

**Spécialisation en hydrogéologie**  
*Master en hydrogéologie*

Travail de fin d'étude

**ETUDE DU COMPORTEMENT DES SUBSTANCES  
PARTICULAIRES ET SOLUBLES DANS LE  
SYSTEME KARSTIQUE DE LA SOURCE DE LA  
NOIRAIGUE**

Aurélien GILLMANN

Février 2007

## Résumé

A l'heure actuelle, 25 % de la population mondiale est alimentée par des sources karstiques. Un des problèmes majeurs de ces sources est leur contamination par des pathogènes.

Pour prévenir l'arrivée de cette contamination, les sources utilisées pour l'approvisionnement en eau potable sont actuellement équipées d'appareils détectant la matière organique et la turbidité ; celles-ci semblent être de bons indicateurs d'arrivées d'eau de la surface du bassin d'alimentation. Or récemment des études ont permis de prouver que la turbidité n'est pas toujours liée à l'augmentation de bactéries. La turbidité autochtone est engendrée par la remobilisation des particules du système karstique alors que la turbidité allochtone est issue du bassin d'alimentation et véhicule les pathogènes (Pronk *et al.* 2006a).

L'étude a porté sur le système karstique constitué de la source de la Noiraigue et de son bassin d'alimentation, la Vallée des Ponts et de la Sagne. Un drainage agricole existe dans la vallée pour y réguler le régime des eaux de surface. Les rivières principales, le Grand Bied et le Petit Bied, drainent ce bassin molassique. Toutes ces eaux s'infiltrent via des pertes ou directement aux affleurements dans le calcaire du Malm ou du Crétacé bordant la vallée. Le calcaire du Malm est le principal aquifère captif de la vallée. La présence de failles sous les versants rend cet aquifère complètement confiné, ayant comme unique exutoire la source de la Noiraigue (Grébillat *et al.* 1987).

Afin de trouver un autre paramètre variant avec l'arrivée de bactéries, un suivi continu du débit, de la température, de la conductivité, de la turbidité et de la matière organique a été réalisé durant 5 mois. Ces mesures automatiques ont été complétées par des échantillonnages manuels afin d'analyser les paramètres non mesurables en continu. Des mesures réalisées pendant des crues ont permis d'obtenir des variations à plus petite échelle. Un compteur de particules, permettant d'obtenir leurs distributions granulométriques, a été utilisé lors de ces crues. L'analyse de bactéries fécales ainsi que le pH ont également été suivis périodiquement.

Un essai de traçage réalisé avec de l'uranine, des bactériophages H40/1 et des microsphères fluorescentes 1µm a permis de mettre en évidence des temps de transit relativement semblables entre les traceurs solubles et particuliers, avec une légère avance pour ces derniers.

Cet essai a été réalisé le 15 septembre 2006 depuis la perte du Voisinage. Les taux de restitution de l'uranine et des bactériophages sont respectivement 48 % et 8 %. La contribution de la perte du Voisinage au débit de la source de la Noiraigue est d'environ un tiers selon des campagnes de jaugeages effectuées par Gogniat (1995). Cette contribution peut varier en fonction des conditions hydriques. Les autres apports sont issus d'autres pertes sur la Vallée des Ponts et de la Sagne ou d'un transfert direct par les affleurements calcaires sur les flancs de la vallée. Le temps de transit entre la perte du Voisinage et la source de la Noiraigue est très variable car le débit de la source fluctue de 0.4 à 12 m<sup>3</sup>/s. Pour l'essai de traçage réalisé à l'occasion de cette étude, le temps de transit est d'environ 83 heures mais de nombreux essais sur cette perte ont révélé des temps allant de 60 à 360 heures.

Les études faites durant les crues ont permis de distinguer la remobilisation des particules sédimentées dans le système karstique de celles venant directement de la zone d'infiltration. De plus, il a été clairement démontré que la turbidité n'était pas un indicateur de la présence de bactéries fécales, mais qu'il fallait la coupler au TOC (total organic carbon) et surtout aux particules afin d'obtenir la certitude d'une contamination bactérienne. La présence de toutes les tailles de particules lors de l'augmentation du débit correspond à la remobilisation des sédiments issus des conduits karstiques (turbidité autochtone). Lorsqu'uniquement les particules de petites tailles sont détectées à la source, la turbidité est allochtone. Elle est liée à la hausse de TOC et aux bactéries fécales, toutes deux indicatrices de l'arrivée d'eau de la vallée. Ces résultats offrent une bonne opportunité pour la recherche future puisqu'ils confirment les observations faites dans le système karstique d'Yverdon-les-Bains (Pronk *et al.* 2006b).

Dans le cadre de cette étude, les traceurs naturels tels que le TOC, la conductivité, la température et les particules ont permis la localisation par zone de leurs origines sur la Vallée des Ponts. Une suite de l'étude est nécessaire pour apporter des détails quant aux origines précises de ces traceurs naturels.

## Remerciements

Je tiens à remercier ici, tout ceux et celles qui m'ont aidé à la bonne réussite de ce diplôme.

En premier temps, j'aimerais adresser un grand merci à Michiel Pronk sans qui ce diplôme aurait été moins enrichissant de part son expérience. Je le remercie de m'avoir pris en charge au sein du projet KARSTDYN afin de contribuer à une partie de son travail de thèse.

Le Dr M. Goldscheider Nico qui m'a donné un coup de main lors de l'essai de traçage et sa bonne humeur toujours au rendez vous.

Le laboratoire de microbiologie qui m'a prêté son équipement ainsi que de m'avoir permis de travailler dans leur laboratoire. Je remercie tout particulièrement le Dr Zopfi Jakob, les étudiant(e)s et professeurs en microbiologie pour leur attention envers les nouveaux.

M. Bourret pour m'avoir gracieusement installé des appareils de mesures sur le terrain.  
Le professeur M. Hunkeler pour m'avoir permis de faire ce travail.

Le Dr M. Schnegg qui a inventé le fluorimètre de terrain dont j'ai pu gracieusement bénéficier.

Je remercie tous mes camarades de ma session 2005-2006 ainsi que leurs aînés.

Je remercie chaleureusement tout ceux et celles que je n'ai pas cité, et qui m'ont aidé dans l'élaboration de ce diplôme.

Je tiens à remercier mes parents et ma sœur de m'avoir fait confiance dans les études post-bac, de m'avoir aidé financièrement et de m'avoir supporté durant ces 22 ans. Je tenais également à encourager mon père pour son rétablissement.

Et pour finir, un énorme merci à toi, ma chérie Perrine, qui depuis plus de 2 ans, arrive à me soutenir et me supporter, même si la distance nous sépare souvent.

Ayons une pensée pour le professeur M. Martin Burkhard qui nous a tragiquement quitté le 23 août 2006.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>7</b>
1.1	PROBLÉMATIQUE.....	7
1.2	OBJECTIFS .....	8
1.3	SITE ÉTUDIÉ.....	9
1.3.1	Contexte géographique .....	9
1.3.2	Contexte géologique.....	10
1.3.3	Contexte hydrogéologique.....	13
1.4	PRÉSENTATION DES PARAMÈTRES .....	15
1.4.1	Paramètres physiques.....	16
1.4.2	Paramètres chimiques.....	17
1.4.3	Analyse d' <i>Escherichia coli</i> .....	18
1.4.4	Essai de traçage.....	18
<b>2</b>	<b>SUIVI DES PARAMÈTRES SUR LE LONG TERME .....</b>	<b>20</b>
2.1	MESURES CONTINUES .....	20
2.1.1	Relation précipitations/débit .....	20
2.1.2	Carbone organique total (TOC).....	22
2.1.3	Conductivité électrique .....	22
2.1.4	Turbidité .....	23
2.1.5	Température.....	23
2.1.6	Exemple à petite échelle .....	24
2.2	MESURES HEBDOMADAIRES .....	25
2.2.1	Granulométrie des particules.....	25
2.2.2	Bactériologie.....	27
2.2.3	Chimie .....	28
2.2.4	pH.....	30
<b>3</b>	<b>MESURES SUR COURTES PÉRIODES .....</b>	<b>31</b>
3.1	CRUE D'OCTOBRE 2006.....	31
3.1.1	Introduction.....	31
3.1.2	Résultats .....	31
3.1.3	Conclusion.....	35
3.2	CRUE DE NOVEMBRE 2006 .....	36
3.2.1	Introduction.....	36
3.2.2	Résultats .....	36
3.2.3	Conclusion.....	39
<b>4</b>	<b>MULTI-TRAÇAGE DU 15 SEPTEMBRE 2006.....</b>	<b>40</b>
4.1	INTRODUCTION.....	40
4.2	RÉSULTATS ET OBSERVATIONS.....	42
4.2.1	Uranine.....	42
4.2.2	Bactériophages .....	44
4.2.3	Microsphères.....	45
4.3	INTERPRÉTATIONS.....	46
4.4	CONCLUSIONS .....	49
<b>5</b>	<b>INTERPRÉTATIONS GÉNÉRALES .....</b>	<b>50</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>58</b>

<b>8</b>	<b>ANNEXES .....</b>	<b>62</b>
<b>A.</b>	<b>MÉTHODOLOGIE .....</b>	<b>62</b>
A.1	PARAMÈTRES PHYSIQUES .....	62
A.1.1	Débit .....	62
A.1.2	Température .....	64
A.1.3	Conductivité électrique .....	65
A.1.4	Turbidité .....	65
A.1.5	Distribution en taille des particules (PSD) .....	66
A.2	PARAMÈTRES CHIMIQUES.....	66
A.2.1	TOC.....	66
A.2.2	Cations et anions.....	67
A.2.3	pH.....	68
A.3	ANALYSE D'ESCHERICHIA COLI .....	68
A.4	ESSAI DE TRAÇAGE .....	69
A.4.1	Uranine .....	69
A.4.2	Bactériophages .....	71
A.4.3	Microsphères.....	71
<b>B.</b>	<b>VALLÉE DES PONTS.....</b>	<b>72</b>
	ANNEXE B.1 : CARTE HYDROGÉOLOGIQUE .....	72
	ANNEXE B.2 : CARTE SYNTHÉTIQUE DES ESSAIS DE TRAÇAGE.....	73
	ANNEXE B.3 : ANALYSE DU TOC.....	74
	ANNEXE B.4 : ANALYSE D'E. COLI .....	74
	ANNEXE B.5 : ANALYSE CHIMIQUE.....	74
	ANNEXE B.6 : DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES .....	75
	ANNEXE B.7 : PH, TEMPÉRATURE, CONDUCTIVITÉ, DÉBIT .....	76
<b>C.</b>	<b>SOURCE DE LA NOIRAIGUE.....</b>	<b>77</b>
	ANNEXE C.1 : LOCALISATION DES DIFFÉRENTES SOURCES À NOIRAIGUE .....	77
	ANNEXE C.2 : RESTITUTION DE L'URANINE .....	78
	ANNEXE C.3 : RESTITUTION DES BACTÉRIOPHAGES.....	79
	ANNEXE C.4 : RESTITUTION DES MICROSPHÈRES .....	79
	ANNEXE C.5 : ANALYSE DU TOC .....	80
	ANNEXE C.6 : ANALYSE D'E. COLI.....	81
	ANNEXE C.7 : ANALYSE CHIMIQUE .....	82
	ANNEXE C.8 : FEUILLE DE CALCUL D'UN JAUGEAGE AU SEL .....	83
	ANNEXE C.9 : PH, TEMPÉRATURE, CONDUCTIVITÉ, DÉBIT .....	84
	ANNEXE C.10 : TEMPS DE TRANSIT DES TRACEURS NATURELS ET ARTIFICIELS .....	85
	ANNEXE C.11 : ÉVOLUTION DU PH ET DE LA CHIMIE PENDANT LA CRUE D'OCTOBRE .....	85
<b>D.</b>	<b>GALERIE PHOTOS .....</b>	<b>86</b>

# 1 INTRODUCTION

Cette étude a été proposée par le Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel (CHYN), dans le cadre du master 2006/2007. Ce travail fait parti du projet KARSTDYN (Fonds National Suisse, n° 200020-105427), dont l'objectif visé est de mieux comprendre la dynamique du carbone organique, des particules en suspension et des communautés microbiennes dans les systèmes karstiques.

Ce diplôme présente les résultats du suivi en continu de différents paramètres mesurés ainsi que de l'échantillonnage manuel effectué durant une période de 5 mois. De plus il propose des explications possibles sur les relations existantes entre ces paramètres.

## 1.1 PROBLÉMATIQUE

La présence des microorganismes pathogènes dans les eaux souterraines constitue un problème majeur de santé publique. Aux Etats-Unis, plus de 50 % des maladies transmises par l'eau sont dues aux aquifères contaminés (Rossi *et al.* 1994). Les sources de ces contaminations sont diverses. Celles-ci peuvent provenir de l'agriculture, de zones urbanisées, de fuites dans les réseaux d'eaux usées, d'accidents chimiques, etc. (Mahler *et al.* 2000).

Les aquifères poreux présentent une bonne capacité filtrante pour la majorité de ces contaminations. De nombreuses équations de transport existent pour ces aquifères (Hauns 1999). Celles-ci ne peuvent pas s'appliquer aux aquifères karstiques du fait de leurs caractéristiques hydrogéologiques uniques au sens qu'elles ont des géomorphologies très hétérogènes avec une dualité des perméabilités (très élevées au sein des conduits développés et faibles dans la matrice environnante) et des zones d'infiltration localisées (Hauns 1999). Ces propriétés leur confèrent une filtration quasi inexistante et un transport très rapide de la surface d'infiltration à l'exutoire, réduisant toute dégradation biologique de possibles contaminants (White 1988). Les aquifères karstiques sont donc beaucoup plus exposés à une contamination bactérienne. A peu près 25 % de la population mondiale est approvisionnée par les eaux issues des karsts (Ford & Williams 1989), ce qui requiert une attention particulière à ce type d'aquifère très vulnérable (Zwahlen 2004).

Lors d'intempéries, la recharge des systèmes karstiques est rapide et suivie d'une accélération des écoulements dans les conduits qui deviennent turbulents et qui auront une capacité de transport de sédiments importante (Atteia *et al.* 1996). Ces particules en suspension se manifestent à la source par la turbidité de l'eau. La turbidité est un signal complexe qui contient une part de remise en suspension des particules sédimentées dans les conduits (turbidité autochtone) et une part de transfert direct des particules, de la surface d'infiltration à l'exutoire (turbidité allochtone) (Massei 2001 ; Pronk *et al.* 2006a). La sédimentation dans le karst résulte d'une baisse des vitesses d'écoulements : ce phénomène apparaît souvent lorsque le débit décroît et lorsque l'eau arrive d'un conduit étroit à une zone plus large (Massei *et al.* 2003). Or la turbidité est un facteur de dégradation et de contamination des eaux potables (Sinreich 2006). En effet, les particules en suspension jouent un rôle important dans la contamination des aquifères karstiques du fait de la capacité des contaminants (bactéries, virus, contaminants chimiques, etc...) à se fixer ou à s'adsorber sur ces particules. De nombreuses études ont démontré une persistance des plus importantes des microorganismes lorsqu'ils sont associés aux particules (Palmateer *et al.* 1993 ; Pommepuy *et al.* 1992). Une étude récente a montré que les eaux d'infiltration, marquées par la venue brutale de turbidité allochtone et de matière organique, sont

associées à la présence de bactéries fécales (*E. coli*) annonciatrices d'une possible contamination pathogénique (Pronk *et al.* 2006a). Cette observation a amené une nouvelle méthode pour différencier les deux types de turbidités. Il s'agit d'établir une distribution en taille des particules. La turbidité autochtone semblerait remobiliser toutes les tailles de particules alors que la turbidité allochtone mobiliserait uniquement les particules de petites tailles (Pronk *et al.* 2006b). Les particules pouvant être vecteurs potentiels des contaminations bactériennes, il est essentiel d'approfondir la compréhension du transport des particules dans les aquifères karstiques.

Le transport des phases solubles dans ces aquifères est relativement bien cerné par la méthode d'analyse chimique, qui constitue depuis un certain temps un puissant outil pour repérer des eaux d'origine différente. Le suivi de la fluorescence naturelle de l'eau quantifie la matière organique et peut aussi être utilisé comme marqueur des eaux d'infiltration (Blondel *et al.* 2006 ; Emblanch 1997 ; Batiot 2002). En effet, la matière organique a une infime concentration dans les calcaires, par contre elle y est très présente dans les quelques centimètres à mètres qui constituent le sol (Thurman 1985).

L'état actuel des connaissances nous enseigne que seule la matière organique et la turbidité sont mesurées pour anticiper l'arrivée de pathogènes (Pronk *et al.* 2006a, b). Il a été démontré qu'à partir d'un certain seuil de TOC ou de turbidité, le chlore injecté dans l'eau n'a plus d'effet contre les pathogènes (Riboni & Robert 2001). C'est dans cette optique que les travaux modernes se sont tournés, à savoir la recherche d'un paramètre mesurable aux sources permettant d'anticiper l'arrivée de pathogènes.

## 1.2 OBJECTIFS

Divers objectifs ont été fixés pour ce travail de master. Il s'agit principalement d'étudier tous les paramètres naturels susceptibles de pouvoir prévenir une contamination bactérienne. Le site de la source de la Noiraigue a été choisi en raison du grand nombre de littérature existant et de la bonne connaissance du fonctionnement général du système karstique.

Afin de pouvoir réaliser l'objectif principal, il faut passer par la compréhension du système karstique. Pour ce faire, il est indispensable d'y étudier le comportement des paramètres naturels. Etudier ces paramètres à long terme puis à court terme lors d'évènements météorologiques est l'un des objectifs annexes. Il sera question d'analyser la dynamique des paramètres naturels tels que la matière organique, les bactéries fécales et les particules en suspension afin de comprendre leurs possibles interactions.

L'injection de traceurs artificiels particulaires et solubles est également requise pour simuler la migration d'une contamination bactérienne ou chimique. De plus, cet essai de traçage apportera des données supplémentaires pour la compréhension globale du système.

Toutes ces données permettront de comparer le comportement des traceurs particulaires et solubles, qu'ils soient artificiels ou naturels, dans un système karstique profond. La localisation des sources des traceurs naturels pourra ainsi être déduite des diverses données obtenues. Ce travail suit l'optique des observations faites sur le site d'Yverdon-les-Bains (Pronk *et al.* 2006a, b). Il s'agira donc de pouvoir conforter ou réfuter les observations dans le système karstique de Noiraigue.

## 1.3 SITE ÉTUDIÉ

### 1.3.1 Contexte géographique

Le lieu d'expérimentation principal se situe à une vingtaine de kilomètres à l'ouest de Neuchâtel (**Figure 1**). Le village de Noiraigue se situe à 733 m d'altitude au pied d'une importante falaise. Etymologiquement, Noiraigue, qui signifie « eau noire », provient de la couleur de sa source (coord. géo. : 545'688/200'964) lors d'événements pluviométriques importants.

Son bassin d'alimentation se situe au nord de Noiraigue, à 1065 m d'altitude. Cette vallée porte le nom de « la Vallée des Ponts et de la Sagne ». La Sagne, du Celtique « Sagna » qui se traduit par « Terres Marécageuses », renseigne sur l'état originel de cette vallée, qui était parsemée de ponts afin de traverser les tourbières, avant la mise en place d'un réseau de drainage. Elle était connue pour être le plus vaste ensemble de tourbières de Suisse. Longtemps exploitée pour le chauffage domestique jusqu'au début des années 90, il ne reste aujourd'hui plus que 10 % de la superficie originelle (Mondi 1999).

Cette vallée, longue de 20 km environ et large de 3,5 km en moyenne, est orientée NE-SW. Sa superficie est de 68 km<sup>2</sup>, principalement recouverte de prairies et de forêts et le restant de tourbières. Elle est drainée par un réseau de rivières, que l'on nomme localement « Bied ». Au NE, le « Grand Bied » et au SW, le « Petit Bied » drainent la majeure partie de la vallée. Ces 2 bieds se rejoignent au Sud de la ville des Ponts-de-Martel pour former le « Bied du voisinage ». Il est ensuite absorbé par l'emposieu principal de la vallée, « le Voisinage » (coord. géo. : 545'725/204'900). Il existe quelques pertes secondaires, situées surtout sur les flancs de la vallée.

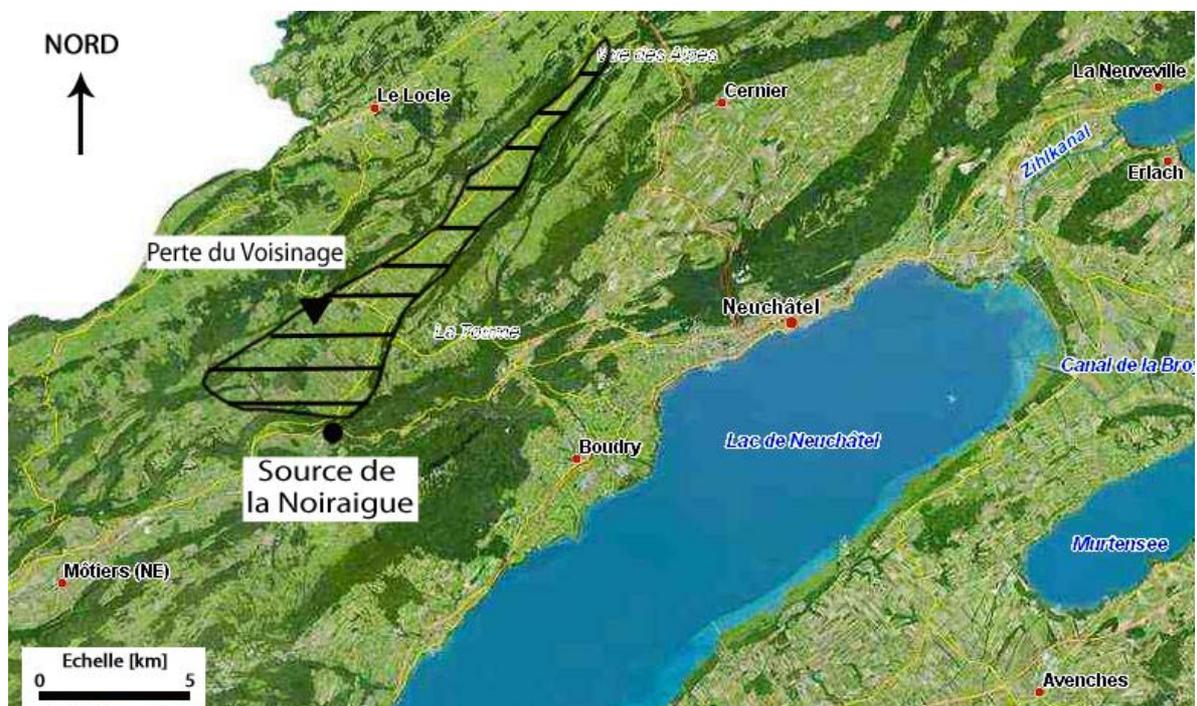


Figure 1 : Situation géographique de la Vallée des Ponts et de la Sagne, de sa perte principale « la perte du Voisinage » (triangle) et de la source de la Noiraigue (rond) (<http://www.map.search.ch>).

### 1.3.2 Contexte géologique

La chaîne du Jura s'est formée il y a environ 12 millions d'années. Avant son orogénèse, un bassin sédimentaire composé principalement de calcaires et de marnes, s'étendait à sa place. La compression alpine est à l'origine du plissement de ce bassin sédimentaire qui a donné naissance à la chaîne jurassienne.

Les principaux horizons géologiques rencontrés dans la Vallée des Ponts, sont le Malm, le Crétacé et la molasse tertiaire (**Figure 2**).

Le Malm (Jurassique supérieur), regroupe les roches d'âge Argovien à Portlandien, d'une épaisseur totale d'environ 600 m. Une alternance marno-calcaires de l'Argovien compose le Malm inférieur avec environ 200 m d'épaisseur. Le Malm supérieur se distingue par les calcaires oolithiques du Séquanien, les calcaires purs et massifs du Kimméridgien et du Portlandien (Sommaruga 1997 ; Valley 2002).

Le Crétacé, âgé du Purbéckien au Cénomaniens, est constitué de calcaires oolithiques du Valanginien, d'une alternance de marnes bleues et de calcaires de l'Hautérvien, et des calcaires oolithiques du Barrémien, pour une épaisseur totale d'environ 200 m (Sommaruga 1997 ; Valley 2002).

La molasse tertiaire provient de dépôts fluvio-lacustres détritiques (débris de roches issues de l'érosion alpine). Elle surmonte les calcaires du Crétacé avec une épaisseur variant de 4 km au sud du Jura à quelques centaines de mètres vers le nord du Jura (Sommaruga 1997 ; Valley 2002).

La Vallée des Ponts et de la Sagne s'est formée dans un synclinal, situé entre la deuxième et la troisième chaîne du Jura plissé. Lors de la dernière glaciation, les glaciers y ont laissé des dépôts morainiques argilo-limoneux à cailloux calcaires. Son remaniement par ruissellement post-glaciaire a donné lieu au dépôt d'argile imperméable à l'origine des tourbières (Valley 2002).

La vallée est délimitée par deux anticlinaux de part en part. Au SE, l'anticlinal d'orientation N40 culminant à 1439 m au Mont Racine et au NW, l'anticlinal du Grand Som-Martel à 1337 m d'orientation N60. Elle est limitée au Sud par l'anticlinal du Solmon culminant à 1288 m (Tablettes).

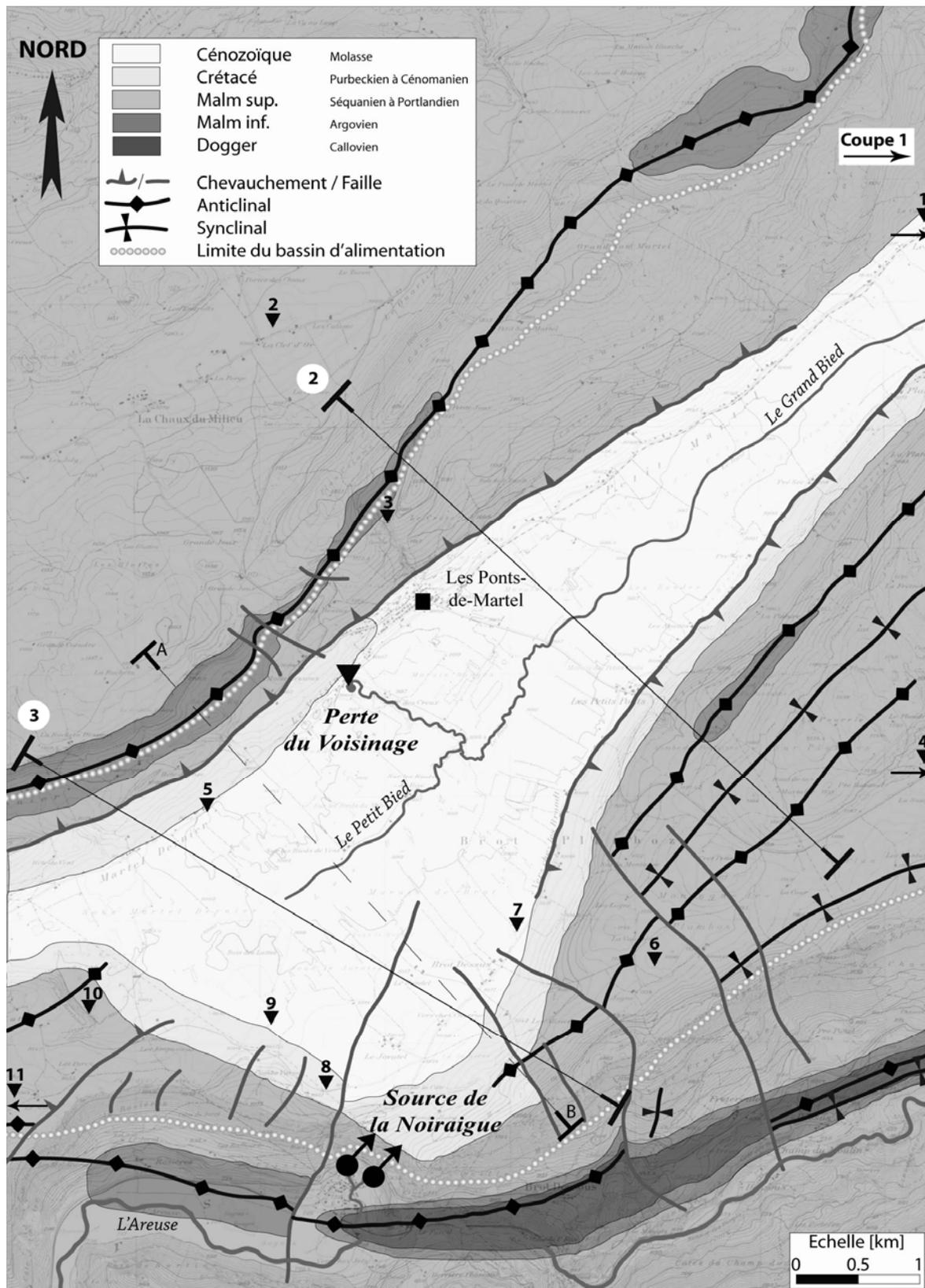
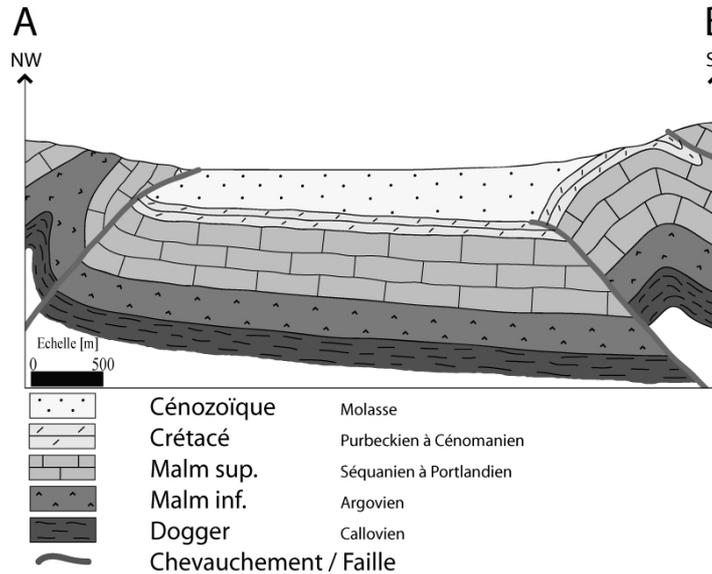


Figure 2 : Carte géologique simplifiée de la Vallée des Ponts et de la Sagne, d'après la carte géologique du Val de Travers 1 : 25'000 (Burkhard *et al.* 2000) et celle de B. Valley (2002). Y figurent la source de la Noiraigue et les pertes testées lors d'essais de traçage antérieurs : la perte principale « perte du Voisinage », les pertes secondaires numérotées (1 : Coeudres, 2 : Chaux-du-Milieu, 3 : Combe de Sagnettes, 4 : Tourne, 5 : Martel Dernier, 6 : Thomasset, 7 : Brot-Dessus, 8 : Naturalistes, 9 : Combe Varin, 10 : Roche Berthoud, 11 : Rotel).

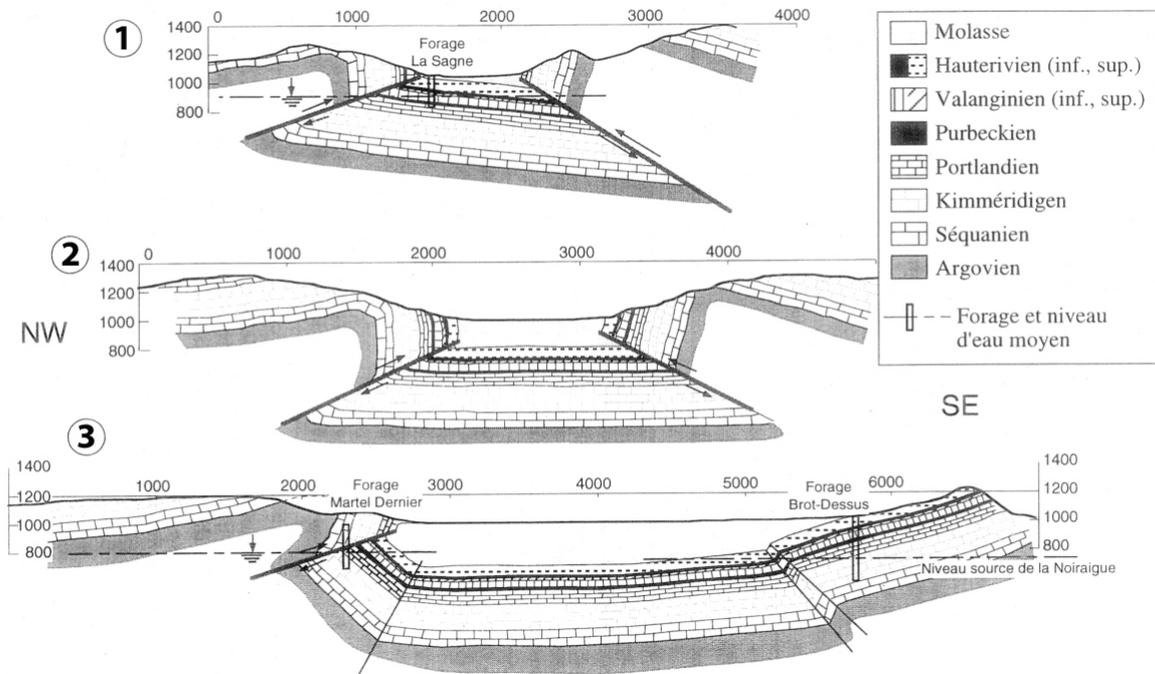
Entre 1964 et 1970, une campagne de forages a établi que le synclinal de la Vallée des Ponts et de la Sagne est constitué de 60 à 130 m de calcaires et de marnes du Crétacé, de 320 à 380 m de calcaires du Malm supérieur et 200 m de marnes du Malm inférieur (Argovien) (Bouyer & Kubler 1981 ; Grétilat 1986).

La **Figure 3** représente la coupe géologique schématique perpendiculaire à l'axe de la vallée.



**Figure 3 :** Coupe géologique schématique transversale à la vallée des Ponts. L'axe A-B est indiqué sur la Figure 2 (modifiée d'après la coupe géologique de Gogniat (1995)).

D'autres coupes plus anciennes existent dans la littérature. En voici trois des plus actuelles (**Figure 4**).



**Figure 4 :** Coupes géologiques perpendiculaires à l'axe de la Vallée des Ponts et de la Sagne avec localisation des forages profonds et des niveaux de base dans ces forages. La trace des coupes 1, 2 et 3 est indiquée sur la Figure 2 (Atteia *et al.* 1996).

### 1.3.3 Contexte hydrogéologique

Le bassin de la Noiraigue est constitué de trois nappes aquifères comprises dans le synclinal de la Vallée des Ponts et de la Sagne et correspondant aux trois formations calcaires du Mésozoïque. Il s'agit de la nappe du Dogger, du Malm et du Crétacé (Király 1970). La fracturation des roches a engendré, dans chacune de ces nappes, des réseaux karstiques bien développés.

La nappe du Malm est le plus important aquifère du bassin. D'une part, le Malm est alimenté directement par affleurement des calcaires (61 % de la superficie du bassin d'alimentation). D'autre part, il recueille les eaux des étages supérieurs (Crétacé et quaternaire avec respectivement 4 % et 31 % de la superficie totale) (Morel 1976).

La nappe du Dogger n'affleure que très rarement et possède un réseau karstique faiblement développé. Cette nappe n'a pas d'exutoire dans la zone étudiée (Morel 1976).

La nappe du Crétacé affleure sur les versants de la Vallée des Ponts et de la Sagne. Les quantités d'eau de l'aquifère du Crétacé sont environ dix fois plus faibles que celles de l'aquifère du Malm (Morel 1976).

L'aquifère karstique principal de la source de la Noiraigue est donc l'aquifère du Malm. La base du Malm supérieur est limitée par les marnes de l'Argovien (Malm inférieur). En effet, la source pérenne de la Noiraigue jaillit des calcaires du Séquanien (Malm supérieur) à 3925 m de la perte du Voisinage. Cette perte alimente l'aquifère karstique du Crétacé avant d'être transférée dans le Malm supérieur. D'autres pertes secondaires participent au drainage du bassin (**Figure 2**). Celles-ci se situent sur les flancs de la vallée au contact direct des calcaires du Crétacé. Schématiquement, un tiers de l'eau de la source de la Noiraigue provient de l'eau s'écoulant sur la formation tertiaire du fond de la vallée et recouverte de sols tourbeux et deux tiers proviennent du Malm (Mondi 1999).

L'orientation des anticlinaux dessine un triangle dans lequel l'aquifère du Malm prend place. Sa seule échappatoire est la zone faillée du Sud à Noiraigue.

La limite hydrogéologique NE du bassin est probablement liée au décrochement sénestre de la Ferrière-Vue des Alpes. Par contre au SE, l'anticlinal du Solmon qui correspond à la limite topographique du bassin est sujet à un changement important de l'orientation de son axe de N40 à N110 dans la région du village de Noiraigue. Des mesures géophysiques ont révélé la présence d'une zone faillée quasi à la verticale de la source (Grétilat *et al.* 1987). Cette zone de fractures est sans doute à l'origine de la source.

Les limites du bassin d'alimentation sont représentées sur la **Figure 2**. La superficie totale du bassin d'alimentation de la source de la Noiraigue est d'environ 68 km<sup>2</sup>.

La source de la Noiraigue, affluent de l'Areuse, n'est pas l'unique exutoire mais il demeure le plus important. A proximité, deux autres sources non pérennes de faibles débits sont localisées : la source des Epinettes et la source de la Libarde (**Annexe C.1**).

La **Figure 5** illustre les différents aquifères alimentant la source de l'Areuse, géologiquement semblable à la source de la Noiraigue.

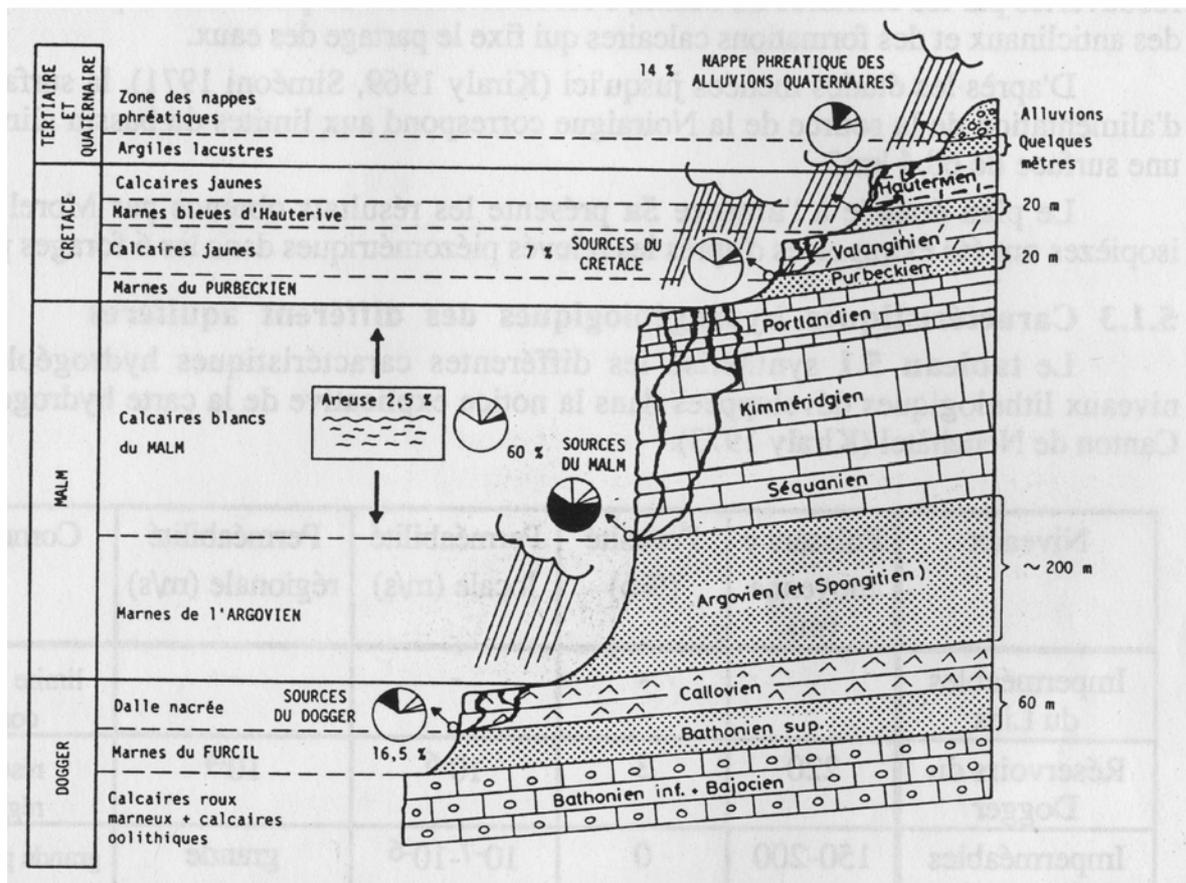


Figure 5 : Coupe stratigraphique de la source de l'Areuse (assimilable à la source de la Noiraigue) avec les apports des différents aquifères (Les Gorges de l'Areuse 1986).

#### Régime hydrologique de la source et du Bied :

Le régime de la source de la Noiraigue est nival, c'est-à-dire ayant son maximum lors de la fonte des neiges (mars-avril). Le débit minimum de basses eaux est de  $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$ , celui de moyennes eaux est de  $2.02 \text{ m}^3/\text{s}$  et en hautes eaux il parvient au-delà de  $14 \text{ m}^3/\text{s}$  (Müller 1982 ; Kiraly 1973). Le débit est lié à la mise en pression du système par la différence de charge exercée entre la source et le niveau piézométrique dans la Vallée des Ponts. Le niveau de la nappe, mesuré dans les forages, est supérieur à 800 m dans le Malm, avec des variations de quelques dizaines de mètres (Figure 4) (Kiraly 1973).

Le régime hydrique du Bied est étroitement lié à la quantité de précipitations. Le réseau de drainage agricole permet une évacuation rapide des eaux vers les pertes lors de fortes précipitations. En période d'étiage, le débit résiduel très faible provient des zones de tourbières à forte capacité de stockage et aux conductivités hydrauliques très basses. D'après Atteia *et al.* (1996), le débit de base du Bied à la hauteur de la perte du Voisinage a été estimé à  $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ , à  $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$  pour le débit moyen et  $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$  pour le débit maximal annuel. Le débit peut parfois atteindre les  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  (Gogniat 1995). Ces valeurs étant le mélange du Petit Bied et du Grand Bied (le débit du Petit Bied étant négligeable devant le débit du Grand Bied).

### *Paramètres physiques et chimiques de la source et du Bied :*

Le Bied de la Vallée des Ponts étant étroitement lié à la source de la Noiraigue, une variation d'un des paramètres tels que la conductivité, la température et la chimie se répercute à la source quelques heures après.

Les valeurs extrêmes de température du Bied peuvent passer de 17°C en été à des températures aux alentours de 0°C en hiver. Une très faible variation de température est à noter entre le Petit Bied et le Grand Bied du fait de leur différence de longueur. Par contre, une différence notable concerne leurs minéralisations. Le Petit Bied, provenant des tourbières de la forêt des Lattes, a une conductivité de l'ordre des 200 µS/cm en période d'étiage, tandis que le Grand Bied draine toute la partie Nord-Est de la vallée et se charge minéralogiquement pour atteindre environ 500 µS/cm en étiage. Donc la perte du Voisinage obtient un mélange des deux eaux avec une dominance du Grand Bied. Au niveau chimique, les eaux du Bied sont du type Ca HCO<sub>3</sub> (300 mg/l HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 130 mg/l Ca<sup>+</sup>) et faiblement polluées par les sulfates, nitrates, chlorures (Mondi 1999).

La source de la Noiraigue varie en fonction des conditions météorologiques de la Vallée des Ponts. D'après Mondy (1999), la température de la source en été avoisine les 10°C en basses eaux mais lors d'intenses événements pluvieux, elle peut dépasser les 12°C. En décembre, la température moyenne est de 8°C en étiage et 5°C en crue (Mondi 1999). Sa minéralisation varie de 380 à 500 µS/cm. La source possède un chimisme typique des eaux karstiques (Miserez 1973). La teneur en calcium et bicarbonate est constante (respectivement 100 mg/l et 280 mg/l). Il y a peu de variations et de faibles concentrations pour les autres éléments chimiques.

## **1.4 PRÉSENTATION DES PARAMÈTRES**

Durant les 5 mois de l'étude, une multitude d'appareils a été utilisée aux deux points d'observation du site d'étude : la Vallée des Ponts et la source de la Noiraigue. La source de la Noiraigue a fait notamment l'objet d'un suivi en continu des paramètres physiques (température, conductivité, turbidité, débit) et d'un paramètre chimique (la matière organique). Des mesures manuelles hebdomadaires ont également été effectuées pour déterminer la composition chimique et microbiologique sur le long terme. Des mesures manuelles journalières ont été organisées pour l'étude à plus petite échelle de deux événements pluvieux. A la Vallée des Ponts, le suivi continu n'a pas pu être maintenu du fait de la trop grosse quantité de matière en suspension encrassant l'appareillage. Des mesures manuelles hebdomadaires ont donc été initiées sur le Grand Bied, le Petit Bied et la perte du Voisinage.

La méthodologie se trouve en **Annexe A** de ce présent manuscrit.

### 1.4.1 Paramètres physiques

#### *Précipitations :*

La pluviométrie est le paramètre primaire pour tout hydrogéologue. Les données pluviométriques journalières de la station des Ponts-de-Martel n° 1289 (coord. géo. : 545'880/205'400) ont été mises à disposition. Elles ont été gracieusement fournies par Météo Suisse pour la période du 1<sup>er</sup> novembre 2005 au 31 décembre 2006 (**Annexe B.6**).

#### *Débit :*

Le débit est un paramètre de base de toute étude hydrogéologique et notamment très important pour les études des systèmes karstiques. En effet, les fracturations et conduits dans le karst induisent des vitesses d'écoulement très élevées et une grande variation des débits aux sources.

#### *Température :*

La température peut être utilisée comme traceur naturel, donner des informations sur l'origine de l'eau, des mélanges éventuels, la profondeur d'écoulement, et le temps de transit. Elle joue un rôle important dans la solubilité des sels et des gaz. Les valeurs des différents paramètres mesurés sont dépendantes de la température au moment de la prise des échantillons, température qui non seulement change au cours de la journée, mais également lors d'évènements météorologiques.

#### *Conductivité électrique :*

La conductivité électrique d'une eau indique la teneur en ions dissouts dans l'eau, c'est-à-dire la minéralisation totale de l'eau. Plus il y a d'ions dissouts, plus la conductivité est élevée et inversement.

De plus, comme la minéralisation augmente avec le temps de résidence, la conductivité permet, en théorie, de différencier les âges ainsi que la qualité des eaux. La conductivité est un bon indicateur de différentes arrivées d'eau.

#### *Turbidité :*

La turbidité est un paramètre important pour la qualité de l'eau. Elle correspond à la réduction de la transparence de l'eau due à la présence de particules en suspension. Dans beaucoup d'eaux naturelles, la turbidité est également due à des particules en solution (hydroxyde de fer en particulier) (Mondi 1999). En général, dans un système karstique, l'eau est turbide après de fortes précipitations. En effet, l'eau se charge de particules qui troublent l'eau. Les matériaux mêlés à l'eau sont de natures très diverses : origines

minérales (argiles, limons, sables, ...), microparticules ou microorganismes, d'où l'intérêt de le mesurer dans cette étude.

La turbidité joue un rôle important dans la désinfection de l'eau : les traitements par ultraviolets perdent de leur efficacité en cas de turbidité trop élevée car les particules stoppent les UV, nécessitant d'avoir recours à des moyens plus lourds tels que la microfiltration par exemple (Riboni & Robert 2001). On considère qu'une eau potable doit avoir une valeur NTU (Nephelometric Turbidity Units) inférieure à 1.

#### *Distribution en taille des particules (PSD) :*

Un compteur de particules de la société Markus Klotz (Abakus mobil fluid) a permis de déterminer le nombre de particules présentes dans l'eau ainsi que leur distribution en taille (PSD : Particle Size Distribution).

L'enjeu principal a été de mesurer la distribution en taille des particules en suspension dans l'eau lors d'évènements pluvieux.

#### 1.4.2 Paramètres chimiques

##### *Matière organique totale (TOC) :*

En l'absence de filtration, le carbone organique mesuré est qualifié de total car les particules en suspension sont également comptabilisées. En effet, le TOC (Total Organic Carbon) comptabilise le carbone organique dissout (DOC : Dissolve Organic Carbon) ainsi que le carbone organique particulaire (POC : Particle Organic Carbon).

L'intérêt de suivre l'évolution de la teneur en matière organique de la source réside dans le fait qu'une augmentation de ce paramètre correspond à l'arrivée d'eau allochtone chargée en microorganismes (Pronk *et al.* 2006a). C'est un paramètre pouvant être qualifié de traceur naturel puisqu'il est souvent utilisé pour calculer le temps de transit dans des systèmes karstiques.

##### *Cations et anions :*

L'analyse des éléments chimiques contenus dans l'eau permet de caractériser son origine et son temps de transit. C'est pourquoi il est souvent intéressant de suivre l'évolution des concentrations des anions et cations à la perte ainsi qu'à la source.

##### *pH :*

Une variation de pH a une influence certaine sur les réactions chimiques et bactériologiques ayant lieu dans l'eau échantillonnée. Il a été ainsi constructif de le mesurer à la source et à la perte du Voisinage.

### 1.4.3 Analyse d'*Escherichia coli*

Les bactéries sont des organismes vivants unicellulaires procaryotes, c'est-à-dire une absence de noyau et de structures spécialisées contenues dans le cytoplasme des eucaryotes. Leurs tailles varient de 0.5 à 20  $\mu\text{m}$ .

L'analyse du nombre de bactéries (coliformes fécaux thermorésistants) de l'eau donne des informations sur son éventuelle contamination par des agents pathogènes et donc sur sa potabilité. La présence de bactéries peut renseigner sur la source de contamination de l'eau et donc servir de traceur si l'aquifère n'a pas une capacité filtrante suffisamment élevée.

### 1.4.4 Essai de traçage

Pour le traçage réalisé en septembre 2006, il a été intéressant d'utiliser des traceurs ayant des propriétés de transport semblables aux contaminations possibles des karsts. Les traceurs utilisés ont été l'uranine, les bactériophages et les microsphères pour étudier le transport respectif des contaminants solubles et particulaires (virus, bactéries).

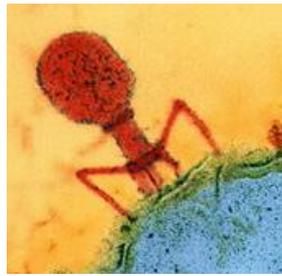
#### *Uranine :*

L'uranine est le traceur le plus utilisé en hydrogéologie et le plus adéquat (il est qualifié de traceur idéal), en raison de sa très grande sensibilité de détection, de sa faible tendance à l'absorption, de sa non toxicité, et de son bas prix. Par contre, il est sensible à la lumière mais cette dégradation ne joue un rôle que lorsque le prélèvement a eu lieu et pour la conservation de l'échantillon jusqu'à l'analyse.

#### *Bactériophages :*

Les bactériophages semblent être une famille de traceurs relativement faciles à utiliser. Ils sont fort utiles dans des zones où toute pollution visuelle doit être évitée.

Les bactériophages ou phages sont des virus spécifiques des bactéries. Ce ne sont pas des organismes vivants mais plutôt des groupes de gènes dont la réplique nécessite l'appareillage à une cellule vivante (**Figure A.8**). Chaque variété de phage est spécialisée pour reconnaître une ou un groupe de bactéries. Leur taille varie de 24 à 200 nm. Il contient une capsidie protégeant leur matériel génétique et leur permettant de résister dans un milieu extracellulaire. Il est ainsi utilisé comme traceur en hydrogéologie grâce à cette capacité à survivre dans les milieux extrêmes.



**Figure A.8 : Photographie au microscope optique d'un bactériophage T4 (<http://fr.wikipedia.org>)**

Pour l'essai de traçage, les bactériophages H40/1 qui sont spécifiques au milieu marin ont été utilisés. Ils n'ont ainsi aucune action possible sur les bactéries présentes dans le système karstique et ne sont pas toxiques pour l'homme ou l'environnement.

#### *Microsphères :*

Ce sont des particules sphériques microscopiques de matière synthétique enduites de couleur fluorescente. Les microsphères utilisées, à base de polystyrène et de latex, ont une taille de 1  $\mu\text{m}$  (référence : Fluoresbrite® Polychromatic Red Microspheres 1  $\mu\text{m}$ , Polysciences, Inc.). Le diamètre a été choisi pour correspondre au mieux à la taille des bactéries.

## 2 SUIVI DES PARAMÈTRES SUR LE LONG TERME

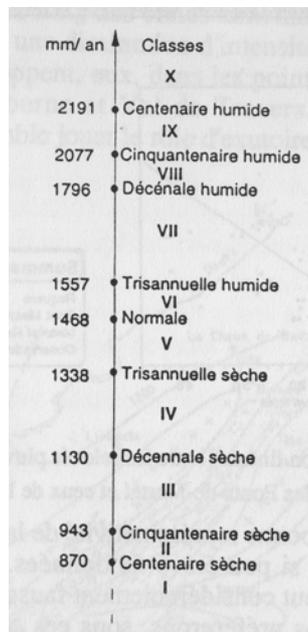
La période de mesures de 5 mois (août à décembre 2006) a permis de recueillir une multitude de données. Ces données ont été récoltées sur les deux sites d'études présentés dans l'introduction, à savoir la source de la Noiraigue et la perte du Voisinage.

### 2.1 MESURES CONTINUES

#### 2.1.1 Relation précipitations/débit

Le Service Météorologique Suisse a fourni les données pluviométriques de la station des Ponts-de-Martel (n°1289), à proximité de la perte du Voisinage.

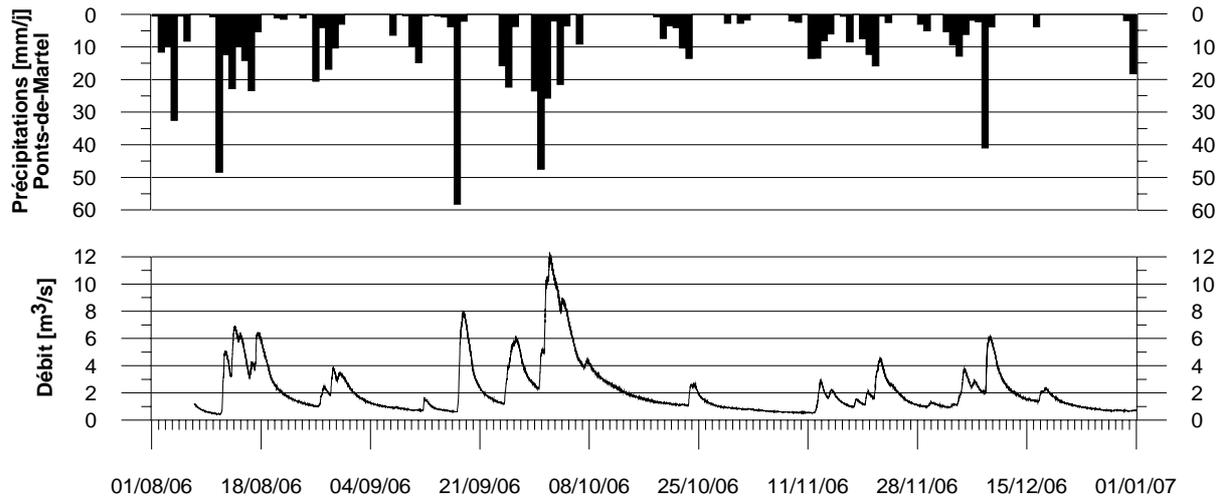
Morel (1976) a établi un classement pour identifier dans quel type d'année hydrologique l'étude s'est déroulée (**Figure 6**). Il a étudié le classement statistique des pluies annuelles de 74 années (de 1901 à 1974). Ce classement indique la période de retour d'une année hydrologique connue en mm/an. L'année hydrologique commence le 1<sup>er</sup> novembre afin de prendre en compte la totalité des périodes estivale et hivernale.



**Figure 6 : Classes de régimes pluviométriques annuels pour la Vallée des Ponts et de la Sagne (Morel 1976).**

L'année hydrologique, durant laquelle a été effectuée l'étude, est qualifiée de décennale humide. En effet, il est tombé 1777 mm de précipitations du 1 novembre 2005 au 31 octobre 2006. Bien entendu cette échelle devrait être remise à jour avec l'actuel changement climatique observé.

L'une des particularités de la Vallée des Ponts et de la Sagne est la présence de tourbières. Ces tourbières sont composées de deux horizons différents (Ischer 1935). Un horizon actif très poreux (acrotelm) permet l'évacuation rapide de l'eau superficielle. L'autre horizon (catotelm) est peu poreux et permet une autorégulation du niveau des biefs. Ce fonctionnement explique la réaction rapide du débit du bief lors des précipitations et le niveau permanent et très bas en étiage. Les quelques mesures de débit effectuées sur le Grand Bief durant l'étude indiquent des valeurs allant de  $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$  à  $0.95 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le Petit Bief contribue faiblement au débit à la perte du Voisinage puisqu'il draine une petite surface. La perte du Voisinage devient « un lac » suivant la durée de la précipitation. Le drainage installé dans la vallée en est responsable. De plus, les précipitations sur la Vallée des Ponts sont directement liées au débit de la source de la Noiraigue comme le montre la **Figure 7**.

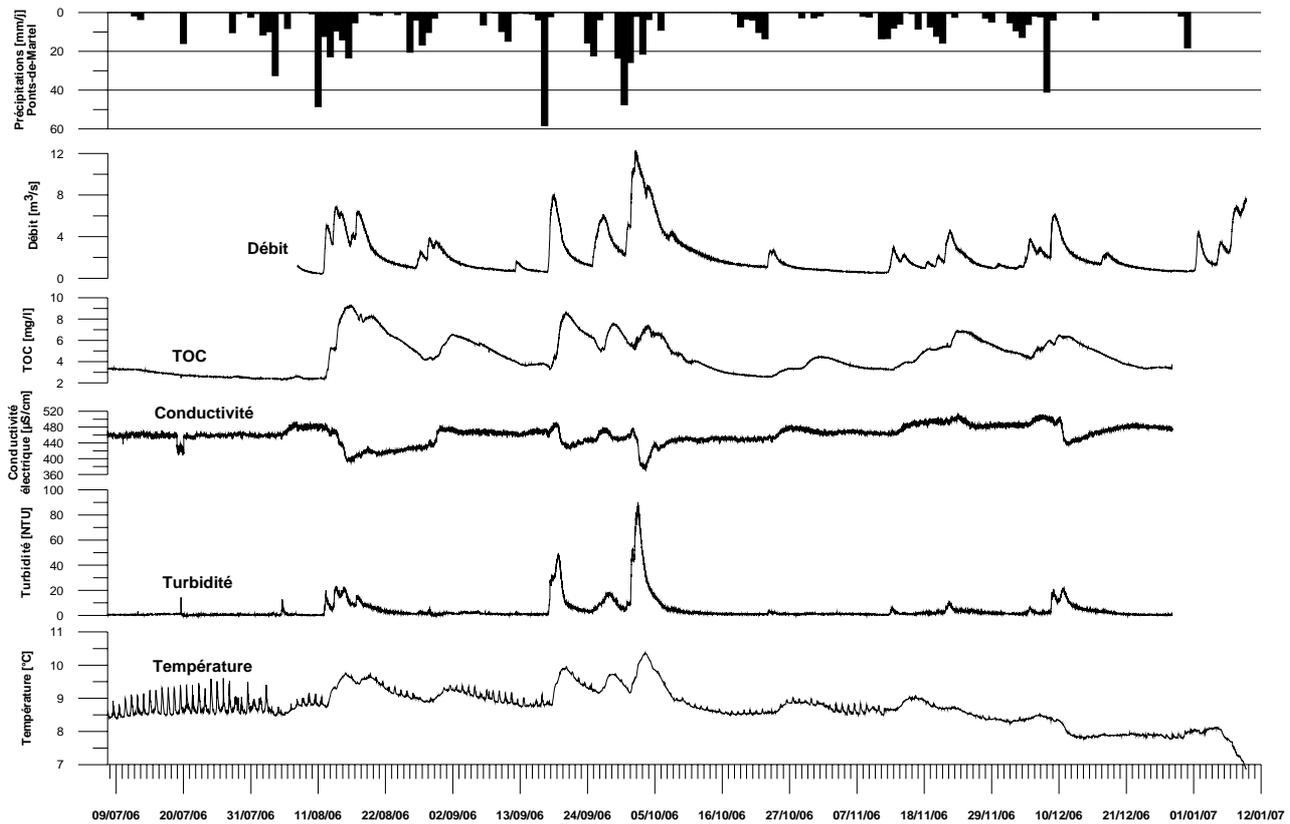


**Figure 7 : Réaction du débit de la source de la Noiraigue aux précipitations mesurées à la station des Ponts-de-Martel.**

Le débit à la source de la Noiraigue montre un temps de réaction très rapide, de l'ordre de 10-12 heures pour des précipitations dépassant les 10 mm. Si les précipitations ne dépassent pas les 10 mm, il n'y aura augmentation du débit uniquement si l'aquifère est déjà saturé. Le Grand Bief ainsi que son exutoire la source de la Noiraigue réagissent donc très rapidement aux précipitations.

Pendant la période d'observation de 5 mois, le débit minimum enregistré à la source de la Noiraigue est de  $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$  en août et son débit maximum est de  $12.3 \text{ m}^3/\text{s}$  en octobre 2006. De nombreuses hausses de débit ont été enregistrées principalement fin août jusque mi-octobre. La moyenne du débit sur la période est de  $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Tous les paramètres mesurés en continu à la source figurent dans le graphe suivant (**Figure 8**).



**Figure 8 : Evolution temporelle du débit, du TOC, de la conductivité électrique, de la turbidité et de la température à la source de la Noiraigue.**

### 2.1.2 Carbone organique total (TOC)

Le minima de la matière organique est d'environ 2.5 mg/l mesuré le 5 août 2006. En fin de période estivale, la Vallée des Ponts a été lessivée par un évènement orageux violent qui a mobilisé plus de 9 mg/l de TOC à la source.

Le TOC mesuré sur quelques pertes de la Vallée des Ponts (Annexe B.3) est très supérieur à ce maximum de la source. En effet, la valeur d'environ 20 mg/l de matière organique a été enregistrée à la perte du Voisinage pendant l'orage d'août 2006. Il y a donc un effet de dilution notable pour expliquer la valeur obtenue à la source. Le minimum relevé à la perte du voisinage est d'environ 10 mg/l en novembre 2006. Les pertes de Roche Berthoud et des Naturalistes, qui n'ont été échantillonnées qu'à quelques reprises, ont enregistré un écart constant de près de 4 mg/l avec la perte.

### 2.1.3 Conductivité électrique

La conductivité électrique a été assez variable durant la période d'étude. Elle a varié de 372 à 514  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à la source. La valeur de la conductivité à l'étiage est aux alentours de 460  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Une légère hausse de la conductivité s'initie à l'instant où le débit commence à augmenter. Par contre, la conductivité chute tout de suite après si le débit augmente toujours. Ces variations semblent correspondre à une remobilisation des eaux plus minéralisées en début de crue puis à une dilution par l'eau issue des précipitations de la Vallée des Ponts.

Les données hebdomadaires enregistrées à la Vallée des Ponts sont nettement plus variables d'une perte à l'autre. En effet, les mesures minimales et maximales pour le Petit Bied sont de 391 et 455  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , de 330 à 604  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour le Grand Bied et pour la perte du Voisinage, de 379 et 607  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En période de crues, ces conductivités sont très basses puisque la dilution de l'eau entre en jeu. La perte de Roche Berthoud semble être moins minéralisée d'environ 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  d'après les mesures. Par contre la perte des Naturalistes est plus minéralisée que la perte du Voisinage. Pour ces deux dernières pertes, le peu de données ne permet pas de tirer des conclusions sur le long terme.

#### 2.1.4 Turbidité

La turbidité à la source a une moyenne de 4 NTU. Elle est très peu de fois inférieure à 1 NTU. La valeur maximale enregistrée durant l'étude a été de 90 NTU le 2 octobre 2006, à l'occasion de la plus longue période de précipitations. Il semblerait que la turbidité apparaisse dès le début de l'augmentation du débit. Il est également remarquable que la turbidité arrive en plusieurs pics successifs comme le montre la courbe au 10 décembre 2006 (**Figure 8**).

La turbidité a été mesurée pendant le mois d'août et septembre dans le Grand Bied. Son seuil de base est plus élevé qu'à la source (6 NTU). Ses valeurs maximales pour cette période sont aux alentours de 30 NTU. Ces quelques mesures ont permis de s'assurer que la perte du Voisinage jouait un rôle important dans l'apport de particules à la source.

La turbidité sera étudiée plus en détails dans la suite de ce mémoire à l'occasion de nombreux exemples à plus petite échelle temporelle.

#### 2.1.5 Température

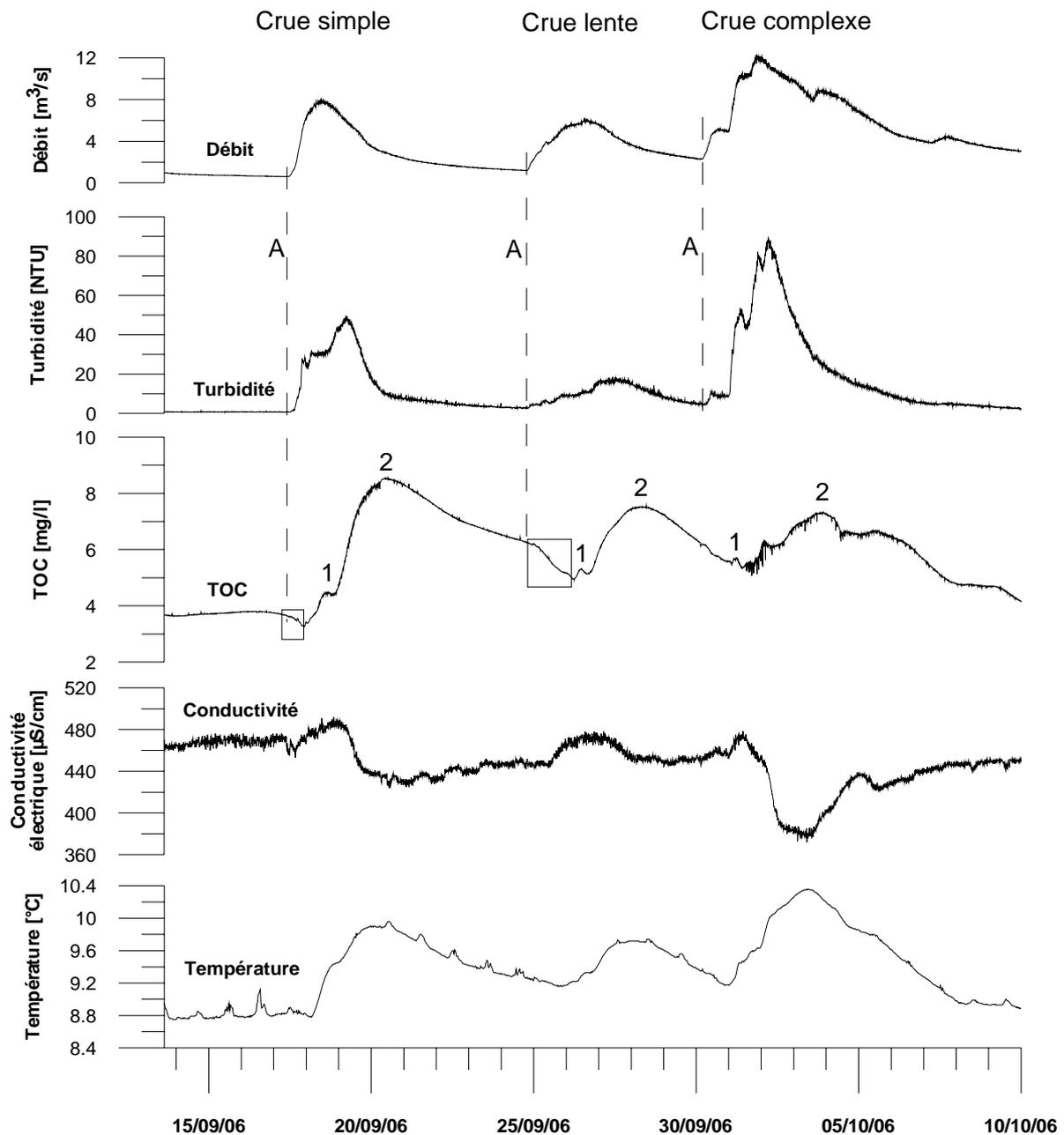
La température mesurée à la source enregistre des variations notables en période de crue et d'étiage. Il est ainsi apparu des températures minimales de l'ordre de 6.8°C en début d'année 2007. La température moyenne en période d'étiage d'été est de 8.4°C. Lors de crues, la température augmente sensiblement jusqu'à 10.4°C, le maximum enregistré. Cette augmentation coïncide avec l'augmentation du TOC, donc de l'eau de la Vallée plus chaude. Ce phénomène est sûrement inversé lors des crues d'hiver puisque la température de l'eau de la Vallée côtoie les 2°C (Mondi 1999). D'ailleurs lors de deux crues, le 10 décembre 2006 et le 1<sup>er</sup> janvier 2007, la température observe une baisse de plus de 1°C. L'eau de la Vallée commence à se refroidir à cette période de l'année. Une autre observation est la variation journalière de la température de l'eau à la source. La température accuse un phénomène de réchauffement de presque 1°C en été de 10 à 16 heures. La température étant mesurée à plus de 100 m en aval de la source, la rivière a le temps de se réchauffer. De plus, cette variation journalière devient de moins en moins visible au fil de l'année car la température de l'air diminue d'autant. En résumé, la température de la source observe des variations saisonnières (été - hiver) et des variations dues aux crues : en été, une crue provoque l'augmentation de la température alors qu'en hiver, une même crue produit une baisse de la température à la source.

Les mesures hebdomadaires de la température sur la Vallée des Ponts montrent également des variations saisonnières. La température du Grand Bied est nettement plus chaude en été (15.1°C) que le Petit Bied (9.0°C). La perte du Voisinage donne des valeurs moyennes de l'ordre de 11.0°C (max : 12.6°C ; min : 6.2°C). Les autres pertes ont des valeurs du même ordre de grandeur. Donc la température des eaux de la Vallée des Ponts

peut être utilisée comme traceur naturel lors de crues pour estimer le temps d'arrivée des eaux de cette vallée.

Sur la **Figure 8**, l'échelle ne permet pas de voir suffisamment de détails. C'est pourquoi il est important de décrire le comportement de chaque paramètre sur une petite période de temps comme le montre la **Figure 9**.

### 2.1.6 Exemple à petite échelle



**Figure 9 : Variations de la turbidité, du TOC, de la conductivité et de la température en fonction du débit de la source Les numéros sur la courbe du TOC correspondent au premier ou second pic de TOC. Les rectangles signifient l'effet de dilution du TOC au début de l'augmentation du débit. La lettre A indique le début d'une crue.**

La **Figure 9** présente les variations des paramètres mesurés en continu pendant la période du 14 septembre au 10 octobre 2006. Trois crues de nature différente y figurent : une crue simple caractérisée par une hausse rapide du débit, une crue lente identifiée par la lenteur de la hausse du débit et une crue complexe avec une augmentation du débit par bonds.

Le TOC observe toujours deux augmentations successives pour une crue donnée. Avant ces augmentations, une phase de dilution a lieu au moment de la hausse du débit (rectangle sur la **Figure 9**). Le 18 septembre, une première inflexion dans la courbe du TOC est visible pendant la phase d'augmentation du débit. Le premier pic du TOC arrive quasiment avec celui du débit (numéro 1 sur la **Figure 9**). Le second pic de TOC (numéro 2) est identifié le 20 septembre alors que le débit est revenu à l'étiage. De plus, la conductivité augmente avec l'arrivée du premier pic de TOC puis diminue lorsque le second pic de TOC intervient. La température, quant à elle, augmente au même moment que la conductivité mais par contre ne diminue pas à l'arrivée du second pic de TOC. La hausse de température est synchrone à l'arrivée du premier pic de TOC. Les deux pics de TOC sont accompagnés de hausse de turbidité, mais un décalage est remarquable entre le deuxième pic du TOC et celui de la turbidité. Ce fonctionnement est identique pour les crues du 26 octobre et du 2 novembre.

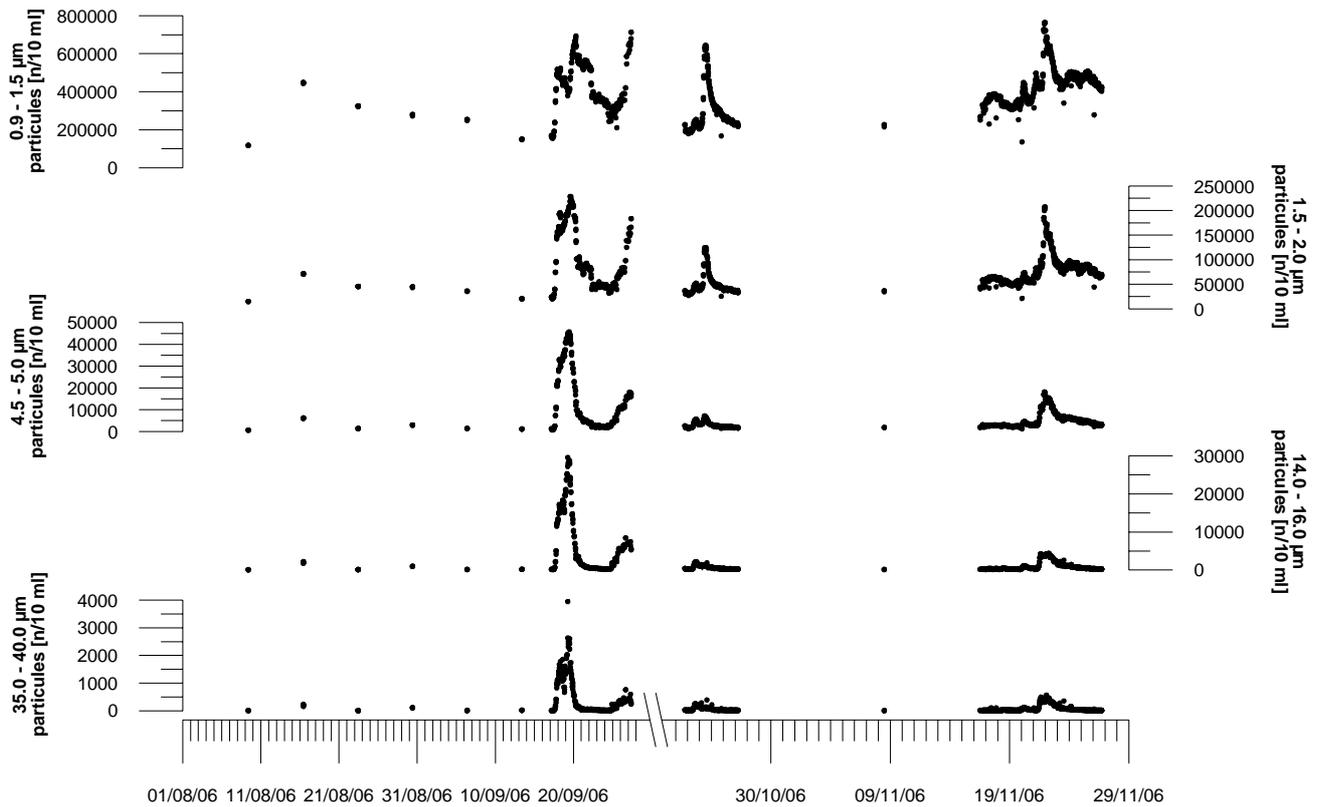
Il semblerait donc que le TOC provienne d'au moins deux endroits distincts ou que les chemins empruntés soient sensiblement différents. La hausse de la température montre clairement l'arrivée d'eau plus chaude de la Vallée des Ponts. La conductivité électrique réagit avec le débit. L'augmentation de débit fait augmenter la conductivité de l'eau. Mais l'arrivée du second pic coïncide avec de l'eau moins minéralisée, sans doute diluée par les précipitations sur la Vallée des Ponts. La turbidité montre plusieurs pics successifs dont l'analyse sera détaillée dans la troisième partie.

## 2.2 MESURES HEBDOMADAIRES

Les paramètres mesurés hebdomadairement sur la Vallée des Ponts et à la source de la Noiraigue sont décrits ci-dessous.

### 2.2.1 Granulométrie des particules

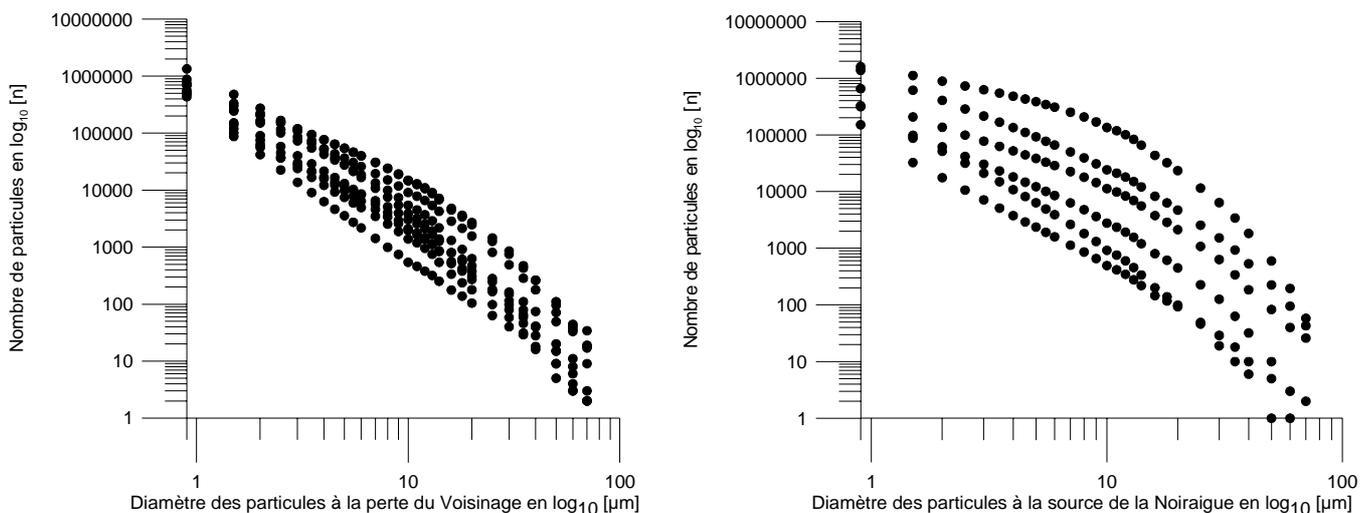
L'analyse de la distribution en taille des particules ou PSD (Particle Size Distribution) a été effectuée pour les deux sites grâce au compteur de particules. Sur la **Figure 10** est représentée la distribution des gammes de particules de 0.9 – 1.5  $\mu\text{m}$ , 1.5 – 2.0  $\mu\text{m}$ , 4.5 - 5.0  $\mu\text{m}$ , 14.0 – 16.0  $\mu\text{m}$  et 35.0 - 40.0  $\mu\text{m}$  lors de l'analyse hebdomadaire et du suivi continu des crues.



**Figure 10 : Distribution en taille des particules à la source de la Noiraigue. Ce graphe comporte à la fois les données enregistrées hebdomadairement et les suivis de crues.**

D'après les résultats obtenus, l'eau de la source contient au maximum environ 765'000 particules de 0.9 – 1.5 µm, 230'000 de 1.5 – 2.0 µm et 4'000 de la gamme de 35.0 – 40.0 µm. Lors d'une augmentation du nombre de particules, la hausse est souvent très visible dans les gammes de 0.9 – 2.0 µm et quelques fois totalement invisible pour les plus grosses particules.

Une autre représentation des résultats de la PSD à la perte du Voisinage et à la source de la Noiraigue est utilisée dans la **Figure 11**.



**Figure 11 : Représentation du nombre de particules en cumulatif en fonction de leurs diamètres à la perte du Voisinage (à gauche) et de quelques mesures extrêmes de la PSD à la source de la Noiraigue (à droite), en base log- log.**

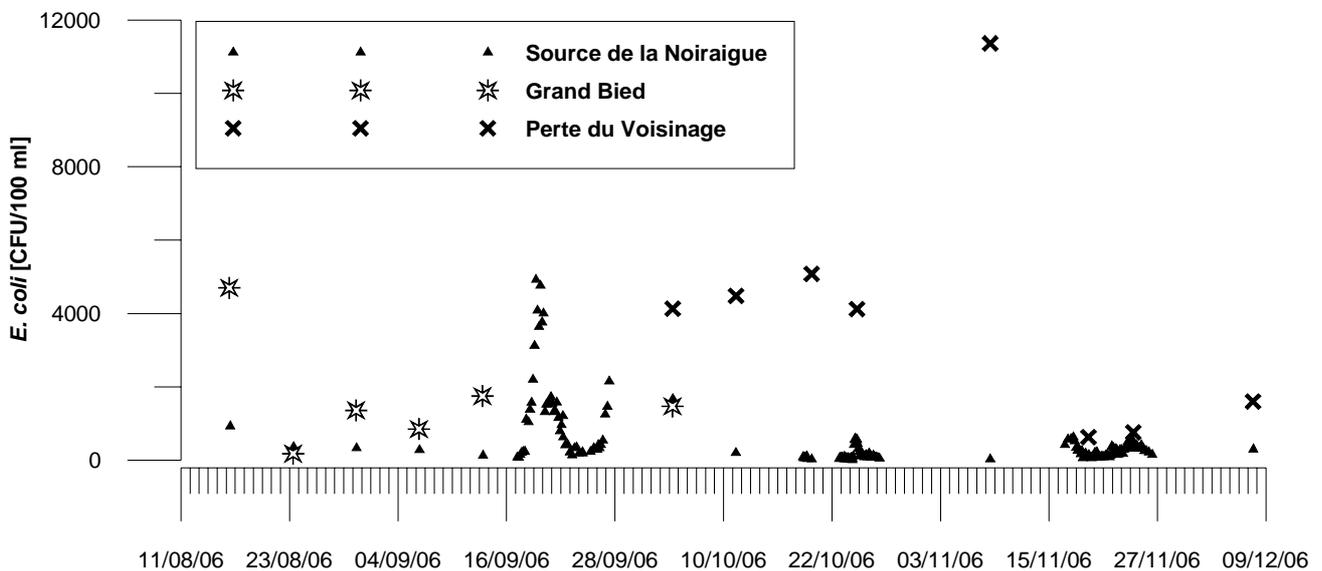
Il ressort de la **Figure 11** que les particules mesurées à la perte du Voisinage sont plus concentrées puisque les minimums de particules pour chaque diamètre dépassent ceux obtenus à la source de la Noiraigue. Les quelques mesures de la source de la Noiraigue représentées sur la **Figure 11** correspondent aux valeurs extrêmes du nombre de particules (minimales et maximales).

Les mesures effectuées à la perte du Voisinage ont permis de donner un ordre de grandeur au nombre de particules que la source de la Noiraigue peut véhiculer. En effet, la perte du Voisinage n'est pas l'unique point d'alimentation de la source.

L'analyse de la PSD sera étudiée en détails dans la troisième partie.

## 2.2.2 Bactériologie

Des analyses bactériologiques ont été effectuées hebdomadairement à la source et à la Vallée des Ponts. Les résultats de ces analyses sont représentés dans la **Figure 12**.



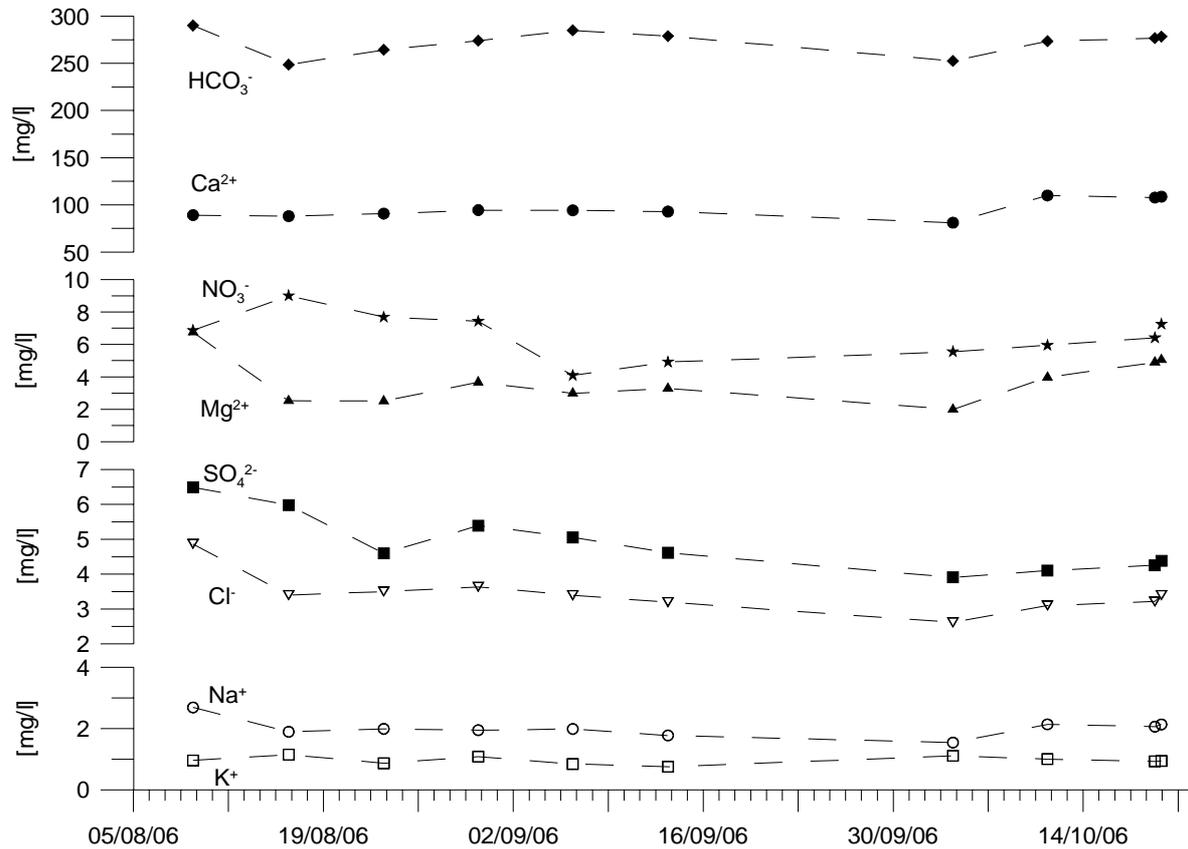
**Figure 12 : Analyse bactériologique d'*E. coli* à la source de la Noiraigue et sur la Vallée des Ponts (Annexes B.4 et C.6). Du 16 août au 4 octobre, les analyses ont été effectuées sur le Grand Bied. Ensuite, les analyses ont été reportées à la perte du Voisinage.**

La concentration maximale enregistrée pour les bactéries fécales est de 11'360 CFU/100 ml à la perte du Voisinage et 4'920 CFU/100 ml à la source. Les mesures ont été initiées sur le Grand Bied du début de l'étude jusqu'au 4 octobre 2006, puis elles ont été réalisées à la perte du Voisinage. Il a été constaté que le Grand Bied contient nettement moins de bactéries fécales que la perte : le 4 octobre, 1'470 CFU/100 ml ont été mesurées au Grand Bied contre 4'130 CFU/100 ml à la perte. Une cause possible est le rejet dans le Bied du Voisinage des eaux traitées par la station d'épuration des Ponts-de-Martel.

En règle générale, la concentration des bactéries est largement supérieure sur la Vallée des Ponts qu'à la source. Une part importante des bactéries est sans doute filtrée ou dégradée durant le transport jusqu'à la source. Mais d'autres pertes ainsi que les affleurements des calcaires du Crétacé et du Malm sup. participent à l'apport d'eau de la source, donc l'effet de dilution n'est pas à négliger. De plus quelques mesures spontanées aux pertes des Naturalistes et à la Roche Berthoud ont révélé des taux d'*E. coli* très faibles. Donc les concentrations d'*E. coli* obtenues à la source peuvent provenir des diverses pertes ainsi que des affleurements sur les flancs de la Vallée des Ponts.

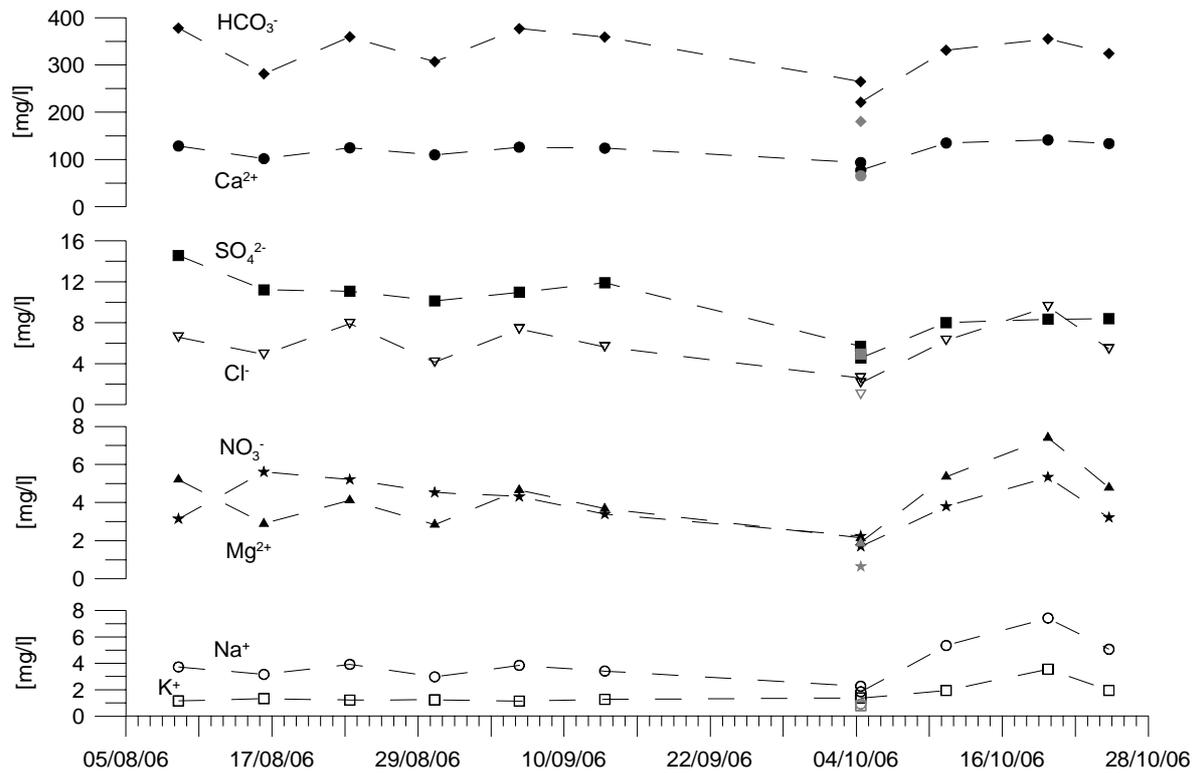
### 2.2.3 Chimie

La composition chimique des eaux a également été suivie durant la période de l'étude. Des échantillons de la perte du Voisinage et de la source de la Noiraigue ont été analysés. L'analyse de la perte a pour intérêt de connaître la chimie à l'entrée du système. Les résultats pour les ions majeurs sont représentés dans les **Figures 13** et **14**.



**Figure 13 : Evolution chimique de l'eau de la source de la Noiraigue (Annexe C.7).**

Aucune variation sensible n'est repérée dans la chimie de l'eau de la source de la Noiraigue (**Figure 13**). Les ions bicarbonates et calciums ont les teneurs les plus élevées puisqu'il s'agit d'un aquifère karstique ( $HCO_3^-$  : 275 mg/l et  $Ca^{2+}$  : 90 mg/l en moyenne). Le nitrate ne dépasse pas les 9 mg/l avec une valeur moyenne de 6 mg/l. Le magnésium se stabilise aux environs de 3 mg/l. Le sulfate et le chlore observent une légère décroissance linéaire durant les mois d'août et septembre ( $SO_4^{2-}$  décroît jusqu'au 4 octobre 2006 de 6.5 à 3.9 mg/l et  $Cl^-$  de 4.9 à 2.6 mg/l). Le sodium et le potassium ont des teneurs faibles de l'ordre de 2 mg/l et 1 mg/l respectivement.



**Figure 14 : Evolution chimique de l'eau s'infiltrant dans la perte du Voisinage (Annexe B.5). Les mesures du 5 août au 4 octobre 2006 inclus ont été effectuées dans le Grand Bied. Le symbole grisé correspond à la mesure du Petit Bied le 4 octobre 2006. A partir de cette date, les échantillons ont été pris dans la perte du Voisinage directement.**

La chimie des eaux s'infiltrant à la perte du Voisinage est également restée stable (**Figure 14**). Le bicarbonate ne dépasse pas les 378.2 mg/l, le calcium est en moyenne de 120 mg/l. Le sulfate et le chlore tendent aux environs de 10 mg/l et 7 mg/l respectivement. Le nitrate et le magnésium sont quasiment semblables avec des concentrations de 4 mg/l en moyenne. Le sodium et le potassium sont présents avec des concentrations inférieures à 4 mg/l d'août à début octobre (3.8 mg/l pour le sodium et 1 mg/l pour le potassium). A partir du 4 octobre, les mesures ont été reportées à la perte du Voisinage. Une station d'épuration rejette les eaux traitées dans le Bied du Voisinage ce qui peut être responsable des augmentations subites des concentrations des nitrates, du magnésium, du sodium et du potassium. Mais aucune donnée ne peut justifier cette hypothèse.

Il est tout de même remarquable que les concentrations les plus élevées sont souvent obtenues pendant la période sèche lorsque les sols sont lessivés qu'occasionnellement.

## 2.2.4 pH

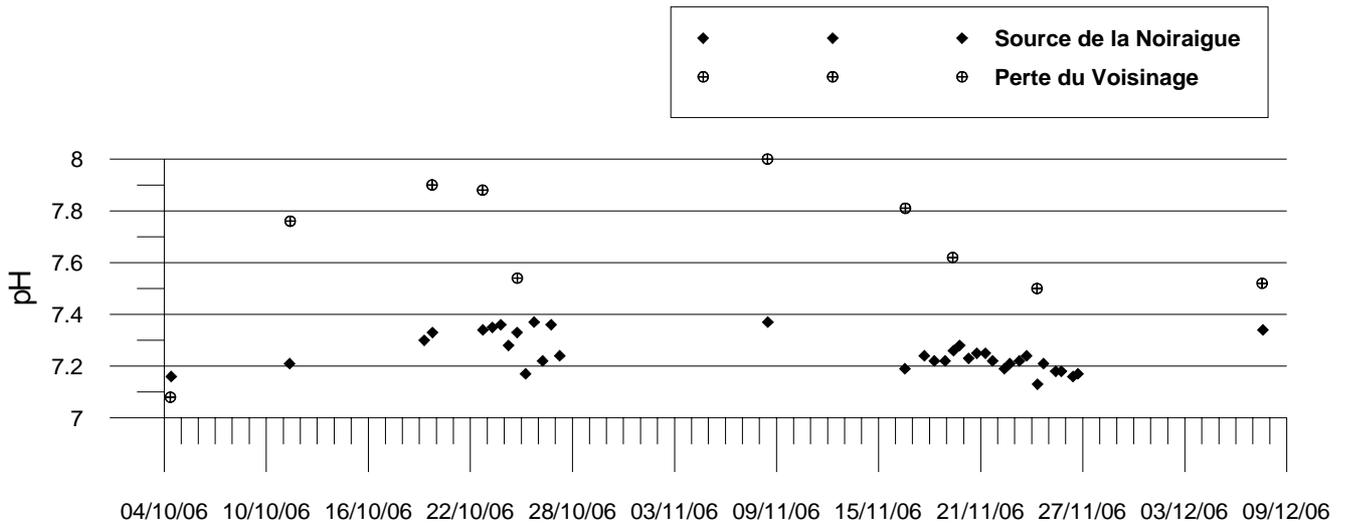


Figure 15 : Mesures du pH à la source de la Noiraigue et à la perte du Voisinage (Annexes B.7 et C.9).

Le pH de la source de la Noiraigue et de la perte du Voisinage a été globalement constant pendant les deux mois de prises de mesures (**Figure 15**). Il a varié de 7.13 à 7.37 à la source et de 7.08 à 8.00 à la perte. L'eau de la perte a un pH plus haut que l'eau de la source (+ 0.5). Peu de variations notables ont été enregistrées, le pH étant resté dans le domaine neutre pour la source et légèrement basique pour la perte.

Certains paramètres requièrent une étude de leurs variations sur une échelle de temps plus petite. La partie 3 analyse ces variations lors de plusieurs événements pluvieux à la Vallée des Ponts.

## 3 MESURES SUR COURTES PÉRIODES

### 3.1 CRUE D'OCTOBRE 2006

#### 3.1.1 Introduction

Une campagne d'échantillonnage d'un épisode pluvieux a été initiée du 22 au 28 octobre 2006 dans le but de déterminer la distribution en taille des particules en suspension. Le matériel permettant ce type d'enregistrement est le compteur de particules (Abakus mobil fluid). Un échantillonneur automatique a été installé à la source de la Noiraigue. Le pas de temps utilisé pour l'échantillonneur a été d'une heure. Afin d'éviter tout effet de floculation des particules entre elles, un passage toutes les 12 heures a été réalisé. Les échantillons issus de l'échantillonneur automatique sont directement passés au compteur de particules. Un échantillonnage manuel mis en place a surtout permis de contrôler s'il y avait diminution ou non du nombre de particules avec le temps. Pour cette crue, un autre fluorimètre de terrain #106 GGUN – FL30 a été installé à la source de la Noiraigue, directement en sortie du karst, afin de distinguer d'éventuels effets de la rivière sur les particules. Exceptionnellement, la température sera mesurée par ce fluorimètre placé à la source afin d'éviter le signal journalier lié à la température atmosphérique. L'analyse bactériologique en *E. coli* a également été suivie durant cette crue avec un pas de temps de deux heures.

L'objectif était de vérifier si la distribution en taille des particules en suspension avait une spécificité propre au type de turbidité (allochtone et autochtone). La venue de bactéries fécales étant toujours liée à l'arrivée d'eau allochtone (Pronk *et al.* 2006b). L'autre objectif était de suivre en continu l'évolution des particules de différentes gammes pour tenter de situer les échantillonnages hebdomadaires par rapport à des événements météorologiques, grâce à leur distribution des particules.

#### 3.1.2 Résultats

Les résultats obtenus de la campagne de mesure sont présentés dans les trois graphiques suivants.

La **Figure 16** présente les paramètres mesurés en continu (débit, turbidité, température, conductivité, TOC) ainsi que les analyses bactériologiques d'*E. coli*. Avant l'évènement pluvieux, le débit de la source était aux alentours de 1.1 m<sup>3</sup>/s. Son débit maximum n'a pas dépassé les 2.7 m<sup>3</sup>/s. Une augmentation de turbidité est visible sur les deux fluorimètres. Elle apparait dès lors que le débit commence à augmenter. De plus, le maximum de la turbidité arrive quand l'accélération du débit est la plus forte, c'est-à-dire lorsque la courbe du débit atteint son point d'inflexion dans la montée. Cette première arrivée n'est pas liée à une contamination bactérienne, le niveau de base d'*E. coli* n'étant pas dépassé. Il est donc fort probable que cette turbidité soit issue de la remise en suspension des particules stockées à l'intérieur du karst, c'est-à-dire une turbidité autochtone. Plusieurs critères viennent conforter cette hypothèse. La température (environ 8.9°C) n'a pas varié durant cette première phase, la conductivité montre une légère augmentation de la minéralisation de l'eau (de 450 à 455 µS/cm) et le TOC est quasi

constant (<2.6 mg/l) avec une très légère hausse. Une interprétation possible est la mise en pression du système, due à l'augmentation de la charge hydraulique, donc la vidange des eaux ayant un temps de transit plus lent, donc plus minéralisées.

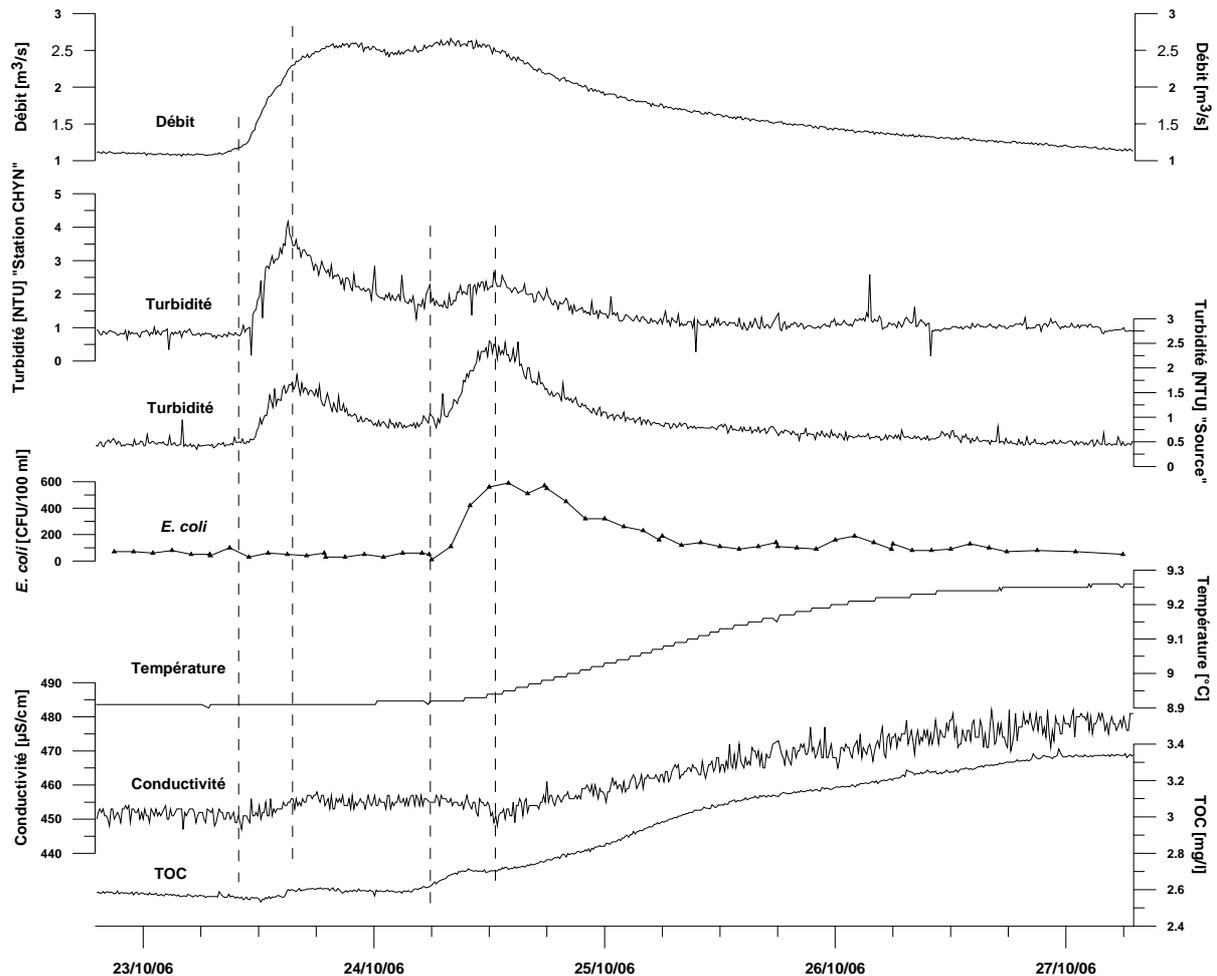


Figure 16 : Dynamique des paramètres naturels mesurés à la source de la Noiraigue.

Une journée après le premier pic de turbidité, un deuxième pic est enregistré. Il n'est pas lié à la légère hausse du débit survenue dans la matinée du 24 octobre. Cette augmentation de turbidité coïncide avec le début de croissance de la température, de la conductivité et du TOC. Or, d'après les mesures effectuées sur la Vallée des Ponts (conductivité, température et TOC moyen : respectivement 550 µS/cm, 10°C et 12.4 mg/l), la hausse de la conductivité, de la température et du TOC correspond à l'arrivée d'eau de cette vallée. Cette seconde turbidité est également liée à la venue de bactéries fécales. Les deux pics coïncident complètement. La deuxième arrivée de turbidité est par conséquent, une arrivée de particules issues de la surface du bassin d'alimentation, en d'autres termes de la turbidité allochtone.

Mais l'allure de la courbe de turbidité varie selon la localisation du point de mesure. Pour le fluorimètre #106 directement à la source, la valeur maximale enregistrée (2.5 NTU) dépasse la valeur du premier pic (1.75 NTU). Par contre, sur le fluorimètre #194 disposé à une centaine de mètres en aval de la source à la « Station CHYN », le premier pic est plus important alors que le second pic est également à 2.5 NTU. L'utilisation de deux fluorimètres a donc permis de mettre en évidence l'influence de la rivière sur les particules. La rivière semble avoir comme effet de remobiliser les particules lors des fortes accélérations du débit. Par contre aucunes variations de turbidité n'a lieu lorsque le débit décroît.

Le pH a été mesuré deux fois par jour, celui-ci indique une variation constatable (pH min : 7.2 ; pH max : 7.4). Par contre, aucune corrélation n'a été trouvée avec les autres paramètres. Pour les cations et anions mesurés pendant cette crue, aucune variation n'a été enregistrée ( $HCO_3^-$  : 284 mg/l,  $Mg^{2+}$  : 5.6 mg/l,  $SO_4^{2-}$  : 5 mg/l,  $Ca^{2+}$  : 110 mg/l) (Annexe C.11).

Les turbidités autochtone et allochtone étant clairement identifiées pour cette crue, il est maintenant intéressant d'en étudier la distribution en taille des particules (Figure 17).

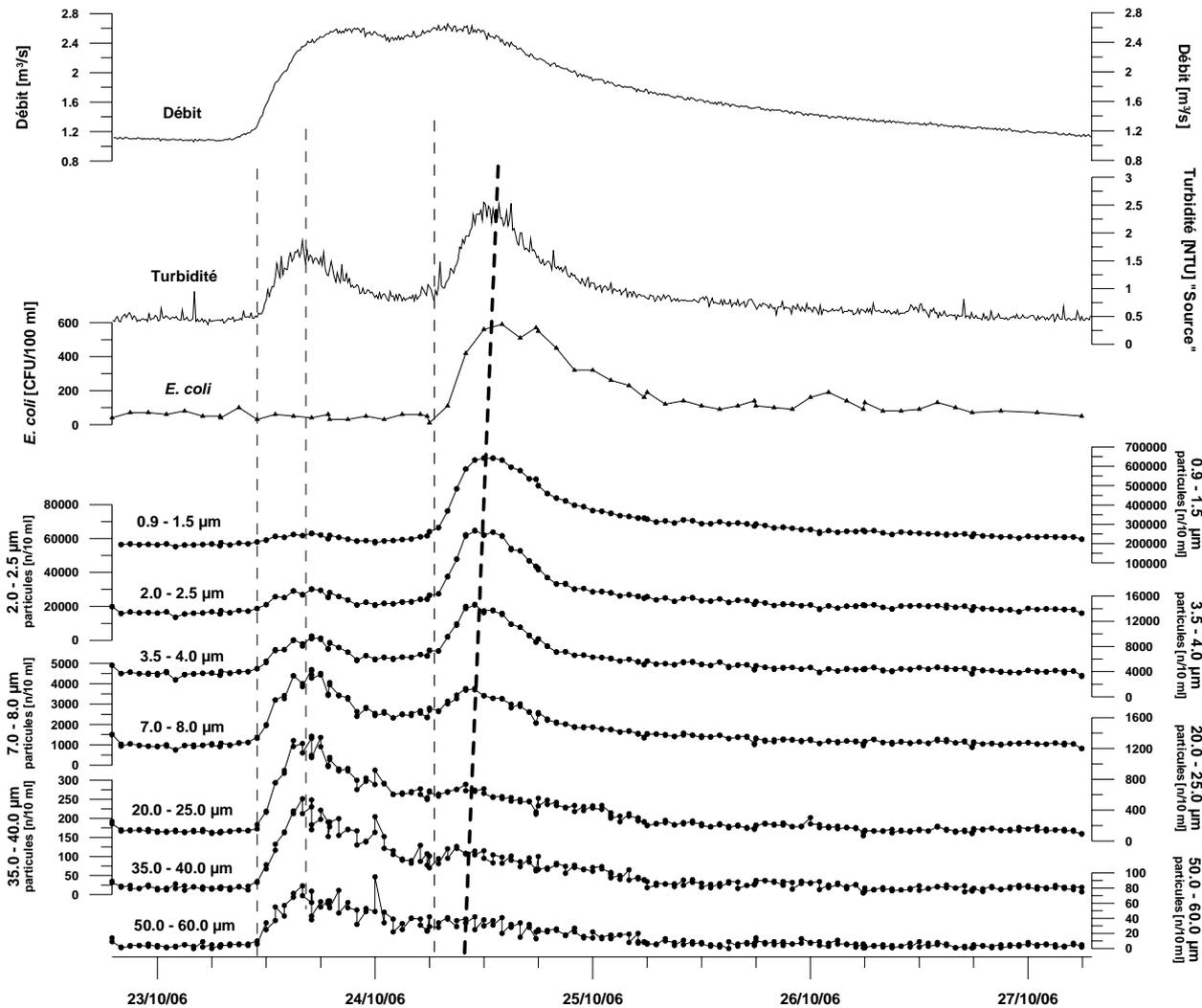


Figure 17 : Distribution en taille des particules pour la période du 22 au 28 octobre 2006.

Sur la Figure 17 est représentée la distribution de quelques gammes de taille de particules mis en relation avec l'arrivée de bactéries fécales.

La turbidité autochtone, correspondant à la remobilisation des particules sédimentées dans le système karstique lors de la mise en pression du karst, est caractérisée par l'augmentation de toutes les classes de taille des particules. L'augmentation des particules de la gamme 0.9 – 1.5 µm n'est pas très visible. L'effet de l'échelle utilisée atténue graphiquement cette augmentation. Mais l'augmentation est plus importante pour les plus grandes tailles. Ceci peut être dû aux vitesses de base et aux turbulences trop importantes qui empêchent la sédimentation des particules de petites tailles dans le réseau karstique, même en période d'étiage. De plus, les particules fines ou colloïdes sont très peu influencés par les processus de sédimentation. Donc l'ensemble des tailles de particules mesurées (soit de 0.9 à 139 µm) se retrouve à la source de la Noiraigue lors de la mise en pression du système.

Par contre une particularité a lieu au niveau de la distribution en taille des particules allochtones. Les particules inférieures à 25  $\mu\text{m}$  forment un pic. L'hypothèse probable est que seules les particules pouvant transiter directement de la Vallée des Ponts jusqu'à la source sont présentes. Et c'est le débit qui fait varier la gamme de particules qui arrive à transiter en une fois. Les autres particules, plus grandes et plus denses, sédimentent dans le karst et seront remobilisées durant la mise en pression du système lors d'une nouvelle crue. Une autre observation peut être tirée du graphique. Les pics sont légèrement anticipés au fur et à mesure de l'augmentation des tailles des particules, c'est-à-dire que le pic des particules de 7.0 – 8.0  $\mu\text{m}$  arrive quelques temps avant le pic de la gamme des 0.9 – 1.5  $\mu\text{m}$ . Une explication possible est le piégeage des particules de plus gros diamètre lorsque le débit diminue, dans des points bas des conduits à faibles vitesses tels que des dépressions ou des zones mortes. En effet, le débit diminue lors de l'arrivée de la turbidité allochtone, donc il y a de plus en plus de sédimentation des particules les plus grandes, d'où une anticipation de leurs pics.

En ce qui concerne le TOC, qui est également un traceur des eaux issues de la Vallée des Ponts, ce paramètre n'augmente que très peu. Par contre, le suivi sur long terme permet de comprendre son fonctionnement (**Figure 18**). En effet, comme vu dans la partie 3, le TOC observe toujours deux paliers pour une même crue. Le premier palier de TOC du 27 octobre semblerait lié à l'arrivée de la turbidité allochtone du 24 octobre. Une autre augmentation très légère de la turbidité est repérée le 30 octobre. Le deuxième pic de TOC arrive au bout d'environ 2 jours après cette date. Ce qui pourrait faire penser à une autre turbidité allochtone. Les deux hausses de la turbidité correspondent donc à l'arrivée du TOC mais leurs pics ont un décalage d'environ 2 jours. Ce temps de décalage pourrait être dû au temps qu'il faut à l'eau pour être drainée de la partie la plus éloignée de la Vallée des Ponts et de la Sagne jusqu'à l'une des pertes (sans doute la perte du Voisinage puisque qu'elle draine la quasi-totalité de cette vallée).

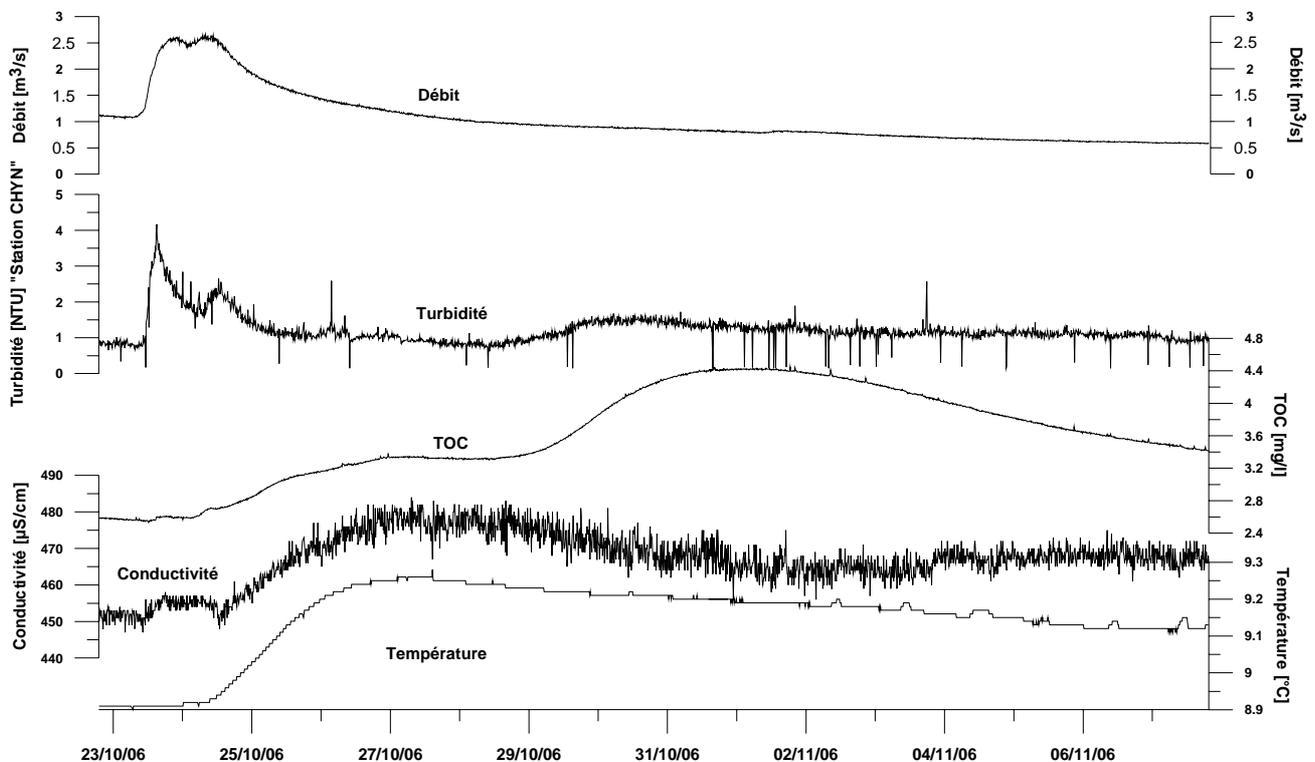


Figure 18 : Suivi des effets à plus longue échéance de la crue d'octobre 2006 sur les paramètres mesurés.

Un autre phénomène est visible sur la **Figure 18**. Il s'agit de l'augmentation journalière de la température enregistrée directement à la source. La température signale une légère hausse entre 10 et 16 heures. Ceci implique une circulation d'air atmosphérique en contact avec l'eau, au moins quelques dizaines de mètres dans le karst (variation amplifiée en été).

La température et la conductivité ont un maximum aux alentours de 9.25 °C et 480 µS/cm respectivement. Ce maximum arrive exactement au niveau du premier palier de TOC. Par contre aucune augmentation de température et de conductivité n'apparaît lors du deuxième pic de TOC le 1<sup>er</sup> novembre. Il semblerait donc qu'il y a plusieurs origines à l'augmentation du TOC. Ce point sera développé dans la 5<sup>ème</sup> partie de ce mémoire. Quoiqu'il en soit, les résultats obtenus n'ont pas comme intérêt premier de comprendre le système karstique mais de pouvoir prévoir l'arrivée de pathogènes grâce à la distribution en taille des particules.

### 3.1.3 Conclusion

Ce suivi de la crue d'octobre 2006 a été effectué lors d'un épisode pluvieux exceptionnel. Exceptionnel de part sa faible intensité et sa constance. Une seule précipitation a permis cette constance dans le régime hydrologique de la source. Le débit atteint était faible comparé aux débits enregistrés tout au long de ce présent travail. Donc pour des débits plus importants, les courbes enregistrées risquent de se chevaucher. De plus, dans ce système, le débit dépasse souvent les 10 m<sup>3</sup>/s et comme la sédimentation des particules est fonction du débit, des gammes d'analyse de particules plus grandes sont requises pour le compteur de particules.

Les résultats enregistrés pendant cette crue d'octobre ont montré que l'arrivée de pathogènes n'est pas toujours liée à la turbidité. Une arrivée de toutes les tailles de particules (turbidité autochtone) n'est qu'indicateur d'une mise en pression du système par remobilisation des particules sédimentées dans le karst. Lorsque celles de plus grandes tailles ne sont plus présentes et qu'une hausse des fines particules est enregistrée, la source est alimentée par de l'eau arrivant du bassin d'alimentation emportant des particules pouvant être pathogènes (turbidité allochtone).

## 3.2 CRUE DE NOVEMBRE 2006

### 3.2.1 Introduction

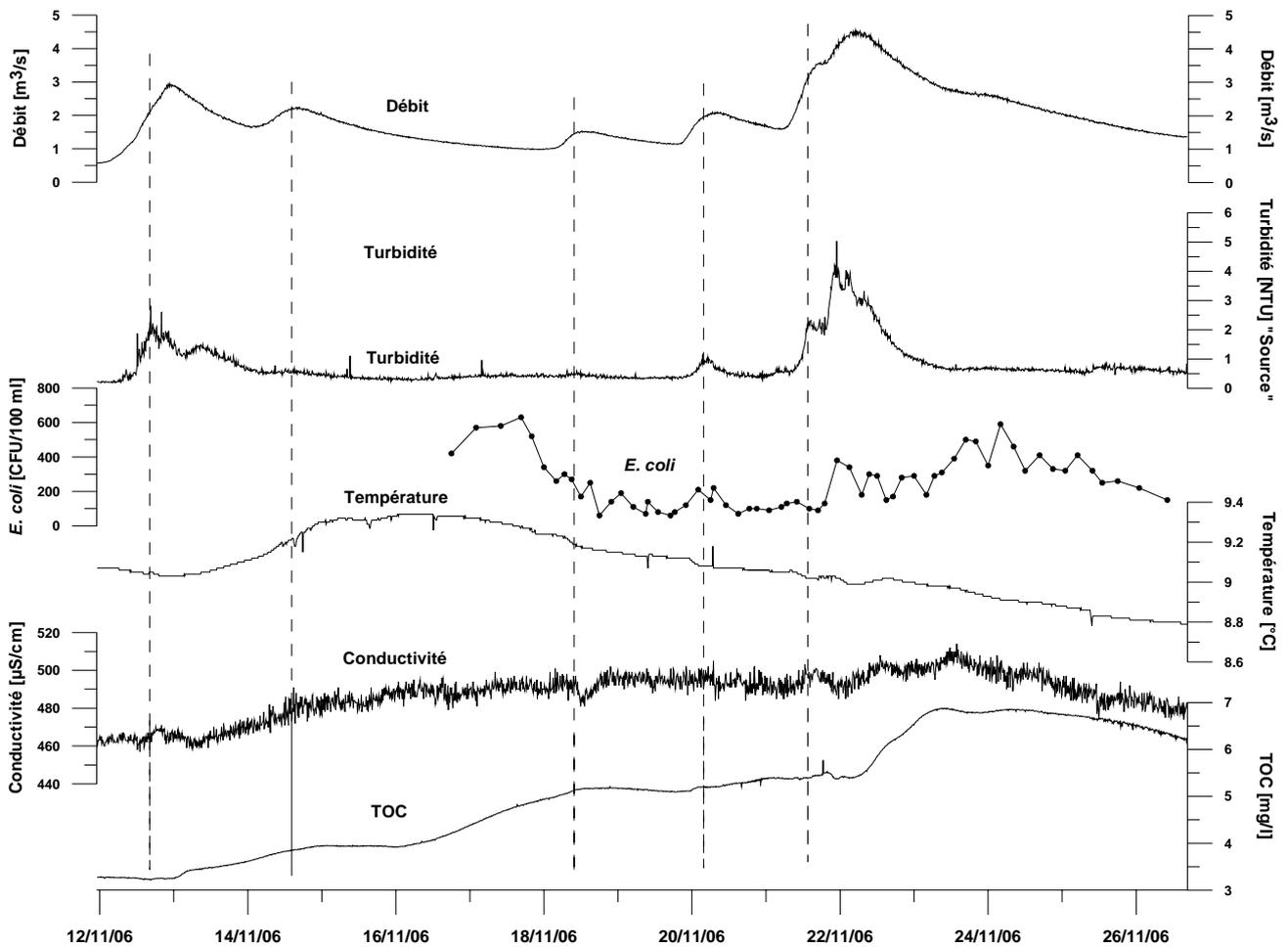
Une nouvelle campagne de suivi des paramètres physiques, chimiques et bactériologiques a été menée pour une période de 10 jours en novembre 2006. La prise d'échantillons a commencé le 16 novembre 2006 et la méthode a été exactement identique à celle de la crue enregistrée en octobre pour pouvoir confronter plus aisément les résultats.

Le but a été d'appuyer les résultats tirés de la crue d'octobre avec un débit plus important. Il s'avère que le suivi a enregistré trois crues successives à intervalles réguliers.

### 3.2.2 Résultats

Sur la **Figure 19**, la courbe de débit montre cinq crues différentes. Seules les trois dernières ont été échantillonnées. Les deux premières crues ont eu comme effet de perturber le système. Sur la première crue de  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ , les turbidités autochtone (12/11 dans l'après-midi) et allochtone (13/11 dans la matinée) sont nettement visibles. La température, la conductivité et le TOC entament leur augmentation à l'instant où la turbidité allochtone arrive. La seconde augmentation du débit (max :  $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) le 14/11 provoque une légère turbidité autochtone. Les particules n'ont pas eu le temps de s'accumuler dans le système karstique pour provoquer un pic plus visible. Sa turbidité allochtone ne provoque aucune variation de turbidité. Par contre la venue synchrone de bactéries fécales et du second pic de TOC le 17 novembre (max : 600 CFU/100 ml) semble indiquer une eau venant de la Vallée des Ponts.

Le 18 novembre, une nouvelle crue avec un débit ne dépassant pas les  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$  fait réapparaître des particules autochtones. Elle est suivie par 2 crues, l'une de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  le 20 et l'autre de  $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$  le 21 novembre. La variation des paramètres naturels n'est pas aisée à analyser puisque les crues sont chevauchantes et ne laissent pas assez de temps au système pour revenir à l'état initial entre les crues. Les sols ont été lessivés d'après la faible concentration de bactéries fécales détectée. C'est pourquoi les analyses bactériologiques ne montrent pas une courbe de restitution typique.



**Figure 19 : Dynamique des paramètres naturels mesurés à la source de la Noiraigue. Les pointillés correspondent à la turbidité autochtone, c'est-à-dire la remise en suspension des particules sédimentées dans le karst due à l'augmentation du débit.**

Le pH a de nouveau été suivi pendant ces crues mais les mesures effectuées ne donnent pas de variations significatives (pH min : 7.13 ; pH max : 7.28).

Les turbidités autochtones étant clairement identifiées sur la **Figure 19**, il est alors intéressant d'utiliser la propriété sur les particules afin d'en déduire leur turbidité allochtone respective (**Figure 20**).

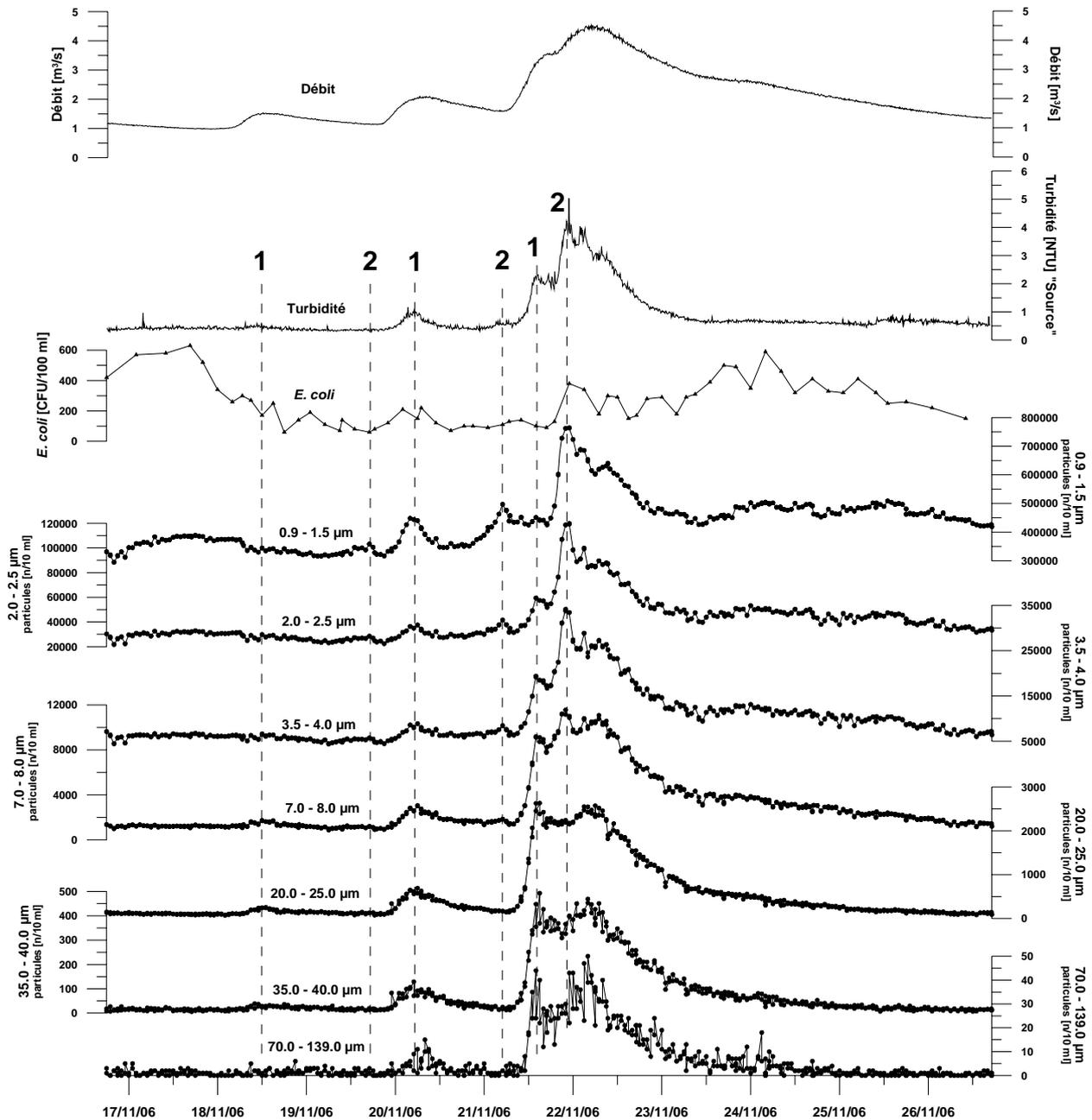


Figure 20 : Distribution en taille des particules pour la période du 16 au 26 novembre 2006. Les numéros indiquent le type de turbidité (1 : autochtone, 2 : allochtone).

La distribution en taille des particules est représentée sur la **Figure 20**. Les numéros indiqués au-dessus des pointillés permettent de repérer le type de turbidité rencontré. Ainsi le numéro 1 est lié à l'apparition de toutes les tailles de particules.

La crue du 18 novembre implique une turbidité autochtone, donc une remise en suspension de toutes les tailles de particules. Mais les particules de petites tailles (inférieures à 4 µm) n'ont pas augmenté. Ceci peut être l'effet de la crue précédente qui a engagé d'importantes quantités de fines particules dans le système. Elles ont donc pu recouvrir la légère hausse des fines particules durant cette turbidité autochtone. Le léger pic est tout de même visible pour les particules supérieures à 7 µm. L'arrivée de l'eau du bassin d'alimentation est identifiée le 19 novembre par l'inflexion des particules de tailles inférieures à 8 µm. Les particules plus grandes sédimentent dans le karst. Par contre la turbidité allochtone n'est pas toujours liée à l'arrivée de bactéries fécales. Comme expliqué

plus haut, cette campagne d'échantillonnage s'est faite durant une période pluvieuse où le sol a été « lavé » dès la première crue.

Une nouvelle crue le 20 novembre a amené des particules de toutes tailles en provenance du karst directement. La turbidité allochtone liée à cette crue, est arrivée le 21 novembre dans la matinée. A nouveau, uniquement les particules de tailles inférieures à 8 µm sont arrivées à la source. Toujours très peu de signal pour la bactériologie.

La dernière crue enregistrée commence le 21 novembre dans l'après-midi. La mise en compression du système remobilise toutes les tailles de particules. Le débit étant cette fois plus grand, les particules venant du bassin arrivent dans la nuit du 21 au 22 novembre. Cette fois, les particules de grosses tailles sont également présentes mais une diminution de leur nombre est quand même visible. Ceci est sans doute lié à la superposition des deux types de turbidités. Une gamme supérieure à 140 µm serait indispensable pour pouvoir certifier le type de turbidité. La bactériologie annonce tout de même une contamination de l'eau.

Selon Atteia et Kozel (1997), les particules de tailles inférieures à 4 – 5 µm sont considérées comme colloïdes variant avec les conditions chimiques et non pas avec les conditions physiques du milieu. Or n'ayant pas trouvé de nettes variations chimiques, cette hypothèse ne peut pas être réfutée surtout en voyant le phénomène sur les particules les plus fines. Par contre, le 17 et 18 novembre, les particules inférieures à 4 µm observent un bombement lié à l'arrivée d'une importante contamination bactérienne. Ce même phénomène s'observe du 24 au 26 novembre. Ces bombements sont parallèles à l'augmentation du second pic de TOC et à environ deux-trois jours de la dernière augmentation du débit. Tout pense à croire que ces augmentations de bactéries fécales liées aux fines particules et aux pics secondaires de TOC, avec un temps de transit de quelques jours, provient de la perte du Voisinage.

### 3.2.3 Conclusion

Cette crue de novembre a donc permis de vérifier les résultats obtenus pour la crue d'octobre à savoir la particularité qu'a le type de turbidité sur la distribution en taille des particules. La turbidité autochtone remobilise toutes les tailles de particules. La turbidité allochtone correspond à l'arrivée de l'eau du bassin d'alimentation et par la venue de particules de faibles tailles. Les particules les plus grandes sédimentent dans le système et seront remobilisées lors d'une nouvelle crue. La taille des particules sédimentées dépend en outre de la vitesse d'écoulement dans le système. Donc il devient indispensable de pouvoir étudier les particules avec des gammes de tailles beaucoup plus larges.

Comme le montre cette étude, la turbidité allochtone n'est pas toujours liée à l'arrivée de bactéries fécales indicatrices d'une possible contamination d'éléments pathogènes. En effet, une succession de crues a pour effet de perturber les variations des principaux paramètres mesurés. Les paramètres chimiques et physiques peuvent observer des superpositions. Par contre le lessivage des sols de la Vallée des Ponts est nettement visible sur la concentration de bactéries fécales obtenue à la source lors d'une succession de crues. Effectivement si les conditions sont non perturbées par plusieurs crues dans un petit laps de temps, la turbidité allochtone est liée à l'arrivée de pathogènes.

## 4 MULTI-TRAÇAGE DU 15 SEPTEMBRE 2006

### 4.1 INTRODUCTION

Le but de l'essai de traçage est d'améliorer la compréhension du transport des traceurs particulaires et solubles dans les systèmes karstiques fortement développés. L'objectif est de pouvoir remplacer les traceurs artificiels par des traceurs naturels issus du milieu lui-même. Il va de soit que ce point passe par une bonne compréhension du système lui-même et une étude de ses variations naturelles. L'essai de traçage va également enrichir les travaux précédents par l'apport de données supplémentaires sur le fonctionnement du système karstique et sur le transport dans le karst, des entités pouvant être assimilées à des pathogènes.

L'essai de traçage a été réalisé à partir de la perte du Voisinage le 15 septembre 2006 à 9h15 (heure d'hiver). Les quantités de traceurs injectées ont été choisies selon les données de traçage précédentes (Gogniat 1995, Desor 1865, Burger 1959, Atteia 1995). L'injection de 3 kg d'uranine, de 10 litres de bactériophages H40/1 ( $4,95E^{+14}$  phages), et de 5 ml de microsphères fluorescentes (nb :  $2,275E^{+11}$ ) (Fluoresbrite® Polychromatic Red Microspheres 1  $\mu$ m, Polysciences, Inc.) s'est faite une vingtaine de mètres en amont de la perte afin de ne pas privilégier une zone d'infiltration par rapport à une autre car la perte du Voisinage est constituée de plusieurs lieux d'infiltration. Ces traceurs sont tout à fait compatibles entre eux et leurs transits dans le karst ne posent pas de problème au niveau de leur dégradation.

Divers projets ont eu pour site d'étude la Vallée des Ponts et de la Sagne. Les premières injections ont été faites durant le 19<sup>ème</sup> siècle. Mais les études se sont surtout échelonnées au cours des 30 dernières années (**Tableau 1** et **Figure 21**).

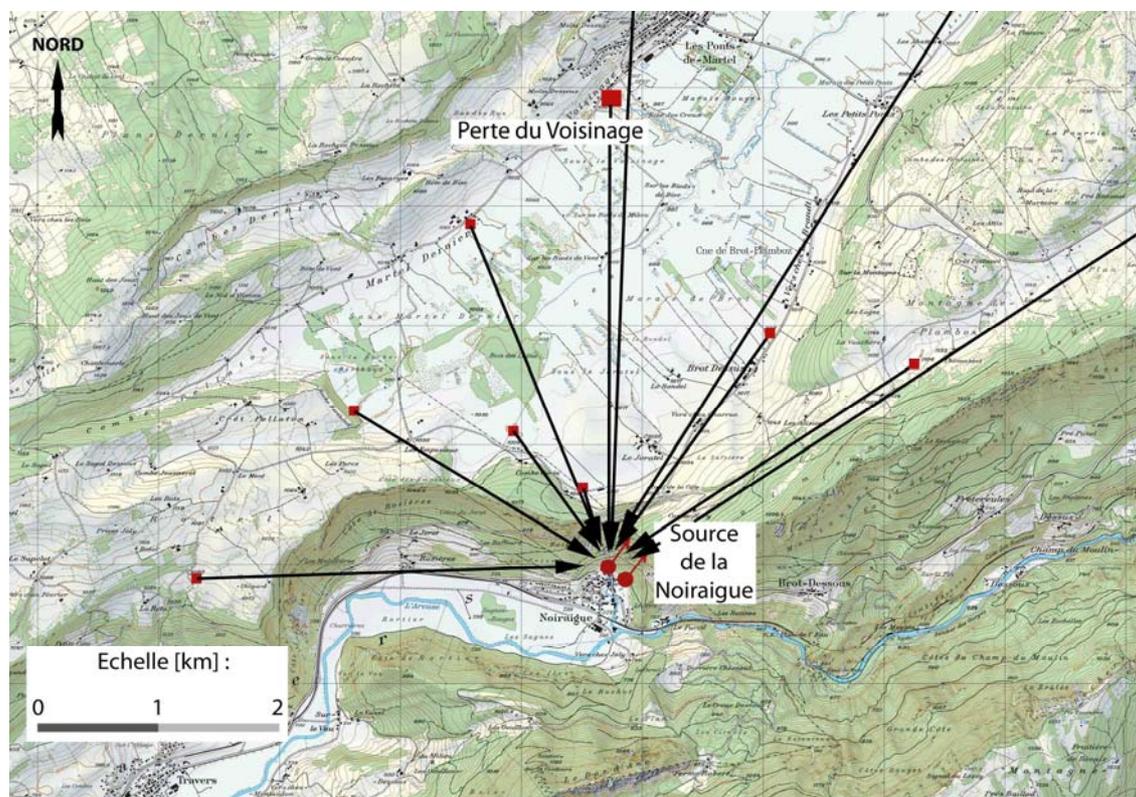
Points d'injection	Dates	Connexion(s)	Restitutions (%)	Traceurs	Vitesses modales (m/h)
Brot-Dessus	28.07.1995	Noiraigue	12	Bactériophages H4	6
	28.07.1995	Noiraigue	13	Duasine	6
	20.09.1995	Noiraigue	34	Bactériophages H4	38
	20.09.1995	Noiraigue	98	Duasine	38
Chaux-du-Milieu	02.04.1987	Noiraigue*	?	Uranine (1 kg)	45
Coeudres	01.04.1986	Epinettes	1	Uranine (10 kg)	132
Combe de Sagnettes	23.06.1990	Noiraigue	?	?	25
Combe Varin	28.07.1995	Noiraigue	17	Bactériophages T7	3
	20.09.1995	Noiraigue	2	Bactériophages T7	41
Naturalistes	20.09.1995	Noiraigue	21	Bactériophages H6	15
Martel Dernier	28.07.1995	Noiraigue	10	Bactériophages H40	18
	20.09.1995	Noiraigue, Lib	31	Bactériophages H40	14
Roche Berthoud	09.06.1976	Noiraigue	?	Uranine (3 kg)	8
	28.07.1995	Noiraigue	8	Sulforhodamine G	30
	20.09.1995	Noiraigue	65	Sulforhodamine G	61
Rotel	15.07.1993	Noiraigue	?	Iodure de Potassium (5 kg)	67
Thomasset	18.05.1992	Noiraigue, Lib	?	Uranine (2 kg)	13
Tourne	18.05.1992	Noiraigue, Lib	?	Bactériophages T7	30
Voisinage	30.09.1864	Noiraigue	8	Sulforhodamine G (7 kg)	500**
	04.05.1901	Noiraigue, Lib	50	Sulforhodamine G (3 kg)	20
	26.07.1901	Noiraigue, Lib	49	Uranine (5 kg)	26
	16.05.1995	Noiraigue, Lib	?	?	60
	28.07.1995	Noiraigue	35	Uranine (3 kg)	8
	20.09.1995	Noiraigue, Lib	95	Uranine (3 kg)	30

\* connexion incertaine (Thierrin 1987)

\*\* valeur incertaine sans doute due à une contamination (Desor 1865)

Lib : source de la Libarde

**Tableau 1 : Synthèse des essais de traçage positifs sur le bassin d'alimentation de la source de la Noiraigue (modifiée d'après Gogniat 1995).**



**Figure 21 : Localisation des points d'injections des essais de traçage positifs sur le bassin de la source de la Noiraigue. Ces points d'injections ont été décrits sur la Figure 2 (Carte issue du logiciel Swiss Map 25, secteur 2, Jura, 1 : 25'000, 2005).**

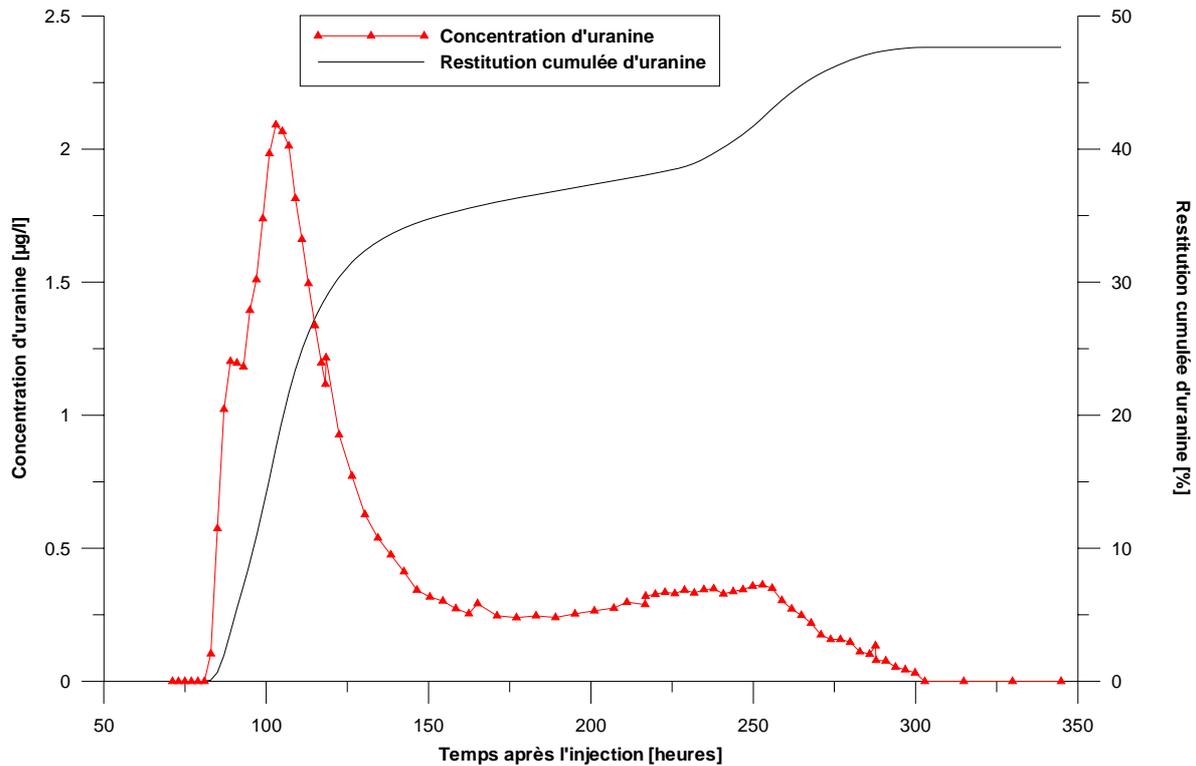
D'après les études faites précédemment, le système karstique fonctionne d'une façon très variable suivant le régime hydrique. Les vitesses de transit passent de 8 m/h à 60 m/h pour la perte du Voisinage (Gogniat 1995, Atteia 1995). Les restitutions sont également très variables lorsque les conditions changent. Elles passent de 35 % en basses eaux à 95 % en hautes eaux pour 3 kg d'uranine injectés à la perte du Voisinage (Gogniat 1995). La plupart des autres pertes réagissent identiquement c'est-à-dire ayant une diminution de la restitution en basses eaux. Ces taux requièrent tout de même de rester prudent puisque la connaissance de la méthode d'échantillonnage de chaque traceur n'a pas été intégrée et l'erreur commise peut en être grandement affectée. Ces données mises à disposition ont également permis d'estimer le temps de transit des traceurs injectés le 15 septembre 2006 afin de garantir un suivi complet de leur passage.

La perte du Voisinage est l'endroit propice pour un essai de multi-traçage puisqu'elle a été testée à de nombreuses reprises et les explications du fonctionnement du système sont déjà bien avancées. De plus, cette perte est connectée aux Bieds collectant les eaux de ruissellement de la quasi-totalité de la Vallée des Ponts et de la Sagne. Comme décrit précédemment, cette vallée est constituée d'importantes zones de tourbières. Elles jouent le rôle de réserve emmagasinant d'importantes quantités d'eau lors de précipitations et la remobilisant lors des grandes périodes sèches. La perte est donc toujours alimentée même lors d'étiage prolongé (Mondi 1999).

## 4.2 RÉSULTATS ET OBSERVATIONS

### 4.2.1 Uranine

Une crue de 8 m<sup>3</sup>/s à la source, survenue le 17 septembre 2006 (soit 2 jours après l'injection) avec 58.2 mm de précipitations tombées en l'espace de 24 heures, a provoqué l'arrivée de fortes concentrations de matières organiques, rendant ainsi inutilisable les données enregistrées par le fluorimètre de terrain. Par conséquent, seuls les échantillons analysés au spectrofluorimètre du laboratoire du CHYN seront discutés ci-dessous (**Figure 22**).



**Figure 22 : Courbe de restitution de l'uranine après la jonction des sources de la Noiraigue et de la Libarde, obtenue grâce au spectrofluorimètre (Annexe C.2). Le pas de temps d'échantillonnage a été de 2 heures (un échantillon correspond à un triangle). La restitution cumulée d'uranine figure également sur le graphique.**

L'uranine est apparu à la source de la Noiraigue le 18 septembre à 20h15, c'est-à-dire 83 heures après l'injection. La distance séparant la perte du Voisinage à la source est de 3925 m, ce qui correspond à une vitesse de transit linéaire maximale de 47 m/h ou 1128 m/j. Le pic est enregistré à 103 heures, c'est-à-dire le 19 septembre à 16h15, avec une concentration de 2.09 ppb ou µg/l. La vitesse d'écoulement dominante est donc de 38 m/h, soit 912 m/j.

Le suivi automatique du débit à la source a permis de calculer les restitutions respectives. Pour les traceurs chimiques ou particuliers, la masse ou le nombre de restitution se calcule avec la formule suivante :

$$R = \int_{t=0}^{\infty} Q \cdot c \cdot dt$$

R : Masse ou nombre de restitution [kg] ou [n]

Q : Débit variable en fonction du temps [l/s]

c : Concentration du traceur [kg/l] ou [n/l]

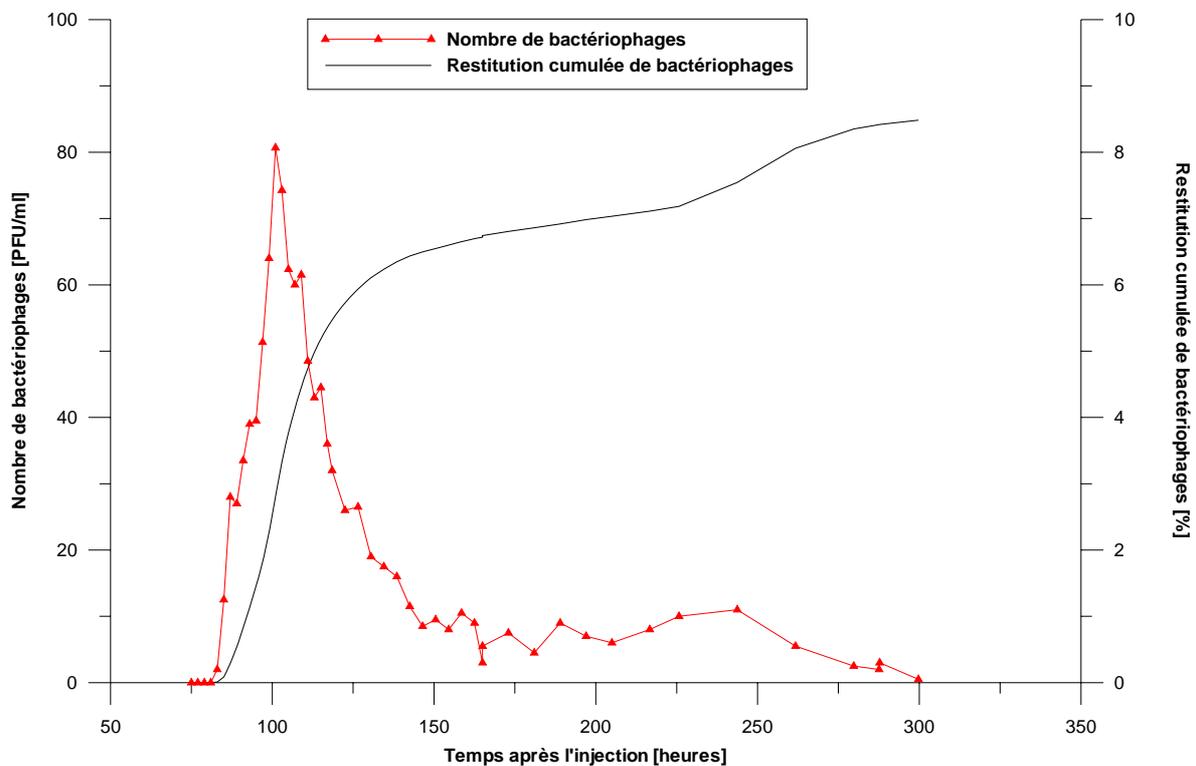
dt : Temps entre 2 mesures [s]

Il est ainsi réapparu 1.43 kg d'uranine, soit 47.65 % de la masse injectée. Le temps de transit médian, correspondant au temps où la moitié de la masse restituée est arrivée à la source, est de 109 heures environ, c'est-à-dire 6 heures après le pic. Ce temps médian donne la vitesse d'écoulement médiane de 36 m/h.

Un léger palier a lieu à 90 heures après l'injection en pleine montée de la concentration de l'uranine, soit 7 heures après la première arrivée et 13 heures avant le pic. Un effet de traîne ou « effet de tailing » est observé sur la courbe de restitution d'uranine. Sur celle-ci, un bombement a lieu à partir de 180 heures jusqu'à son maximum à 256 heures. Sur la courbe de restitution cumulée, ce bombement est également notable par le changement d'inflexion de la courbe.

#### 4.2.2 Bactériophages

Les courbes de restitution et de restitution cumulée des bactériophages ressemblent étroitement à celle de l'uranine (**Figure 23**). Leur première détection a eu lieu au même moment que l'uranine, c'est-à-dire à 83 heures après l'injection. Par contre le pic est arrivé à 101 heures, soit 2 heures avant le pic d'uranine. Le nombre de bactériophages restitué à la source est de  $4,20E^{+13}$  PFU, soit 8.48 %. Le temps médian est de 108 heures qui est quasi équivalent à celui de l'uranine.

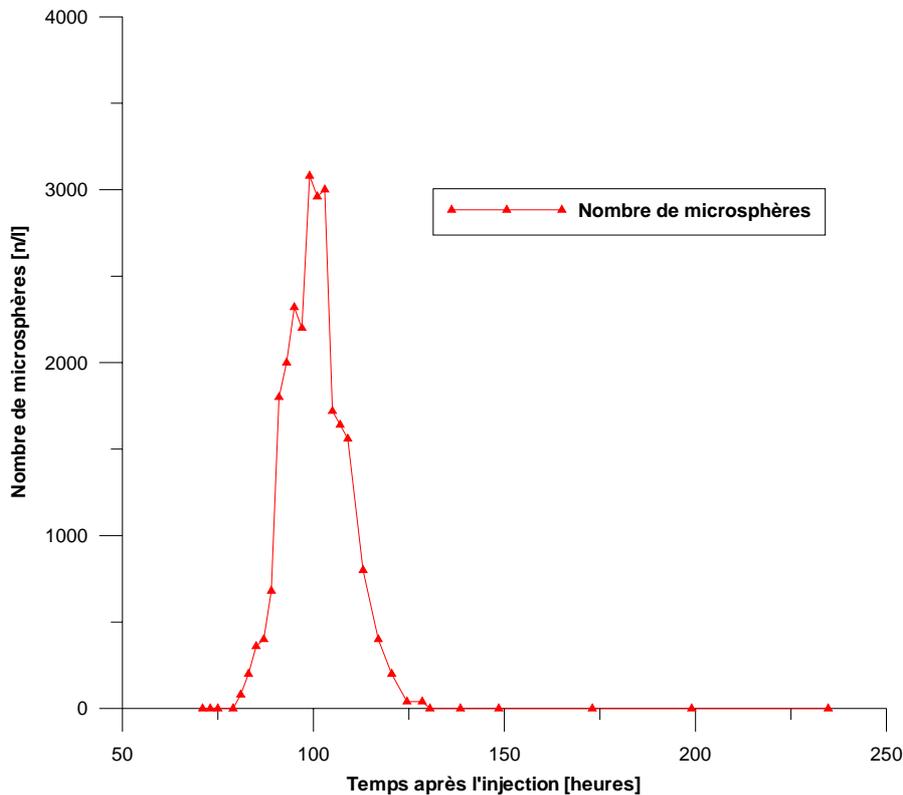


**Figure 23 : Courbe de restitution des bactériophages H40/1 après la jonction des sources de la Noiraigue et de la Libarde, obtenue grâce au laboratoire de microbiologie (Annexe C.4). Le pas de temps d'échantillonnage a été de 2 heures. La restitution cumulée des bactériophages figure également sur le graphique.**

Le premier palier, assez visible sur la courbe de restitution de l'uranine, n'est pas aussi évident à mettre en avant. Mais il semble que ce palier soit tout de même à 89 heures de l'injection. Le bombement sur le tailing est visible de 181 heures jusqu'au maximum à 244 heures. Il ressort nettement que l'uranine et les bactériophages ont des temps de transit très semblables avec une légère avance pour le traceur particulière.

### 4.2.3 Microsphères

En ce qui concerne les microsphères, elles sont apparues 2 heures avant les autres traceurs, le 18 septembre à 18h15 (81 heures après l'injection) (**Figure 24**). Leur pic se situe à 12h15 (99 heures) donc 4 heures avant le pic d'uranine et 2 heures avant le pic de bactériophages. Les vitesses maximale et modale sont donc respectivement 48 m/h et 40 m/h environ.

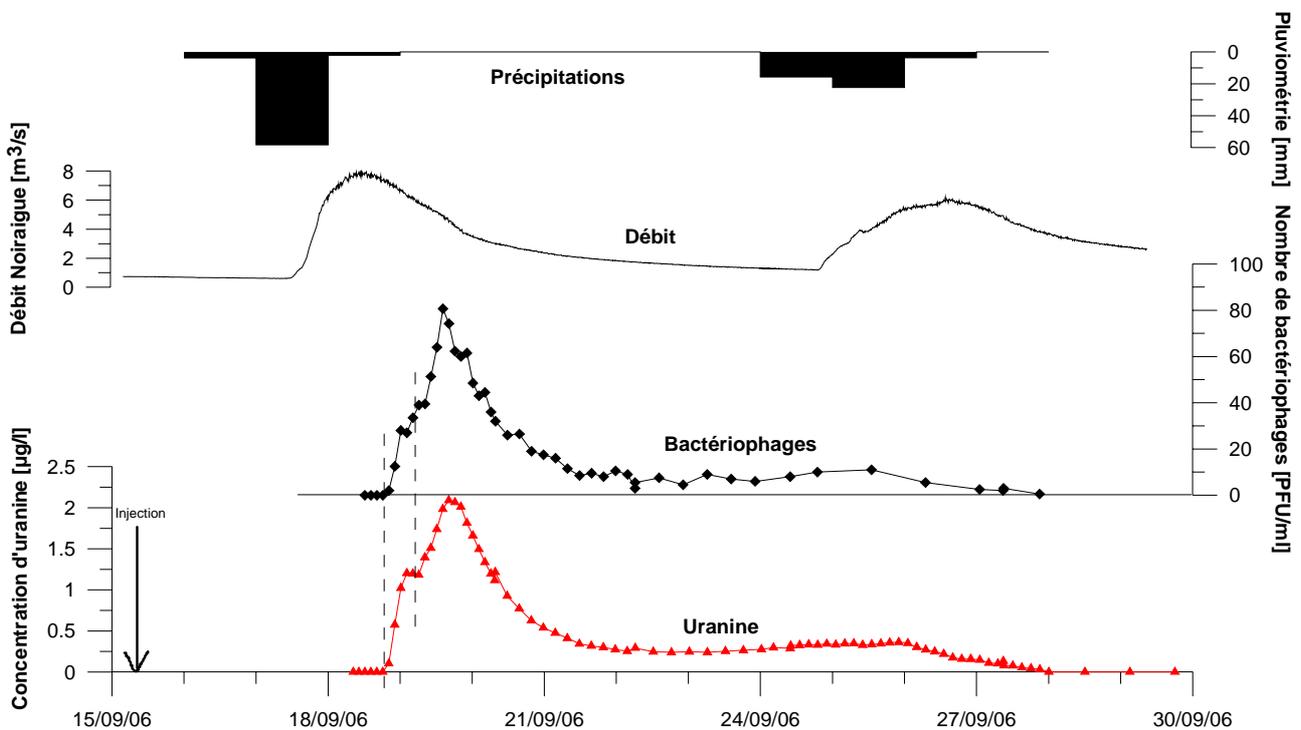


**Figure 24 : Courbe de restitution des microsphères après la jonction des sources de la Noiraigue et de la Libarde, obtenue par comptage sous microscope à fluorescence (Annexe C.3). Le pas de temps d'échantillonnage a été de 2 heures.**

La courbe de restitution cumulée est volontairement non visible. Une restitution de 424.82 % a été calculée (pour  $9,66E^{+11}$  microsphères restituées). L'hypothèse de cette incohérence est une erreur de comptage au microscope à fluorescence. En effet, la turbidité très importante de l'eau, qui a atteint les 50 NTU, a imposé une filtration d'uniquement 25 ml au lieu des 100 ml préconisés pour le décompte. Mais même en diminuant le volume par 4, le comptage a été très difficile, la turbidité rendant impossible de différencier les microsphères des autres particules semblables, d'où l'erreur commise. Par contre, la courbe de restitution des microsphères semble être assez correcte au niveau de son allure mais pour les raisons citées, elle ne sera pas prise en compte dans les résultats.

### 4.3 INTERPRÉTATIONS

L'essai de traçage réalisé le 15 septembre 2006 a tout de même donné d'intéressants résultats. Les restitutions des traceurs se sont faites sous leur forme typique de cloche. L'arrivée prématurée du pic des traceurs particuliers tels que les bactériophages est très bien connue pour des aquifères poreux (Rossi *et al.* 1994) (**Figure 23** et **24**). D'après ces auteurs, les traceurs chimiques et biologiques connaissent l'effet de dispersion au long de leur parcours. Par contre, l'effet de retard des traceurs solubles n'est pas observé sur les courbes de concentrations des traceurs biologiques. Une explication pourrait être l'exclusion des particules dans des microfissures et leur dégradation naturelle. Mais dans le karst, ce phénomène reste mal vérifiable. Une autre explication possible serait que les traceurs solubles comme l'uranine ont plus de dispersion que les traceurs particuliers tels que les bactériophages ou microsphères. Ces dernières prennent des chemins préférentiels à plus fortes vitesses de transit.



**Figure 25 : Courbes de restitution de l'uranine et des bactériophages mis en parallèle avec le débit de la source de la Noiraigue et les précipitations aux Ponts-de-Martel.**

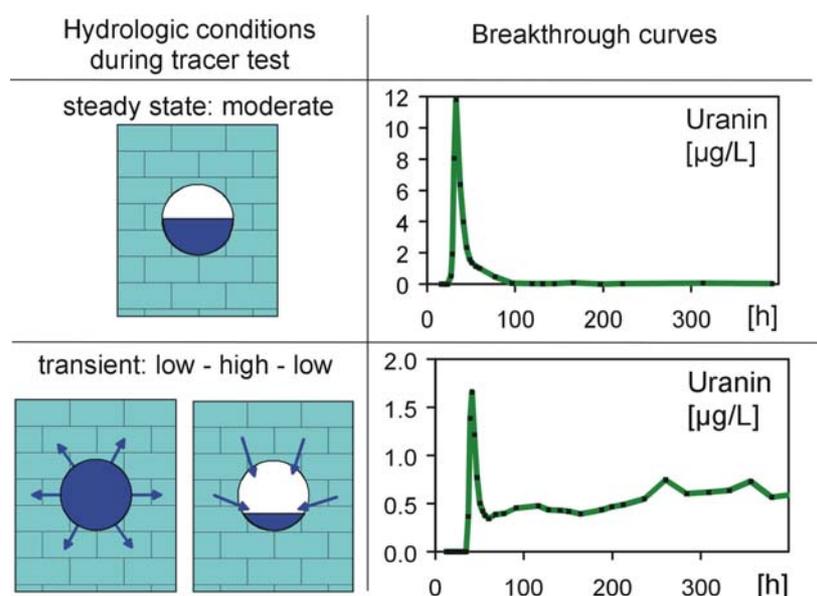
Lors de l'injection, la source se trouvait à l'étiage avec un débit à la source de  $0.73 \text{ m}^3/\text{s}$  (**Figure 25**). Mais un évènement orageux a modifié quelque peu la donne. Un débit de  $7.9 \text{ m}^3/\text{s}$  a été mesuré quelques heures avant l'arrivée des traceurs. Le temps de transit estimé au moment de l'injection a donc été nettement revu à la baisse. Les traceurs sont apparus 83 heures après leur injection. Leurs pics arrivent durant la décrue, à 101 heures pour les phages et 103 heures pour l'uranine.

Sur les deux courbes de restitutions (**Figure 25**), une légère cassure a été observée pendant la montée du pic. Gogniat (1995) a pu vérifier les résultats obtenus par d'autres auteurs sur le temps de réponse entre les sources de la Noiraigue et la Libarde. Les deux sources, distantes de quelques centaines de mètres, avait un temps de réponse différé de 1 à 2 jours suivant les conditions hydriques. Le traceur arrive toujours en premier à la source principale c'est-à-dire la source de la Noiraigue. Ce décalage pourrait donc être la cause du palier observé. Le temps entre la première détection et ce palier est d'environ 7 heures, ce qui est largement inférieur au temps observé dans les études précédentes. Mais il ne faut

pas oublier le caractère exceptionnel de la crue durant l'essai de traçage qui a sans doute réduit cette différence de temps entre les deux sources. Par contre sachant que la Libarde a un débit largement plus bas que celui de la Noiraigue, un deuxième pic de restitution plus grand que le premier n'est pas envisageable. Une autre hypothèse serait le passage des traceurs par un autre conduit approvisionné durant la crue. Une quasi-superposition de deux pics serait tout à fait possible. Cette dernière hypothèse a également été citée pour expliquer les phénomènes de restitutions en multi-pics durant les essais de traçage réalisés en 1995 par Gogniat.

L'hypothèse la plus réaliste reste cependant le piégeage d'une partie des traceurs dans la zone non saturée lors de l'injection en basses eaux. Les précipitations du 17 septembre 2006 semblent remobiliser ces traceurs avec l'apparition du second pic. Le temps de transit entre la hausse du débit concorde parfaitement avec de l'eau arrivant de la perte du Voisinage. Un graphique mettant les temps de transit en fonction du débit a été fait dans la prochaine partie pour certifier cette hypothèse.

La deuxième particularité sur les courbes de restitution est l'augmentation des concentrations de traceurs aux alentours du 24 septembre alors que le débit diminue. Cette croissance ne semble pas liée à l'augmentation du débit. En effet, la concentration en traceurs commence à augmenter environ 60 heures avant la nouvelle crue. Cet effet de retard a déjà été étudié à de nombreuses reprises (Jeannin & Maréchal 1997). L'hypothèse est le piégeage des traceurs dans la fissuration secondaire de la matrice du réseau karstique lors de la mise en compression du conduit durant la crue (**Figure 26**). Pendant la décrue, une partie des traceurs piégés peuvent à nouveau se déverser dans le conduit et provoquer ainsi « un effet de tailing » suivi d'une augmentation des restitutions (Goldscheider 2002). La nouvelle crue remobilise le restant des traceurs piégés.



**Figure 26 : Modèles schématiques expliquant les courbes de restitutions jointes (Goldscheider 2002)**

L'effet de la crue peut être très bien identifié en suivant la restitution des traceurs en microgrammes par seconde (**Figure 27**). Cette nouvelle crue a eu lieu le 25 septembre 2006 durant la phase de remobilisation des traceurs. Son action a été de vidanger totalement le karst de tous traceurs. Une hausse assez prononcée de la restitution puis une baisse rapide

jusqu'à 0  $\mu\text{g/s}$ , pendant que le débit augmente toujours, indiquent que les traceurs ont été entièrement lessivés du système karstique.

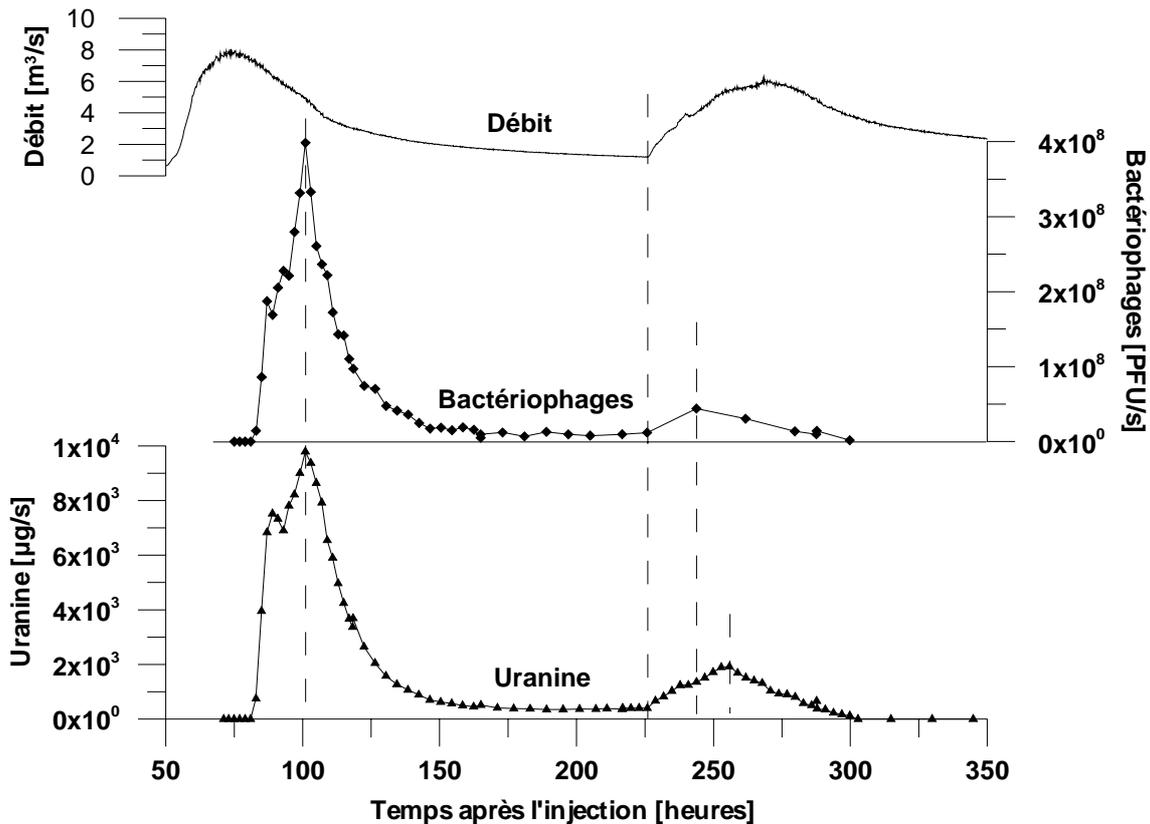
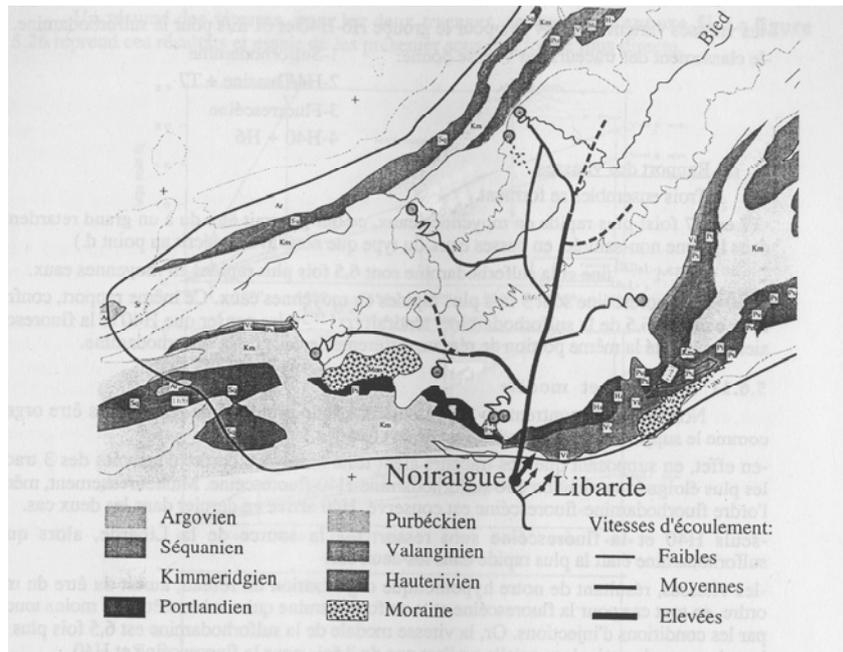


Figure 27 : Restitution de l'uranine en microgrammes par seconde et des bactériophages en PFU/s.

Par contre, uniquement 47.65 % de l'uranine sont revenus à la source. Une des causes possibles est la perte du traceur dans la zone non saturée durant son transfert de l'emposieu à la zone saturée. En effet, la source de la Noiraigue était en période d'étiage lors de l'injection, c'est-à-dire que la charge hydraulique était faible dans l'aquifère, ce qui a révélé des zones non saturées. L'autre possibilité est le piégeage définitif dans la matrice fissurée pendant la première crue.

Un modèle schématique a été réalisé sur la base de deux multi-traçages (Gogniat 1995) (Figure 28). Il donne une explication possible du fonctionnement du système karstique de Noiraigue. Le temps de transit, la restitution et l'ordre d'arrivée des traceurs ont été pris en compte pour la construction de ce modèle. Par contre, il n'a pas pu être testé puisqu'il nécessite l'étude de toutes les pertes simultanément.



**Figure 28 : Modèle schématique du fonctionnement du système karstique de Noiraigue (Gogniat 1995).**

D'après ce modèle, la perte du Voisinage est reliée par deux conduits de moyenne vitesse au réseau principal. Ce double conduit a été imaginé à proximité de la perte car seules les injections effectuées à la perte du Voisinage ont un mode de restitution en double pic. C'est un schéma très intéressant mais il serait préférable de le vérifier avec de nouveaux multi-traçages.

#### 4.4 CONCLUSIONS

L'essai de traçage réalisé à la perte du Voisinage a permis de mettre en évidence la réaction très rapide de la source de la Noiraigue aux précipitations. Le système karstique est très bien développé pour permettre à l'exutoire d'atteindre des débits de l'ordre de  $12 \text{ m}^3/\text{s}$  (valeur maximale enregistrée durant la période d'étude).

Les taux de restitutions pour l'essai de traçage du 15 septembre 2006 sont récapitulés dans le **Tableau 2**.

<i>Traceur</i>	<i>Temps de 1<sup>ère</sup> détection (h)</i>	<i>Temps d'arrivée du pic (h)</i>	<i>Vitesse du pic (m/h)</i>	<i>Taux de restitution (%)</i>
Uranine (3 kg)	83	103	38.1	47.65
Bactériophages ( $4.95\text{E}^{+14}$ )	83	101	38.9	8.48

**Tableau 2 : Synthèse des résultats de l'essai de traçage du 15 septembre 2006.**

Les résultats montrent clairement que les temps d'arrivée pour les traceurs particuliers et chimiques sont quasiment identiques, mais que le maximum des traceurs particuliers arrive avant celui des traceurs chimiques. Les vitesses de l'ordre de 40 m/h démontrent la vulnérabilité de la source de la Noiraigue par rapport à la perte du Voisinage. Celle-ci ayant une action non négligeable dans l'apport total de l'eau de la source. Donc sa qualité dépend en grande partie de la qualité chimique et bactériologique des eaux s'infiltrant à la perte du Voisinage. Or l'eau du Bied est de très mauvaise qualité, avec un taux important de matière organique, de particules en suspension et de bactéries fécales.

## 5 INTERPRÉTATIONS GÉNÉRALES

L'étude des crues d'octobre et de novembre a permis d'identifier les différentes turbidités liées à l'augmentation du débit. Les turbidités autochtone et allochtone ont été clairement distinguées lors des crues de faibles débits. Mais de quelles pertes proviennent ces particules ? Cette question demande une étude beaucoup plus spécifique. Il s'agit d'effectuer, lors de précipitations, des essais de traçage simultanément aux diverses pertes. Tous les paramètres naturels ont comme origine la Vallée des Ponts, par contre leur point d'injection précis n'est pas connu.

L'essai de traçage réalisé le 15 septembre 2006 à la perte du Voisinage constitue un très bon exemple de la complexité de l'interprétation. Dans les résultats de l'essai de traçage (**Figure 25**) ne figurent pas les paramètres tels que le TOC, la température, la conductivité ou la bactériologie. Ces données sont représentées dans le graphe suivant (**Figure 29**).

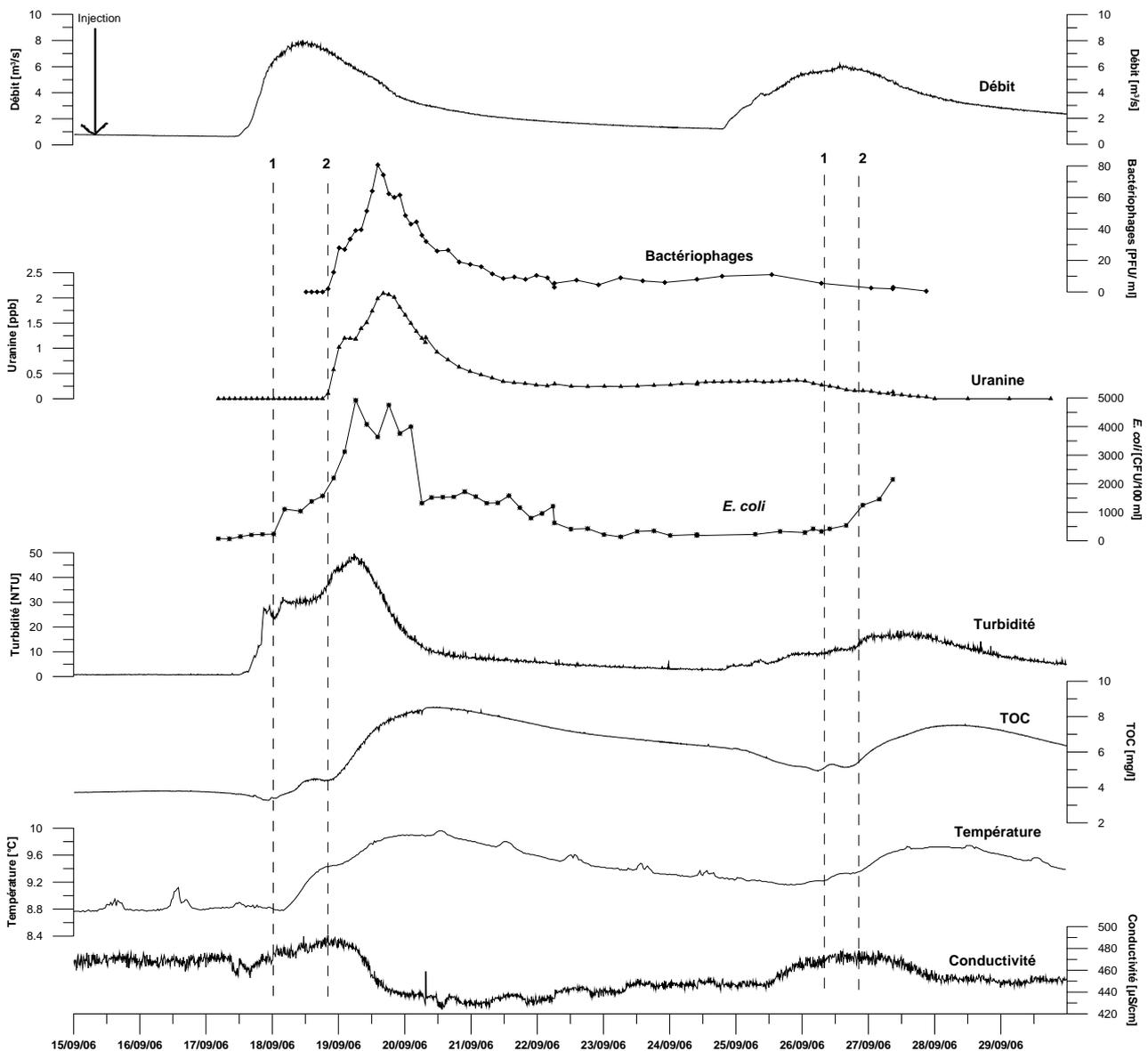


Figure 29 : Evolution des paramètres mesurés pendant l'essai de traçage du 15 septembre 2006.

Le 17 septembre 2006, un orage a provoqué une importante crue à la source. Son débit maximum a été enregistré le 18 septembre avec  $7.9 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cette crue intervient donc deux jours après l'injection des traceurs dans la perte du Voisinage. Le 18 septembre à partir de 0H30, les bactéries fécales commencent leur première apparition à la source (indiqué sur la **Figure 29** par un numéro 1). Leur courbe augmente parallèlement à la turbidité allochtone pour atteindre le pic dans la journée du 18 septembre. Un deuxième pic d'*E. coli* est apparu aux alentours du 19 septembre (numéro 2), soit environ deux jours après le début de la hausse du débit. Les deux arrivées de TOC sont complètement synchrones des deux arrivées de bactéries fécales. Le phénomène se répète pour la crue du 26 septembre. Donc le léger pic de TOC est lié au premier pic de bactéries et le second pic de TOC est lié à la grande arrivée de bactéries. Ceci pouvant être vérifié sur tous les exemples cités dans cette étude. De plus la conductivité électrique baisse lorsque la deuxième arrivée de TOC commence. Or les mesures effectuées sur le Grand Bied durant les crues révèlent des conductivités de l'ordre des  $380 \mu\text{S}/\text{cm}$  ce qui pourrait tout à fait expliquer cette baisse.

Un autre phénomène non explicable celui-ci est le changement de pente dans la courbe du TOC le 22 septembre dans l'après-midi. Cette modification n'est pas due au débit mais liée au début de la hausse de l'uranine.

La **Figure 29** montre que les restitutions des traceurs sont quasiment arrivées en même temps que les *E. coli* et la turbidité allochtone, avec une légère avance par rapport à ces deux derniers. Les traceurs ayant été injectés avant la crue, il serait donc tout à fait censé de dire que les premières bactéries fécales arrivées ne proviennent pas de la perte du Voisinage. Cependant plusieurs hypothèses peuvent être émises concernant l'ordre d'arrivée :

1. Les traceurs ont été retardés dans la zone non saturée du karst puisqu'il y avait un débit très bas à la source ( $0.73 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Les précipitations ont emporté ces traceurs et les bactéries fécales.
2. Les traceurs ont emprunté un chemin de basses eaux, puis les précipitations ont provoqué l'alimentation d'un autre conduit karstique plus rapide, que les bactéries ont alors emprunté.
3. Les premières bactéries fécales proviennent d'autres pertes ou d'affleurements calcaires du Crétacé ou du Malm, situées plus proches de la source que la perte du Voisinage (proches au point de vue des vitesses de transit) (**Figure 30**). Le deuxième pic des bactéries fécales provient alors de la perte du Voisinage.

Le deuxième pic de bactéries fécales a été repéré par un suivi de la PSD pendant le traçage à la date du 26 septembre (**Figure 31**). La PSD de l'essai de traçage n'a pas été traitée car le pas de temps de deux jours entre l'échantillonnage et la mesure aux compteurs de particules a engendré un effet de floculation des particules entre elles. Malgré ce petit désagrément, des résultats peuvent en être tirés.

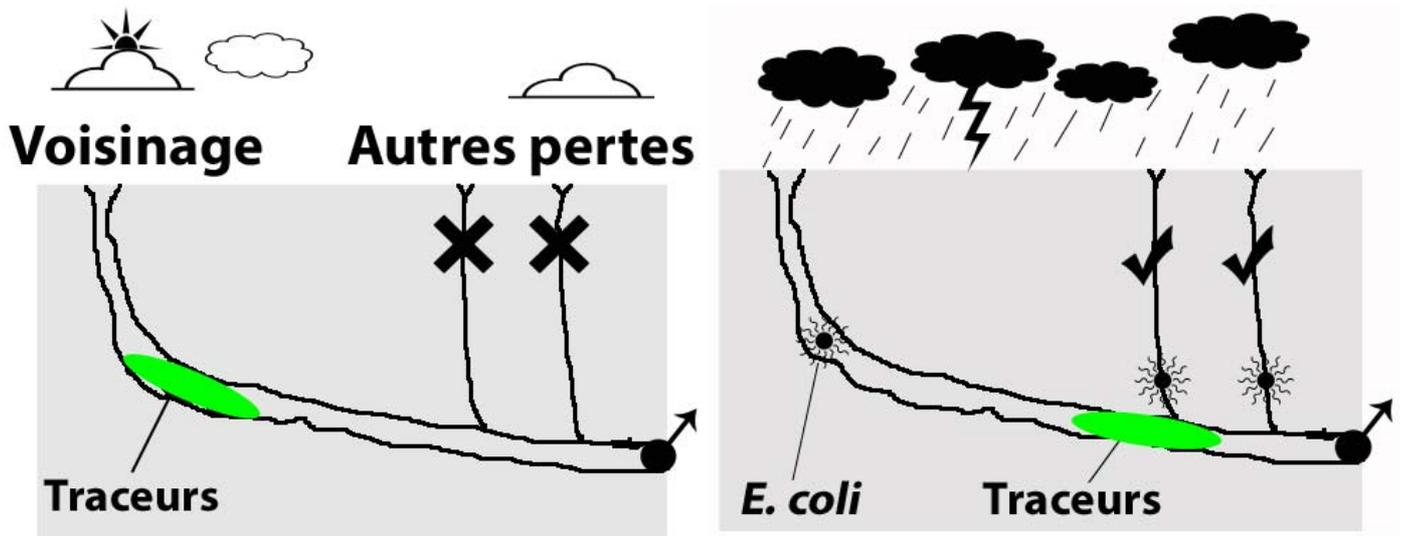


Figure 30 : Schémas explicatifs pour l'arrivée prématurée des bactéries fécales (3<sup>ème</sup> hypothèse). A gauche, situation quelques temps après l'injection des traceurs à la perte du Voisinage, les croix indiquant que les pertes les plus proches de la source de la Noiraigue n'apportent pas de bactéries fécales. A droite, la crue du 17 septembre est représentée avec l'apport de bactéries fécales de toutes les pertes.

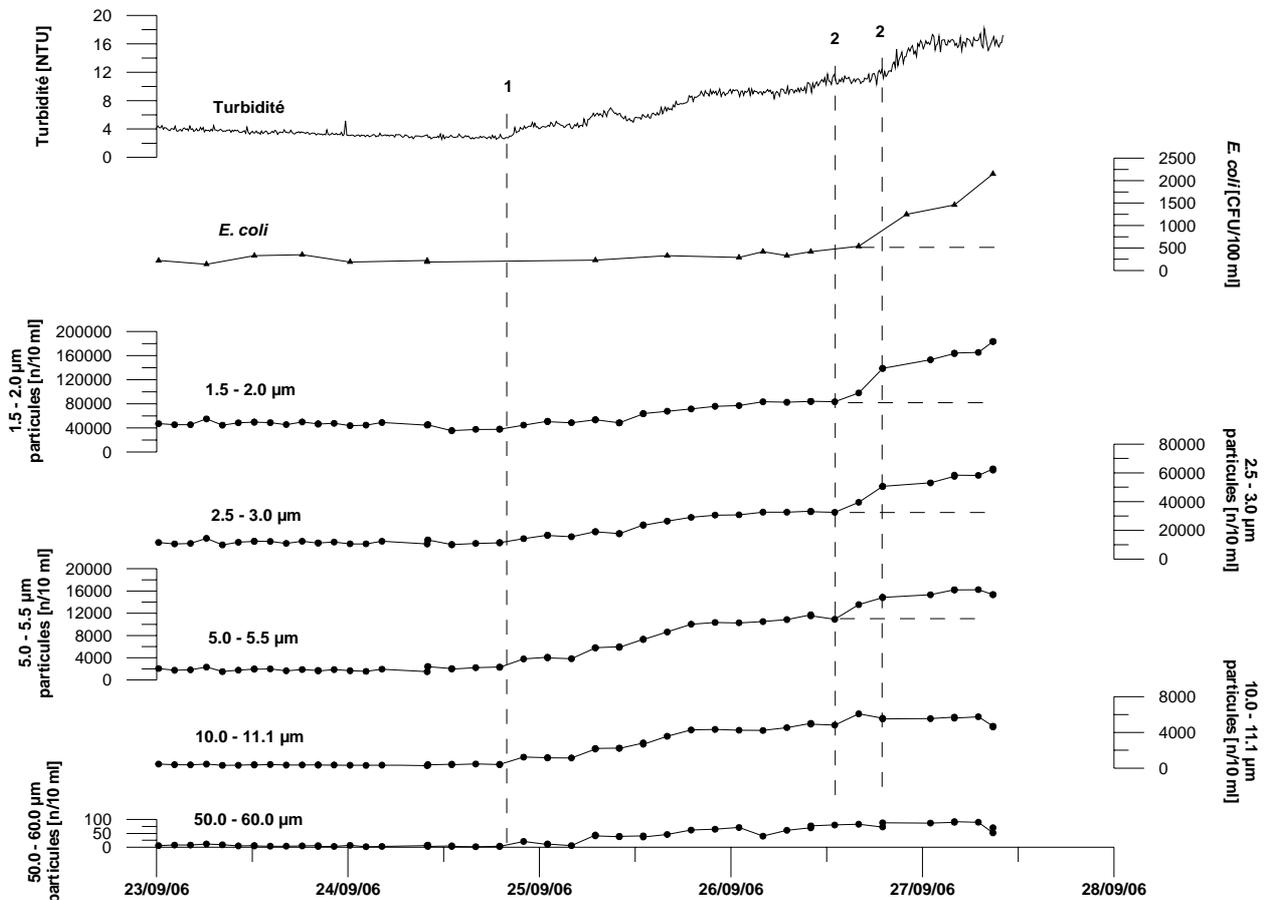
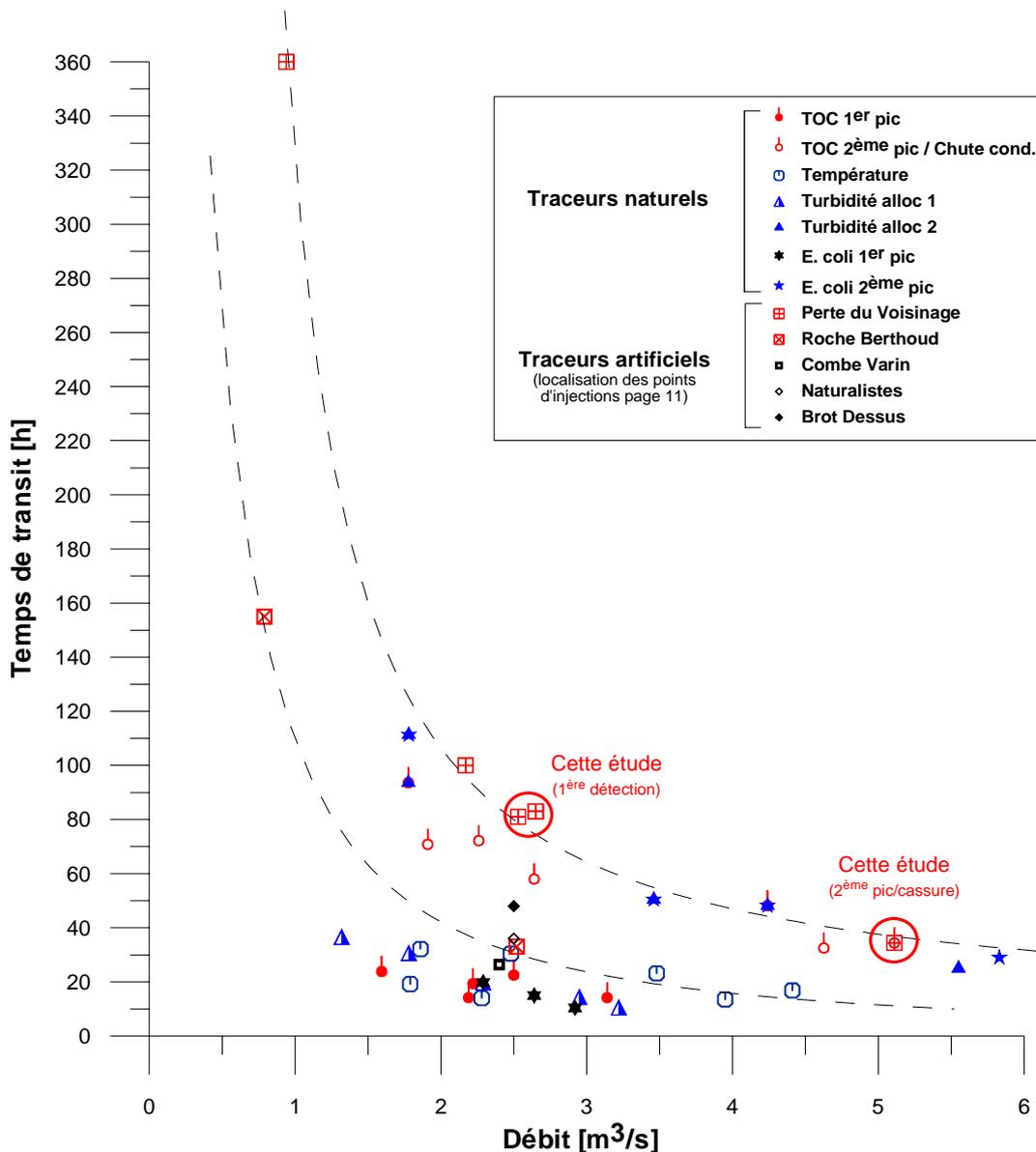


Figure 31 : Distribution en tailles des particules en fin d'essai de traçage du 15 septembre 2006.

Les pointillés verticaux numérotés correspondent au type de turbidité (1 : autochtone et 2 : allochtone). La turbidité allochtone est identifiable d'après la présence des fines particules alors que les plus grosses particules n'apparaissent pas. De plus, la présence d'*E. coli* pendant cette augmentation des fines particules certifie l'affirmation. Les pointillés horizontaux indiquent le seuil de base des particules si aucune turbidité allochtone n'avait été détectée. La droite pointillée n°2 (le 26/09 vers midi) correspond à l'augmentation du premier pic TOC (**Figure 29**) et la droite du 26/09 vers 18h00 concorde à la hausse du second pic de TOC. Ces deux pics de TOC sont donc liés à l'arrivée de bactéries fécales d'origine différente. Il serait intéressant maintenant de connaître la source de ces variations qui se répètent à chaque changement des conditions hydriques.

Le calcul du temps de transit de chaque paramètre est alors requis pour localiser leurs origines sur la Vallée des Ponts et confirmer ou non l'une des hypothèses émises.

La **Figure 32** montre la distribution des temps de transit des traceurs naturels et artificiels en fonction du débit moyen. Pour les traceurs artificiels, les temps de transit ont été calculés à partir de la date d'injection jusqu'à la première détection. Les traçages effectués dans les pertes les plus proches de la source figurent sur le graphe, à savoir les pertes Roche Berthoud, Combe Varin, Naturalistes et Brot Dessus. Les données utilisées sont celles des multi-traçages de Gogniat (1995). La perte du Voisinage y est également représentée. Les traceurs naturels utilisés sont tous les paramètres enregistrés à la source de la Noiraigue observant des variations après les crues. Le temps de transit pour les traceurs naturels se calcule en prenant comme départ la date de l'augmentation du débit jusqu'au début de la variation du traceur concerné. Les traceurs naturels qui figurent dans le graphe sont les suivants : les deux pics de TOC, la température, la chute de conductivité liée à l'arrivée d'une eau moins minéralisée, les deux pics de turbidités allochtones et les deux pics de bactéries fécales. Les deux arrivées de TOC sont quasiment tout le temps calculables, par contre les pics de turbidités allochtones ainsi que les bactéries fécales leur étant associées ne sont pas toujours visibles. En effet, les seconds pics de ces paramètres sont enregistrés uniquement si aucune crue ne vient perturber leur transport pendant au moins trois jours (**Figure 7 et 9**). Ces conditions étaient réunies à quatre reprises.



**Figure 32 : Distribution des temps de transit pour tous les traceurs artificiels ou naturels en fonction du débit moyen. Les courbes correspondent au temps de transit nécessaire pour un traceur naturel ou artificiel injecté à la perte du Voisinage (courbe supérieure) et à la Roche Berthoud (courbe inférieure) en fonction du débit de la source de la Noiraigue. Pour un souci de lisibilité, les temps de transit pour les faibles débits n'ont pas été pris en compte (Annexe C.10).**

Sur la **Figure 32**, deux courbes de tendance sont tracées, l'une pour la perte du Voisinage, l'autre pour la perte de Roche Berthoud. Il est tout de suite notable que tous les traceurs naturels ont un temps de transit inférieur ou égal à celui de la perte du Voisinage.

Divers groupes se distinguent. L'un d'eux est un groupe ayant un faible temps de transit. Dans ce groupe figure le premier pic de TOC, la température, la première turbidité allochtone et le premier pic d'*E. coli*. Le temps de transit est inférieur ou égal à celui de la Roche Berthoud. Donc ces traceurs proviennent des pertes plus rapides que la Roche Berthoud ou de la Roche Berthoud elle-même. D'après les essais de traçage réalisés par Gogniat (1995), Combe Varin est la plus rapide des pertes du bassin. Cette perte pourrait donc alimenter la source avec ces éléments. Mais il est aussi possible qu'ils s'agissent de fuites dans le réseau de drainage installé sur toute la Vallée des Ponts qui auraient provoqué ces arrivées rapides de traceurs naturels. En effet, les pertes des Naturalistes, de la Combe

Varin pour ne citer que les plus proches de la source sont équipées d'une chambre souterraine canalisée permettant une meilleure évacuation des eaux du bassin. Ceci pourrait jouer dans le temps de transit puisque ces eaux sont évacuées et infiltrées plus rapidement que les eaux atteignant naturellement les pertes. Les temps de transit pour ce groupe ne dépassent pas les 40 heures.

Un autre groupe de temps de transit plus important est visible sur la **Figure 32**. Ce groupe comporte le deuxième pic de TOC (le plus imposant) associé à la chute de conductivité, la deuxième turbidité allochtone et le second pic d'*E. coli*. Ce groupe est situé sur et légèrement sous la courbe de tendance de la perte du Voisinage. Donc ces traceurs proviennent soit de cette perte, soit d'une perte plus proche en temps de transit. La perte du Brot Dessus est la perte ayant un temps compris entre la Roche Berthoud et le Voisinage. Par contre la perte du Brot Dessus est trop rapide par rapport au groupe repéré. Mais une seule mesure du temps de transit de la perte du Brot Dessus ne suffit pas pour conclure.

Durant l'essai de traçage, la cassure dans la courbe de restitution de l'uranine vraisemblablement provoquée par une remobilisation du traceur lors des précipitations, a également été placée sur la **Figure 32**. Le temps de transit calculé coïncide avec l'arrivée du deuxième pic de bactéries fécales et de la chute de la conductivité électrique. Le point figure aux alentours des 5.2 m<sup>3</sup>/s pour un temps inférieur à 40 heures. Donc l'hypothèse que le traceur ait été stoppé dans la zone non saturée du karst due à la période d'étiage lors de l'injection est fort probable.

L'erreur sur les temps étant non négligeable, aucune affirmation ne peut être certifiée. Mais il ressort nettement du graphique que les deux pics de TOC proviennent bien de différentes pertes. Les bactéries fécales et la turbidité ont également le même fonctionnement. Le premier pic de TOC (le léger bombement) est lié aux premières arrivées de bactéries fécales et à la première turbidité allochtone. C'est de l'eau issue de la Vallée des Ponts, d'où la hausse (en hiver le contraire) de la température au même instant. Ces traceurs ne proviennent pas de la perte du Voisinage mais plutôt de la Roche Berthoud, des Naturalistes ou de la Combe Varin.

La deuxième arrivée de TOC est liée à la venue de la seconde turbidité allochtone, au deuxième bombement de bactéries fécales et à la chute de la conductivité électrique. Ces traceurs naturels semblent provenir de la perte du Voisinage, mais ayant un temps de transit légèrement plus rapide que les temps de transit établis par les essais de traçage. Il faut aussi tenir compte de l'erreur commise sur le calcul du temps de transit. La perte du Voisinage contribuant à un tiers de l'eau de la source est sans doute à l'origine des arrivées des deuxièmes pics de turbidité allochtone, de TOC et d'*E. coli*. Les mesures manuelles contribuent à rendre cette hypothèse plus qu'acceptable.

Les deux premières hypothèses précédemment citées page 51 sont donc réfutées partiellement. Il ne s'agit donc pas d'un effet de retard des traceurs dans la zone non saturée ou d'un conduit plus rapide, mais plutôt d'un piégeage dans cette zone non saturée. Une part des bactéries fécales provient d'une perte ou d'un affleurement calcaire très proche de la source et l'autre part plus importante a comme origine la perte du Voisinage.

Le comportement du système est peut-être tel que Gogniat (1995) l'a expliqué (**Figure 28**). Les différentes pertes agissent sur les paramètres enregistrés à la source de la Noiraigue. D'après cette étude, lors des précipitations ce sont les éléments s'infiltrant dans la zone la plus proche de la source qui entraînent la première variation de toutes les mesures. Les substances s'infiltrant dans la perte du Voisinage n'interviennent que plus tard avec un pic de matière organique très élevé ainsi qu'une seconde turbidité allochtone souvent associée à une contamination bactérienne.

## 6 CONCLUSIONS

Durant les 5 mois passés sur le site de la source de la Noiraigue et à la Vallée des Ponts, les relations liant les traceurs naturels, qu'ils soient particulaires ou solubles, ont pu être mises en évidence. Un certain nombre de caractéristiques, citées ci-après, a ainsi été identifié et mesuré par le suivi de divers paramètres.

La hausse de la température en saison estivale (ou réciproquement sa baisse en saison hivernale) mesurée à la source de la Noiraigue coïncide parfaitement avec la première augmentation de TOC.

L'augmentation de la conductivité électrique est en corrélation avec l'arrivée du TOC. Si la crue à la Vallée des Ponts est imposante, l'eau arrivant à la source est d'autant plus diluée et donc la conductivité chute. Cette baisse accompagne la seconde venue de TOC.

Le TOC observe une légère baisse au moment où le débit commence à augmenter. L'eau du karst pauvre en matière organique est remobilisée par la mise en pression du système d'où cet effet de dilution.

Les deux pics de TOC sont accompagnés de turbidités allochtones différentes. La turbidité autochtone produite par la mise en pression du karst n'est jamais liée à l'augmentation de TOC ou de bactéries fécales. Lors de grandes crues, ces turbidités sont quasi superposées et leur étude devient compliquée. Mais en analysant des faibles crues, il est possible de séparer ces turbidités et de calculer un temps de transit pour toutes les substances étudiées.

Les bactéries fécales, indicatrices d'une possible contamination de pathogènes, ont montré que leur venue est directement liée à la turbidité allochtone. Des exemples dans cette étude ont montré que leur détection à la source dépend de leur présence sur le bassin d'alimentation. En effet, lors de crues simultanées, les sols sont lessivés à la première crue, ne laissant donc plus assez de bactéries pour une seconde crue proche dans le temps. L'arrivée principale d'*E. coli* est synchrone avec la seconde turbidité allochtone et le second TOC.

Les particules ont été analysées grâce à un compteur spécifique donnant leur distribution en tailles. De très intéressants résultats ont pu être tirés de leur étude durant deux épisodes pluvieux. La crue d'octobre 2006 a permis de bien comprendre le comportement du système karstique. L'augmentation du débit à la source survient quelques heures après le début des précipitations sur la vallée. Il en résulte la mise en pression du système et la remobilisation des particules sédimentées dans les conduits pour donner la turbidité autochtone. Celle-ci se caractérise par la présence de toutes les tailles de particules. Un second pic de turbidité arrive plus tard alors que le débit est en train de diminuer. En revanche, aucune particule de grande taille n'est détectée lors de ce pic. Il coïncide avec la venue de bactéries fécales et du TOC, il est donc allochtone puisque le TOC et les *E. coli* sont de très bons indicateurs de l'arrivée d'eau du bassin. Une autre série de crues a également été échantillonnée pour observer la distribution des tailles de particules. Le même phénomène est à nouveau visible, la turbidité autochtone comprenant toutes les gammes de tailles de particules et la turbidité allochtone uniquement les particules de fins diamètres. Une seconde turbidité allochtone a été détectée lors de cette campagne et elle est associée à l'arrivée du second pic de TOC (le plus grand), les bactéries fécales faisant également leur réapparition.

L'essai de traçage du 15 septembre 2006 a démontré que le temps de transit peut très vite changer. D'après les données des essais précédents, il a été estimé à environ 15 jours, du fait du faible débit de la source à l'injection. Une partie des traceurs sont restés piégés dans la zone non saturée du karst, mais d'intenses précipitations les ont remobilisées, emmenant avec elles le TOC et les bactéries fécales, modifiant profondément le temps de transit. La légère cassure dans les courbes de restitution en témoigne. Le temps de première détection a donc été raccourci à 3 jours et demi. Les taux de restitutions ont été de 48 % pour l'uranine et de 8 % pour les bactériophages H40/1. Cet essai de traçage a permis d'ajouter des données intéressantes pour la compréhension globale du système karstique de Noiraigue.

Les temps de transit pour les traceurs naturels solubles et particuliers entre la Vallée des Ponts et la source de la Noiraigue sont très variables. Mais en faisant un graphe des temps de transit en fonction du débit moyen, il est possible de retrouver l'origine de chacune des substances s'infiltrant dans cette vallée. Il a ainsi été démontré que le premier pic de TOC, la première turbidité allochtone, les premières arrivées de bactéries fécales et le changement de température sont liés par leur origine commune à une courte distance de la source. Les pertes de la Roche Berthoud, de la Combe Varin et des Naturalistes peuvent en être la source (origine). Le réseau de drainage situé dans ce secteur de la vallée peut également contribuer à l'accélération des infiltrations.

Le second pic de TOC de forte amplitude, la deuxième turbidité allochtone, la variation de la conductivité et la seconde arrivée d'*E. coli* sont synchrones et originaires d'une zone plus éloignée de la source. La perte du Voisinage semble être l'endroit clé de ces infiltrations. Les mesures manuelles faites à la perte sur la bactériologie et la matière organique confirment cette hypothèse. Il ne faut surtout pas oublier que les infiltrations directes via les affleurements calcaires du Crétacé et du Malm contribuent à environ 2/3 (valeur non vérifiée) du débit de la source (Gogniat 1995).

Il ressort de cette étude que le TOC, les particules, la température et la conductivité sont tous des traceurs de bonne qualité ayant des variations communes. Leur suivi en continu permet de repérer l'arrivée de bactéries, indicatrices d'une possible contamination. Mais comme il a été montré dans ce mémoire, ces paramètres, à l'exception des particules, ne peuvent pas toujours être utilisés comme indicateur de l'arrivée de l'eau de la Vallée des Ponts. En effet leurs variations n'est plus exploitable dès lors que les crues sont trop rapprochées dans le temps. Par contre le compteur de particules permet toujours de distinguer les différentes turbidités quelles soient autochtones ou allochtones. Mais une compréhension du site est nécessaire avant de pouvoir utiliser ce type de compteur pour des sources reliées au réseau d'eau potable.

La chimie des eaux s'infiltrant aux pertes n'a pas montré de variation notable durant les quelques mois de l'étude. Son suivi sur une année hydrique couplé avec les traceurs naturels permettrait d'en savoir plus sur les liens pouvant exister entre eux.

Il serait d'une grande utilité de réaliser, à l'occasion de prochaines études, plusieurs campagnes de multi-traçage sur toutes les pertes précédemment citées lors de conditions hydriques différentes. Ceci serait le moyen de localiser précisément les sources (origines) des traceurs naturels et particuliers à la Vallée des Ponts. De nombreuses incertitudes demeurent quant au fonctionnement du système karstique de Noiraigue. Des études complémentaires seraient l'occasion d'apporter des réponses aux données existantes sur le fonctionnement global de ce site.

## 7 BIBLIOGRAPHIE

ATTEIA O. 1995. Essai de traçage au « Voisinage », Vallée de la Sagne / NE. Rapport du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, Univ. Neuchâtel, non publié.

ATTEIA O., GOGNIAT S., KOZEL R. 1996. Apport de l'hydrogéologie, de la géophysique et des essais de traçage à la connaissance de l'aquifère karstique de la Noiraigue (Jura neuchâtelois, Suisse). Bull. d'Hydrogéologie, Univ. Neuchâtel, 15 : 33-61.

ATTEIA O., KOZEL R. 1997. Particle size distributions in waters from a karstic aquifer : from particles to colloids. Journal of Hydrology 201(1-4) : 102-119.

BATIOT C. 2002. Etude expérimentale du cycle du carbone en régions karstiques. Apport du carbone organique et du carbone minéral à la connaissance hydrogéologique des systèmes. Site expérimental de Vaucluse, Jura, Larzac, Région Nord-Montpelliéraine, Nerja (Espagne). Thèse, Univ. d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 247 pp.

BLONDEL T., BATIOT-GUILHE C., EMBLANCH C., DUDAL Y. 2006. Perspectives sur l'utilisation de la fluorescence de la matière organique comme traceur quantitatif du temps de séjour dans un système karstique méditerranéen. Application au Laboratoire Souterrain à Bas Bruit. - Proc. 8th Conference on Limestone Hydrogeology, Neuchâtel (Switzerland) 21-23 sep. 2006, p. 11-14. Presses universitaires de Franche-Comté, Besançon, France.

BOUYER Y., KUBLER B. 1981. Hétérogénéité chimique et hydrologique des eaux souterraines d'un karst du Haut-Jura neuchâtelois. Journal of Hydrology, 54 : 315-339.

BURGER A. 1959. Hydrogéologie du bassin de l'Areuse. Thèse, Neuchâtel - GIGON, R. 1976. Inventaire spéléologique de la Suisse, Tome 1 : Canton de Neuchâtel. éd. Comm. de spéléologie de la SHSN, Neuchâtel, p. 127 SCHARDT, H. & DUBOIS, A.

BURKHARD M., BOUZELBOUDJEN M., AFFOLTER T., BUNZLI M.-A. 2000. Carte géologique du Val de Travers 1 : 25'000. Institut de géologie, Univ. Neuchâtel.

DESOR E. 1865. Expériences faites pour connaître le temps de parcours des eaux depuis les Ponts jusqu'aux sources de la Noiraigue. Bull. Soc. neuch. Sci. nat., 7, 37-40.

DONNENBERG M. 2002. Escherichia coli : Virulence Mechanisms of a versatile Pathogen. Editions Lavoisier : 416 pp.

EMBLANCH C. 1997. Les équilibres chimiques et isotopiques du carbone dans les aquifères karstiques : étude en région méditerranéenne de montagne. Thèse, Univ. d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 198 pp.

FORD D. C., WILLIAMS P. W. 1989. Karst Geomorphology and Hydrology. Unwin Hyman, London.

GRETILLAT P.-A. 1986. Géologie avec étude géophysique de l'extrémité sud-ouest de la Vallée des Ponts. Travail de diplôme, Univ. Neuchâtel.

GRETILLAT P.-A., BOUYER Y., MÜLLER I. 1987. Un exemple d'utilisation de la géophysique électromagnétique (VLF-R et bipôle) pour l'étude de la fracturation au nord de la source karstique de la Noiraigue. Bull. d'Hydrogéologie, Univ. Neuchâtel, 7 : 335-346.

GOGNIAT S. 1995. Etude des infiltrations rapides de l'aquifère de la Noiraigue (Neuchâtel, Suisse). Travail de diplôme, Univ. Neuchâtel, 113 pp.

GOLDSCHIEDER N. 2002. Hydrogeology and vulnerability of karst systems. Examples from the Northern Alps and Swabian Alb. PhD, University of Karlsruhe. Schr Angew Geol Karlsruhe 68 : 1-236.

HAUNS M. 1999. Modeling tracer and particle transport under turbulent flow conditions in karst conduit structures. PhD Thesis, Univ. Neuchâtel, 88 pp.

ISCHER A. 1935. Les tourbières de la vallée des Ponts-de-Martel. Bull. Soc. Neuchâtel, Sci. Nat. 60 : 77-164.

JEANNIN P.-Y., MARECHAL J.-C. 1997. Dispersion and tailing of tracer plumes in a karstic system (Milandre, JU, Switzerland). Sciences & Techniques de l'Environnement, Univ. de Franche-Comté, mémoire hors-série n°12 : 149-152.

KIRALY L. 1970. Carte hydrogéologique du Canton de Neuchâtel 1 : 25'000. CHYN, Univ. Neuchâtel, Suisse.

KIRALY L. 1973. Notice explicative de la carte hydrogéologique du Canton de Neuchâtel. Suppl. Bull. Neuchâtel. Sci. Nat., 96 : 1-16.

LES GORGES DE L'AREUSE. 1986. Ouvrage collectif publié à l'occasion du centième anniversaire de la Société des Sentiers des Gorges de l'Areuse. Eds. A la Baconnière.

MAHLER B.J., PERSONNE J.-C., LODS G. F., DROGUE C. 2000. Transport of free and particulate-associated bacteria in karst. Journal of Hydrology 238 : 179-193.

MASSEI N. 2001. Transport de particules dans l'aquifère crayeux karstique et à l'interface Craie/alluvions. PhD Thesis, Université de Rouen, Mont-Saint-Aignan, 195 pp.

MASSEI N. WANG H. Q., DUPONT J. P., RODET J. LAIGNEL B. 2003. Assessment of direct transfer and resuspension of particles during turbid floods at a karstic spring. Journal of Hydrology 275 : 109-121.

MISEREZ J.-J. 1973. Géochimie des eaux du karst jurassien. Contribution physico-chimique à l'étude des altérations. Thèse de doctorat, Univ. Neuchâtel, 313 pp.

MONDI C. 1999. Formation et devenir de colloïdes associant matière organique et fer dans les eaux drainant les tourbières d'un bassin karstique : étude physico-chimique et microscopique. Thèse de doctorat, Univ. Lausanne, 248 pp.

MOREL G. 1976. Etude hydrogéologique du bassin de la source de la Noiraigue (Jura). Rapport du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, Univ. Neuchâtel, Suisse, non publié.

MÜLLER I. 1982. Multitraçage des eaux souterraines karstiques dans le bassin de la source de l'Areuse (Jura Neuchâtelois, Suisse). Bull. du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, Univ. Neuchâtel, 4 : 7-40.

PALMATEER G., MACLEAN D., KUTAS W., MEISSNER S. 1993. Suspended particulate/bacterial interaction in agricultural drains. S. S. RAO, 1-40.

POMMEPUY M., GUILLAUD J., DERRIEN A., LE GUYADER F., CORMIER F. 1992. Enteric bacteria survival factors. Water Sci. Technol. 25 (12), 93-103.

PRONK M. 2003. Turbidité, COD et bactériologie dans les eaux karstiques. Exemple des sources du Moulinet, Yverdon-les-Bains. Travail de diplôme, CHYN, Univ. Neuchâtel, 96 pp.

PRONK M, GOLDSCHIEDER N.& ZOPFI J. 2006a. Dynamics and interaction of organic carbon, turbidity and bacteria in a karst aquifer system. Hydrogeology Journal, 14: 473-484.

PRONK M., GOLDSCHIEDER N. & ZOPFI J. 2006b. Monitoring of organic carbon, natural particles and bacteria in a deep karst system, Yverdon-les-Bains, Switzerland. - Proc. 8th Conference on Limestone Hydrogeology, Neuchâtel (Switzerland) 21-23 sep. 2006, p. 215-219. Presses universitaires de Franche-Comté, Besançon, France.

RIBONI E., ROBERT M. 2001. Les méthodes de désinfection de l'eau : Avantages et inconvénients respectifs entre le chlore – U.V. – ozone – microfiltration. Note technique, Ozone.ch SARL, 2017 Boudry, Suisse.

RODIER J. 1996. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Editions Dunod, Paris : 1383 pp.

ROSSI P, CARVALHO DILL A., MÜLLER I., ARAGNO M. 1994. Comparative tracing experiments in a porous aquifer using bacteriophages and fluorescent dye on a test field located at Wilerwald (Switzerland) and simultaneously surveyed in detail on a local scale by radio-magneto-tellury (12-240 kHz). Env. Geol., 23 : 192-200.

SCHNEGG P.-A. 2002. An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement. Groundwater and Human Development, Univ. Neuchâtel, ISBN 987-544-063-9.

SCHNEGG P.-A. 2006. Illustrations du fonctionnement de la fluorescence et du spectrofluorimètre. Cours du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, Univ. Neuchâtel.

SINREICH M. 2006. Microsphères de verre : un traceur pour la simulation du transport sédimentaire. Université de Neuchâtel, Suisse. - Proc. 8th Conference on Limestone Hydrogeology, Neuchâtel (Switzerland) 21-23 sep. 2006, p. 249-252. Presses universitaires de Franche-Comté, Besançon, France.

SOMMARUGA A. 1997. Geology of the central Jura and the molasse basin : new insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt. Mémoire de la société neuchâteloise des sciences naturelles, Tome XII, Neuchâtel, 175 pp.

THIERRIN J. 1987. Zones de protection du puits de captage de la Brévine. Commune de la Brévine. Rapport du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, Univ. Neuchâtel, inédit.

THURMAN E. 1985. Organic chemistry of natural waters. Nijhoff, Junk, Dordrecht, 497 pp.

VALLEY B. 2002. La Vallée des Ponts-de-Martel : Rétro-déformation 3-D d'une structure complexe dans le Jura neuchâtelois. Travail de diplôme sciences de la terre BeNeFri, Univ. Neuchâtel, 107 pp.

WHITE P. 1988. Geomorphology and Hydrology of karst Terrains. Oxford University Press, New York.

ZWAHLEN F. (ed.) 2004. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, final report (COST action 620). European Commission, Brussels.

## 8 ANNEXES

### A. MÉTHODOLOGIE

#### A.1 PARAMÈTRES PHYSIQUES

##### A.1.1 Débit

Une sonde de pression STS DL/N 64 a été installée. Celle-ci mesure toutes les dix minutes, la pression hydrostatique qui correspond à la lame d'eau au-dessus de la sonde. Une variation de la pression hydrostatique équivaut ainsi à une variation de la hauteur du niveau d'eau.

Le point de jaugeage est situé après le pont à 100 m en aval de la source de la Noiraigue (à proximité du petit pont en bois). Dans la littérature, ce point de mesure est souvent appelé « Station CHYN » car il a servi à de nombreuses reprises comme point de mesure. C'est d'ailleurs à cet endroit que fut dressée une courbe de tarage du débit en fonction de la hauteur d'eau fait par le Service Hydrologique et Géologique National (SHGN ; Berne, Suisse). Une campagne de jaugeage a permis de vérifier la courbe de tarage (**Figure A.1**).

Deux techniques de jaugeage ont été utilisées : le jaugeage au sel et la méthode du flotteur. La technique la plus fiable pour des écoulements torrentiels tels qu'à la source de la Noiraigue est le jaugeage au sel.

Le jaugeage au sel consiste à injecter dans la rivière une masse connue de chlorure de sodium (NaCl), préalablement diluée dans un volume d'eau et injecté en amont du point de mesure. Un conductimètre de terrain (type WTW 340i) est placé de telle sorte que la sonde mesure au milieu de la rivière en aval du point d'injection. L'injection de la saumure doit se faire à une distance suffisante pour permettre un bon mélange dans toute la section de la rivière.

La sonde enregistre en continu la conductivité électrique de l'eau en micro Siemens par centimètre [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]. Une relation linéaire a été étalonnée entre la conductivité électrique et sa concentration en sel dissous. Au passage du nuage de sel, le conductimètre enregistre la courbe de concentration de sel en fonction du temps. L'enregistrement peut être arrêté lorsque la conductivité électrique initiale est à nouveau atteinte. Le débit est obtenu en divisant la masse de sel injectée par l'aire sous la courbe de restitution des conductivités électriques :

$$Q = \frac{M}{I}$$

$Q$  : débit de la rivière [l/s]

$M$  : masse de sel injectée [kg]

$I$  : aire sous la courbe de restitution des concentrations du sel [kg.s/l]

La courbe de tarage de la source de la Noiraigue est donnée par l'équation suivante, établie par le SHGN dans les années 1970 :

$$Q[m^3 / s] = 5.787 \cdot H0[m] + 10.01 \cdot H0^2[m]$$

où  $H0$  représente la lame d'eau.

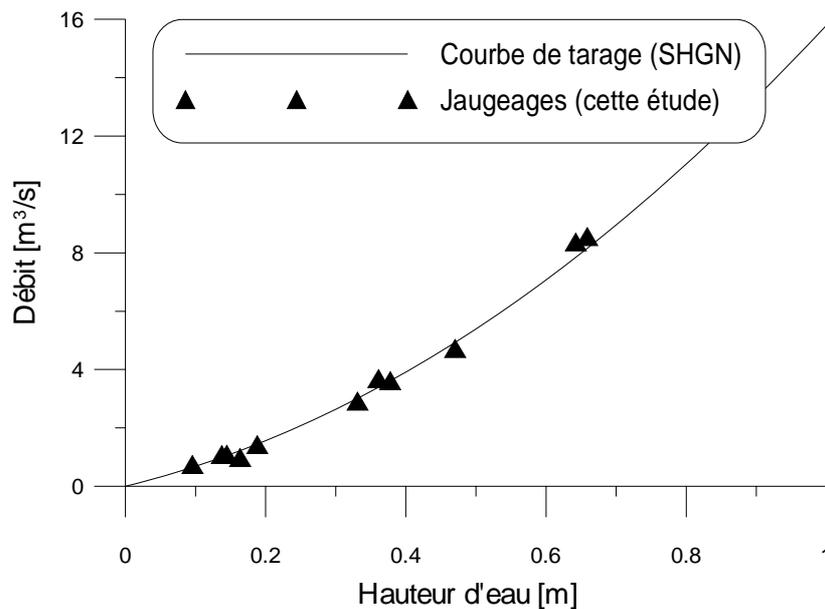


Figure A.1 : Courbe de tarage pour la source de la Noiraigue.

Comme mentionné ci-dessus, le niveau de référence ( $H0 = 0$  m) n'étant pas connue avant la présente étude, la campagne de jaugeage a permis de fixer cette référence. Pour utiliser l'équation du SHGN, la sonde doit être placée au niveau de la grande vis (10 mm de diamètre) du côté amont sous la niche, à côté du petit pont de bois. Il suffit de placer la sonde à 97.7 cm sous le bas de la vis pour avoir  $H0$  de l'équation (Figure A.2). L'erreur sur la mesure de ce point de référence est de  $\pm 2$  cm, soit  $\pm 360$  l/s pour un débit de 9 m<sup>3</sup>/s.



**Figure A.2 : Photographie de la « station CHYN ». Le point de référence est la vis de 1 cm de diamètre à 20.8 cm du bord. Le niveau d'eau de référence  $H_0$  de l'équation de tarage se trouve à 97.7 cm sous la vis.**

Un jaugeage a également été effectué sur le Bied à la Vallée des Ponts. Pour le jauger, la technique du flotteur a du être employée étant donné que l'écoulement est laminaire avec des vitesses très lentes de l'ordre de 9 m/min.

Le jaugeage au flotteur consiste à mesurer le temps de parcours entre deux sections d'espacement connu d'un objet flottant ou submersible. Cette méthode mesure uniquement des vitesses d'écoulement de surface ou proche de celle-ci. Le jaugeage a été effectué sous le pont à proximité de la jonction du Grand Bied et du Petit Bied. C'est une méthode qui donne de bonnes approximations du débit suffisantes pour l'étude.

La perte du Voisinage n'étant pas l'unique perte alimentant la source de la Noiraigue, la mesure du débit sur le bassin n'a pas été d'une grande importance.

L'erreur commise sur les mesures de hauteur d'eau de la sonde de pression STS DL/N 64, est d'environ  $\pm 1$  cm c'est-à-dire une erreur du débit de  $\pm 190$  l/s pour un débit de  $9 \text{ m}^3/\text{s}$  de la source.

### A.1.2 Température

La température a été mesurée en continue par intervalle de trente minutes, à la source de la Noiraigue grâce au Data Taker DT 50 couplé à une sonde de température. Une mesure manuelle hebdomadaire au conductimètre de terrain WTW 340 i a été utilisée pour le calibrer.

L'erreur sur la mesure de la température est de  $\pm 0.1$  °C.

### A.1.3 Conductivité électrique

La sonde mesure la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm<sup>2</sup> de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm. L'unité de conductivité électrique est le micro-siemens par centimètre ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Elle a été mesurée en continu à la source de la Noiraigue grâce au fluorimètre #194 modèle GGUN-FL30 (Geomagnetism Group of the University of Neuchâtel) calibré pour prendre des mesures toutes les dix minutes. La conductivité électrique a été calibrée par le conductimètre de terrain WTW 340 i.

L'erreur commise sur la mesure de la conductivité électrique est de l'ordre de 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### A.1.4 Turbidité

La turbidité a été mesurée en continu, avec un pas de temps de dix minutes, par le fluorimètre #194 modèle GGUN-FL30 (**Figure A.3**), calibré préalablement en laboratoire avec des standards de Formazine (Rodier 1996).



**Figure A.3 : Photographie du fluorimètre de terrain #194 GGUN-FL30 et de son boîtier d'enregistrement des données, installé à la source de la Noiraigue.**

Le fluorimètre de terrain GGUN-FL30 est conçu pour mesurer la concentration de différents traceurs artificiels dans l'eau. En effet, la sonde comporte une triple optique dans la gamme suivante : bleue  $\lambda = 470$  nm (uranine, éosine), verte  $\lambda = 525$  nm (rhodamine), UV  $\lambda = 370$  nm (tinopal, naphthionate) pour la détection simultanée de 3 traceurs différents (**Figure A.4**). Ces concentrations sont corrigées grâce à une quatrième optique mesurant la turbidité de l'eau à une longueur d'onde de  $\lambda = 660$  nm (rouge). Elle se mesure en faisant passer un faisceau lumineux à travers l'eau circulant librement dans le tube centrale en verre. La turbidité est déterminée en mesurant la lumière qui est diffusée par les particules en suspension à un angle de 90°.

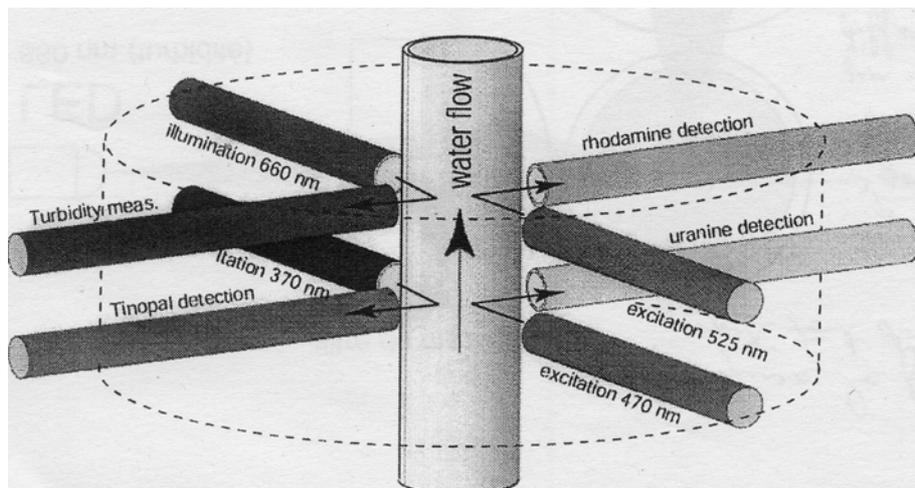


Figure A.4 : Schéma de fonctionnement des fluorimètres GGUN-FL30 (Schneegg 2002).

### A.1.5 Distribution en taille des particules (PSD)

Ce compteur enregistre la gamme de particules de 0.9  $\mu\text{m}$  à 139  $\mu\text{m}$  contenues dans 10 ml d'échantillon. L'échantillon d'eau passe à travers un tube de 0.3 mm de diamètre illuminé par un faisceau laser ( $\lambda = 655 \text{ nm}$ ). Un détecteur enregistre l'ombre créée par chaque particule. C'est ainsi qu'il est possible d'obtenir la taille des particules et leur nombre (nombre max. de particules naturelles :  $>10^5/\text{ml}$ ). Le compteur donne la distribution cumulée du nombre de particules ainsi que la distribution par gammes de tailles.

Durant les mois d'octobre et de novembre 2006, deux séries d'intempéries ont été mesurées avec un pas de temps d'une heure. Des mesures hebdomadaires ont également été réalisées à la source de la Noiraigue et à la perte du Voisinage.

## A.2 PARAMÈTRES CHIMIQUES

### A.2.1 TOC

Le carbone organique a été mesuré en continu par le fluorimètre de terrain #194 GGUN FL30 à la source de la Noiraigue. Le carbone organique total (COT ou TOC en anglais) peut être mesuré avec l'optique UV ( $\lambda = 370 \text{ nm}$ ). En effet, la concentration en TOC d'une eau est liée par une relation avec la fluorescence naturelle (communication orale de L. Savoy). Un échantillonnage hebdomadaire a également été réalisé afin de calibrer les mesures grâce au spectrofluorimètre Perkin Elmer LS50B du laboratoire du CHYN (principe de fonctionnement en A.4.1). La méthode consiste en un scan synchrone avec une excitation de 250 à 400 nm et un  $\Delta\delta$  de 100 nm.

L'unité de mesure du TOC sur le fluorimètre est le millivolt (mV). Cette unité non usuelle de mV peut être convertie en mg/l de TOC d'après la calibration effectuée par le spectrofluorimètre.

$$TOC[\text{mg} / \text{l}] = 0.298197 \cdot TOC[\text{mV}] + 0.937255$$

L'erreur sur le TOC en mg/l peut être estimée à environ 10%.

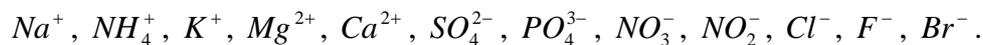
### A.2.2 Cations et anions

Ces analyses ont été faites au laboratoire du CHYN à l'Université de Neuchâtel. L'appareil utilisé est le chromatographe ionique Dionex DX-120.

Il est destiné à l'analyse des cations et anions majeurs présents dans une eau. Il ne permet pas le dosage des éléments traces. Un échantillon est injecté dans une colonne analytique à résines échangeuses d'ions (à base de polymère de type polystyrène et/ou polyacrylate). Un flux d'éluant permet la migration des espèces ioniques présentes en fonction de leur taille et de leur polarisabilité. La colonne sépare les différents ions en fonction de leurs temps de rétention respectifs. Les ions sortant de la colonne sont détectés par conductimétrie, cette mesure étant directement reliée à leur concentration. L'identification de l'espèce ionique est assurée par la comparaison des temps de rétention des différents pics observés avec ceux de standards ; la hauteur ou la surface des pics permet une détermination quantitative (communication orale de M.-E. Wyniger).

Auparavant, les échantillons d'eau sont filtrés afin d'éliminer les particules grossières en suspension et la matière organique qui masque certains pics. Le flacon d'eau destiné à l'analyse des cations est acidifié avec de l'acide nitrique ( $HNO_3$ ) concentré à 65% afin d'éviter le développement d'algues, la formation de précipités et l'adsorption de certains éléments sur les parois des bouteilles. Lors de leur passage à la chromatographie ionique, les échantillons ayant des concentrations  $>50$  mg/l doivent être dilués pour éviter de polluer les colonnes.

Les cations et anions analysés avec le chromatographe ionique sont les suivants :

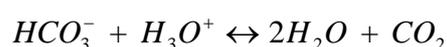


Le titre alcalimétrique carbonaté (TAC) correspond à la teneur de l'eau en carbonates et bicarbonates ( $CO_3^{2-}$  et  $HCO_3^-$ ).

L'alcalinité caractérise la possibilité qu'a une eau de maintenir son pH constant. Ainsi une eau alcaline sera capable de neutraliser un acide et donc de maintenir son pH constant. Il est aussi question de pouvoir tampon d'un tel milieu. Une eau alcaline protège donc la vie aquatique. Lorsqu'une eau se charge en carbonates, bicarbonates, hydroxydes, phosphates, silicates, elle augmente son alcalinité. Elle se mesure essentiellement en déterminant le volume de  $HCO_3^-$  présent dans l'eau.

Une eau est dite alcaline lorsque son pH est supérieur à 7. Plus la valeur du pH est proche de 14, plus l'alcalinité est forte.

Le TAC est dosé en ajoutant de l'acide chlorhydrique (HCl) de concentration 0.1 mol/l jusqu'à ce qu'un volume de 50 ml d'échantillon atteigne un pH de 4,3. Cette mesure donne la capacité tampon de l'eau, c'est la capacité de l'eau à fixer l'acide. Celle-ci est épuisée à pH 4.3. C'est-à-dire qu'à ce pH, il n'y pratiquement plus que du dioxyde de carbone dissout. Voici la réaction se produisant lors de l'ajout d'acide :



Le résultat donné (dureté carbonatée) par le titreur équivaut au volume d'acide en ml injecté. Ce chiffre devra être multiplié par 2 pour avoir la teneur de bicarbonate en meq/l puis par la masse molaire du bicarbonate (61 g/mol) pour l'avoir en mg/l. Le résultat est multiplié par 2 car le titrage devrait être fait avec 100 ml et non pas 50 ml d'échantillon.

L'erreur commise est minime du fait du doublement de chaque titrage par échantillon.

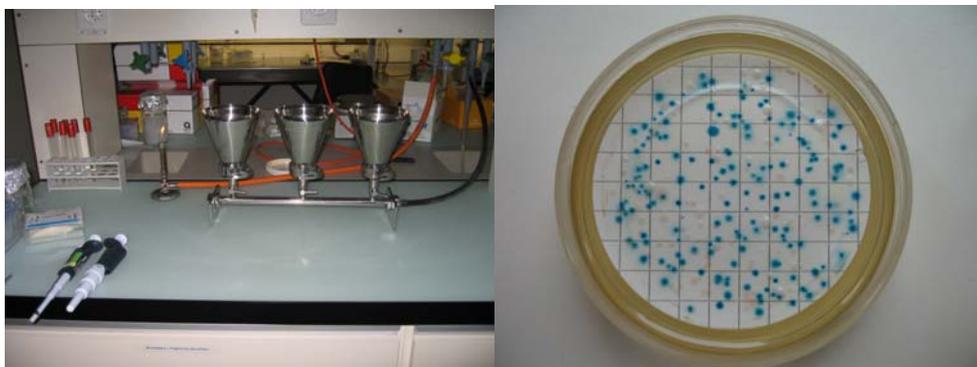
### A.2.3 pH

Des mesures hebdomadaires et à des pas de temps plus petits ont été réalisées à la Vallée des Ponts ainsi qu'à la source de la Noiraigue avec un pH-mètre manuel se calibrant directement sur le terrain.

L'erreur commise, d'après le constructeur, est d'environ  $\pm 0.05$ .

## A.3 ANALYSE D'*ESCHERICHIA COLI*

Le suivi hebdomadaire et durant des crues du nombre de bactéries fécales *Escherichia coli* a été fait. Il est intéressant de suivre l'évolution des *E. coli* puisqu'elles sont des bactéries indicatrices de contamination bactériologique. La méthode de comptage est le dénombrement par filtration sur membrane de 0.45  $\mu\text{m}$ . Une rampe de filtration triple permettant la filtration simultanée de trois échantillons d'eau a été mise à disposition par le laboratoire de Microbiologie de l'Université de Neuchâtel (**Figure A.5a**). Cette rampe permet de filtrer de 100 ml à 1 ml. Il est indispensable de procéder à ces dosages car il est très souvent impossible de compter le nombre de bactéries fécales présentes dans 100 ml. La membrane est ensuite placée sur un milieu gélosé revivifiant TSA (trypticase soja agar, Biomérieux) et mise à l'étuve à 37 °C pendant 3  $\pm$  1 heure. Puis elle est posée sur un milieu nutritif XTB (X-glucuronide tryptone bile, Oxoid) et incubée à 44 °C pendant 22  $\pm$  2 heures. Le comptage est alors possible, les bactéries *E. coli* étant colorées en bleu vert (**Figure A.5b**) (Donnenberg 2002).



**Figures A.5a et b : Photographies de la rampe de filtration triple à gauche et des analyses d'*Escherichia coli* à droite, ressortant en couleur bleu-vert, cultivé sur le milieu XTB.**

En Suisse, la concentration des bactéries fécales est exprimée en colonie formant des unités par cent millilitres (CFU / 100 ml). Selon l'Ordonnance Suisse sur la qualité des eaux, une eau est potable si aucune bactérie fécale n'est détectée dans 100 ml d'échantillon.

## A.4 ESSAI DE TRAÇAGE

Pour le traçage réalisé en septembre 2006, il a été intéressant d'utiliser des traceurs ayant des propriétés de transport semblables aux contaminations possibles des karsts. Les traceurs utilisés ont été l'uranine, les bactériophages et les microsphères pour étudier le transport respectif des contaminants solubles et particulaires (virus, bactéries).

La source de la Noiraigue a été échantillonnée périodiquement pendant l'essai de traçage. Le fluorimètre de terrain #194 GGUN – FL30, disposé après la jonction de la source de la Noiraigue et de la source de la Libarde, sous la passerelle en bois, a permis un suivi précis du passage des traceurs. Un échantillonneur automatique, contenant un chariot de 24 flacons de 500 ml, a également été placé à cet endroit.

L'intervalle de temps entre chaque mesure a été de 10 min pour le fluorimètre et 2 heures pour l'échantillonneur automatique. Ce pas de temps pour l'échantillonneur automatique a requis un passage sur site tous les 2 jours. Un échantillonnage manuel a été effectué lors de ce passage.

Les échantillons issus de l'échantillonnage manuel et automatique sont ensuite analysés au spectrofluorimètre Perkin Elmer LS 50B du laboratoire du CHYN en vue de la détection d'uranine et le restant a été utilisé pour le comptage des bactériophages et des microsphères.

### A.4.1 Uranine

Comme décrit précédemment, l'excitation de l'uranine sur le fluorimètre se fait grâce à la lampe bleue, et le résultat est ensuite corrigé avec la mesure de la turbidité. L'utilisation du spectrofluorimètre Perkin Elmer LS50B au laboratoire du CHYN a également été requise pour mesurer l'uranine.

Le principe d'analyse de l'uranine repose sur les propriétés d'émission de photons par des colorants fluorescents, après avoir absorbé de la lumière visible ou ultraviolette. Le photon émis est toujours moins énergétique que celui absorbé, donc la longueur d'onde d'émission est plus courte (**Figure A.6**). Les colorants absorbant la lumière visible ( $\lambda = 350\text{-}800\text{ nm}$ ) sont quasi inexistantes dans une eau naturelle. Par conséquent, de très faibles concentrations sont mesurables par cette technique.

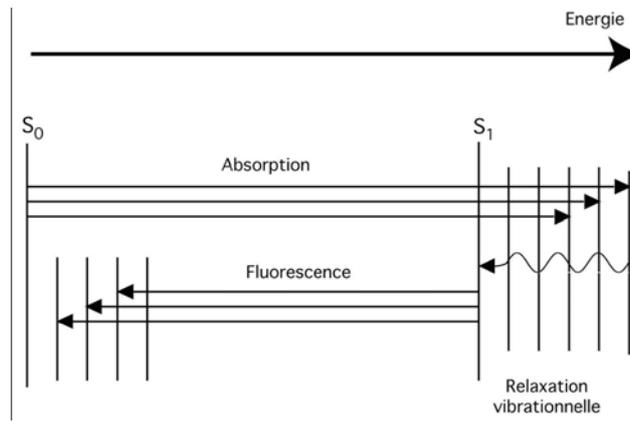


Figure A.6 : Schéma du principe de fonctionnement de la fluorescence (Schnegg 2006).

L'absorption d'un photon par le colorant fait passer un électron dans un état excité plus élevé en énergie. Le spectrofluorimètre possède une lampe à décharge au Xénon fonctionnant par flashes d'environ 8 ms (Figure A.7). La lampe permet l'excitation de tout le spectre UV de 200-800 nm. L'émission, quant à elle, peut être mesurée jusqu'à 900 nm.

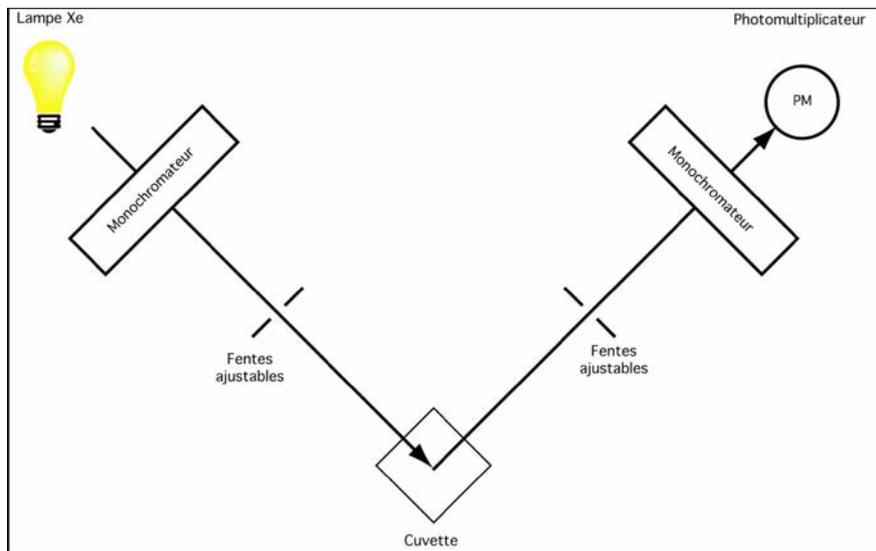


Figure A.7 : Schéma de fonctionnement du spectrofluorimètre (Schnegg 2006).

Les longueurs d'ondes d'émission et d'excitation de l'uranine sont respectivement de 488 nm et 516 nm. L'appareil sature facilement pour des concentrations importantes (>8 ppb). Ceci présente le désavantage de devoir diluer les échantillons, mais également l'avantage de rester dans le domaine linéaire.

Le spectrofluorimètre donne des résultats plus précis que le fluorimètre du fait des longueurs d'onde plus spécifiques au traceur.

#### A.4.2 Bactériophages

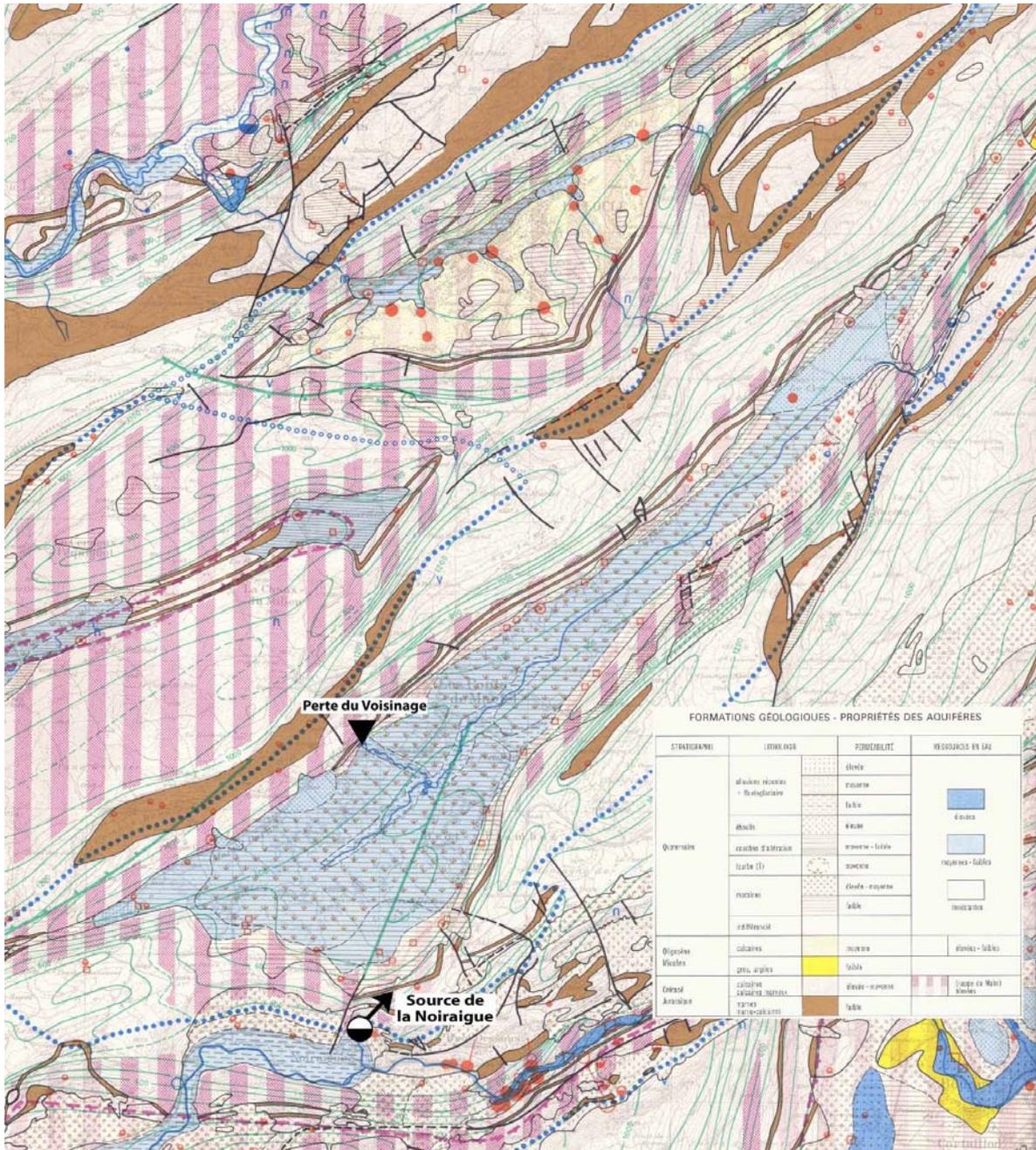
Le comptage des bactériophages ne peut se faire que dans des établissements spécialisés tels que le laboratoire de Microbiologie de l'Université de Neuchâtel. La méthode consiste à prélever 2 ml d'échantillon, à ajouter 0.1 ml de bactéries spécifiques aux phages H40/1, vortexer le tube puis laisser agir pendant 15 minutes. Ensuite il s'agit de verser le contenu dans une boîte de pétri contenant un milieu SWA marin (SWA : Sea Water Agar). Le tout est recouvert avec le même milieu SWA, ce qui donne un A2/c (agar double couche). Il faut alors laisser incuber une nuit environ à température ambiante à l'abri de la lumière (20°C). L'unité utilisée pour le comptage des bactériophages est le PFU/ml (Plaques-Forming Units) mais pour une meilleure compréhension des résultats, il est parfois remplacé par phages/ml. Si le nombre de phages dépasse 100 PFU/ml, une dilution est alors envisageable pour une meilleure précision. Il suffit de pipeter 3.6 ml de solution tampon pH dans un tube à essai, y ajouter 0.4 ml de l'échantillon à analyser et 0.4 ml de bactéries spécifiques. Il faut ensuite vortexer et placer 1.1 ml de ce mélange dans un tube à essai, puis reprendre 0.4 ml de ce tube, le placer dans un nouveau tube contenant également 3.6 ml de solution tampon pH et 0.4 ml de bactéries. Répéter l'opération afin d'obtenir la dilution souhaitée. La suite consiste à reprendre la méthode de comptage décrite ci-dessus, c'est-à-dire verser le contenu de chaque tube dans une boîte de pétri contenant le milieu SWA, recouvrir par ce même milieu et laisser incuber (communication orale de V. Di Marzo).

Les méthodes de comptage et de détection ont une sensibilité d'environ 1 phage par 2 ml d'échantillon. Pour un traceur particulière, cette sensibilité est excellente et très proche des meilleurs traceurs utilisés en hydrogéologie (Rossi *et al.* 1994 ; Rossi 2001).

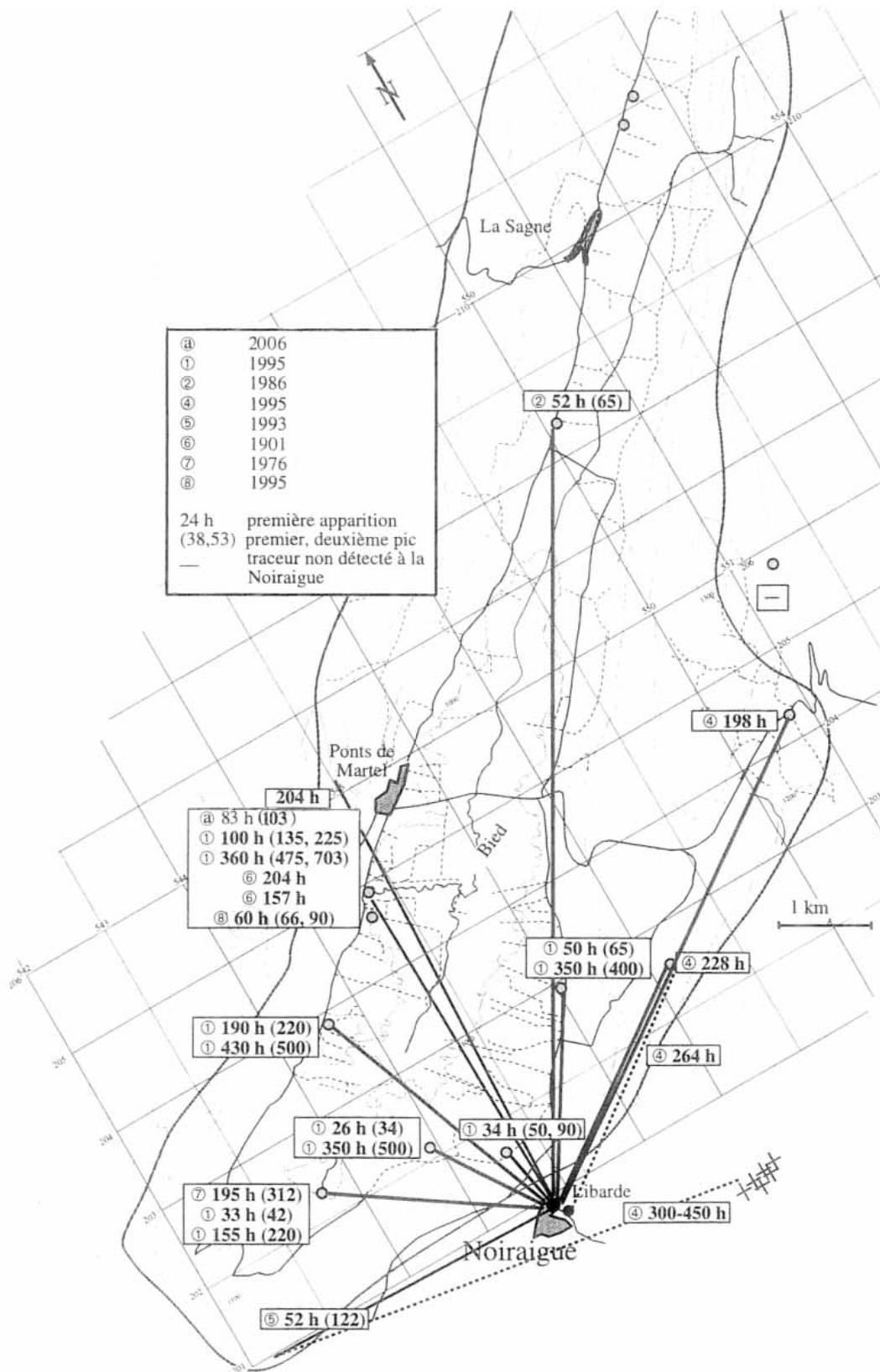
#### A.4.3 Microsphères

L'identification et le comptage des microsphères s'effectuent au laboratoire de Microbiologie de Neuchâtel par microscope à fluorescence. Une quantité de 25 ml a été filtrée (pour des raisons qui sont évoquées dans la partie 4) avec des membranes micropores 0.45 µm puis le comptage s'effectue sur toute la membrane. Les microsphères apparaissent orange sous la lumière UV, rouge vif avec un filtre de longueur d'onde 475-490 nm et jaune avec un filtre de 545-610 nm (Polysciences, Inc.). Le comptage est long et fastidieux mais pour le moment elle demeure la seule méthode pratique. En effet, les compteurs de particules ne peuvent pas mesurer des microsphères fluorescentes inférieures à 5 µm. La sensibilité de détection est de 1 microsphère par 100 ml d'échantillon mais l'erreur commise peut être très importante due à la qualité de l'eau.

**B. VALLÉE DES PONTS**



**ANNEXE B.1 : Carte hydrogéologique de la Vallée des Ponts 1 : 50 000 (Király 1970).**



**ANNEXE B.2 :** Carte synthétique des résultats des essais de traçage positifs réalisés sur le bassin de la source de la Noiraigue jusqu'à ce jour (modifiée d'après Gogniat 1995).

Vallée des Ponts				
Date	Lieu	Spectro [mV] max	Intensité de fluo. maximale [nm]	TOC [mg/l]
09/08/2006 07:45	Pont GB	1392.4	331.5	11.56
16/08/2006 08:05	Pont GB	2322.0	333.0	19.47
23/08/2006 09:30	Pont GB	1462.0	331.0	12.16
30/08/2006 08:45	Pont GB	2316.0	334.0	19.41
06/09/2006 07:30	Pont GB	1190.8	332.5	9.85
13/09/2006 08:10	Pont GB	1611.8	334.0	13.43
04/10/2006 08:25	Pont PB	1554.0	348.0	12.94
04/10/2006 08:35	Pont GB	1609.5	341.0	13.41
04/10/2006 08:50	Voisinage	1626.3	344.0	13.55
11/10/2006 09:15	Voisinage	1299.0	338.0	10.77
19/10/2006 17:55	Voisinage	1223.8	339.0	10.13
24/10/2006 18:10	Voisinage	1628.6	341.5	13.57
08/11/2006 11:15	Voisinage	1167.8	336.0	9.65
16/11/2006 13:45	Voisinage	1411.2	338.0	11.72
19/11/2006 08:30	Voisinage	1625.9	339.5	13.55
19/11/2006 09:10	Roche Berthoud	1238.4	342.5	10.25
24/11/2006 07:30	Voisinage	1479.1	339.5	12.30
24/11/2006 07:55	Roche Berthoud	1013.7	341.5	8.34
07/12/2006 13:10	Voisinage	1676.0	340.5	13.97
07/12/2006 13:30	Naturalistes	1113.7	333.5	9.19

**ANNEXE B.3 : Analyse de TOC à la Vallée des Ponts.**

Date	lieu	Escherichia coli		
		[CFU/10 ml]	[CFU/1 ml]	[CFU/100 ml]
16/08/2006 08:05	Pont GB	NC	47	4700
23/08/2006 09:30	Pont GB	18	5	180
30/08/2006 08:45	Pont GB	136	11	1360
06/09/2006 07:30	Pont GB	85	7	850
13/09/2006 08:10	Pont GB	175	21	1750
04/10/2006 08:25	Pont PB	121	13	1210
04/10/2006 08:35	Pont GB	147	17	1470
04/10/2006 08:50	Perte	413	38	4130
11/10/2006 09:15	Perte	448	56	4480
19/10/2006 17:55	Perte	508	n.a.	5080
24/10/2006 18:10	Perte	412	n.a.	4120
08/11/2006 11:45	Perte	1136	n.a.	11360
19/11/2006 08:30	Perte	63	n.a.	630
19/11/2006 09:10	Roche Berthoud	5	n.a.	50
24/11/2006 07:30	Perte	76	n.a.	760
24/11/2006 07:55	Roche Berthoud	7	n.a.	70
07/12/2006 13:10	Perte	160	n.a.	1600
07/12/2006 13:30	Naturaliste	35	n.a.	350

**ANNEXE B.4 : Analyse d'E. coli à la Vallée des Ponts.**

Date	Lieu	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Σ anions	Σ cations
			[mg/l]	[mg/l]														
09/08/2006 07:45	Pont GB	n.a.	379.2	378.2	0.06	6.58	n.d.	n.d.	3.14	n.d.	14.57	3.72	0.10	1.16	5.21	128.45	402.6	138.7
16/08/2006 08:05	Pont GB	n.a.	279.4	281.3	0.06	4.89	n.d.	n.d.	5.61	n.d.	11.21	3.16	0.09	1.33	2.90	101.72	303.1	109.2
23/08/2006 09:30	Pont GB	n.a.	362.8	359.7	0.06	7.90	n.d.	n.d.	5.21	n.d.	11.07	3.92	n.d.	1.22	4.12	124.65	383.9	133.9
30/08/2006 08:45	Pont GB	n.a.	309.9	307.2	0.05	4.14	n.d.	n.d.	4.54	n.d.	10.14	2.98	n.d.	1.24	2.84	109.78	326.1	116.8
06/09/2006 07:30	Pont GB	n.a.	377.7	377.2	0.05	7.38	n.d.	n.d.	4.32	n.d.	10.96	3.84	n.d.	1.14	4.66	126.07	399.9	135.7
13/09/2006 08:10	Pont GB	n.a.	362.6	359.4	n.d.	5.63	0.26	n.d.	3.39	0.84	11.90	3.41	n.d.	1.28	3.68	124.02	381.4	132.4
04/10/2006 08:25	Pont PB	6.84	176.7	180.3	0.05	1.00	0.22	n.d.	0.65	n.d.	4.93	0.92	n.d.	0.79	1.86	65.39	187.2	69.0
04/10/2006 08:35	Pont GB	7.07	263.8	265.0	0.04	2.59	0.37	n.d.	2.25	0.61	5.68	2.27	n.d.	1.37	2.15	93.51	276.5	99.3
04/10/2006 08:50	Perte	7.08	226.7	221.3	0.05	2.11	0.27	n.d.	1.70	0.61	4.56	1.85	n.d.	1.37	1.92	77.31	230.6	82.4
11/10/2006 09:15	Perte	7.76	327.7	331.4	0.05	6.26	0.29	n.d.	3.80	n.d.	8.01	5.35	0.29	1.94	5.36	134.86	349.8	147.8
19/10/2006 17:55	Perte	7.90	355.3	355.5	0.06	9.56	0.27	n.d.	5.33	n.d.	8.34	7.43	0.57	3.55	7.40	141.31	379.1	160.3
24/10/2006 18:10	Perte	7.54	322.3	324.3	0.05	5.43	0.25	n.d.	3.21	n.d.	8.40	5.06	0.27	1.96	4.79	133.66	341.6	145.7

Date	Lieu	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Σ anions	Σ cations	Balance ionique
		[meq/l]	[meq/l]															
09/08/2006 07:45	Pont GB	6.21	6.20	3.29E-03	1.86E-01	n.d.	n.d.	5.07E-02	n.d.	3.03E-01	1.62E-01	5.75E-03	2.97E-02	4.28E-01	6.41	6.75	7.04	2.08
16/08/2006 08:05	Pont GB	4.58	4.61	2.90E-03	1.38E-01	n.d.	n.d.	9.05E-02	n.d.	2.39E-01	1.37E-01	4.94E-03	3.40E-02	2.38E-01	5.08	5.06	5.49	4.09
23/08/2006 09:30	Pont GB	5.95	5.89	3.00E-03	2.23E-01	n.d.	n.d.	8.41E-02	n.d.	2.31E-01	1.71E-01	n.d.	3.13E-02	3.39E-01	6.22	6.46	6.76	2.27
30/08/2006 08:45	Pont GB	5.08	5.03	2.83E-03	1.17E-01	n.d.	n.d.	7.32E-02	n.d.	2.11E-01	1.30E-01	n.d.	3.17E-02	2.34E-01	5.48	5.46	5.87	3.64
06/09/2006 07:30	Pont GB	6.19	6.18	2.62E-03	2.08E-01	n.d.	n.d.	6.96E-02	n.d.	2.28E-01	1.67E-01	n.d.	2.92E-02	3.83E-01	6.29	6.69	6.87	1.29
13/09/2006 08:10	Pont GB	5.94	5.89	n.d.	1.59E-01	5.63E-03	n.d.	5.47E-02	2.64E-02	2.48E-01	1.48E-01	n.d.	3.27E-02	3.03E-01	6.19	6.41	6.67	2.01
04/10/2006 08:25	Pont PB	2.90	2.96	2.37E-03	2.82E-02	4.87E-03	n.d.	1.04E-02	n.d.	1.03E-01	4.01E-02	n.d.	2.02E-02	1.53E-01	3.26	3.07	3.48	6.15
04/10/2006 08:35	Pont GB	4.32	4.34	2.29E-03	7.31E-02	8.00E-03	n.d.	3.62E-02	1.91E-02	1.18E-01	9.87E-02	n.d.	3.51E-02	1.77E-01	4.67	4.59	4.98	4.04
04/10/2006 08:50	Perte	3.71	3.63	2.50E-03	5.96E-02	5.87E-03	n.d.	2.74E-02	1.92E-02	9.50E-02	8.03E-02	n.d.	3.51E-02	1.58E-01	3.86	3.88	4.13	3.12
11/10/2006 09:15	Perte	5.37	5.43	2.60E-03	1.77E-01	6.36E-03	n.d.	6.13E-02	n.d.	1.67E-01	2.33E-01	1.60E-02	4.97E-02	4.41E-01	6.73	5.81	7.47	12.35
19/10/2006 17:55	Perte	5.82	5.83	3.41E-03	2.70E-01	5.96E-03	n.d.	8.60E-02	n.d.	1.74E-01	3.23E-01	3.17E-02	9.09E-02	6.09E-01	7.05	6.36	8.11	11.85
24/10/2006 18:10	Perte	5.28	5.31	2.63E-03	1.53E-01	5.49E-03	n.d.	5.18E-02	n.d.	1.75E-01	2.20E-01	1.49E-02	5.00E-02	3.94E-01	6.67	5.69	7.35	12.65

**ANNEXE B.5 : Analyse des éléments chimiques à la Vallée des Ponts (n.a. : not analysed ; n.d. : not detected).**

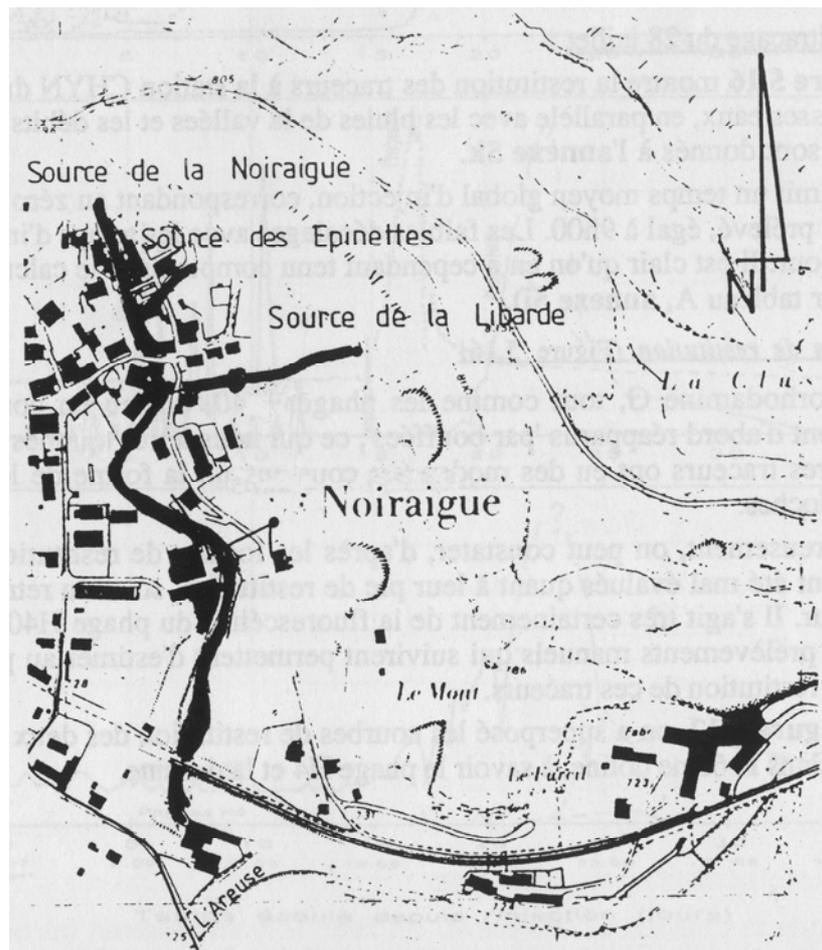
Date	Précipitations (mm)	Date	Préc. (mm)						
01/11/05	4.2	07/02/06	0.0	16/05/06	13.2	22/08/06	0.0	28/11/06	3.0
02/11/05	0.9	08/02/06	11.9	17/05/06	0.0	23/08/06	0.0	29/11/06	5.0
03/11/05	1.2	09/02/06	13.4	18/05/06	30.4	24/08/06	1.1	30/11/06	0.0
04/11/05	22.8	10/02/06	0.0	19/05/06	0.8	25/08/06	0.0	01/12/06	0.0
05/11/05	0.6	11/02/06	0.0	20/05/06	3.8	26/08/06	20.5	02/12/06	5.3
06/11/05	0.0	12/02/06	0.0	21/05/06	0.0	27/08/06	4.0	03/12/06	9.4
07/11/05	0.0	13/02/06	0.0	22/05/06	12.8	28/08/06	16.8	04/12/06	12.8
08/11/05	0.0	14/02/06	0.0	23/05/06	0.0	29/08/06	10.3	05/12/06	6.2
09/11/05	0.0	15/02/06	31.4	24/05/06	0.0	30/08/06	3.0	06/12/06	1.8
10/11/05	0.0	16/02/06	24.0	25/05/06	0.8	31/08/06	0.0	07/12/06	2.3
11/11/05	0.0	17/02/06	14.5	26/05/06	6.5	01/09/06	0.0	08/12/06	41.0
12/11/05	0.0	18/02/06	2.3	27/05/06	0.3	02/09/06	0.0	09/12/06	3.9
13/11/05	0.0	19/02/06	4.6	28/05/06	14.2	03/09/06	0.0	10/12/06	0.0
14/11/05	0.0	20/02/06	0.0	29/05/06	22.7	04/09/06	0.0	11/12/06	0.0
15/11/05	0.0	21/02/06	0.0	30/05/06	6.8	05/09/06	0.0	12/12/06	0.0
16/11/05	1.0	22/02/06	0.0	31/05/06	7.8	06/09/06	0.0	13/12/06	0.0
17/11/05	0.0	23/02/06	0.0	01/06/06	5.1	07/09/06	6.4	14/12/06	0.0
18/11/05	0.0	24/02/06	0.0	02/06/06	0.0	08/09/06	0.0	15/12/06	0.0
19/11/05	0.0	25/02/06	0.0	03/06/06	0.0	09/09/06	0.4	16/12/06	3.8
20/11/05	0.0	26/02/06	0.0	04/06/06	0.0	10/09/06	9.8	17/12/06	0.0
21/11/05	0.0	27/02/06	0.0	05/06/06	0.0	11/09/06	14.8	18/12/06	0.0
22/11/05	0.0	28/02/06	12.2	06/06/06	0.0	12/09/06	0.5	19/12/06	0.0
23/11/05	0.0	01/03/06	2.1	07/06/06	0.0	13/09/06	0.2	20/12/06	0.0
24/11/05	18.0	02/03/06	11.0	08/06/06	0.0	14/09/06	0.5	21/12/06	0.0
25/11/05	0.0	03/03/06	23.5	09/06/06	0.0	15/09/06	0.8	22/12/06	0.0
26/11/05	0.0	04/03/06	43.5	10/06/06	0.0	16/09/06	3.8	23/12/06	0.0
27/11/05	5.0	05/03/06	1.9	11/06/06	0.0	17/09/06	58.2	24/12/06	0.0
28/11/05	21.5	06/03/06	8.0	12/06/06	0.0	18/09/06	2.1	25/12/06	0.0
29/11/05	3.7	07/03/06	5.3	13/06/06	0.0	19/09/06	0.0	26/12/06	0.0
30/11/05	0.0	08/03/06	33.6	14/06/06	2.5	20/09/06	0.0	27/12/06	0.0
01/12/05	0.0	09/03/06	1.8	15/06/06	0.0	21/09/06	0.0	28/12/06	0.0
02/12/05	12.0	10/03/06	10.5	16/06/06	0.0	22/09/06	0.0	29/12/06	0.0
03/12/05	3.0	11/03/06	10.0	17/06/06	28.8	23/09/06	0.0	30/12/06	1.9
04/12/05	8.2	12/03/06	2.0	18/06/06	21.7	24/09/06	15.7	31/12/06	18.2
05/12/05	2.7	13/03/06	0.0	19/06/06	12.0	25/09/06	22.3		
06/12/05	3.5	14/03/06	0.0	20/06/06	0.0	26/09/06	3.7		
07/12/05	1.3	15/03/06	0.0	21/06/06	1.0	27/09/06	0.0		
08/12/05	15.2	16/03/06	0.0	22/06/06	0.0	28/09/06	0.0		
09/12/05	0.0	17/03/06	0.0	23/06/06	0.0	29/09/06	23.5		
10/12/05	0.0	18/03/06	0.0	24/06/06	16.8	30/09/06	47.5		
11/12/05	0.0	19/03/06	0.0	25/06/06	16.3	01/10/06	25.7		
12/12/05	0.0	20/03/06	1.7	26/06/06	0.5	02/10/06	2.0		
13/12/05	0.0	21/03/06	8.4	27/06/06	8.5	03/10/06	21.5		
14/12/05	0.0	22/03/06	4.0	28/06/06	5.0	04/10/06	3.6		
15/12/05	0.7	23/03/06	2.0	29/06/06	0.0	05/10/06	0.0		
16/12/05	14.4	24/03/06	5.7	30/06/06	0.0	06/10/06	9.1		
17/12/05	11.2	25/03/06	6.2	01/07/06	0.0	07/10/06	0.0		
18/12/05	0.0	26/03/06	0.0	02/07/06	0.0	08/10/06	0.0		
19/12/05	1.6	27/03/06	19.3	03/07/06	0.0	09/10/06	0.0		
20/12/05	0.0	28/03/06	12.8	04/07/06	0.0	10/10/06	0.0		
21/12/05	0.0	29/03/06	6.1	05/07/06	6.8	11/10/06	0.0		
22/12/05	0.0	30/03/06	41.5	06/07/06	1.2	12/10/06	0.0		
23/12/05	0.0	31/03/06	0.5	07/07/06	9.7	13/10/06	0.0		
24/12/05	0.0	01/04/06	5.7	08/07/06	0.0	14/10/06	0.0		
25/12/05	0.0	02/04/06	6.0	09/07/06	0.0	15/10/06	0.0		
26/12/05	2.5	03/04/06	0.5	10/07/06	0.0	16/10/06	0.0		
27/12/05	2.6	04/04/06	5.7	11/07/06	0.0	17/10/06	0.0		
28/12/05	2.7	05/04/06	21.6	12/07/06	1.7	18/10/06	0.7		
29/12/05	0.0	06/04/06	0.0	13/07/06	3.6	19/10/06	7.4		
30/12/05	28.5	07/04/06	0.0	14/07/06	0.0	20/10/06	3.5		
31/12/05	15.6	08/04/06	3.9	15/07/06	0.0	21/10/06	4.0		
01/01/06	10.7	09/04/06	49.9	16/07/06	0.0	22/10/06	10.3		
02/01/06	0.0	10/04/06	23.7	17/07/06	0.0	23/10/06	13.5		
03/01/06	0.0	11/04/06	2.2	18/07/06	0.0	24/10/06	0.0		
04/01/06	0.0	12/04/06	3.0	19/07/06	0.0	25/10/06	0.0		
05/01/06	0.0	13/04/06	2.0	20/07/06	16.0	26/10/06	0.0		
06/01/06	0.0	14/04/06	0.0	21/07/06	0.0	27/10/06	0.0		
07/01/06	0.0	15/04/06	20.0	22/07/06	0.0	28/10/06	0.0		
08/01/06	0.0	16/04/06	3.4	23/07/06	0.0	29/10/06	2.7		
09/01/06	0.0	17/04/06	0.0	24/07/06	0.0	30/10/06	0.0		
10/01/06	0.0	18/04/06	0.0	25/07/06	0.0	31/10/06	2.7		
11/01/06	0.0	19/04/06	0.0	26/07/06	0.0	01/11/06	1.7		
12/01/06	0.0	20/04/06	0.0	27/07/06	0.0	02/11/06	0.0		
13/01/06	0.0	21/04/06	0.0	28/07/06	10.4	03/11/06	0.0		
14/01/06	0.0	22/04/06	8.0	29/07/06	0.6	04/11/06	0.0		
15/01/06	0.0	23/04/06	0.0	30/07/06	0.0	05/11/06	0.0		
16/01/06	10.2	24/04/06	2.5	31/07/06	2.5	06/11/06	0.0		
17/01/06	15.2	25/04/06	7.2	01/08/06	0.5	07/11/06	0.0		
18/01/06	21.8	26/04/06	0.5	02/08/06	11.6	08/11/06	2.0		
19/01/06	0.0	27/04/06	1.6	03/08/06	9.9	09/11/06	2.4		
20/01/06	2.0	28/04/06	0.4	04/08/06	32.5	10/11/06	0.0		
21/01/06	2.2	29/04/06	0.0	05/08/06	0.5	11/11/06	13.5		
22/01/06	0.0	30/04/06	0.0	06/08/06	8.2	12/11/06	13.4		
23/01/06	0.0	01/05/06	0.0	07/08/06	0.0	13/11/06	8.1		
24/01/06	0.0	02/05/06	0.0	08/08/06	0.0	14/11/06	6.0		
25/01/06	0.0	03/05/06	0.0	09/08/06	0.0	15/11/06	0.0		
26/01/06	2.9	04/05/06	0.0	10/08/06	0.7	16/11/06	0.6		
27/01/06	0.0	05/05/06	13.0	11/08/06	48.4	17/11/06	8.5		
28/01/06	0.0	06/05/06	5.4	12/08/06	12.4	18/11/06	0.0		
29/01/06	0.0	07/05/06	5.0	13/08/06	22.8	19/11/06	7.5		
30/01/06	0.0	08/05/06	38.5	14/08/06	9.6	20/11/06	12.3		
31/01/06	0.0	09/05/06	10.1	15/08/06	14.1	21/11/06	15.8		
01/02/06	0.0	10/05/06	0.7	16/08/06	23.4	22/11/06	0.5		
02/02/06	0.0	11/05/06	0.0	17/08/06	5.3	23/11/06	2.5		
03/02/06	0.0	12/05/06	4.3	18/08/06	0.0	24/11/06	0.0		
04/02/06	0.0	13/05/06	15.7	19/08/06	0.0	25/11/06	0.0		
05/02/06	0.0	14/05/06	0.0	20/08/06	1.1	26/11/06	0.0		
06/02/06	0.0	15/05/06	5.2	21/08/06	1.5	27/11/06	0.0		

**ANNEXE B.6 : Données pluviométriques de la station des Ponts-de-Martel n° 1289**  
(coord. géo. : 545°880/205°400) fournies par Météo Suisse.

Date	Grand Bied					Petit Bied / Autres pertes			Voisinage		
	pH	T [°C]	Cond. [μS/cm]	Hauteur d'eau [m]	Débit [m³/s]	pH	T [°C]	Cond. [μS/cm]	pH	T [°C]	Cond. [μS/cm]
07/08/2006 15:34		14.6	548								
09/08/2006 07:45		13.4	604								
16/08/2006 08:00		12.2	470	1.00	0.95						
22/08/2006 13:40		13.6	585	0.25	0.14						
23/08/2006 08:45		11.9	588	0.19	0.13						
30/08/2006 08:45		11.1	509	0.85	0.83						
06/08/2006 07:30		14.9	604	0.14	0.12		9.0	455			
13/09/2006 08:00		11.7	580	0.36	0.16		10.2	479			
04/10/2006 08:35	7.07	11.2	466			6.84	11.6	294	7.08	11.0	379
11/10/2006 09:40	7.55	9.2	560			7.36	9.6	391	7.76	9.3	535
19/10/2006 17:55									7.90	11.4	578
22/10/2006 17:10									7.88	12.6	544
24/10/2006 18:10									7.54	11.0	523
08/11/2006 11:15									8.00	6.3	607
16/11/2006 13:45									7.81	8.1	550
19/11/2006 08:30									7.62	6.2	554
19/11/2006 09:10						7.69	5.3	416			
24/11/2006 07:30									7.50	7.7	510
24/11/2006 07:55						7.44	7.2	432			
07/12/2006 13:10									7.52	6.6	538
07/12/2006 13:30						7.20	8.0	606			

**ANNEXE B.7 : Mesures de pH, de température, de conductivité électrique et de débit à la Vallée des Ponts.**

### C. *SOURCE DE LA NOIRAIGUE*



**ANNEXE C.1 : Localisation des différentes sources à Noiraigue (Gogniat 1995).**

Source de Noiraigue		Uranine Spectro	Restitution cumulée	Restitution
Date	Temps [h]	[ppb]	[g]	[%]
18/09/2006 08:23	71.1	0.00	0	0.0
18/09/2006 10:13	73.0	0.00	0	0.0
18/09/2006 12:13	75.0	0.00	0	0.0
18/09/2006 14:13	77.0	0.00	0	0.0
18/09/2006 16:13	79.0	0.00	0	0.0
18/09/2006 18:13	81.0	0.00	0	0.0
18/09/2006 20:13	83.0	0.10	3	0.1
18/09/2006 22:13	85.0	0.57	20	0.7
19/09/2006 00:13	87.0	1.02	59	2.0
19/09/2006 02:12	89.0	1.20	111	3.7
19/09/2006 04:12	91.0	1.20	164	5.5
19/09/2006 06:12	93.0	1.18	216	7.2
19/09/2006 08:12	95.0	1.39	269	9.0
19/09/2006 10:12	97.0	1.51	326	10.9
19/09/2006 12:12	99.0	1.74	388	12.9
19/09/2006 14:12	101.0	1.98	456	15.2
19/09/2006 16:12	103.0	2.09	525	17.5
19/09/2006 18:12	105.0	2.07	590	19.7
19/09/2006 20:12	107.0	2.01	650	21.7
19/09/2006 22:12	109.0	1.81	702	23.4
20/09/2006 00:12	111.0	1.66	747	24.9
20/09/2006 02:12	113.0	1.50	786	26.2
20/09/2006 04:12	115.0	1.34	819	27.3
20/09/2006 06:12	117.0	1.20	847	28.2
20/09/2006 07:30	118.2	1.12	864	28.8
20/09/2006 07:40	118.4	1.22	866	28.9
20/09/2006 11:40	122.4	0.93	911	30.4
20/09/2006 15:40	126.4	0.77	945	31.5
20/09/2006 19:40	130.4	0.63	971	32.4
20/09/2006 23:40	134.4	0.54	991	33.0
21/09/2006 03:40	138.4	0.48	1008	33.6
21/09/2006 07:40	142.4	0.41	1022	34.1
21/09/2006 11:40	146.4	0.34	1034	34.5
21/09/2006 15:40	150.4	0.32	1043	34.8
21/09/2006 19:40	154.4	0.30	1052	35.1
21/09/2006 23:40	158.4	0.27	1060	35.3
22/09/2006 03:40	162.4	0.25	1066	35.5
22/09/2006 06:20	165.1	0.29	1071	35.7
22/09/2006 12:20	171.1	0.25	1081	36.0
22/09/2006 18:20	177.1	0.24	1089	36.3
23/09/2006 00:20	183.1	0.25	1098	36.6
23/09/2006 06:20	189.1	0.24	1105	36.8
23/09/2006 12:20	195.1	0.25	1113	37.1
23/09/2006 18:20	201.1	0.26	1121	37.4
24/09/2006 00:20	207.1	0.28	1129	37.6
24/09/2006 04:20	211.1	0.30	1134	37.8
24/09/2006 09:55	216.7	0.29	1141	38.0
24/09/2006 10:05	216.8	0.32	1142	38.1
24/09/2006 13:05	219.8	0.33	1146	38.2
24/09/2006 16:05	222.8	0.33	1150	38.3
24/09/2006 19:05	225.8	0.33	1155	38.5
24/09/2006 22:05	228.8	0.34	1160	38.7
25/09/2006 01:05	231.8	0.33	1168	38.9
25/09/2006 04:05	234.8	0.34	1178	39.3
25/09/2006 07:05	237.8	0.35	1191	39.7
25/09/2006 10:05	240.8	0.33	1204	40.1
25/09/2006 13:05	243.8	0.34	1218	40.6
25/09/2006 16:05	246.8	0.34	1234	41.1
25/09/2006 19:05	249.8	0.36	1251	41.7
25/09/2006 22:05	252.8	0.36	1270	42.3
26/09/2006 01:05	255.8	0.35	1291	43.0
26/09/2006 04:05	258.8	0.30	1311	43.7
26/09/2006 07:05	261.8	0.27	1328	44.3
26/09/2006 10:05	264.8	0.25	1344	44.8
26/09/2006 13:05	267.8	0.22	1358	45.3
26/09/2006 16:05	270.8	0.17	1371	45.7
26/09/2006 19:05	273.8	0.16	1382	46.1
26/09/2006 22:05	276.8	0.16	1392	46.4
27/09/2006 01:05	279.8	0.15	1401	46.7
27/09/2006 04:05	282.8	0.11	1408	46.9
27/09/2006 07:05	285.8	0.10	1414	47.1
27/09/2006 08:55	287.7	0.13	1418	47.3
27/09/2006 09:05	287.8	0.08	1418	47.3
27/09/2006 12:05	290.8	0.08	1422	47.4
27/09/2006 15:05	293.8	0.05	1425	47.5
27/09/2006 18:05	296.8	0.04	1427	47.6
27/09/2006 21:05	299.8	0.03	1429	47.6
28/09/2006 00:05	302.8	0.00	1430	47.7
28/09/2006 12:05	314.8	0.00	1430	47.7
29/09/2006 03:05	329.8	0.00	1430	47.7
29/09/2006 18:05	344.8	0.00	1430	47.7
<b>TOTAL</b>			<b>1430</b>	<b>47.7</b>

## ANNEXE C.2 : Restitution de l'uranine au spectrofluorimètre Perkin Elmer LS50B.

Source de Noiraigue		Bactériophages H40/1		Restitution cumulée	Restitution
Date	Temps [h]	[n/1 ml]		[n]	[%]
18/09/2006 12:15	75.0	0.0		0.00E+00	0.0
18/09/2006 14:15	77.0	0.0		0.00E+00	0.0
18/09/2006 16:15	79.0	0.0		0.00E+00	0.0
18/09/2006 18:15	81.0	0.0		0.00E+00	0.0
18/09/2006 20:15	83.0	2.0		5.26E+10	0.0
18/09/2006 22:15	85.0	12.5		4.22E+11	0.1
19/09/2006 00:15	87.0	28.0		1.41E+12	0.3
19/09/2006 02:15	89.0	27.0		2.69E+12	0.5
19/09/2006 04:15	91.0	33.5		4.04E+12	0.8
19/09/2006 06:15	93.0	39.0		5.60E+12	1.1
19/09/2006 08:15	95.0	39.5		7.22E+12	1.5
19/09/2006 10:15	97.0	51.3		9.03E+12	1.8
19/09/2006 12:15	99.0	64.0		1.12E+13	2.3
19/09/2006 14:15	101.0	80.7		1.39E+13	2.8
19/09/2006 16:15	103.0	74.3		1.65E+13	3.3
19/09/2006 18:15	105.0	62.3		1.86E+13	3.8
19/09/2006 20:15	107.0	60.0		2.04E+13	4.1
19/09/2006 22:15	109.0	61.5		2.21E+13	4.5
20/09/2006 00:15	111.0	48.5		2.35E+13	4.7
20/09/2006 02:15	113.0	43.0		2.46E+13	5.0
20/09/2006 04:15	115.0	44.5		2.56E+13	5.2
20/09/2006 06:15	117.0	36.0		2.65E+13	5.4
20/09/2006 07:45	118.5	32.0		2.71E+13	5.5
20/09/2006 11:45	122.5	26.0		2.83E+13	5.7
20/09/2006 15:45	126.5	26.5		2.94E+13	5.9
20/09/2006 19:45	130.5	19.0		3.02E+13	6.1
20/09/2006 23:45	134.5	17.5		3.09E+13	6.2
21/09/2006 03:45	138.5	16.0		3.14E+13	6.3
21/09/2006 07:45	142.5	11.5		3.19E+13	6.4
21/09/2006 11:45	146.5	8.5		3.22E+13	6.5
21/09/2006 15:45	150.5	9.5		3.24E+13	6.5
21/09/2006 19:45	154.5	8.0		3.27E+13	6.6
21/09/2006 23:45	158.5	10.5		3.29E+13	6.6
22/09/2006 03:45	162.5	9.0		3.32E+13	6.7
22/09/2006 06:15	165.0	3.0		3.33E+13	6.7
22/09/2006 06:15	165.0	5.5		3.34E+13	6.7
22/09/2006 14:15	173.0	7.5		3.37E+13	6.8
22/09/2006 22:15	181.0	4.5		3.40E+13	6.9
23/09/2006 06:15	189.0	9.0		3.42E+13	6.9
23/09/2006 14:15	197.0	7.0		3.46E+13	7.0
23/09/2006 22:15	205.0	6.0		3.48E+13	7.0
24/09/2006 09:55	216.7	8.0		3.52E+13	7.1
24/09/2006 19:00	225.7	10.0		3.56E+13	7.2
25/09/2006 13:00	243.7	11.0		3.73E+13	7.5
26/09/2006 07:00	261.7	5.5		3.99E+13	8.1
27/09/2006 01:00	279.7	2.5		4.13E+13	8.3
27/09/2006 08:50	287.6	2.0		4.17E+13	8.4
27/09/2006 09:00	287.7	3.0		4.17E+13	8.4
27/09/2006 21:00	299.7	0.5		4.20E+13	8.5
<b>TOTAL</b>				<b>4.20E+13</b>	<b>8.5</b>

### ANNEXE C.3 : Restitution des bactériophages H40/1.

Source de Noiraigue		Microsphères 1-µm		Restitution cumulée	Restitution
Date	Temps [h]	[n/25 ml]	[n/l]	[n]	[%]
18/09/2006 08:15	71.0	0	0	0.00E+00	0.0
18/09/2006 10:15	73.0	0	0	0.00E+00	0.0
18/09/2006 12:15	75.0	0	0	0.00E+00	0.0
18/09/2006 16:15	79.0	0	0	0.00E+00	0.0
18/09/2006 18:15	81.0	2	80	2.16E+09	1.0
18/09/2006 20:15	83.0	5	200	9.52E+09	4.2
18/09/2006 22:15	85.0	9	360	2.38E+10	10.5
19/09/2006 00:15	87.0	10	400	4.24E+10	18.6
19/09/2006 02:15	89.0	17	680	6.75E+10	29.7
19/09/2006 04:15	91.0	45	1800	1.23E+11	54.0
19/09/2006 06:15	93.0	50	2000	2.05E+11	90.0
19/09/2006 08:15	95.0	58	2320	2.94E+11	129.1
19/09/2006 10:15	97.0	55	2200	3.83E+11	168.6
19/09/2006 12:15	99.0	77	3080	4.84E+11	212.9
19/09/2006 14:15	101.0	74	2960	5.94E+11	261.3
19/09/2006 16:15	103.0	75	3000	6.96E+11	305.7
19/09/2006 18:15	105.0	43	1720	7.69E+11	338.1
19/09/2006 20:15	107.0	41	1640	8.18E+11	359.7
19/09/2006 22:15	109.0	39	1560	8.62E+11	378.8
20/09/2006 02:15	113.0	20	800	9.21E+11	404.7
20/09/2006 06:15	117.0	10	400	9.48E+11	416.9
20/09/2006 09:45	120.5	5	200	9.60E+11	421.8
20/09/2006 13:45	124.5	1	40	9.65E+11	424.0
20/09/2006 17:45	128.5	1	40	9.66E+11	424.7
20/09/2006 19:45	130.5	0	0	9.66E+11	424.8
21/09/2006 03:45	138.5	0	0	9.66E+11	424.8
21/09/2006 13:45	148.5	0	0	9.66E+11	424.8
22/09/2006 14:15	173.0	0	0	9.66E+11	424.8
23/09/2006 16:15	199.0	0	0	9.66E+11	424.8
25/09/2006 04:00	234.7	0	0	9.66E+11	424.8
<b>TOTAL</b>				<b>9.66E+11</b>	<b>424.8</b>

### ANNEXE C.4 : Restitution des microphères (Fluoresbrite® Polychromatic Red Microspheres 1 µm, Polysciences, Inc.).

Source de la Noiraigue			
Date	Spectro [mV] max	Intensité de fluo. maximale [nm]	TOC [mg/l]
09/08/2006 09:30	329.5	244.0	2.53
16/08/2006 10:35	1102.4	338.0	9.10
23/08/2006 10:45	738.2	339.0	6.00
30/08/2006 09:55	608.2	330.5	4.90
06/09/2006 09:10	683.1	335.0	5.53
13/09/2006 09:30	396.2	335.0	3.10
04/10/2006 09:40	775.4	339.5	6.32
11/10/2006 08:45	482.9	335.5	3.83
19/10/2006 06:50	333.0	335.5	2.56
19/10/2006 18:20	293.8	332.0	2.23
23/10/2006 07:00	276.8	332.5	2.08
23/10/2006 18:50	298.4	333.5	2.27
24/10/2006 05:45	321.7	334.5	2.46
24/10/2006 17:45	356.9	334.5	2.76
25/10/2006 05:40	398.3	336.5	3.11
25/10/2006 17:50	415.5	337.0	3.26
26/10/2006 05:50	434.0	333.0	3.42
26/10/2006 17:50	435.0	334.5	3.43
27/10/2006 05:55	433.8	336.5	3.42
08/11/2006 11:45	386.5	334.5	3.01
16/11/2006 13:05	557.1	334.5	4.46
17/11/2006 16:35	643.7	335.0	5.20
18/11/2006 06:40	649.7	336.0	5.25
18/11/2006 21:50	654.8	337.5	5.29
19/11/2006 09:40	680.3	336.0	5.51
19/11/2006 18:25	678.7	334.5	5.50
20/11/2006 07:00	677.0	336.0	5.48
20/11/2006 18:35	711.3	336.5	5.77
21/11/2006 06:45	702.5	337.0	5.70
21/11/2006 16:50	708.8	336.5	5.75
22/11/2006 09:25	746.4	337.5	6.07
22/11/2006 17:10	785.8	338.0	6.41
23/11/2006 06:35	842.0	339.5	6.88
23/11/2006 16:45	798.3	338.5	6.51
24/11/2006 08:15	799.3	339.0	6.52
24/11/2006 16:40	765.0	339.0	6.23
25/11/2006 09:50	801.8	337.5	6.54
25/11/2006 18:00	787.3	338.5	6.42
26/11/2006 10:05	762.9	338.0	6.21
26/11/2006 17:10	741.6	337.0	6.03
07/12/2006 14:15	716.0	336.5	5.81

### ANNEXE C.5 : Analyse du TOC à la source de la Noiraigue.

Date	Escherichia coli		
	[CFU/10 ml]	[CFU/1 ml]	[CFU/100 ml]
16/08/2006 10:35	93	9	930
23/08/2006 10:45	36	2	360
30/08/2006 09:45	33	2	330
06/09/2006 09:10	28	4	280
13/09/2006 09:30	13	1	130
17/09/2006 04:29	8	0	80
17/09/2006 08:29	7	0	70
17/09/2006 12:29	15	1	150
17/09/2006 16:29	21	1	210
17/09/2006 20:29	23	4	230
18/09/2006 00:29	24	4	240
18/09/2006 04:29	111	6	1110
18/09/2006 10:15	104	13	1040
18/09/2006 14:15	138	20	1380
18/09/2006 18:15	157	13	1570
18/09/2006 22:15	220	31	2200
19/09/2006 02:15	312	30	3120
19/09/2006 06:15	492	41	4920
19/09/2006 10:15	408	41	4080
19/09/2006 14:15	364	56	3640
19/09/2006 18:15	476	35	4760
19/09/2006 22:15	376	35	3760
20/09/2006 02:15	400	55	4000
20/09/2006 06:15	132	29	1320
20/09/2006 09:45	152	22	1520
20/09/2006 13:45	153	24	1530
20/09/2006 17:45	154	16	1540
20/09/2006 21:45	172	17	1720
21/09/2006 01:45	155	20	1550
21/09/2006 05:45	132	18	1320
21/09/2006 09:45	133	17	1330
21/09/2006 13:45	158	14	1580
21/09/2006 17:45	116	13	1160
21/09/2006 21:45	80	7	800
22/09/2006 01:45	96	14	960
22/09/2006 05:45	121	15	1210
22/09/2006 09:15	63	3	630
22/09/2006 12:15	41	3	410
22/09/2006 18:15	43	6	430
23/09/2006 00:15	22	2	220
23/09/2006 06:15	14	2	140
23/09/2006 12:15	33	1	330
23/09/2006 18:15	35	1	350
24/09/2006 00:15	19	2	190
24/09/2006 09:55	22	1	220
24/09/2006 09:55	19	4	190
25/09/2006 07:00	23	1	230
25/09/2006 16:00	33	2	330
26/09/2006 01:00	29	3	290
26/09/2006 04:00	42	8	420
26/09/2006 07:00	33	7	330
26/09/2006 10:00	42	5	420
26/09/2006 16:00	54	4	540
26/09/2006 22:00	125	12	1250
27/09/2006 04:00	146	20	1460
27/09/2006 08:50	215	20	2150
04/10/2006 09:40	167	18	1670
11/10/2006 08:45	20	3	200
18/10/2006 19:00	9	n.a.	90
18/10/2006 21:00	6	n.a.	60
18/10/2006 23:00	8	n.a.	80
19/10/2006 01:00	6	n.a.	60
19/10/2006 03:00	8	n.a.	80
19/10/2006 05:00	11	n.a.	110
19/10/2006 06:50	4	n.a.	40
19/10/2006 18:20	3	n.a.	30
22/10/2006 19:00	4	n.a.	40
22/10/2006 21:00	7	n.a.	70
22/10/2006 23:00	7	n.a.	70
23/10/2006 01:00	6	n.a.	60
23/10/2006 03:00	8	n.a.	80
23/10/2006 05:00	5	n.a.	50
23/10/2006 06:55	5	n.a.	50
23/10/2006 07:00	4	n.a.	40
23/10/2006 09:00	10	n.a.	100
23/10/2006 11:00	3	n.a.	30
23/10/2006 13:00	6	n.a.	60
23/10/2006 15:00	5	n.a.	50
23/10/2006 17:00	4	n.a.	40
23/10/2006 18:50	6	n.a.	60
23/10/2006 19:00	3	n.a.	30
23/10/2006 21:00	3	n.a.	30
23/10/2006 23:00	5	n.a.	50
24/10/2006 01:00	3	n.a.	30
24/10/2006 03:00	6	n.a.	60

Date	Escherichia coli	
	[CFU/10 ml]	[CFU/100 ml]
24/10/2006 05:00	6	60
24/10/2006 05:45	5	50
24/10/2006 06:00	1	10
24/10/2006 06:00	11	110
24/10/2006 10:00	42	420
24/10/2006 12:00	56	560
24/10/2006 14:00	59	590
24/10/2006 16:00	51	510
24/10/2006 17:45	57	570
24/10/2006 18:00	55	550
24/10/2006 20:00	45	450
24/10/2006 22:00	32	320
25/10/2006 00:00	32	320
25/10/2006 02:00	26	260
25/10/2006 04:00	23	230
25/10/2006 05:40	16	160
25/10/2006 06:00	19	190
25/10/2006 08:00	12	120
25/10/2006 10:00	14	140
25/10/2006 12:00	11	110
25/10/2006 14:00	9	90
25/10/2006 16:00	11	110
25/10/2006 17:50	14	140
25/10/2006 18:00	11	110
25/10/2006 20:00	10	100
25/10/2006 22:00	9	90
26/10/2006 00:00	16	160
26/10/2006 02:00	19	190
26/10/2006 04:00	14	140
26/10/2006 05:50	9	90
26/10/2006 06:00	13	130
26/10/2006 08:00	8	80
26/10/2006 10:00	8	80
26/10/2006 12:00	9	90
26/10/2006 14:00	13	130
26/10/2006 16:00	10	100
26/10/2006 17:50	7	70
26/10/2006 21:00	8	80
27/10/2006 01:00	7	70
27/10/2006 05:55	5	50
08/11/2006 11:45	3	30
16/11/2006 18:00	42	420
17/11/2006 02:00	57	570
17/11/2006 10:00	58	580
17/11/2006 16:35	63	630
17/11/2006 20:00	52	520
18/11/2006 00:00	34	340
18/11/2006 04:00	26	260
18/11/2006 06:40	30	300
18/11/2006 09:00	27	270
18/11/2006 12:00	17	170
18/11/2006 15:00	25	250
18/11/2006 18:00	6	60
18/11/2006 21:50	14	140
19/11/2006 01:00	19	190
19/11/2006 05:00	11	110
19/11/2006 09:00	7	70
19/11/2006 09:40	14	140
19/11/2006 13:00	8	80
19/11/2006 17:00	6	60
19/11/2006 18:25	8	80
19/11/2006 22:00	12	120
20/11/2006 02:00	21	210
20/11/2006 06:00	15	150
20/11/2006 07:00	22	220
20/11/2006 11:00	12	120
20/11/2006 15:00	7	70
20/11/2006 18:35	10	100
20/11/2006 21:00	10	100
21/11/2006 01:00	9	90
21/11/2006 05:00	11	110
21/11/2006 06:45	13	130
21/11/2006 10:00	14	140
21/11/2006 14:00	10	100
21/11/2006 16:50	9	90
21/11/2006 19:00	13	130
21/11/2006 23:00	38	380
22/11/2006 03:00	34	340
22/11/2006 07:00	18	180
22/11/2006 09:25	30	300
22/11/2006 12:00	29	290
22/11/2006 15:00	15	150
22/11/2006 17:10	17	170
22/11/2006 20:00	28	280
23/11/2006 00:00	29	290

Date	Escherichia coli	
	[CFU/10 ml]	[CFU/100 ml]
23/11/2006 04:00	18	180
23/11/2006 06:35	29	290
23/11/2006 09:00	31	310
23/11/2006 13:00	39	390
23/11/2006 16:45	50	500
23/11/2006 20:00	49	490
24/11/2006 00:00	35	350
24/11/2006 04:00	59	590
24/11/2006 08:15	46	460
24/11/2006 12:00	32	320
24/11/2006 16:40	41	410
24/11/2006 21:00	33	330
25/11/2006 01:00	32	320
25/11/2006 05:00	41	410
25/11/2006 09:50	32	320
25/11/2006 13:00	25	250
25/11/2006 18:00	26	260
26/11/2006 01:00	22	220
26/11/2006 10:05	15	150
07/12/2006 14:15	30	300

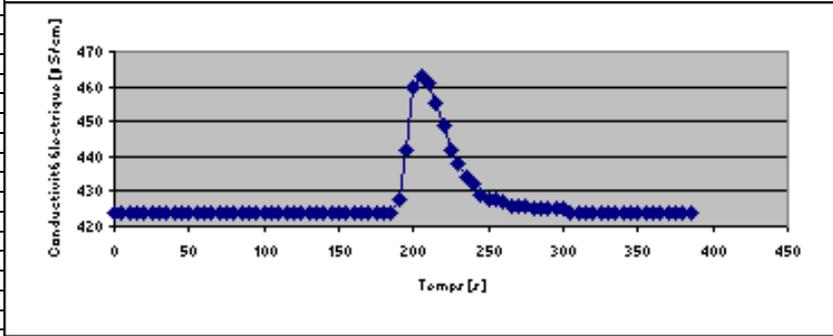
## ANNEXE C.6 : Analyse d'E. coli à la source de la Noiraigue.

Date	pH	HCO <sub>3</sub>		F	Cl	NO <sub>2</sub>	Br	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Li <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	Σ anions	Σ cations
		[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
09/08/2006 09:30	n.a.	282.6	290.1	0.09	4.87	n.d.	n.d.	6.87	n.d.	6.49	n.d.	2.69	n.d.	0.96	6.76	89.13	n.d.	308.4	99.5
16/08/2006 10:35	n.a.	248.9	248.6	0.04	3.40	n.d.	n.d.	9.00	0.51	5.98	n.d.	1.90	n.d.	1.15	2.53	88.06	n.d.	267.6	93.6
23/08/2006 10:45	n.a.	264.3	264.3	0.05	3.50	n.d.	n.d.	7.69	n.d.	4.60	n.d.	1.99	n.d.	0.87	2.51	90.76	n.d.	280.1	96.1
30/08/2006 09:55	n.a.	274.7	274.0	0.05	3.64	n.d.	n.d.	7.43	n.d.	5.39	n.d.	1.95	n.d.	1.08	3.67	94.46	n.d.	290.5	101.2
06/09/2006 09:10	n.a.	283.5	285.0	n.d.	3.39	0.53	n.d.	4.09	0.86	5.06	n.d.	1.99	n.d.	0.85	2.99	94.18	n.d.	298.9	100.0
13/09/2006 09:30	n.a.	276.9	278.9	n.d.	3.20	0.54	n.d.	4.92	0.75	4.61	n.d.	1.78	n.d.	0.76	3.29	92.89	n.d.	292.9	98.7
04/10/2006 09:40	7.16	256.4	252.5	0.04	2.62	0.20	n.d.	5.54	0.64	3.91	n.d.	1.54	n.d.	1.11	1.99	81.12	n.d.	264.6	85.8
11/10/2006 08:45	7.21	274.0	273.5	n.d.	3.10	0.42	n.d.	5.95	n.d.	4.10	n.d.	2.14	n.d.	1.00	3.97	109.98	n.d.	287.1	117.1
19/10/2006 06:50	7.30	n.a.	276.7	0.07	3.21	n.d.	n.d.	6.41	0.80	4.25	n.d.	2.06	n.d.	0.93	4.89	107.72	n.d.	291.4	115.6
19/10/2006 18:20	7.33	279.6	278.4	0.04	3.40	0.21	n.d.	7.25	0.72	4.38	n.d.	2.13	n.d.	0.94	5.05	108.70	n.d.	294.4	116.8
22/10/2006 19:00	n.a.	n.a.	n.a.	0.03	3.56	n.d.	n.d.	6.45	n.d.	4.39	n.d.	2.61	n.d.	0.95	5.44	109.19	n.d.		118.2
23/10/2006 03:00	n.a.	n.a.	n.a.	0.04	3.70	n.d.	n.d.	5.68	0.64	4.57	n.d.	2.27	n.d.	1.01	5.42	108.26	n.d.		117.0
23/10/2006 07:00	7.35	278.9	281.6	n.d.	3.46	n.d.	n.d.	6.17	n.d.	4.45	n.d.	2.24	n.d.	0.93	5.49	108.17	n.d.	295.7	116.8
23/10/2006 15:00	n.a.	n.a.	n.a.	n.d.	3.47	n.d.	n.d.	6.53	0.52	4.45	n.d.	2.26	n.d.	0.99	5.56	109.06	n.d.		117.9
23/10/2006 19:00	7.36	284.3	284.5	n.d.	3.55	n.d.	n.d.	6.50	n.d.	4.58	n.d.	3.34	0.14	2.08	5.63	110.28	n.d.	299.1	121.5
24/10/2006 03:00	n.a.	n.a.	n.a.	n.d.	3.74	n.d.	n.d.	7.29	n.d.	4.47	n.d.	2.55	n.d.	1.12	5.46	108.14	n.d.		117.3
24/10/2006 06:00	7.28	284.0	284.0	n.d.	3.33	n.d.	n.d.	5.80	0.65	4.47	n.d.	2.34	n.d.	1.09	5.54	109.08	n.d.	298.3	118.0
24/10/2006 14:00	n.a.	n.a.	n.a.	0.04	3.33	n.d.	n.d.	5.45	0.71	4.55	n.d.	2.32	n.d.	1.04	5.36	107.00	n.d.		115.7
24/10/2006 22:00	n.a.	n.a.	n.a.	0.04	3.65	n.d.	n.d.	6.18	0.73	4.82	n.d.	2.99	n.d.	1.49	5.58	108.08	n.d.		118.1
25/10/2006 05:40	7.17	284.3	282.3	0.05	3.33	n.d.	n.d.	6.21	0.66	4.93	n.d.	2.42	n.d.	1.24	5.60	110.06	n.d.	297.5	119.3
25/10/2006 10:00	n.a.	n.a.	n.a.	n.d.	3.35	n.d.	n.d.	6.14	n.d.	5.10	n.d.	2.47	n.d.	1.23	5.85	109.96	n.d.		119.5
25/10/2006 17:50	7.37	284.5	287.9	0.05	3.41	n.d.	n.d.	6.54	0.63	5.03	n.d.	2.46	n.d.	1.30	5.90	110.27	n.d.	303.6	119.9
25/10/2006 22:00	n.a.	n.a.	n.a.	0.06	3.42	n.d.	n.d.	6.26	n.d.	5.06	n.d.	2.49	n.d.	1.14	5.97	109.38	n.d.		119.0
26/10/2006 05:50	7.22	286.9	286.9	0.05	3.20	0.49	n.d.	5.30	0.41	5.15	n.d.	2.53	n.d.	1.24	6.05	109.95	n.d.	301.5	119.8
26/10/2006 10:00	n.a.	n.a.	n.a.	0.05	3.59	n.d.	n.d.	6.40	0.87	5.26	n.d.	2.82	n.d.	1.35	6.27	112.61	n.d.		123.0
26/10/2006 17:50	7.36	287.7	289.1	0.06	3.70	n.d.	n.d.	6.56	n.d.	5.37	n.d.	2.67	n.d.	1.30	6.13	109.85	n.d.	304.8	119.9
26/10/2006 22:00	n.a.	n.a.	n.a.	0.05	3.81	n.d.	n.d.	6.38	n.d.	5.47	n.d.	3.09	n.d.	1.34	6.17	109.60	n.d.		120.2
27/10/2006 05:55	7.24	285.2	293.5	0.06	3.83	n.d.	n.d.	6.73	0.67	5.44	n.d.	2.72	n.d.	1.29	6.11	108.84	n.d.	310.3	119.0

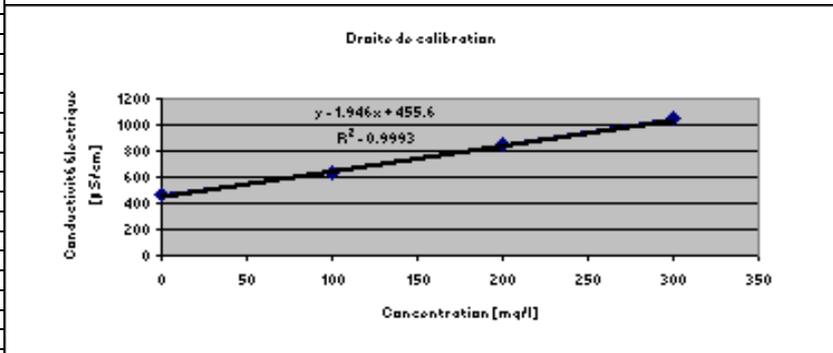
Date	HCO <sub>3</sub>		F	Cl	NO <sub>2</sub>	Br	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Li <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	Σ anions	Σ cations	Balance ionique
	[meq/l]	[meq/l]	[meq/l]	[meq/l]	[meq/l]	[meq/l]	[meq/l]	[meq/l]	[meq/l]	[meq/l]	[meq/l]	[meq/l]	[meq/l]	[meq/l]	[meq/l]	[meq/l]	[meq/l]	[meq/l]	[%]
09/08/2006 09:30	4.63	4.75	4.97E-03	1.37E-01	n.d.	n.d.	1.11E-01	n.d.	1.35E-01	n.d.	1.17E-01	n.d.	2.46E-02	5.56E-01	4.45	n.d.	5.08	5.15	0.63
16/08/2006 10:35	4.08	4.07	2.22E-03	9.58E-02	n.d.	n.d.	1.45E-01	1.62E-02	1.25E-01	n.d.	8.24E-02	n.d.	2.94E-02	2.08E-01	4.39	n.d.	4.46	4.71	2.76
23/08/2006 10:45	4.33	4.33	2.46E-03	9.87E-02	n.d.	n.d.	1.24E-01	n.d.	9.58E-02	n.d.	8.65E-02	n.d.	2.22E-02	2.07E-01	4.53	n.d.	4.65	4.84	2.03
30/08/2006 09:55	4.50	4.49	2.73E-03	1.03E-01	n.d.	n.d.	1.20E-01	n.d.	1.12E-01	n.d.	8.47E-02	n.d.	2.77E-02	3.02E-01	4.71	n.d.	4.83	5.13	2.95
06/09/2006 09:10	4.65	4.67	n.d.	9.57E-02	1.15E-02	n.d.	6.60E-02	2.73E-02	1.05E-01	n.d.	8.64E-02	n.d.	2.16E-02	2.46E-01	4.70	n.d.	4.96	5.05	0.89
13/09/2006 09:30	4.54	4.57	n.d.	9.01E-02	1.17E-02	n.d.	7.93E-02	2.38E-02	9.60E-02	n.d.	7.73E-02	n.d.	1.93E-02	2.71E-01	4.64	n.d.	4.86	5.00	1.49
04/10/2006 09:40	4.20	4.14	1.91E-03	7.38E-02	4.28E-03	n.d.	8.94E-02	2.01E-02	8.13E-02	n.d.	6.72E-02	n.d.	2.84E-02	1.64E-01	4.05	n.d.	4.44	4.31	1.54
11/10/2006 08:45	4.49	4.48	n.d.	8.75E-02	9.04E-03	n.d.	9.59E-02	n.d.	8.54E-02	n.d.	9.30E-02	n.d.	2.56E-02	3.27E-01	5.49	n.d.	4.76	5.93	10.93
19/10/2006 06:50	n.a.	4.53	3.59E-03	9.06E-02	n.d.	n.d.	1.03E-01	2.51E-02	8.86E-02	n.d.	8.96E-02	n.d.	2.38E-02	4.03E-01	5.38	n.d.	4.85	5.89	9.74
19/10/2006 18:20	4.58	4.56	2.09E-03	9.58E-02	4.59E-03	n.d.	1.17E-01	2.27E-02	9.12E-02	n.d.	9.28E-02	n.d.	2.42E-02	4.16E-01	5.42	n.d.	4.91	5.96	9.68
22/10/2006 19:00	n.a.	n.a.	1.63E-03	1.01E-01	n.d.	n.d.	1.04E-01	n.d.	9.15E-02	n.d.	1.14E-01	n.d.	2.43E-02	4.48E-01	5.45	n.d.		6.03	
23/10/2006 03:00	n.a.	n.a.	2.22E-03	1.04E-01	n.d.	n.d.	9.16E-02	2.02E-02	9.51E-02	n.d.	9.88E-02	n.d.	2.59E-02	4.46E-01	5.40	n.d.		5.97	
23/10/2006 07:00	4.57	4.61	n.d.	9.75E-02	n.d.	n.d.	9.95E-02	n.d.	9.27E-02	n.d.	9.74E-02	n.d.	2.39E-02	4.51E-01	5.40	n.d.	4.88	5.97	10.03
23/10/2006 15:00	n.a.	n.a.	n.d.	9.78E-02	n.d.	n.d.	1.05E-01	1.65E-02	9.26E-02	n.d.	9.81E-02	n.d.	2.52E-02	4.57E-01	5.44	n.d.		6.02	
23/10/2006 19:00	4.66	4.66	n.d.	1.00E-01	n.d.	n.d.	1.05E-01	n.d.	9.53E-02	n.d.	1.45E-01	7.87E-03	5.33E-02	4.63E-01	5.50	n.d.	4.96	6.17	10.89
24/10/2006 03:00	n.a.	n.a.	n.d.	1.06E-01	n.d.	n.d.	1.18E-01	n.d.	9.31E-02	n.d.	1.11E-01	n.d.	2.86E-02	4.50E-01	5.40	n.d.		5.99	
24/10/2006 06:00	4.65	4.65	n.d.	9.39E-02	n.d.	n.d.	9.36E-02	2.04E-02	9.31E-02	n.d.	1.02E-01	n.d.	2.80E-02	4.56E-01	5.44	n.d.	4.96	6.03	9.76
24/10/2006 14:00	n.a.	n.a.	2.26E-03	9.40E-02	n.d.	n.d.	8.80E-02	2.23E-02	9.47E-02	n.d.	1.01E-01	n.d.	2.66E-02	4.41E-01	5.34	n.d.		5.91	
24/10/2006 22:00	n.a.	n.a.	2.24E-03	1.03E-01	n.d.	n.d.	9.96E-02	2.32E-02	1.00E-01	n.d.	1.30E-01	n.d.	3.80E-02	4.59E-01	5.39	n.d.		6.02	
25/10/2006 05:40	4.66	4.63	2.44E-03	9.38E-02	n.d.	n.d.	1.00E-01	2.08E-02	1.03E-01	n.d.	1.05E-01	n.d.	3.16E-02	4.61E-01	5.49	n.d.	4.96	6.09	10.20
25/10/2006 10:00	n.a.	n.a.	n.d.	9.45E-02	n.d.	n.d.	9.90E-02	n.d.	1.06E-01	n.d.	1.08E-01	n.d.	3.15E-02	4.82E-01	5.49	n.d.		6.11	
25/10/2006 17:50	4.66	4.72	2.75E-03	9.62E-02	n.d.	n.d.	1.06E-01	2.00E-02	1.05E-01	n.d.	1.07E-01	n.d.	3.33E-02	4.85E-01	5.50	n.d.	5.02	6.13	9.94
25/10/2006 22:00	n.a.	n.a.	2.97E-03	9.66E-02	n.d.	n.d.	1.01E-01	n.d.	1.05E-01	n.d.	1.08E-01	n.d.	2.91E-02	4.91E-01	5.46	n.d.		6.09	
26/10/2006 05:50	4.70	4.70	2.80E-03	9.02E-02	1.07E-02	n.d.	8.54E-02	1.30E-02	1.07E-01	n.d.	1.10E-01	n.d.	3.17E-02	4.98E-01	5.49	n.d.	5.01	6.13	10.00
26/10/2006 10:00	n.a.	n.a.	2.82E-03	1.01E-01	n.d.	n.d.	1.03E-01	2.74E-02	1.10E-01	n.d.	1.23E-01	n.d.	3.45E-02	5.16E-01	5.62	n.d.		6.29	
26/10/2006 17:50	4.71	4.74	2.98E-03	1.04E-01	n.d.	n.d.	1.06E-01	n.d.	1.12E-01	n.d.	1.16E-01	n.d.	3.31E-02	5.04E-01	5.48	n.d.	5.05	6.13	9.68
26/10/2006 22:00	n.a.	n.a.	2.78E-03	1.07E-01	n.d.	n.d.	1.03E-01	n.d.	1.14E-01	n.d.	1.34E-01	n.d.	3.43E-02	5.08E-01	5.47	n.d.		6.15	
27/10/2006 05:55	4.67	4.81	3.01E-03	1.08E-01	n.d.	n.d.	1.09E-01	2.11E-02	1.13E-01	n.d.	1.18E-01	n.d.	3.30E-02	5.03E-01	5.43	n.d.	5.08	6.09	9.04

ANNEXE C.7 : Analyse des éléments chimiques à la source de la Noiraigue.

Temps (s)	eC (µS/cm)	eC - background (µS/cm)	Surface sous la courbe (s.µS/cm)
0	424	0	0
5	424	0	0
10	424	0	0
15	424	0	0
20	424	0	0
25	424	0	0
30	424	0	0
35	424	0	0
40	424	0	0
45	424	0	0
50	424	0	0
55	424	0	0
60	424	0	0
65	424	0	0
70	424	0	0
75	424	0	0
80	424	0	0
85	424	0	0
90	424	0	0
95	424	0	0
100	424	0	0
105	424	0	0
110	424	0	0
115	424	0	0
120	424	0	0
125	424	0	0
130	424	0	0
135	424	0	0
140	424	0	0
145	424	0	0
150	424	0	0
155	424	0	0
160	424	0	0
165	424	0	0
170	424	0	0
175	424	0	0
180	424	0	0
185	424	0	0
190	428	4	10
195	442	18	55
200	460	36	135
205	463	39	187.5
210	461	37	190
215	455	31	170
220	449	25	140
225	442	18	107.5
230	438	14	80
235	434	10	60
240	432	8	45
245	429	5	32.5
250	428	4	22.5
255	428	4	20
260	427	3	17.5
265	426	2	12.5
270	426	2	10
275	426	2	10
280	425	1	7.5
285	425	1	5
290	425	1	5
295	425	1	5
300	425	1	5
305	424	0	2.5
310	424	0	0
315	424	0	0
320	424	0	0
325	424	0	0
330	424	0	0
335	424	0	0
340	424	0	0
345	424	0	0
350	424	0	0
355	424	0	0
360	424	0	0
365	424	0	0
370	424	0	0
375	424	0	0
380	424	0	0
385	424	0	0



Concentration [mg/l]	Conductivité [µS/cm]	Surface cumulée sous la courbe (s.µS/cm):	
0	462	Surface cumulée sous la courbe (s.mg/l):	1335
100	641	Masse d'injection [kg]:	2
200	844	Débit Q (l/s):	2915
300	1043		



(s.µS/cm/1.946) équivaut à des (s.mg/l)

**ANNEXE C.8 : Feuille de calcul du jaugeage au sel du 20 septembre 2006.**

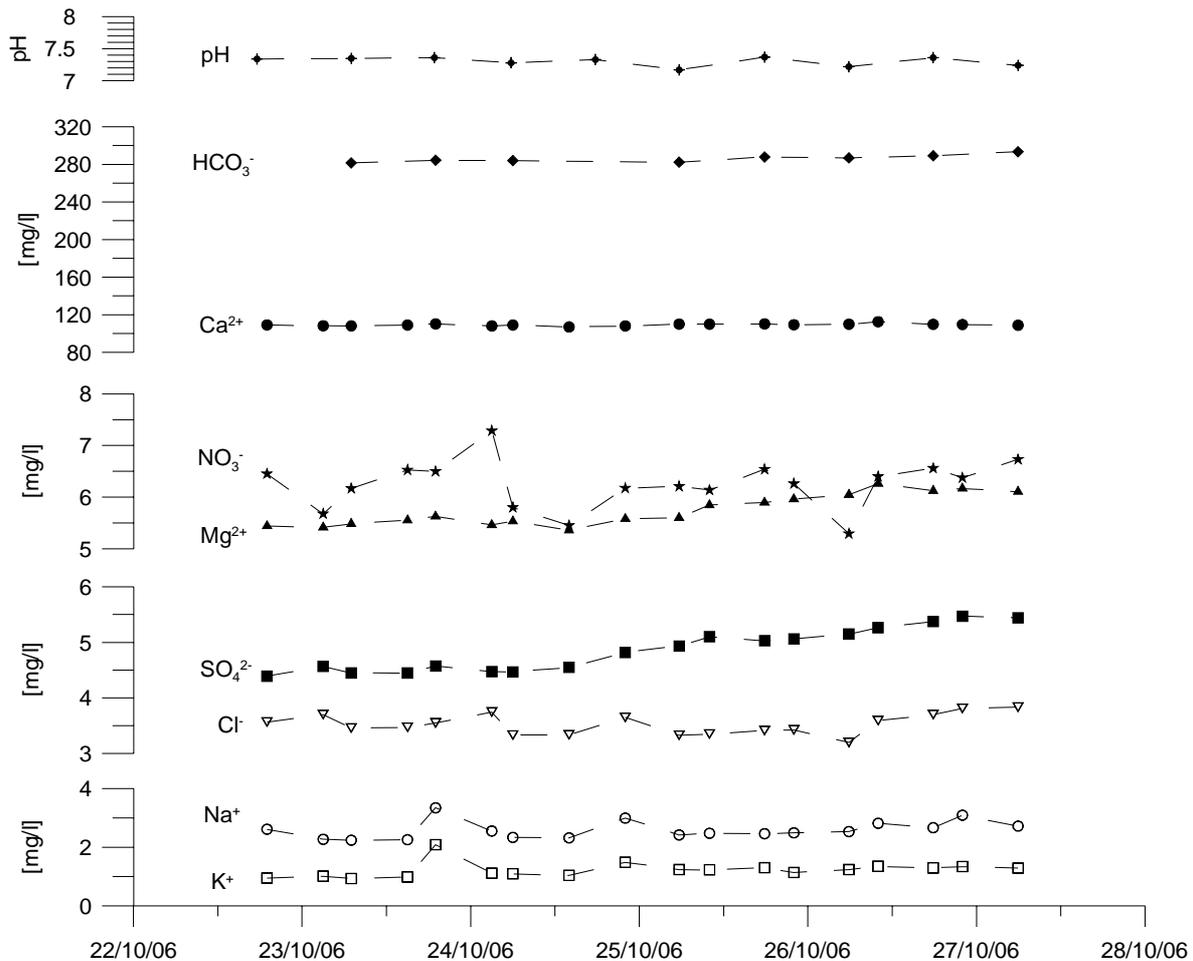
Date	pH	Cond. [ $\mu\text{S/cm}$ ]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]
14/07/2006 17:52	n.a.	n.a.	8.71
07/08/2006 15:00	n.a.	477	8.91
09/08/2006 08:55	n.a.	477	8.92
16/08/2006 10:25	n.a.	392	9.63
22/08/2006 15:00	n.a.	419	9.25
23/08/2006 10:45	n.a.	416	9.28
30/08/2006 09:55	n.a.	468	9.05
06/09/2006 09:00	n.a.	463	9.03
13/09/2006 10:00	n.a.	456	8.80
18/09/2006 08:30	n.a.	471	8.96
20/09/2006 07:35	n.a.	429	9.88
22/09/2006 06:20	n.a.	434	9.53
24/09/2006 09:55	n.a.	443	9.30
27/09/2006 09:05	n.a.	470	9.65
01/10/2006 10:30	n.a.	478	9.47
04/10/2006 09:40	7.16	417	10.04
11/10/2006 08:45	7.21	443	8.72
19/10/2006 06:50	7.30	449	8.53
19/10/2006 18:20	7.33	449	8.54
22/10/2006 17:35	7.34	451	8.56
23/10/2006 07:00	7.35	452	8.56
23/10/2006 18:50	7.36	454	8.56
24/10/2006 05:45	7.28	457	8.56
24/10/2006 17:45	7.33	455	8.58
25/10/2006 05:40	7.17	461	8.65
25/10/2006 17:50	7.37	471	8.75
26/10/2006 05:50	7.22	474	8.81
26/10/2006 17:50	7.36	471	8.87
27/10/2006 05:55	7.24	477	8.86
08/11/2006 11:45	7.37	465	8.73
16/11/2006 13:05	7.19	487	9.06
17/11/2006 16:35	7.24	493	8.97
18/11/2006 06:40	7.22	492	8.88
18/11/2006 21:50	7.22	497	8.80
19/11/2006 09:40	7.26	494	8.74
19/11/2006 18:25	7.28	492	8.77
20/11/2006 07:00	7.23	493	8.71
20/11/2006 18:35	7.25	489	8.69
21/11/2006 06:45	7.25	498	8.68
21/11/2006 16:50	7.22	497	8.71
22/11/2006 09:25	7.19	496	8.70
22/11/2006 17:10	7.21	498	8.71
23/11/2006 06:35	7.22	499	8.69
23/11/2006 16:45	7.24	508	8.68
24/11/2006 08:15	7.13	492	8.61
24/11/2006 16:40	7.21	499	8.58
25/11/2006 09:50	7.18	485	8.53
25/11/2006 17:45	7.18	484	8.51
26/11/2006 10:05	7.16	484	8.46
26/11/2006 17:10	7.17	481	8.47
07/12/2006 14:15	7.34	500	8.46

**ANNEXE C.9** : Mesures du pH, de la conductivité électrique et de la température à la source de la Noiraigue.

TOC 1	Temps [h]	Débit [m³/s]	TOC 2 / Chute cond.	Temps	Débit	Température	Temps	Débit	Turbidité 2	Temps	Débit	Turbidité 3	Temps	Débit	E.coli 1	Temps	Débit	E.coli 2	Temps	Débit
12/08/2006 08:10	14	2.19	13/08/2006 02:30	32	4.63	12/08/2006 08:00	14	2.28												
			29/08/2006 23:45	72	2.26															
18/09/2006 03:10	14	3.14	18/09/2006 23:23	34	5.11	18/09/2006 02:30	13	3.95	17/09/2006 23:30	11	3.22	18/09/2006 14:00	25	5.55	18/09/2006 04:00	15	2.64	18/09/2006 18:00	29	5.83
			26/09/2006 20:55	48	4.24	25/09/2006 19:55	23	3.48				26/09/2006 20:55	48	4.24	25/09/2006 16:00	19	3.24	26/09/2006 20:55	48	4.24
						30/09/2006 22:05	17	4.41												
24/10/2006 06:35	19	2.22	27/10/2006 08:50	94	1.78	24/10/2006 17:40	30	2.48	24/10/2006 07:00	20	2.29	27/10/2006 08:50	94	1.78	24/10/2006 07:00	20	2.29			
13/11/2006 00:00	24	1.59	14/11/2006 23:00	71	1.91	13/11/2006 08:20	32	1.86				16/11/2006 15:30	111	1.78				16/11/2006 15:30	111	1.78
									19/11/2006 17:05	37	1.32									
									21/11/2006 06:05	31	1.78									
									21/11/2006 23:00	14	2.95	23/11/2006 11:00	50	3.46	21/11/2006 19:00	10	2.92	23/11/2006 11:00	50	3.46
05/12/2006 03:00	23	2.50	06/12/2006 14:30	58	2.64	04/12/2006 23:40	19	1.79												

Traceurs	Temps	Débit
Uranine (19/09/2006)	34	5.11
Uranine (19/09/2006)	83	2.65
H4O/1 (19/09/2006)	83	2.65
Uranine (28/07/1995)	360	0.94
Uranine (20/09/1995)	100	2.17
Sulfite G (28/07/1995)	155	0.79
Sulfite G (20/09/1995)	33	2.52
T7 (20/09/1995)	26	2.4
H6 (20/09/1995)	36	2.5
H4 (20/09/1995)	48	2.5

**ANNEXE C.10 : Temps de transit des différents traceurs artificiels et naturels.**



**ANNEXE C.11 : Evolution du pH et des éléments chimiques à la source de la Noiraigue du 22 au 27 octobre 2006.**

## D. GALERIE PHOTOS



**Annexe D.1 : Photographies de la source de la Noiraigue, du village de Noiraigue, de son bassin d'alimentation, la Vallée des Ponts et de la « station CHYN » à la source de la Noiraigue.**



**Annexe D.2 : Photographies du point d'échantillonnage à la jonction du Petit Bied et du Grand Bied.**



**Annexe D.3 : Photographies à la perte du Voisinage lors de l'essai de traçage du 15 septembre 2006.**



**Annexe D.4 : Photographies du Creux du Van depuis la Vallée des Ponts, de la perte du Voisinage en basses eaux et hautes eaux et de la perte de la Roche Berthoud.**