



Analyse croisée des paramètres hydrochimiques et physico-chimiques à hautes fréquences. Caractérisation des évolutions lors des crues.

Iliès Arahmane

► To cite this version:

Iliès Arahmane. Analyse croisée des paramètres hydrochimiques et physico-chimiques à hautes fréquences. Caractérisation des évolutions lors des crues.: Rapport de stage de Master 2 –Master Sciences de l'eau - Parcours Hydrogéologie, Hydropédologie, Hydrogéochimie (Hydro3). [Travaux universitaires] Université rennes1; Géosciences sciences Rennes. 2019. hal-03137125

HAL Id: hal-03137125

<https://brgm.hal.science/hal-03137125>

Submitted on 10 Feb 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse croisée des paramètres hydrochimiques et physico-chimiques à hautes fréquences. Caractérisation des évolutions lors des crues.

Rapport de stage de Master 2 – Master Sciences de l’eau
Parcours Hydrogéologie, Hydropédologie, Hydrogéochimie
(Hydro3)

Encadré par V. Bailly-Comte et J-B. Charlier

Stage réalisé au BRGM Montpellier du 18 Mars 2019 au 17 Septembre 2019

Table des matières

Remerciement.....	3
1 – Introduction	4
2 - Etat de l’Art.....	4
3 - Présentation du site d’étude	5
3.1 - Contexte géologique	5
3.2 - Contexte hydrogéologique	6
4 - Matériel et Méthodes	8
4.1 - Description des variables	8
4.2 - Sélection des crues	9
4.3 - Séparation d’hydrogramme par modèle de mélange.....	10
5- Résultats	11
5.1 - Réponse hydrodynamique du système face à un épisode pluvieux.....	11
5.2 - Réaction physico-chimiques du système pour un épisode pluvieux	12
5.2.1 - Etude de la conductivité électrique	13
5.2.2 - Etude de la turbidité	15
5.2.3 - Etude de la fluorescence.....	16
5.3 – Variabilité temporelle des pôles de mélange.....	17
6- Discussion	20
7 – Conclusion.....	23
8 – Bibliographie	23
VIII - Annexes.....	25

Remerciement

Je tiens à remercier mes maitres de stage, Jean-Baptiste Charlier et Vincent Bailly-Comte pour le temps qu'ils m'ont accordé tout au long du stage et toutes les connaissances qu'ils ont pu m'apporter. Je tiens également à remercier Emilie Lenoir qui m'a accompagné, conseillé, renseigné pendant toute la durée de mon séjour à Montpellier.

Je remercie les stagiaires Julie Gamblin, Georges MacFarina, et Adélaïde Taveneau pour l'aide qu'ils ont pu m'apporter dans mon travail mais aussi pour les bons moments que nous avons passés à côté. Je remercie aussi toutes les personnes avec qui je me suis lié d'amitié pendant les 6 mois et qui ont grandement animé mon stage.

1 – Introduction

Le karst de Nîmes est un parfait exemple de la complexité des systèmes karstiques. Une partie du karst se situant directement dans la ville, l'eau de ce dernier présente des caractéristiques physico-chimiques particulières en lien avec son occupation du sol. Ce site a initialement été instrumenté dès 1998 dans le but de mieux comprendre la genèse des crues éclaircs dans les aquifères karstiques. Depuis 2012, ce site est instrumenté de capteurs optiques pour le suivi de la fluorescence naturelle et de la turbidité, en complément des paramètres physicochimiques et hydrodynamiques classiques (débit, température et conductivité électrique). Ce jeu de données a permis à ce site d'intégrer le Service National d'Observation du Karst (SNO KARST). L'objectif de ce stage est de comprendre en quoi la dynamique de transport des matières en suspension et des fluorophores permettent de mieux comprendre le fonctionnement du karst de la Fontaine de Nîmes, et de tenter d'identifier les différents compartiments du karst qui contribuent à l'alimentation de la source selon les conditions hydrogéologiques.

2 - Etat de l'Art

Le karst correspond à l'ensemble des structures qui sont issues de la dissolution des roches carbonatées comme les calcaires ou les dolomies. La dissolution est rendue possible par la présence d'acide carbonique dans les eaux infiltrées au sein de la structure (Bakalowicz, 1999). Un karst est une structure complexe, de par son hétérogénéité, qui diffère selon les caractéristiques géologiques du site étudié, mais également selon l'état de karstification du système (Marsaud, 1996). Ainsi, différentes vitesses d'écoulement sont observées au sein du même système. Dans les conduites karstiques qui contrôlent le drainage de l'aquifère, l'écoulement est en général bien plus rapide que dans le reste du système où l'écoulement, lent, empreinte le réseau de fractures. (White, 1969).

La structure d'un système karstique est divisée (au plus) en 3 zones distinctes disposées verticalement (Mangin, 1975) :

- La zone d'infiltration peut contenir un épikarst. L'épikarst, lorsqu'il est présent, correspond à la zone la plus superficielle du karst. C'est la zone la plus sensible à l'altération physique et chimique du système puisqu'elle est la plus proche de la surface (Blavoux et Mudry, 1986). Il peut jouer le rôle d'aquifère superficielle en stockant des masses d'eau qui proviennent des précipitations pouvant être importantes et/ou temporaires selon le climat environnant et son état de karstification (Klimchouk, 2004). La zone d'infiltration est une zone qui se remplit seulement lors de fortes périodes de recharge ou lors des crues. Elle est le siège d'infiltrations rapides qui contrôlent la dynamique de décrue des exutoires karstiques (Mangin, 1975). Lorsque

cette zone est très épaisse, une infiltration lente est également identifiée à partir de l'analyse des hydrogrammes, et est attribuée au drainage de la zone d'infiltration (Ladouche, 2005).

- La zone noyée est la partie du karst qui est constamment en eau. Elle représente le réservoir d'eau le plus important du karst. La zone noyée est généralement constituée des conduites qui vont présenter les vitesses d'écoulement les plus fortes du système. Elle est également constituée d'une matrice fracturée qui stocke la majeure partie de l'eau du système et est à l'origine des écoulements lents (Kiraly, 1998).

Une des particularités d'un aquifère karstique est que l'eau qui transite par ce système est chargée de matières en suspension (Mahler, 1999). Ce phénomène intervient principalement durant les épisodes de crues, où l'augmentation du débit permet une remobilisation de la matière qui décante entre deux épisodes de crues et pendant l'étiage où le débit engendré par les orages est trop faible pour transporter ces particules (Close-Lecocq, 1981). Pour autant, la valeur de turbidité, représentative de la concentration de l'eau en matière en suspension, ne correspond pas seulement à la remobilisation de la matière du système, mais également à l'importation d'éléments via les précipitations ainsi qu'à l'altération du système karstique dans les fissures et drains par le passage de l'eau (Reed et al, 2010). Lors des crues, il est cependant difficile de discerner la part de turbidité correspondant à la remobilisation, dite composante autochtone, de celle correspondant à l'apport de matière dans le système, dite composante allochtone (Massei et al, 2003). De plus, chaque aquifère karstique possède une dynamique différente due à la complexité du système et il est également difficile d'utiliser les mêmes critères de détermination d'un karst à un autre (Einsiedl, 2010).

3 - Présentation du site d'étude

3.1 - Contexte géologique

Le karst Nîmois prend place au Nord de la ville, dans les garrigues. Les garrigues se situent principalement sur les roches de l'Hauterivien supérieur constituées de calcaires (figure 1), ainsi que de l'Hauterivien inférieur et du Barrémien constituées de calcaires marneux (Maréchal et al, 2005). La faille de Nîmes délimite, au sud, le karst de la plaine de la Vistrinque constituée de dépôts d'argiles, limons ou encore de Loess qui la rendent peu perméable.

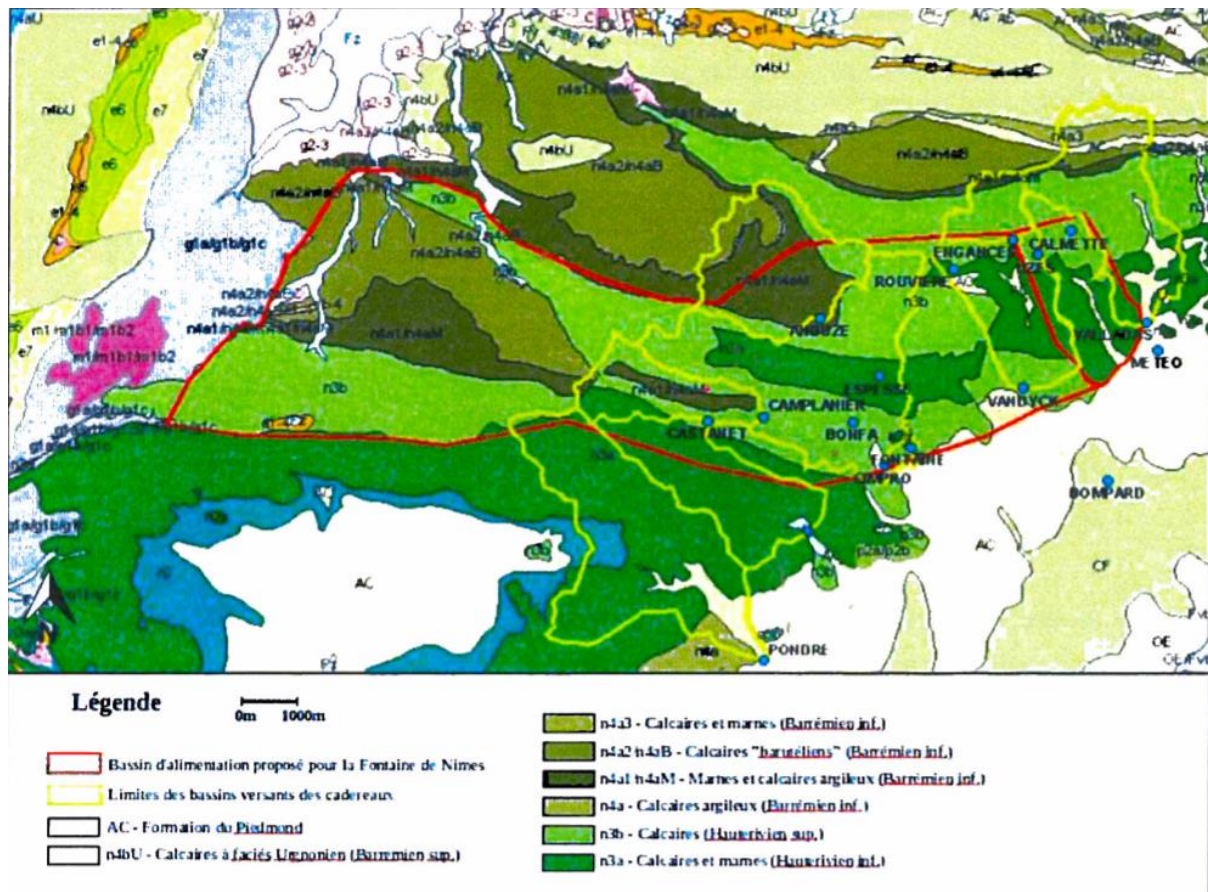


Figure 1 : Carte géologique du bassin d'alimentation (rouge) du karst Nîmois réalisé par Xavier Durepaire (2014)

3.2 - Contexte hydrogéologique

Avec un bassin d'alimentation estimé à environ 55 km² (Fabre, 1997), l'aquifère karstique de Nîmes, situé dans le département du Gard, dans le sud de la France, est en proie aux événements Cévénols et de manière générale aux pluies de fortes intensités, typique du climat méditerranéen. Il y tombe en moyenne 800mm d'eau par an pour moins de 100 jours de précipitations. La ville est donc soumise à des orages provoquant souvent des crues éclairs de grande intensité.

L'exutoire principal du karst Nîmois se situe au sein de la ville, dans les jardins de la Fontaine de Nîmes. Cet exutoire est une source de débordement, l'eau sort du karst par l'Aven Mazauric (Maréchal et al, 2004). Le débit moyen mesuré dans l'Aven Mazauric est de 560 L/s, mais il peut descendre jusqu'à 10 L/s en période d'étiage et atteindre des valeurs supérieures à 15 m³/s en période de crue.

L'aven Mazauric est alimenté par deux drains principaux qui prennent naissance au Nord-Est et au Nord-Ouest de l'exutoire (figure 2). Le drain Nord-Ouest est de plus grand diamètre que le drain Nord-Est, il

alimente probablement plus fortement l'exutoire en eau. Sur le premier drain (Nord-Est) se trouve le piézomètre des 9 Arcades. Le second drain est également relié à un puits, puits Poubelle. L'eau provenant du drain Nord-Est subit de fortes pollutions anthropiques dues au rejet des eaux de ménages dans le karst. C'est aussi le cas du drain Nord-Ouest dans une moindre mesure, mais celui-ci reçoit également les eaux polluées en provenance de la décharge de Lauzières située à l'Ouest de la ville de Nîmes (Maréchal et al, 2004).

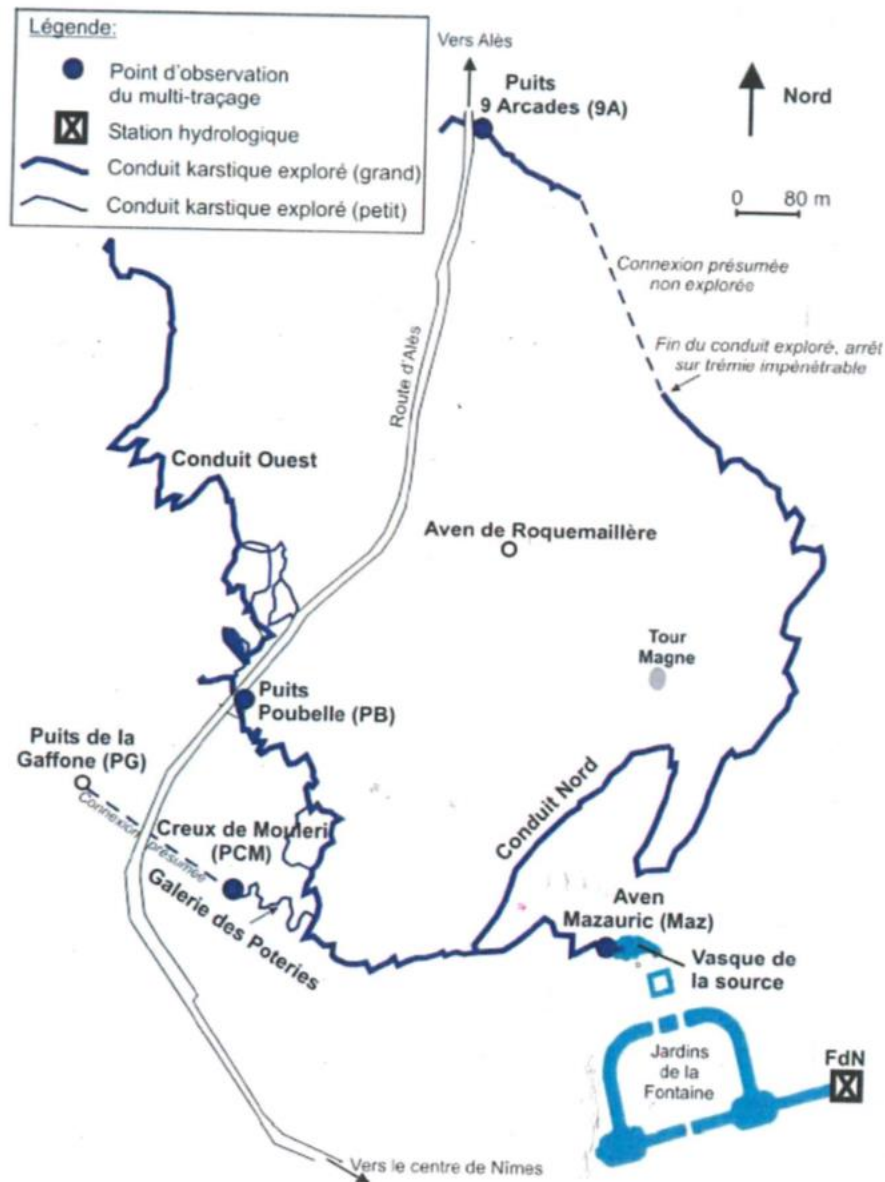


Figure 2: Carte du réseau spéléologique de la Fontaine de Nîmes réalisée d'après Coste et Jouanen (2002) et repris par Mélanie Erostate (2016)

4 - Matériel et Méthodes

4.1 - Description des variables

Différents paramètres ont pu être suivis sur le site de la fontaine de Nîmes. Tous les paramètres utilisés ont été mesurés sur différentes périodes mais tous au pas de temps de 15 minutes, à l'exception des données de précipitations. Des moyennes horaires ont été réalisées pour l'interprétation.

Turbidité: Sur le site d'étude, la turbidité est mesurée depuis 2012 à l'aven Mazauric. Elle correspond à la charge de matières en suspension (MES) dans l'eau et est exprimée en NTU. La turbidité du système provient de la remobilisation de la matière lors des épisodes de crues et de l'infiltration des eaux chargées en MES dans le karst lors des précipitations ainsi que de la dissolution de la matrice lors du passage de l'eau.

Fluorescence: La fluorescence est une donnée mesurée depuis 2012 à l'Aven Mazauric. En solution, les substances émettant la fluorescence sont appelées fluorophores. Les fluorophores sont présents principalement dans la matière organique dissoute (Borup, 2008). Les matières organiques dissoutes (MOD) sont présentes sous deux formes dites humiques et non-humiques. La MOD humique est issue de la décomposition des végétaux (Hudson et al, 2008) tandis que la MOD non-humique est sécrétée par l'activité fongique et bactériologique du système (Parlanti et al, 2000). La fluorescence peut être apportée dans un aquifère par les rejets anthropiques. Dans le cas de la Fontaine de Nîmes, les eaux de ménage relâchées dans le karst chargent l'eau en matière organique dissoute. Par conséquent, la fluorescence est, pour le cas du site d'étude, un indicateur de la pollution de l'eau.

Conductivité Electrique: Elle est mesurée depuis 2004 à l'Aven Mazauric et de 2004 à 2015 à puits Poubelle et 9 Arcades. Malheureusement seule la conductivité de l'exutoire est exploitable puisque lors des épisodes de crue, les sondes placées à puits poubelle et 9 arcades ne fonctionnaient pas sur un ensemble d'épisodes suffisamment important. La conductivité est un indicateur de la minéralisation de l'eau, ainsi, plus une eau est chargée en éléments, plus sa conductivité est forte. Elle peut également être indicateur d'une pollution du système. La conductivité de l'eau de ruissellement issue de la pluie est de l'ordre de quelques dizaines de $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C . Lors de son transit dans un karst, celle-ci augmente rapidement du fait de la dissolution et de l'équilibre calco-carbonique, pour atteindre des valeurs de plusieurs centaines de $\mu\text{S}/\text{cm}$. Pour le cas des karsts méditerranéens la conductivité spécifique de l'eau est souvent supérieure à $400 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Le débit: Le débit est mesuré sur le site de la fontaine de Nîmes depuis 1998 et à partir d'une courbe de tarage hauteur/débit établie en 2005. L'étude du débit permet d'analyser le temps de réponse du système face à un épisode pluvieux.

La piézométrie des points de 9 Arcades (n° BSS BSS002ESQL) et de Puits Poubelle (n° BSS forage F3 BSS002ESXB) a été mesurée entre 2001 et 2015. Connaître la piézométrie sur les deux branches du système permet de comprendre la réaction du système au cours d'une année hydrologique mais également au cours des crues.

Les précipitations de la ville de Nîmes ont été fournies par MétéoFrance sur la période de 1998 à 2015. Ces données sont les seules à ne pas avoir été directement mesurées par le BRGM.

4.2 - Sélection des crues

Les crues ont été sélectionnées grâce aux données de précipitations sur toute la période de l'étude. Les 32 plus forts épisodes de pluie sur une période de 24h ont été retenus. Les crues ont été séparées en 4 types dans le but d'identifier un comportement différent selon l'état hydrologique du système :

- La crue de reprise: La crue de reprise désigne la première crue qui alimente l'aquifère à la fin de la période d'étiage. Il en existe une seule par année hydrologique, à partir du mois d'Aout. Les critères pour qu'une crue soit considérée comme une crue de reprise sont qu'elle ait lieu à partir du mois d'Aout et que son pic de crue dépasse les $5\text{m}^3/\text{s}$.
- La crue de recharge: Un seul critère est utilisé pour déterminer si une crue est, ou non, une crue de recharge. Il est impératif que la crue ait lieu pendant la période de recharge de l'aquifère.
- La crue printanière: Lorsque le niveau piézométrique de la zone noyée commence à diminuer, une crue est placée en crue printanière.
- Les orages d'été : Lorsque la crue survient pendant la période d'étiage, avant le mois d'Aout ou après mais que son pic de crue ne dépasse pas les $5\text{ m}^3/\text{s}$, elle est considérée comme un orage d'été.

Les crues sélectionnées sont traitées selon deux approches différentes. En premier lieu, chaque épisode de crue est observé individuellement (figure 5). Cette approche permet d'analyser l'évolution des paramètres de conductivité, turbidité et fluorescence au cours de la crue. S'en suit la mise en place de graphiques binaires. Ils permettent d'étudier, via des indicateurs sélectionnés grâce à une matrice de

corrélation (ANNEXE 1), la conductivité, la turbidité ou encore la fluorescence sur l'ensemble des crues (figure 6). Ces graphiques permettent de croiser des informations hydrodynamiques, climatiques et physico-chimiques sur l'ensemble de la période analysée.

4.3 - Séparation d'hydrogramme par modèle de mélange

Le modèle de mélange est utilisé en hydrologie afin de définir en un point donné, ici l'exutoire du karst Nîmois, les proportions des différents types d'eau qui contribuent à l'alimentation de l'exutoire. Pour pouvoir utiliser ce modèle, il est indispensable de partir du postulat que le site étudié provient d'un mélange de plusieurs pôles de mélanges différents. Pour se faire, les concentrations de paramètres chimiques et/ou physico-chimiques naturels sont utilisées. Les traceurs naturels correspondent aux indicateurs retrouvés dans une eau naturellement, qui permettent d'identifier via leur variation, l'arrivée d'une masse d'eau particulière (Molinari, 1969). Ces derniers sont considérés comme ayant un comportement conservatif dans le système (Carrera et al, 2004). La définition des pôles peut se faire de deux façon différentes. A partir d'échantillons collectés sur le site étudié ou par estimation des valeurs attribuées aux pôles.

Dans le cadre de ce stage, les valeurs attribuées aux pôles ont été estimées en interprétant les valeurs observées pour chaque paramètre. Le but de cette méthode étant de déterminer la contribution de chaque pôle dans l'eau de mélange, des coefficients (α , β , γ , etc) sont attribués à chaque pôle. Ici un exemple présente un cas où l'eau de mélange est issue de 3 pôles différents.

$$(1) \quad Q(t) = \alpha(t)Q_1(t) + \beta(t)Q_2(t) + \gamma(t)Q_3(t) \quad (\text{en m}^3/\text{s})$$

$Q(t)$ représente le débit de l'eau de mélange à un l'instant t . Les coefficients α , β et γ sont estimés grâce à un système de 3 équations à 3 inconnues où des composantes caractéristiques des pôles de mélange sont utilisées:

$$(2) \quad V(t) = \alpha(t)V_1 + \beta(t)V_2 + \gamma(t)V_3$$

$$(3) \quad W(t) = \alpha(t)W_1 + \beta(t)W_2 + \gamma(t)W_3$$

$$(4) \quad 1 = \alpha(t) + \beta(t) + \gamma(t)$$

$V(t)$ et $W(t)$ correspondent aux valeurs des composantes utilisées dans l'eau de mélange à l'instant t pour les 2 variables. $V_i(t)$ et $W_i(t)$, avec i le numéro attribué à chaque pôle, représentent les valeurs de la composante utilisée pour chaque pôle.

Pour pouvoir réaliser ces opérations pour chaque pas de temps d'une crue et pour chaque crue, un code MATLAB a été mis en place au cours du stage (ANNEXE 2).

5- Résultats

5.1 - Réponse hydrodynamique du système face à un épisode pluvieux

Comparer le débit de l'Aven Mazaure pendant une crue avec l'évolution de la piézométrie du puits des 9 Arcades et de puits Poubelle permet de comprendre la réaction du système face à une crue. Le niveau piézométrique du puits des 9 Arcades est plus élevé de 2m que celui de puits Poubelle (Figure 3). Puisque les deux piézomètres se situent sur des branches différentes, étudier leur évolution permet également de comprendre comment est alimenté le système.

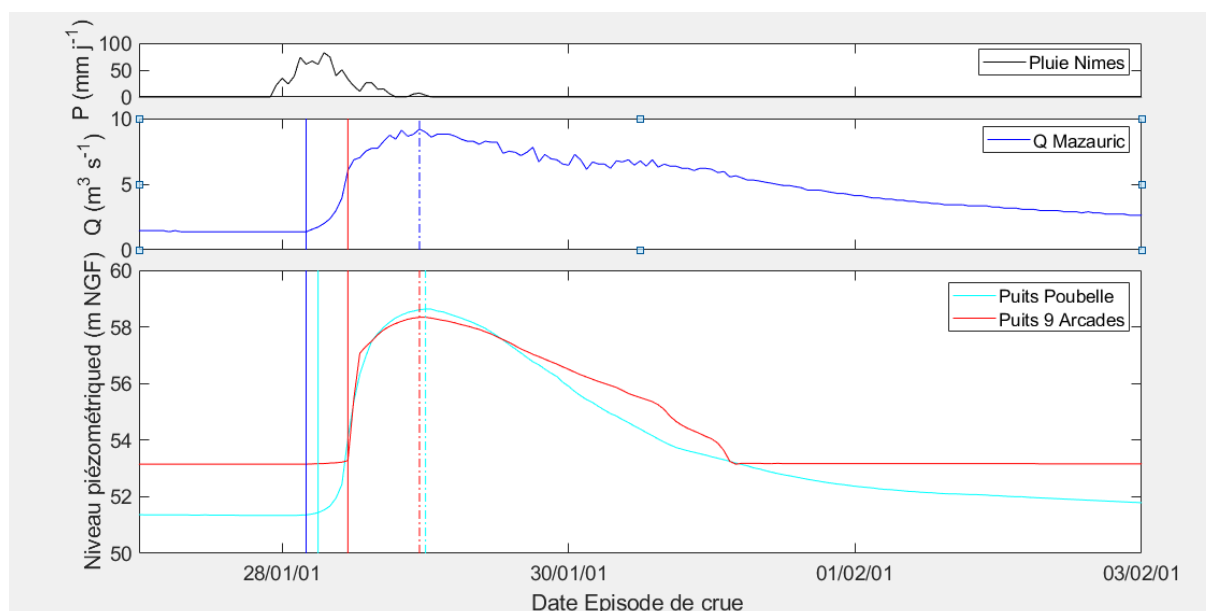


Figure 3 : Evolution de la pluviométrie sur la ville de Nîmes, du débit observé à l'exutoire et des niveaux piézométriques des puits Poubelle et 9 Arcades durant un épisode de crue

Pendant un épisode de crue, la réaction de l'exutoire à des précipitations se fait en seulement quelques heures. Ces variations de débit observées sont corrélées à celles du niveau piézométrique de puits Poubelle de façon quasi-simultanée. Elles sont représentées graphiquement par les lignes pleines verticales bleues et bleues claires. Ce n'est pas le cas pour le puits des 9 Arcades qui commence à varier lorsque le niveau piézométrique de puits Poubelle augmente suffisamment pour être égal à celui observé aux 9 Arcades. Cette réaction au niveau des 9 Arcades se fait systématiquement lorsque le débit dépasse 5 m³/s. Tant que le débit mesuré à l'exutoire est inférieur à 5 m³/s, aucune variation de niveau n'est observée au puits des 9 Arcades. La réaction du puits des 9 Arcades arrive donc plus tard que celle de puits Poubelle, avec un effet de seuil. Cependant, le niveau piézométrique maximal des deux puits,

représenté sur la figure par les lignes pointillées de couleur bleue et rouge, est atteint au même moment. Ce niveau piézométrique maximal survient également au même moment que le pic de crue.

Cet épisode de crue n'est pas un cas isolé, puisque c'est un fonctionnement qui est retrouvé pour chaque épisode de crue (figure 4). Le débit maximal correspond au pic de crue mesuré à l'Aven Mazauric pendant les épisodes de crue et la hauteur d'eau pour les puits des 9 Arcades et Poubelle correspond au niveau piézométrique maximal recensé pendant l'épisode de crue.

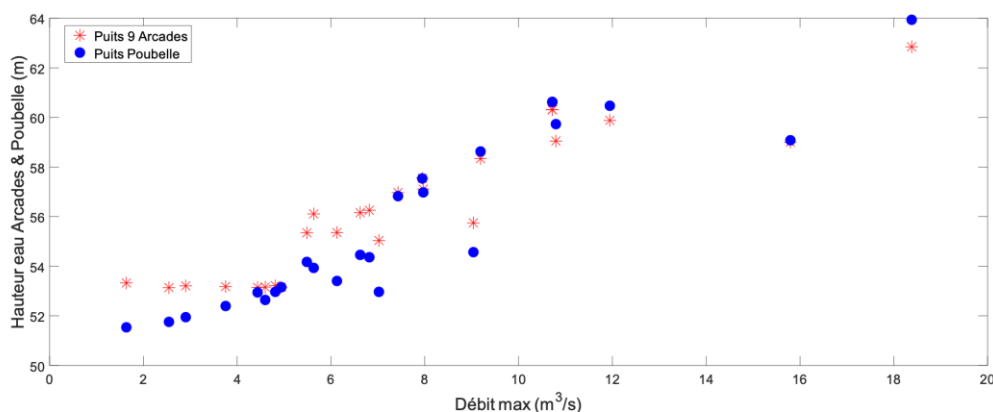


Figure 4 : Evolution du niveau piézométrique dans les puits Poubelle et 9 Arcades en fonction du débit maximal mesuré à L'Aven Mazauric pendant les épisodes de crues

Plus le débit mesuré pendant le pic de crue est fort, plus le niveau piézométrique au puits Poubelle est élevé. Ce n'est pas nécessairement le cas pour 9 Arcades. Si le pic de crue n'excède pas les 5 m³/s, alors le puits des 9 Arcades reste à son niveau de base. Lorsque les pics de crue sont supérieurs à 5 m³/s, 9 Arcades réagit de manière similaire au puits Poubelle. Cependant, pour des débits compris entre 5 et 7,5 m³/s, les niveaux piézométriques des deux puits sont différents, bien qu'ils soient tous deux mis en eau.

5.2 - Réaction physico-chimiques du système pour un épisode pluvieux

Lors d'une crue, des variations de conductivité, de turbidité et de fluorescence peuvent être observées à l'Aven Mazauric (figure 5).

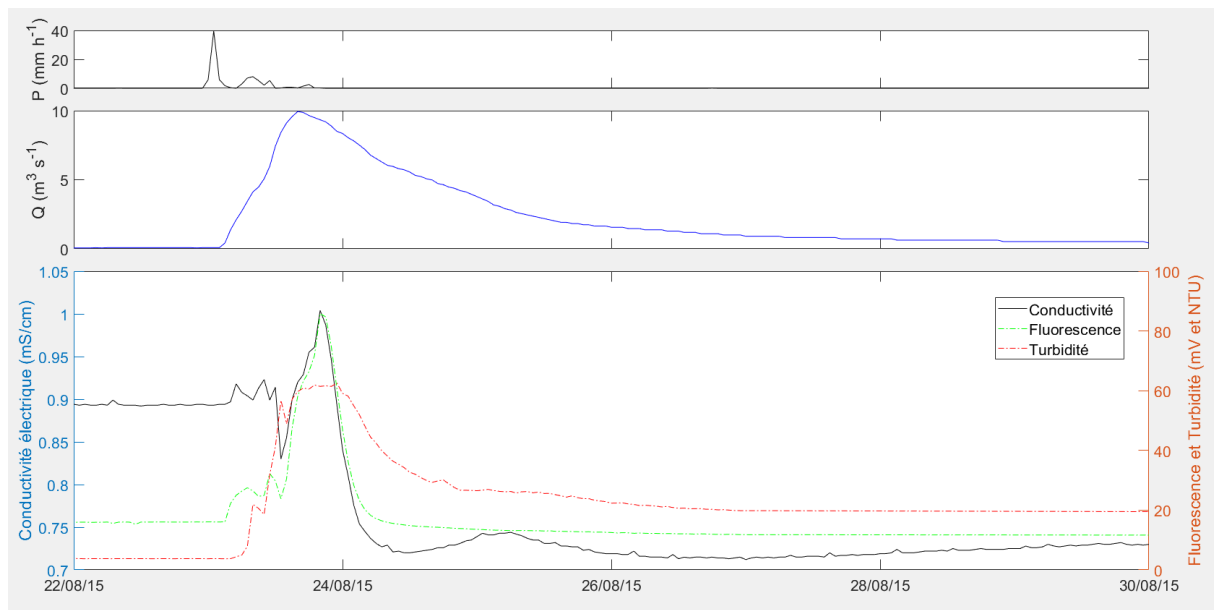


Figure 5 : Evolution de la turbidité, fluorescence et conductivité au cours d'une crue superposée à l'hydrogramme de crue.

La conductivité électrique passe de 0.9 mS/cm à 0.7 mS/cm entre le début et la fin de la crue (figure 5). Cependant une première diminution est visible suivie directement par un pic de conductivité plus fort que la conductivité initiale. Au cours de la crue, l'exutoire dilue alors globalement l'eau puis fait face à une arrivée d'eau plus minéralisée. Ce pic de conductivité est lié au pic de crue ainsi qu'au pic de fluorescence et de turbidité.

La fluorescence réagit différemment systématiquement de la conductivité puisqu'elle va présenter un pic pendant le pic de crue puis redescendre à sa concentration initiale rapidement. Ce n'est pas le cas de la turbidité qui augmente jusqu'au pic de crue et stagne à cette valeur pour quelques heures avant de diminuer à nouveau lentement. La turbidité ne retrouve pas sa valeur initiale même plusieurs jours après l'événement. Ce phénomène est probablement lié à un encrassement de la sonde pendant la crue.

5.2.1 - Etude de la conductivité électrique

L'évolution de la conductivité est différente selon les crues, leur intensité mais également la période de l'année, c'est pourquoi les crues sont séparées en différents types (figure 6). ΔEC_{min} est l'indicateur de conductivité corrélant le mieux avec le débit. Il correspond à la différence entre la conductivité initiale et la conductivité post-événementielle. Le débit max correspond au pic de crue de l'événement.

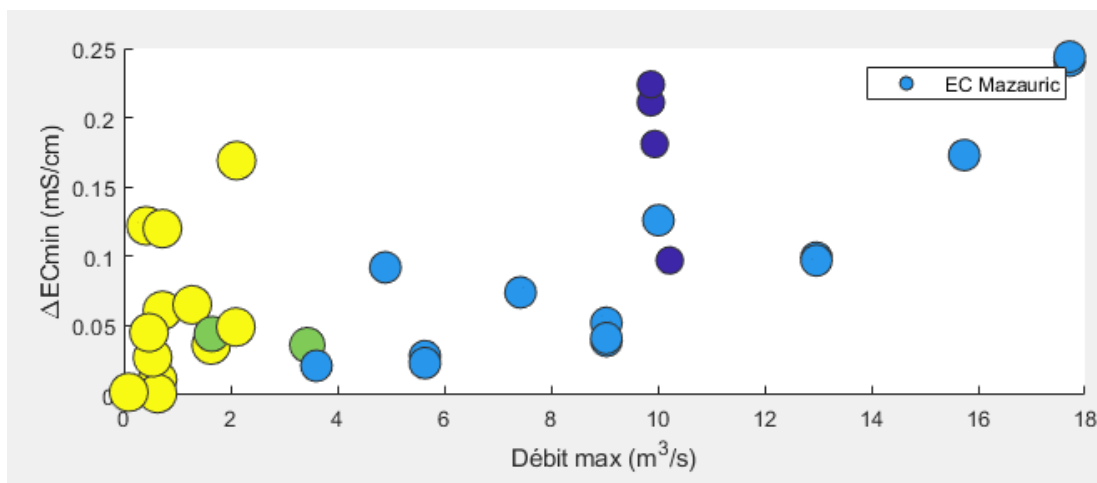


Figure 6 : Evolution de la conductivité électrique à l'aven Mazauric entre le début et la fin des crues en fonction du débit max avec les points jaunes correspondant aux orages d'été, les points verts aux crues printanières, les points bleus ciels aux crues de recharge et les points bleus foncés aux crues de reprise.

1

Les crues de reprise et les orages d'été sont des crues qui permettent une forte dilution de l'eau au cours de l'événement (figure 6). Certaines crues de recharge permettent également une dilution intense de l'eau de l'aquifère mais elles nécessitent des débits nettement plus élevés. Pour les mêmes débits, ces crues diluent l'eau plus faiblement. En effet, plus la crue est forte plus la dilution de l'eau est importante en période de recharge. Cependant les événements qui diluent autant que les crues de reprises sont considérées comme des événements exceptionnels à temps de retour d'au moins 10 ans.

En ce qui concerne le pic de conductivité au cours de la crue, ce dernier n'est pas toujours présent. Le ΔEC_{max} correspond à la différence entre la conductivité initiale et le pic de conductivité (figure 7).

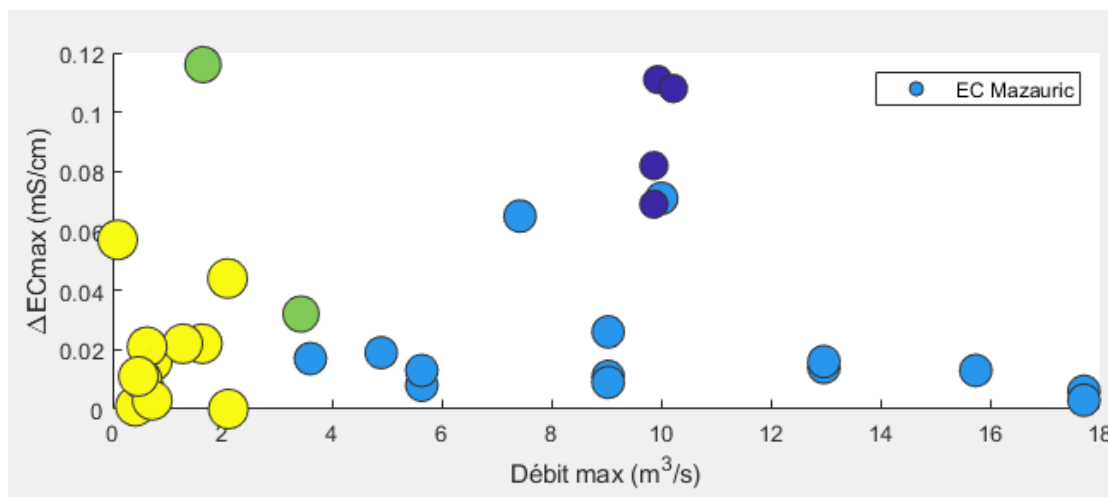


Figure 7 : Evolution de la conductivité électrique à l'aven Mazauric entre le début de l'événement et le pic de conductivité en fonction du débit max avec les points jaunes correspondant aux orages d'été, les points verts aux crues printanières, les points bleus ciels aux crues de recharge et les points bleus foncés aux crues de reprise.

Ce pic survient pour toutes les crues considérées comme des crues de reprises ainsi que pour quelques orages d'été mais dans une moindre mesure (figure 7). Les crues printanières peuvent présenter ce pic mais la gamme d'échantillon est trop faible pour pouvoir l'affirmer. Par contre, c'est un phénomène qui ne se produit que peu souvent pendant la période de recharge.

5.2.2 - Etude de la turbidité

La turbidité est également influencée par la période à laquelle l'événement a lieu, mais ce n'est pas le seul critère. En effet, plus le pic de crue est important, et plus il est probable d'observer un pic de turbidité intense. Pour le cas de la figure 8, le pic de turbidité est représenté par la variable ΔTurb qui correspond à la différence entre la turbidité maximale observée pendant l'événement et la turbidité initiale (Annexe 2).

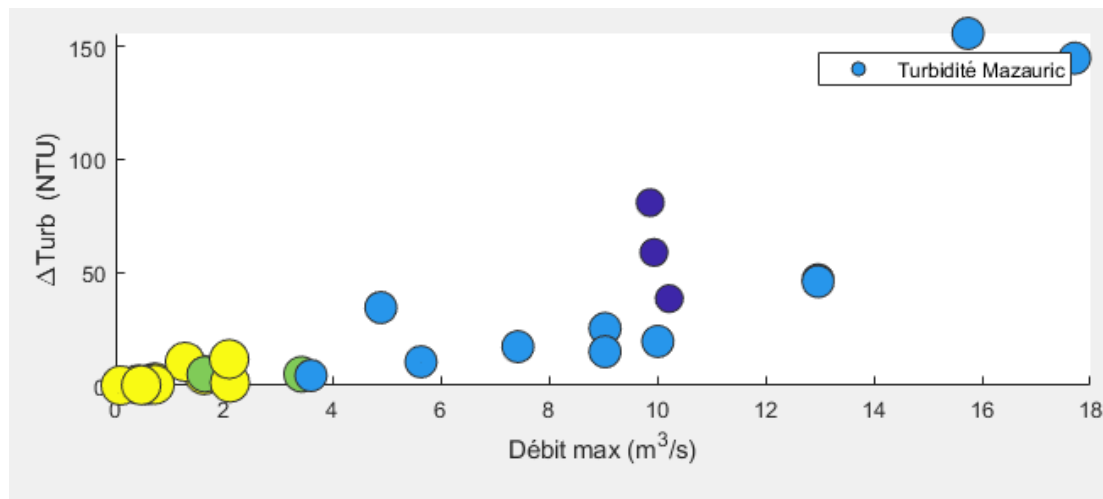


Figure 8 : Evolution de la turbidité à l'aven Mazauric entre le début de l'événement et le pic de turbidité en fonction du débit max avec les points jaunes correspondant aux orages d'été, les points verts aux crues printanières, les points bleus ciels aux crues de recharge et les points bleus foncés aux crues de reprise.

La turbidité n'est que peu présente pendant les crues lorsque celles-ci n'excèdent pas 5 m³/s. Cependant, à partir de 5 m³/s, lorsqu'une partie du système comme le puits des 9 arcades est mis en eau, la turbidité commence à se manifester. Pour une crue de reprise et de recharge de même intensité, la crue de reprise produit plus de turbidité que la crue de recharge. Cependant pour les crues de recharge, cette turbidité est proportionnelle à l'intensité de la crue.

5.2.3 - Etude de la fluorescence

La fluorescence réagit différemment de la turbidité et de la conductivité. Elle ne dépend pas du débit maximal observé pendant la crue mais du débit initial (figure 9). De plus, elle est inversement proportionnelle à ce débit initial.

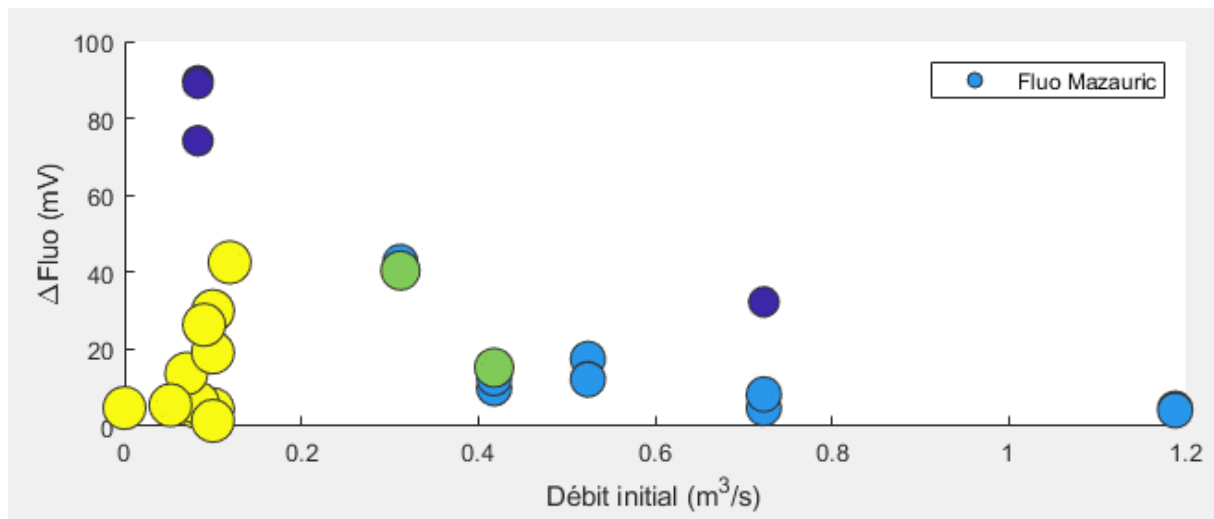


Figure 9 : Evolution de la fluorescence à l'aven Mazaauric entre le début de l'événement et le pic de fluorescence en fonction du débit initial avec les points jaunes correspondant aux orages d'été, les points verts aux crues printanières, les points bleus ciels aux crues de recharge et les points bleus foncés aux crues de reprise.

Les pics de fluorescence les plus faibles apparaissent pour des débits initiaux proches de 0 m³/s. La fluorescence mesurée la plus intense intervient lors de crues de reprise. Pour les crues de recharge, la fluorescence n'arrive dans le système qu'en petite quantité et n'intervient plus lorsque les débits sont trop faibles.

5.3 – Variabilité temporelle des pôles de mélange

Un total de trois pôles de mélange a été déterminé par l'étude des différentes variations de conductivité et de fluorescence observées au cours des crues et l'étude des potentielles zones pouvant alimenter l'eau de mélange. Chaque pôle possède ses propres caractéristiques:

- Pôle de mélange 1 : Cette eau correspond à l'eau pré-événementielle présente dans le système. Sa contribution à la crue est influencée par la variation du débit de base. Le débit de base représente la part d'eau qui n'est pas issue des précipitations. Dans le cas d'un karst, le débit de base est associé à la part d'eau issue de la zone noyée.
- Pôle de mélange 2: C'est une eau minéralisée et peu fluorescente, caractéristique de temps de séjours court dans le l'aquifère karstique. Elle est caractéristique d'un écoulement rapide.
- Pôle de mélange 3: C'est une eau également pré-événementielle qui est fortement chargée en matières organiques dissoutes fluorescentes, et qui présente également une conductivité

électrique élevée. La contribution de ce pôle se traduit également par de fortes valeurs de turbidité. Elle est significative d'une eau à long temps de séjour dans le karst ou une eau fortement polluée par les eaux de ménage.

Les équations de mélange ont été réalisées en utilisant comme composantes la conductivité électrique et la fluorescence. La turbidité n'a pas été sélectionnée car elle n'est pas considérée comme un traceur suffisamment conservatif pour caractériser un pôle de mélange. Elle dépend beaucoup trop de la charge hydraulique mise en œuvre durant la crue pour pouvoir permettre d'identifier clairement l'apport d'un pôle de mélange. Les valeurs sélectionnées pour chaque pôle sont les suivantes:

Tableau 1: Valeurs de conductivité et de fluorescence déterminées des pôles de mélange

	Pôle de mélange 1	Pôle de mélange 2	Pôle de mélange 3
Conductivité électrique (mS/cm)	0.96	0.05	1.5
Fluorescence (mV)	7	0	200

La mise en place de trois pôles d'eau différentes (figure 10) permet de fournir une première approche théorique du fonctionnement des différentes masses d'eau au sein de l'aquifère lors d'une crue. L'eau des 3 pôles additionnée représente le débit total relevé à la source de la Fontaine de Nîmes.

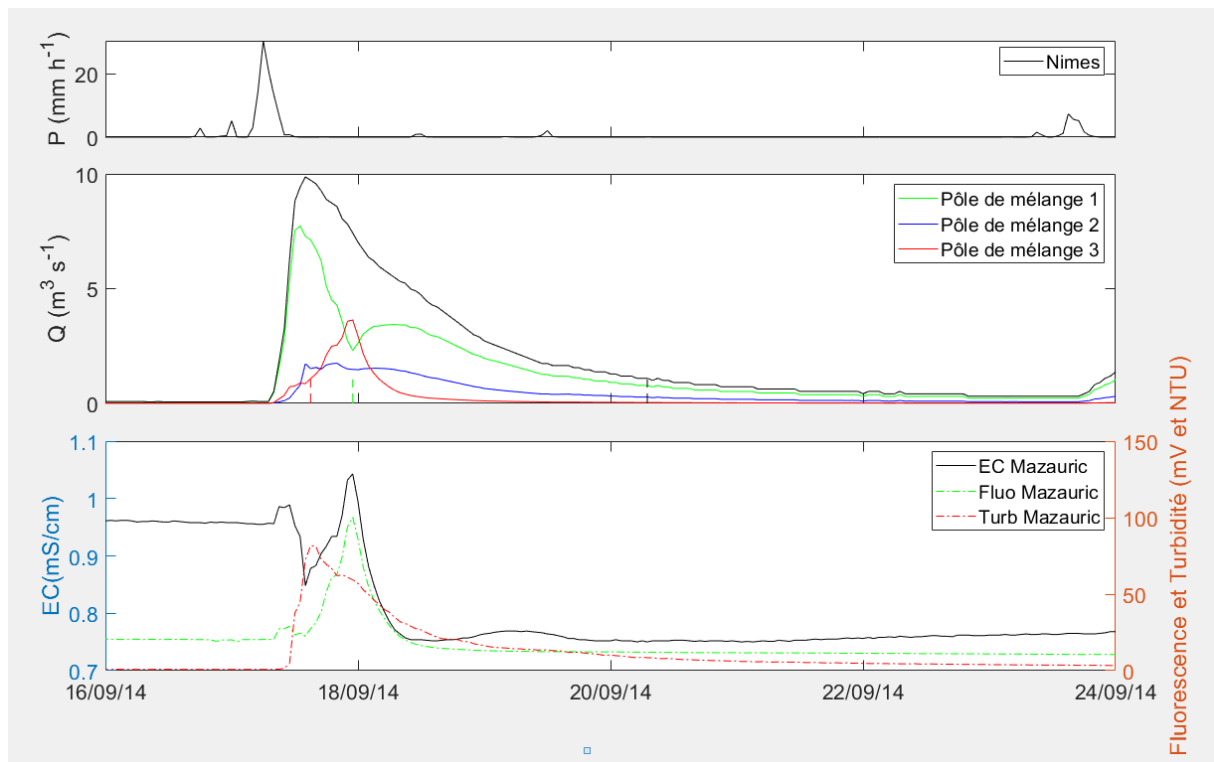


Figure 10: Evolution des de la contribution des différents pôles au court d'une crue

Sur cet exemple de crue de reprise (figure 10), l'eau du premier pôle de mélange est prédominante sur les premières heures. Sa proportion à l'exutoire diminue ensuite laissant place à une plus forte part d'eau en provenance des deux autres pôles. Cependant, cette eau provenant de la zone noyée contribue fortement à la crue tout au long de l'événement. Ce n'est pas le cas d'une l'eau de deuxième pôle qui est présente seulement aux alentours du pic de crue. L'eau du pôle 3 alimente quant à elle la source progressivement jusqu'au pic de crue, puis de plus en plus faiblement jusqu'à la fin de l'événement.

La première diminution de conductivité est associée à la fois à l'augmentation de la contribution de l'eau des pôles 1 et 3. C'est également le cas pour le pic de turbidité. L'augmentation de conductivité et le pic de fluorescence sont eux associés à une forte diminution du rôle de l'eau du pôle 1 dans l'hydrogramme de crue et à l'apparition de la contribution de l'eau du pôle 2.

Il est possible de tirer de ces courbes, des proportions moyennes d'eau provenant des 3 pôles définis, pour chaque type de crue (figure 11).

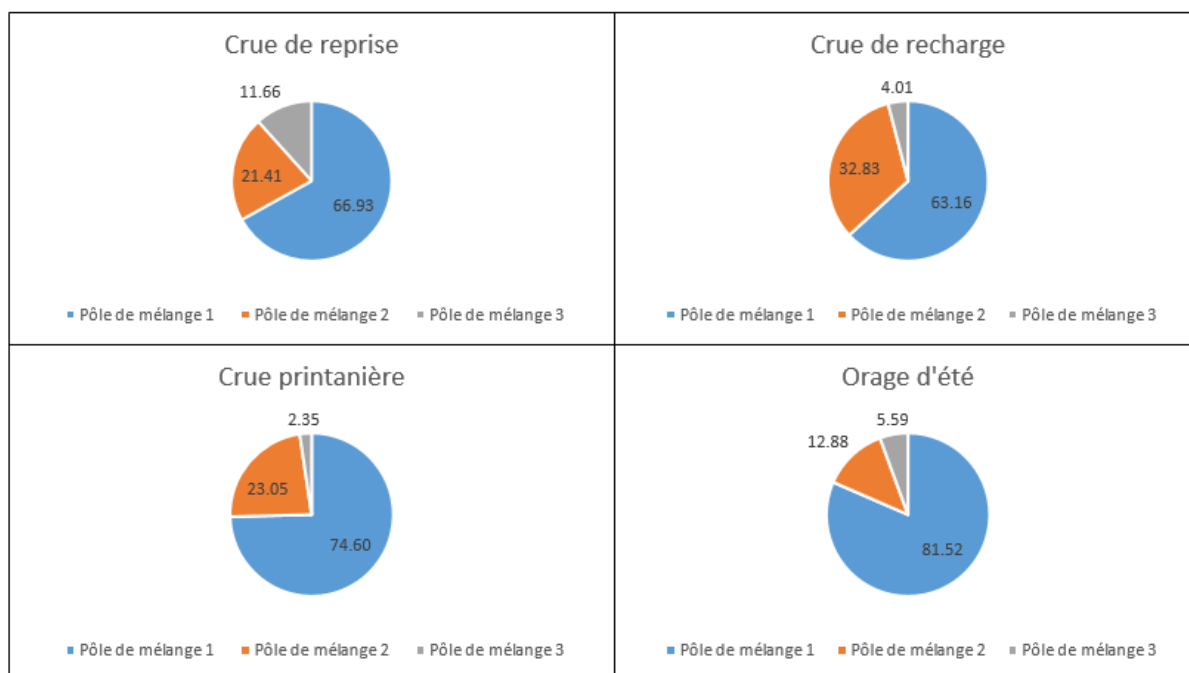


Figure 11 : Contribution moyenne de chaque pôle de mélange pour chaque type de crue (en %)

Tous les types de crues sont principalement alimentés par le premier pôle de mélange. Le pôle de mélange 2, contribue plus grandement aux crues de recharges hivernales qu'aux autres crues. Il n'alimente que très peu l'eau de mélange pendant les orages d'été. Ces derniers ne dépassent que rarement 5 m³/s. Ce pôle influence plus les crues lorsque le système est déjà, en partie en eau. Enfin, le pôle de mélange 3 n'alimente que très peu le système, sauf pendant les crues de reprises.

6- Discussion

La réaction piézométrique simultanée de puits Poubelle et de l'exutoire indique qu'ils sont connectés hydrauliquement. Ce n'est pas le cas du puits des 9 Arcades. En effet, il nécessite d'atteindre une certaine charge hydraulique dans le drain (et donc un certain débit à l'exutoire) pour que le puits des 9 arcades commence à réagir à l'épisode de crue. Cependant, une fois ce niveau de saturation atteint, l'évolution des 3 points est similaire indiquant qu'ils sont connectés hydrauliquement. Ces informations renseignent sur la position des puits. Puits Poubelle, positionné sur le drain Nord-Ouest, réagit de façon permanente et similaire à celle de l'exutoire. Ainsi, ces deux points sont directement connectés. Le fait que ce puits soit connecté en permanence à l'exutoire et ce même pour de faibles débits indique qu'il permet de caractériser la charge hydraulique de la zone noyée, seule zone alimentant en permanence la source.

Le puits des 9 Arcades a besoin d'un niveau d'eau minimal pour être connecté au karst, ce qui induit le fait qu'il se trouve dans une zone différente de celle de puits poubelle. Vu qu'il se trouve être en lien avec l'exutoire pour un certain débit indique qu'il se trouve dans la zone d'infiltration, zone mise en eau seulement lors des crues.

C'est l'apport d'eau des zones déconnectées de l'exutoire en dehors des crues qui permet de faire varier les paramètres de conductivité, turbidité et fluorescence.

L'augmentation des valeurs de turbidité dans l'eau observées seulement pour des débits supérieurs à 5 m³/s permet d'avancer plusieurs hypothèses. La première est qu'elle peut provenir de la zone d'infiltration et ne peut être évacuée qu'avec des débits suffisants. La seconde est que pour remobiliser les matières en suspension qui auraient décantées dans la zone noyée, un débit minimal de 5m³/s est nécessaire. Il est probable qu'une association de ces cas de figure se produise pendant les crues de reprises. En effet, la crue de reprise à lieu après une période d'étiage où les matières en suspension ont, à la fois le temps de décanter dans la zone noyée puisque le débit est trop faible pour le transport. Mais où la zone d'infiltration a aussi le temps de se recharger en matières en suspension par apport des eaux infiltrées lors des orages d'été et par stockage des eaux de ménages rejetées dans le karst. Enfin, les fortes valeurs de turbidité observées pour les crues de recharge s'expliquent par le fait qu'elles apparaissent pour des débits extrêmement élevés. Or, plus le débit est élevé et plus les vitesses d'écoulement sont importantes, permettant de remobiliser les MES de la zone d'infiltration et de la zone noyée. De plus, c'est durant la période de recharge que les débits les plus forts sont rencontrés. Ils traduisent également une mise en eau plus grande de l'aquifère, qui connecte alors des souvent quasiment jamais connectées.

La diminution systématique de la conductivité après une crue est influencée par l'arrivée d'une eau jeune dans le système via les précipitations et qui n'a pas eu le temps de se minéraliser. Cette eau se mélange à l'eau déjà présente dans la zone noyée, ce qui pourrait expliquer les teneurs toujours fortes en conductivité. Cette eau issue d'écoulements rapide arrive probablement à l'exutoire au moment de la première diminution des teneurs en conductivité, puis elle continue d'alimenter l'aquifère tout au long de la décrue selon une infiltration plus lente et un stockage plus ou moins long dans la zone d'infiltration. Ceci explique la ré-augmentation de conductivité pour les crues de reprise qui provoquent la mise en eau de la zone d'infiltration et/ou de l'épikarst. L'eau piégée dans ces zones est représentative d'écoulements lents, ce qui lui laisse le temps de se charger en minéraux au contact de la roche.

Les teneurs en fluorescence sont également issues de la mise en eau des zones de stockage. Ces teneurs proviennent du stockage des eaux de ménages ainsi que de la dégradation biologique pouvant s'effectuer dans le karst. De fortes valeurs sont observées pour des débits initiaux faible s'explique par le fait que cette fluorescence est totalement diluée dans la masse lorsque le débit est trop important.

Enfin, les différents pôles d'eau supposés peuvent être reliés à des zones du milieu karstique en comparant leur évolution face aux teneurs en turbidité, fluorescence et conductivité. En partant du principe que l'eau du premier pôle alimente pour près de 100% de l'exutoire en début d'événement, il est possible de la relier à la zone noyée du karst. L'eau du deuxième pôle, faiblement minéralisée, contribue à la crue une fois le pic de crue en place. Elle peut être associée à une eau événementielle qui pourrait apporter une partie de la turbidité présente dans le système et correspondre aux précipitations qui s'infiltrent et ruissellent au sein du karst. Le dernier pôle correspondrait à une eau provenant de la zone d'infiltration. Il se manifeste pour le pic de crue et disparaît rapidement après la diminution en intensité du débit. Pour pouvoir alimenter l'eau de mélange, ce pôle a besoin d'une charge hydraulique minimale afin d'être connecté au système.

Selon le type de crue analysé, les pôles n'alimentent pas de la même manière l'eau de mélange. Le premier pôle, qui est majoritaire dans l'équation de mélange pour toutes les crues, indique que la zone noyée est celle qui alimente généralement l'exutoire. D'après son comportement, le deuxième pôle qui proviendrait de l'infiltration de l'eau de pluie dans le système lors de la crue a un rôle de dilution à l'exutoire. Le fait que cette eau soit plus présente pendant les crues de recharge est cohérent avec le renouvellement de l'eau du système pendant les hautes eaux. Enfin, le dernier pôle de mélange est plus sollicité en période de crues de reprise indiquant un drainage de niveaux perchés dans la zone d'infiltration lorsque le système est sous-saturé après un étiage long de plusieurs mois.

Perspectives de l'étude:

Il serait intéressant de tester cette approche, qui est automatisée (code MATLAB), sur d'autres sites systèmes karstiques afin de définir s'il est possible d'observer des similitudes entre les sites. Il serait nécessaire pour cela d'avoir des séries de données sur une période d'au moins 4-5 ans de conductivité, débit, fluorescence, précipitations et turbidité au pas de temps 1 heure. Cependant, les systèmes karstiques étant extrêmement complexes, il sera sûrement nécessaire d'utiliser d'autre critères de comparaison pour pouvoir définir le fonctionnement d'un autre site, ce qui implique d'en essayer à nouveau une multitude.

Utiliser le modèle de mélange sur le karst de Nîmes a permis de faire des suppositions quant au fonctionnement du système. Ré-utiliser cette méthode sur d'autres sites pourrait nécessiter un nombre de pôles différent selon la complexité du site.

Cette étude pourrait être complétée par le suivi de paramètres hydrochimiques pendant les épisodes de crues, mais également par l'extension du suivi physico-chimique à d'autres points du site d'étude. Ces paramètres pourraient permettre de renforcer les hypothèses faites sur le fonctionnement du système.

7 – Conclusion

L'hétérogénéité du karst de Nîmes rend son fonctionnement complexe à comprendre. L'étude des paramètres physico-chimiques du site a permis d'en déduire que son comportement est différent en fonction des saisons. Pour ajouter à sa complexité, l'application d'un modèle de mélange a mis en évidence la variation de contribution de l'eau des différents pôles au cours de la crue et au cours de l'année.

L'amélioration d'un code MATLAB automatisé au cours du stage permet de pouvoir utiliser à nouveau cette méthode sur d'autres aquifères karstiques. Cette méthode pourrait permettre d'identifier plus rapidement cohérent avec l'hypothèse de drainage de niveaux perchés dans la zone d'infiltration lors de ces forts épisodes de crue survenant après un étiage long de plusieurs mois.

8 – Bibliographie

Bakalowicz, M et Al, Juin 1999. Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques. Bassin Rhône-Méditerranéen-Corse. Guide technique N°3. Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques. Natural tracing in karst aquifers

Blavoux, B, et Mudry, J, 1983 Décomposition chimique des hydrogrammes du karst. Hydrogéologie-géologie de l'ingénieur 4.

Borup, M, 2008. Detecting and Identifying Water Pollution sources using fluorescence spectrophotometry. World environmental and water resources congress 2008.

Carrera, J et al, 2004. A methodology to compute mixing ratios with uncertain end-members. Water resources research 40(12).

Coste, A, Jouanen, G. 2002. Réseau souterrain de la Fontaine de Nîmes – Report en surface, d'après les relevés topographiques de 1966 à 2000. Travaux spéléologiques du Spéléo Club Nimois, de l'Equipe Nimoise de Spéléologie, de l'Association de Spéléologie Nimoise et de l'Association de la Fontaine de Nîmes.

Einsiedl, F. 2010. Occurrence and transport of pharmaceuticals in a karst groundwater system affected by domestic wastewater treatment plants. Journal of Hydrology 312.

Fabre, G, 1997. Le bassin d'alimentation de la fontaine de Nîmes d'après les expériences de tracages. Bull. Société d'étude Sci.Nat.Nîmes, tome 61.

Hudson, N, et al, 2008. Can fluorescence spectrometry be used as a surrogate for the biochemical oxygen demand (BOD) test in water quality assesment. An example from South West England. River Res. Appl. 23.

Kiraly, L, 1998. Modelling karst aquifers by the combined discrete channel and continuum approach. Bulletin d'hydrogéologie 16.

Klimchouk , A, 2004. Towards defining, delimiting and classifying epikarst : It's origin, processes and variants of geomorphic evolution. Speleogenesis and evolution of karst aquifers.

Ladouche B et Al, 2005. Pompage d'essais sur le système karstique des Cents Fonts. Présentations et interprétation des données recueillies. BRGM-RP/54426-FR

Mahler, B, 1999. Muddy water : temporal variation in sediment discharging from a karst spring. Journal of geology 214.

Mangin, A, 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse, Université de Bourgogne, France. These, Laboratoire souterrain du CNRS, Moulis, France.

Maréchal et al, 2004. Synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques sur le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes. BRGM/RP-53422-FR.

Maréchal et al, 2005. Modèle conceptuel de la structure et du fonctionnement du système karstique de la Fontaine de Nîmes BRGM/RP-53827-FR.

Maréchal et al, 2006. Fonctionnement hydrogéologique du système karstique de la fontaine de Nîmes en crue, Rapport final, BRGM/RP-54723-FR.

Marsaud, B, 1996. Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Thèse, Université Paris XI, France.

Massei, N, 2003. Assesment of direct transfer and resuspension of particles during turbid floods at a karstic spring. Hydrogeology journal 14.

Molinari, J, 1969. Les traceurs isotopiques en hydrologie. Ann. Mines Fr.

Parlanti et al, 2000. Dissolved organic matter fluorescence spectroscopy as a tool to estimate biological activity in a coastal zone submitted to anthropogenic inputs. Organic geochemistry 31.

Reed et al, 2010. Sediment discharges during a storm flow proximal urban and rural karst springs, central Kentucky, USA. Journal of geology 383.

White, 1969. Conceptual models for carbonate aquifers. Ground water 7.

VIII - Annexes

Annexe 1 : Matrice de corrélation réalisés avec les paramètres testés au cours du stage

Δ Turb_tot	Δ Turb_max	Δ Turb_min	Turb_ini	Turb_max	Turb_min	Δ Fluo_tot	Δ Fluo_max	Δ Fluo_min	Fluo_min	Pant_Id	Pant_2d	Pant_10d	Pant_15d	Pant_30d	Pant_60d	Pant_90d
0.329	0.298	0.317	0.629	0.386	0.673	-0.340	-0.324	-0.299	-0.452	0.057	-0.008	0.010	0.436	0.608	0.612	0.743
0.857	0.833	0.324	0.427	0.872	0.324	0.148	0.160	0.020	0.012	0.117	-0.052	-0.023	0.611	0.547	0.536	0.499
0.395	0.383	0.158	0.473	0.444	0.604	-0.254	-0.246	-0.199	-0.333	0.151	-0.051	-0.152	0.304	0.380	0.546	0.854
0.768	0.748	0.272	0.430	0.791	0.393	-0.082	-0.068	-0.132	-0.197	0.069	-0.056	-0.091	0.620	0.628	0.623	0.630
0.719	0.700	0.259	0.455	0.748	0.451	-0.120	-0.107	-0.150	-0.232	0.069	-0.057	-0.107	0.578	0.599	0.630	0.699
0.412	0.376	0.357	0.456	0.435	0.332	-0.071	-0.089	0.060	-0.202	-0.007	-0.109	0.033	0.281	0.525	0.433	0.525
0.841	0.836	0.148	0.250	0.848	0.241	0.141	0.170	-0.083	0.049	0.148	0.024	-0.156	0.662	0.452	0.544	0.463
0.703	0.673	0.351	0.238	0.687	-0.027	0.709	0.706	0.454	0.668	0.132	0.101	-0.129	0.254	0.111	0.098	0.054
0.044	-0.011	0.471	0.271	0.032	-0.117	0.630	0.715	0.284	0.601	0.075	0.322	0.053	-0.190	-0.328	-0.372	-0.292
0.799	0.790	0.187	0.149	0.787	0.083	0.502	0.487	0.396	0.496	0.119	-0.035	-0.176	0.386	0.284	0.290	0.200
-0.192	-0.183	-0.094	-0.239	-0.215	-0.287	0.404	0.362	0.437	0.582	0.038	0.112	0.013	-0.278	-0.417	-0.369	-0.265
-0.167	-0.178	0.073	-0.133	-0.192	-0.312	0.621	0.589	0.569	0.760	0.062	0.218	0.030	-0.329	-0.509	-0.478	-0.351
-0.728	-0.715	-0.215	-0.319	-0.741	-0.275	0.015	-0.013	0.172	0.180	-0.048	0.125	0.134	-0.519	-0.574	-0.534	-0.378
0.662	0.668	0.038	-0.019	0.643	-0.079	0.419	0.419	0.257	0.368	0.134	-0.030	0.079	0.406	0.250	0.194	-0.047
0.670	0.687	-0.057	-0.006	0.663	0.059	-0.068	-0.047	-0.163	-0.113	-0.098	-0.185	-0.025	0.571	0.450	0.379	0.079
0.157	0.148	0.104	-0.017	0.140	-0.155	0.583	0.563	0.477	0.565	0.262	0.145	0.122	-0.061	-0.134	-0.133	-0.135
0.065	0.075	-0.079	-0.212	0.040	-0.260	0.428	0.415	0.338	0.506	0.227	0.167	0.142	-0.138	-0.259	-0.151	-0.228
0.461	0.481	-0.105	-0.192	0.435	-0.195	0.338	0.339	0.201	0.380	0.142	0.036	0.111	0.222	0.042	0.095	-0.154
-0.065	-0.040	-0.225	-0.298	-0.085	-0.227	0.036	0.038	0.011	0.171	0.067	0.099	0.085	-0.143	-0.247	-0.087	-0.200
1	0.393	0.189	0.225	0.396	0.149	0.198	0.217	0.010	0.110	0.117	-0.020	0.044	0.594	0.619	0.557	0.345
1	1	0.075	0.134	0.388	0.135	0.175	0.196	-0.014	0.095	0.116	-0.044	0.020	0.602	0.625	0.551	0.328
		1	0.809	0.199	0.144	0.217	0.206	0.201	0.149	0.023	0.202	0.217	0.006	0.034	0.133	0.192
			1	0.286	0.698	0.039	0.041	0.014	-0.050	0.085	0.144	0.132	0.061	0.290	0.307	0.469
				1	0.299	0.176	0.196	-0.011	0.084	0.125	-0.020	0.040	0.592	0.649	0.580	0.390
					1	-0.199	-0.182	-0.221	-0.265	0.115	-0.004	-0.041	0.095	0.446	0.355	0.555
						1	0.332	0.664	0.365	0.184	0.251	-0.015	-0.131	-0.280	-0.340	-0.247
							1	0.564	0.345	0.181	0.275	-0.024	-0.115	-0.270	-0.327	-0.243
								1	0.712	0.126	0.018	0.045	-0.173	-0.236	-0.286	-0.174
									1	0.305	0.230	-0.053	-0.188	-0.342	-0.387	-0.313
										0.313	-0.034	-0.149	-0.242	-0.286	-0.243	-0.297
										1	0.590	0.207	0.019	-0.025	-0.057	0.101
										1	0.501	0.085	-0.071	-0.066	-0.035	0.002
											1	0.333	0.212	0.082	-0.149	-0.112
												1	0.678	0.549	0.175	0.15
													1	0.599	0.345	0.34
														1	0.739	0.66
															1	0.95

Le but de cette matrice de corrélation est de faire ressortir les paramètres corrélés ou anti-corrélés entre eux. Les paramètres fortement corrélés sont affichés en vert, leur corrélation est supérieure à 0,6. Les paramètres fortement anti-corrélés sont affichés en rose. Leur corrélation est inférieure à -0,6.

Pour chaque paramètre : turbidité, température, conductivité, précipitations, débit et fluorescence, les différentes valeurs ont été essayées. C'est le cas des valeurs maximales, minimales ou initiales au cours d'une crue mais également les différences entre ces 3 valeurs.

Pour la pluie un calcul de la pluie antécédante sur 1, 2, 7, 10, 15, 30, 60 et 90 jours a été réalisé, sans succès. Aucune corrélation n'a été jugée assez intéressante pour être exploitée. Sur d'autres sites, ces valeurs seront peut-être utiles.

Annexe 2 : Code MATLAB ayant servi à estimer les équations de mélange :

```
EC_Noyee = 0.96;
Fluo_Noyee = 7;

EC_Dilution = 0.05;
Fluo_Dilution = 0;

EC_Epikarst = 1.5;
Fluo_Epikarst = 200;

Vector_1 = ones(size(EC_Mazauric));
Matrix_X = [EC_Noyee EC_Dilution EC_Epikarst; Fluo_Noyee Fluo_Dilution
Fluo_Epikarst; 1 1 1];
Matrix_Y = [EC_Mazauric Fluo_Mazauric Vector_1];

Matrix_A = zeros(length(t), 3);

for iii = 1:size(Matrix_Y,1)
    Matrix_A(iii,:) = Matrix_Y(iii,:) / Matrix_X' ;
end

alpha = Matrix_A(:,1) ;
beta = Matrix_A(:,2) ;
gamma = Matrix_A(:,3) ;
total_coef = alpha+beta+gamma ;

pre_event_water = alpha.*Q;
storm_event_water = beta.*Q;
pre_event_water_infiltration_zone = gamma.*Q;
```