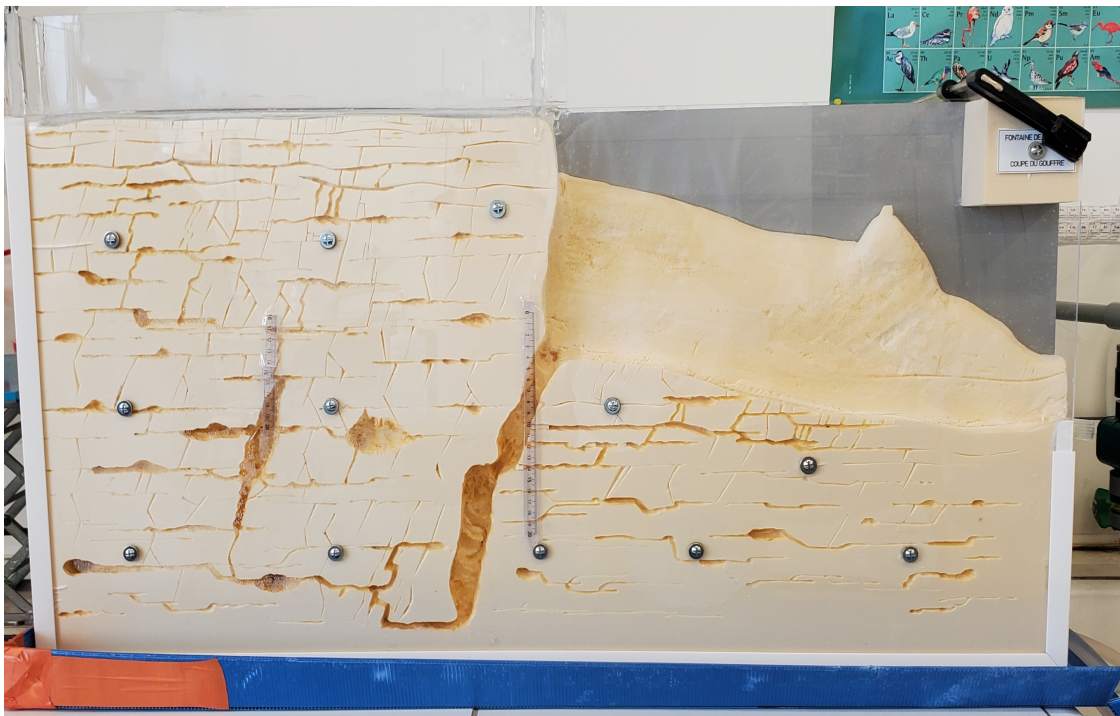


Licence Sciences de la Terre et de l'Eau

**Rapport de stage :**

**Détermination de la typologie des réponses à des impulsions  
pluvieuses en systèmes karstique -  
Expériences sur la maquette de Fontaine-de-Vaucluse**



**Réalisé par : Tom Henry**  
**Sous l'encadrement de Mohamed Ghahalla**

Soutenu le 07 Juin 2024

Année universitaire 2023-2024

## Remerciement

Je voudrais remercier vivement tous les acteurs et l'institution qui m'ont permis de réaliser ce stage de recherche pour aboutir à ce présent rapport :

- L'ensemble de l'équipe de L'UMR EMMAH de l'Université d'Avignon Agroparc.
- Les enseignants-chercheurs : Mohamed Ghnahalla (mon maître de stage), Adriano Mayer (mon référent), Vincent Marc, Christophe Emblanch et Roland Simler, un grand merci à eux !

## Sommaire

1. Programme de stage.....	page 5
2. Introduction.....	pages 5-6
3. Contexte géologique et hydrogéologique.....	pages 6-9
3.1. Contexte géologique.....	pages 7-9
3.2. Contexte hydrogéologique.....	pages 9-10
4. Matériels et méthodes.....	pages 10-13
4.1. Protocole de la première expérience.....	page 10
4.2. Protocole de la deuxième expérience.....	pages 10-12
4.3. Protocole de la troisième expérience.....	pages 12-13
5. Résultats.....	pages 13-22
5.1. Résultats de la première expérience.....	pages 13-16
5.1.1. Variation de la conductivité.....	pages 13-14
5.1.2. Variations des débits.....	pages 14-15
5.1.3. Comparaison des volumes totaux écoulés.....	pages 15-16
5.2. Résultats de la deuxième expérience.....	pages 16-18
5.2.1. Différence de hauteurs d'eau à un débit constant de 3,20 mL/s.....	page 16
5.2.2. Différence de hauteurs d'eau à un débit constant de 5,60 mL/s.....	pages 16-17
5.2.3. Différence de hauteurs d'eau à un débit constant de 10 mL/s.....	page 17
5.2.4. Différence de hauteurs d'eau à un débit constant de 16 mL/s.....	page 18
5.2.5. Différence de hauteurs d'eau à un débit constant de 19,66 mL/s.....	page 18-19
5.3. Résultats de la troisième expérience.....	pages 19-22
5.3.1. Différence de hauteurs d'eau à un débit constant de 18,46 mL/s.....	page 19
5.3.2. Différence de hauteurs d'eau à un débit constant de 9,94 et 10,20 mL/s.....	pages 19-20
5.3.3. Différence de hauteurs d'eau à un débit constant de 19,91 mL/s.....	page 20
5.3.4. Résultats de la conductivité en fonction du temps.....	page 21
5.3.5. Variation de la conductivité à un débit constant de 10,20 mL/s.....	pages 21-22
5.3.6. Variation de la conductivité à un débit constant de 19,91 mL/s.....	page 22
6. Discussion.....	pages 22-24
6.1. Discussion de la première expérience.....	pages 22-23
6.2. Discussion de la deuxième expérience.....	pages 23-24
6.3. Discussion de la troisième expérience.....	page 24
7. Conclusion.....	pages 24-25
8. Bibliographie.....	page 25

## Table des figures et photo

Figure 1 : Karst de Fontaine de Vaucluse, modifié d'après (Mangin, 1975).....	page 5
Figure 2 : Aire d'alimentation de la Sorgue, modifié d'après (Puig, 1987).....	page 7
Figure 3 : Coupe lithostratigraphique d'après (Puig, 1987).....	page 8
Figure 4 : Coupe géologique passant par la Fontaine de Vaucluse, modifié d'après (Puig, 1987).....	page 9
Figure 5 : Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en fonction du temps (s) pour différents scénario pendant la première expérience.....	page 14
Figure 6 : Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en fonction du temps (s) pendant le troisième scénario de la première expérience.....	page 14
Figure 7 : Débit (mL/s) en fonction du temps (s) pendant la première expérience....	page 15
Figure 8 : Volume totaux écoulés en fonction des différentes injections pendant la première expérience.....	page 15
Figure 9 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à un débit constant de 3,20 mL/s pendant la deuxième expérience.....	page 16
Figure 10 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à un débit constant de 5,60 mL/s pendant la deuxième expérience.....	page 17
Figure 11 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à un débit constant de 10 mL/s pendant la deuxième expérience.....	page 17
Figure 12 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à un débit constant de 16 mL/s pendant la deuxième expérience.....	page 18
Figure 13 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à un débit constant de 19,66 mL/s pendant la deuxième expérience.....	page 18
Figure 14 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à un débit constant de 18,46 mL/s pendant la troisième expérience.....	page 19
Figure 15 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à un débit constant de 9,94 et 10,20 mL/s pendant la troisième expérience.....	page 20
Figure 16 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à un débit constant de 19,91 mL/s pendant la troisième expérience.....	page 20
Figure 17 : Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en fonction du temps (s) à des débits constants pendant la troisième expérience.....	page 21
Figure 18 : Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en fonction du temps (s) à un débit constant de 10,20 mL/s pendant la troisième expérience.....	page 21
Figure 19 : Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en fonction du temps (s) à un débit constant de 19,91 mL/s pendant la troisième expérience.....	page 22
Photo 1 : Première expérience sur la maquette.....	page 26
Figure 20 : Hauteur 1 (mm), hauteur 2 (mm) et débit (mL/s) en fonction des différentes injections pendant le scénario 1 de la première expérience.....	page 26
Figure 21 : Hauteur 1 (mm), hauteur 2 (mm) et débit (mL/s) en fonction des différentes injections pendant le scénario 2 de la première expérience.....	page 27
Figure 22 : Hauteur 1 (mm), hauteur 2 (mm) et débit (mL/s) en fonction des différentes injections pendant le scénario 3 de la première expérience.....	page 27
Figure 23 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à des débits constants pendant la deuxième expérience.....	page 27
Figure 24 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à des débits constants pendant la troisième expérience.....	page 28

## 1. Programme de stage

Mon stage se résume en cinq parties : la rédaction des différents protocoles pour les expériences, la réalisation des expériences, l'acquisition et le traitement des données, l'analyse des données et la discussion des résultats et la rédaction du rapport de stage. La rédaction des différents protocoles pour les expériences a concerné en tout trois jours. La réalisation des expériences m'a pris en tout quatre jours. L'acquisition et le traitement des données a concerné en tout quatre jours. L'analyse des données et la discussion des résultats m'as pris en tout quatre jours. Et la rédaction du rapport de stage m'a pris en tout six jours.

## 2. Introduction

Les aquifères de types karstiques présentent de grandes différences, notamment par leur complexité structurale, hydrodynamique et hydrochimique vis-à-vis des autres types d'aquifères. Les systèmes karstiques sont en général divisés en trois parties : la zone supérieure, l'épikarst ; la zone intermédiaire (la plus épaisse), la zone non-saturée et la zone inférieure, la zone saturée (Perineau et al., 2011). La complexité de ces trois zones rendent le suivi des écoulements d'eau assez difficile. Ce que nous savons, c'est que la zone non-saturée joue un rôle très important dans l'écoulement de l'eau vers la zone saturée (aquifère).

En effet, il est très compliqué de modéliser un système karstique, même si grâce à la théorie nous pouvons le faire. C'est ce qui a été fait par l'Université d'Avignon, avec la création d'une maquette modélisant le sous-sol de la Fontaine-de-Vaucluse (aquifère karstique).

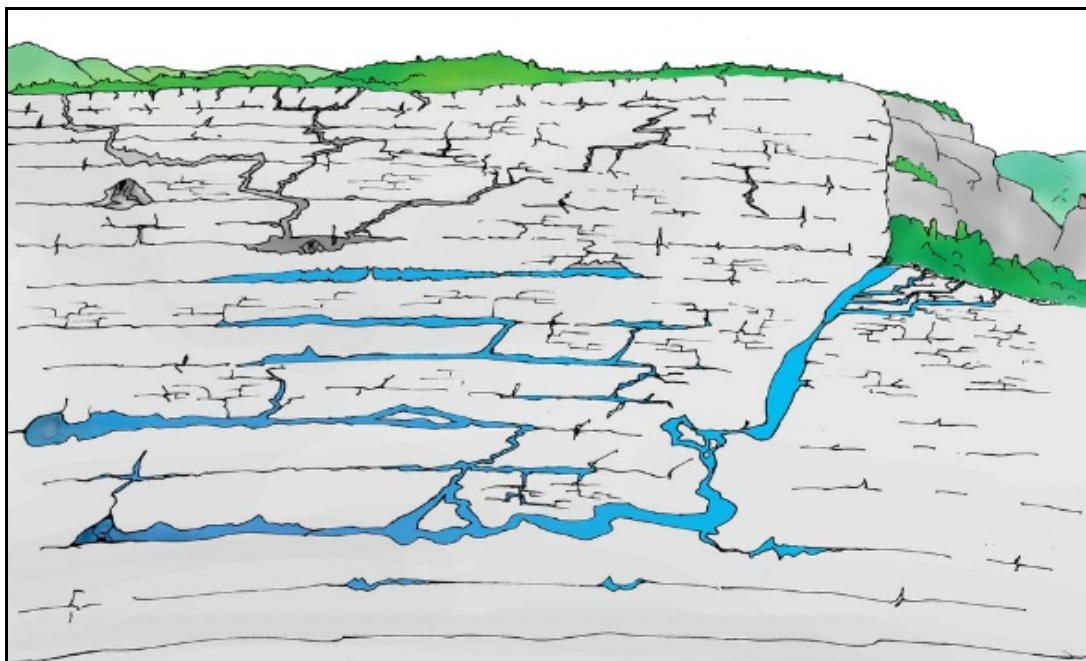


Figure 1 : Karst de Fontaine de Vaucluse, modifié d'après (Mangin, 1975)

Par rapport à cela, une étude a été menée pour essayer de comprendre les dynamiques

de ce système et pour essayer de mieux comprendre le système karstique de Fontaine-de-Vaucluse. Cette étude comporte trois expériences pluviométriques théoriques.

La première expérience se base sur deux types d'eau et trois scénarios préalablement définis. Le premier scénario se résume par l'injection de la même quantité d'eau du robinet sept fois, mais avec un intervalle de cinq minutes à partir de la fin de l'écoulement du milieu entre ces injections. Le deuxième scénario consiste à injecter cette même quantité d'eau du robinet sept fois aussi, mais cette fois-ci sans temps d'intervalle. Le troisième scénario se résume par l'injection du double de la quantité d'eau précédente trois fois de suite et sans temps d'intervalle, mais cette fois, l'eau utilisée est de l'eau distillée. Et enfin, le deuxième scénario est réitéré à la suite du troisième, en utilisant de l'eau du robinet.

Egalement pour répondre à notre objectif de départ, plusieurs paramètres ont été étudiés : la conductimétrie a été prise à l'aide d'un conductimètre, deux prises de hauteurs, une au niveau du gouffre et une deuxième au milieu du système karstique ont été relevés et le débit a été calculé par rapport aux pas de temps et aux volumes d'eau sortant de l'exutoire. Il faut préciser que ces mesures ont été effectuées pendant les injections toutes les cinq secondes.

La deuxième expérience a été faite en utilisant uniquement un type d'eau. A l'instar de la première expérience, le débit ici est constant et différents débits constants ont été utilisés. Ces derniers permettent d'obtenir par la suite les différences de hauteurs d'eau dans le tube récipient permettant d'analyser les différentes réponses de ce milieu karstique.

La troisième expérience a été réalisée en utilisant deux types d'eau et trois scénarios préalablement définis. Comme la deuxième expérience, différents débits constants ont été utilisés. Le premier scénario se résume par l'injection constante d'un fort débit d'eau du robinet pendant cinq minutes et cela deux fois. Le deuxième scénario consiste à injecter de manière constante un faible débit d'eau distillée pendant cinq minutes et cela deux fois. Et le troisième scénario se résume par l'injection constante d'un seul fort débit d'eau distillée pendant cinq minutes.

Egalement, ces débits constants permettent de mettre en charge ce système karstique et de pouvoir l'analyser. Aussi, la conductimétrie a été prise par un conductimètre pour visualiser les variations de conductimétrie notamment après les différentes injections d'eau distillée.

Dans ce rapport, l'objectif de ces trois expériences est de mieux comprendre les aspects hydrodynamiques et hydrochimiques du système karstique de Fontaine-de-Vaucluse et de valider le fait que sa maquette peut être utilisée pour modéliser son système à plus petite échelle.

Pour cela, tout d'abord, nous parlerons des différents aspects géologiques et hydrogéologiques de la zone d'étude, puis nous aborderons les résultats obtenus lors de la discussion et enfin, nous en discuterons.

### 3. Contexte géologique et hydrogéologique

L'aquifère de la Fontaine de Vaucluse forme un relief remarquable de la région, dont le Mont-Ventoux, la montagne d'Albion et la montagne de Lure sont les principaux sommets. L'aire de collecte des eaux de pluies qui s'infiltrent dans l'aquifère (ou impluvium) s'étend sur environ 1 200 km<sup>2</sup>. La figure ci-dessous illustre cette grande aire d'alimentation :

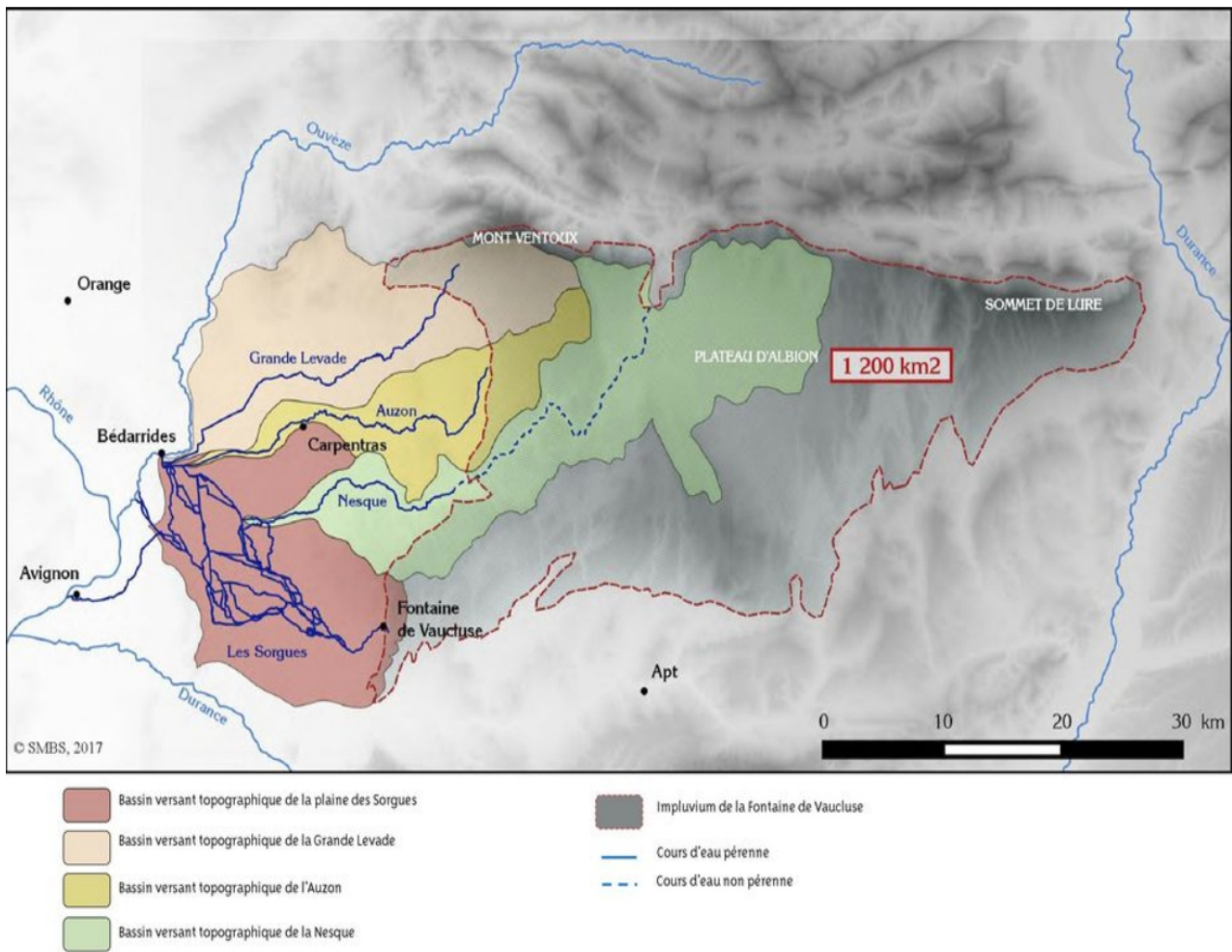


Figure 2 : Aire d'alimentation de la Sorgue, modifié d'après (Puig, 1987)

### 3.1. Contexte géologique

Au niveau des unités lithologiques formant ce système, nous pouvons distinguer trois grands ensembles : le Valanginien – Hauterivien Inférieur ; l'Hauterivien Supérieur – Barrémien – Bédoulien et le Gargasien – Crétacé Supérieur (Puig, 1987).

La coupe lithostratigraphique de Fontaine-de-Vaucluse est présentée ci-dessous pour plus de compréhension :

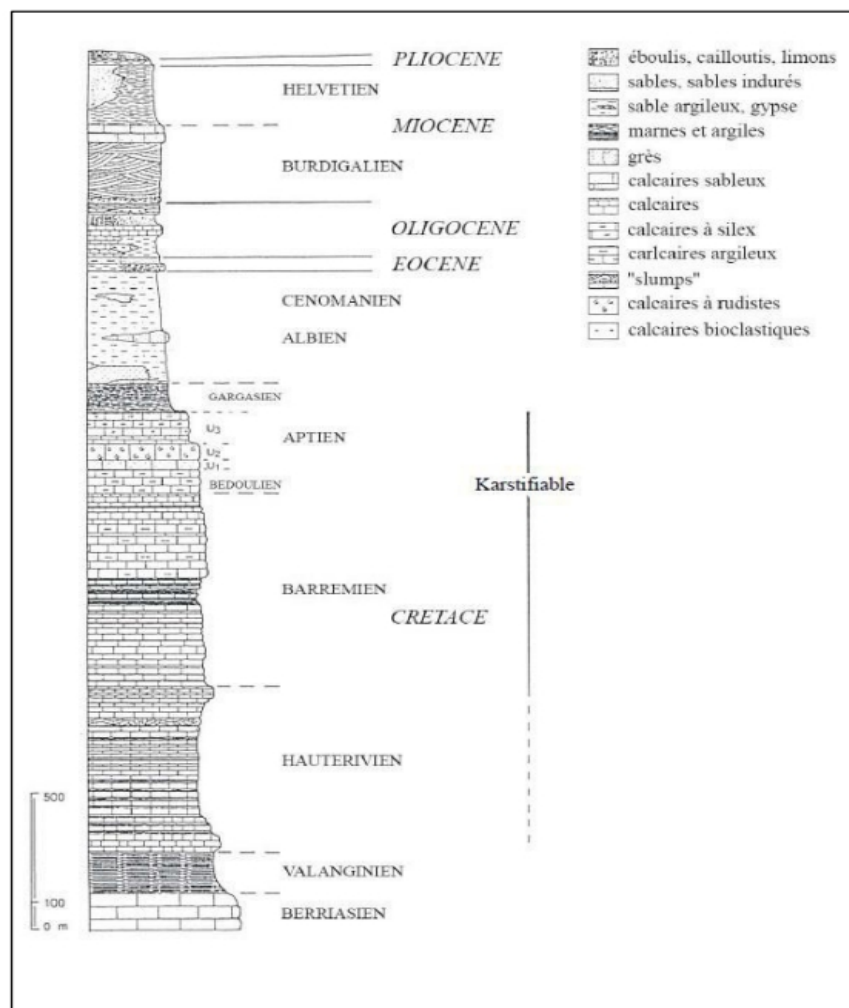


Figure 1-18 Coupe lithostratigraphique (Puig, 1987)

Figure 3 : Coupe lithostratigraphique d'après (Puig, 1987)

### Valanginien – Hauterivien Inférieur :

Le Valanginien se présente par une épaisseur d'environ 200 m, est essentiellement marneux voire marno-calcaire et se caractérise par la présence de fossiles pyriteux. Pour l'Hauterivien, il se compose à sa base par des alternances de marnes et de marno-calcaires, pour finir à son sommet, sur des calcaires et possède une épaisseur de 670 m au maximum. Cette formation se caractérise par le fait qu'il s'agit du «mur», limite de l'aquifère, il semblerait qu'il s'agisse du substratum imperméable de cette aquifère karstique (Puig, 1987 ; Barbel-Perineau et al., 2015; Barbel-Périneau, 2013).

### Hauterivien Supérieur – Barrémien – Bédoulien :

Cette formation se caractérise par un grand ensemble de différents calcaires de 1 500 m d'épaisseur environ. Au niveau de l'Urgonien, on peut caractériser trois différents calcaires : les calcaires bioclastiques inférieurs (U1), les calcaires à rudistes (U2) et les calcaires bioclastiques supérieurs à silex (U3).

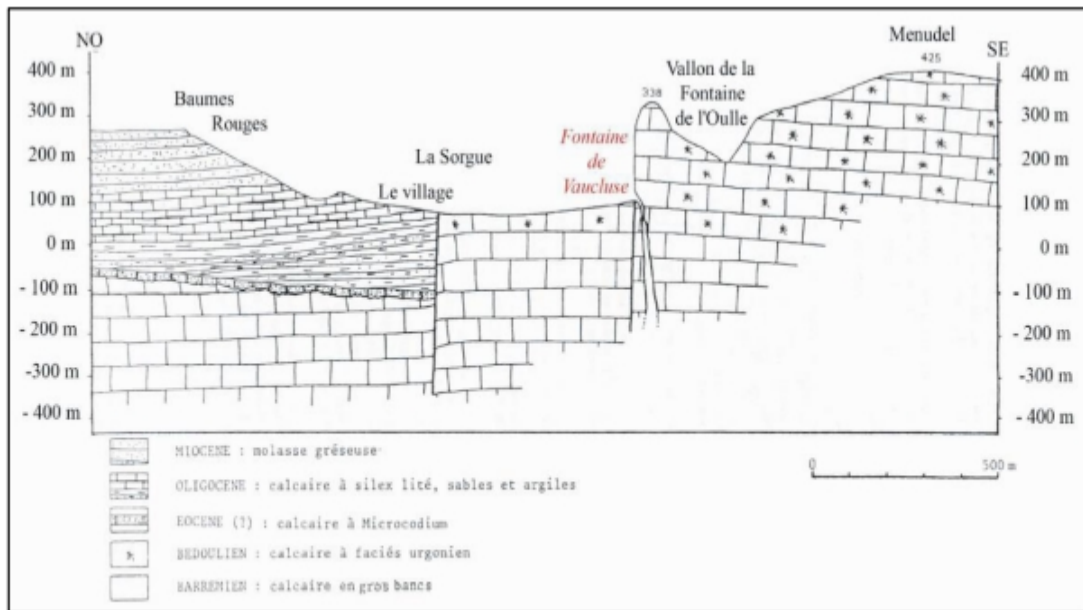
Au Crétacé, après la transgression marine, cette formation a depuis été sujet à une importante karstification qui résulte de nos jours du système karstique de Fontaine-de-Vaucluse (Puig, 1987 ; Barbel-Perineau et al., 2015; Barbel-Périneau, 2013).

### Gargasien – Crétacé Supérieur :



Ces séries sont caractérisées par la présence de marnes d'une épaisseur variable entre 50 et 200 m. Cette formation forme le toit de l'aquifère karstique et joue un rôle important en permettant de mettre en charge une partie de cette aquifère. Au-dessus de ce toit, nous retrouvons une série terrigène sablo-marneuse d'une épaisseur variant de quelques mètres à 800 m (Puig, 1987 ; Barbel-Perineau et al., 2015; Barbel-Périneau, 2013).

Pour une plus grande de précision sur la géologie de Fontaine-de-Vaucluse, voici sa coupe géologique :



**Figure 1-20 Coupe géologique passant par la Fontaine de Vaucluse (Puig, 1987)**

Figure 4 : Coupe géologique passant par la Fontaine de Vaucluse, modifié d'après (Puig, 1987)

### 3.2. Contexte hydrogéologique

Cette aquifère karstique possède un grand plateau, comprenant le Plateau d'Albion, le Mont Ventoux et la Montagne de Lure, créant ainsi un bassin d'alimentation de 1 115 km<sup>2</sup>, avec donc pour exutoire la Fontaine-de-Vaucluse. L'altitude de ce bassin varie de 84 m pour l'exutoire à 1 912 m pour le sommet du Mont Ventoux avec une moyenne pondérée pour la zone vadose de 870 m. Les précipitations moyennes annuelles s'échelonnent de 700 mm pour Gordes (altitude 370 m) à 1 300 mm pour la crête du Ventoux (altitude 1 912 m) et les températures moyennes annuelles de 12,6 °C pour Gordes à 6 °C au Chalet Reynard sur le Mont Ventoux (altitude 1 440 m). La structure de cet aquifère peut être considérée comme une vaste dalle monoclinale avec un pendage de 15° vers le SW, affectée par de nombreux accidents N-S et NE-SO (Puig, 1987 ; Barbel-Perineau et al., 2015; Barbel-Périneau, 2013).

Le débit moyen de nos jours à l'exutoire de la Fontaine-de-Vaucluse est de 21 m<sup>3</sup>/s. Entre 2007 et 2023, le débit journalier minimum mesuré était de 2,7 m<sup>3</sup>/s en 2007 (banque hydro) et le débit journalier maximal mesuré était de 81,602 m<sup>3</sup>/s le 3 décembre 2019 (source banque hydro).

L'émergence de la Fontaine de Vaucluse se fait à la faveur de la grande faille

subméridienne, séparant la terminaison ouest des Monts de Vaucluse du bassin tertiaire de Carpentras. Elle se présente au pied d'un escarpement calcaire de 200 m sous la forme d'une large vasque. Au-dessus de la cote 83 m, les émergences sont pérennes. Pour des débits supérieurs au débit minimum observé, des sorties étagées entre la cote 83 m et le seuil de débordement de la vasque, 105,5 m, entrent successivement en action. Le débordement de la source se produit pour des débits supérieurs à 20 m<sup>3</sup>/s. Grâce à des expéditions «sous-marines» dans la conduite noyée, on sait maintenant que ce dernier à une profondeur de 308 m, soit 224 m en dessus du niveau de la mer (SCHAPI - HydroPortail, 2024).

## 4. Matériels et Méthodes

Le but des expériences suivantes est de tester une maquette de système karstique. Cette maquette représente globalement le fonctionnement d'un système karstique, dont nous allons tester la validité. Nous souhaitons voir les réactions que cette maquette peut avoir, face à des simulations de précipitations plus ou moins intenses sous forme de débits irréguliers ou constants, et les comparer à des données réelles. Le but étant de voir si cette maquette peut être utilisée à des fins de recherches et de modélisation sur les systèmes karstiques.

### 4.1. Protocole de la première expérience

#### **Matériels :**

- Maquette,
- Conductimètre (conductivité),
- Règle pour mesurer les variations de hauteurs d'eau au milieu de la maquette,
- Règle pour mesurer les variations de hauteurs d'eau en haut de la maquette,
- Bécher ou éprouvette graduée (pour la mesure du débit ) 25 ou 50 cl,
- Tuyau souple,
- 14 éprouvettes graduées de 25 cl d'eau distillée,
- 2 éprouvettes graduées de 25 cl d'eau du robinet,
- Eau distillée,
- Eau du robinet,
- Chronomètre.

#### **Mesures :**

- Débit : mesure du temps qu'un bécher (ou éprouvette graduée) met à se remplir,
- Conductivité,
- Hauteurs d'eau au milieu de la maquette,
- Hauteurs d'eau au haut de la maquette,
- Temps : noté à chaque fois que l'eau coule ou s'arrête de couler.

#### **Témoin :**

- Remplir d'eau du robinet par le fond du gouffre jusqu'à ce que l'eau coule,
- Commencer les mesures à partir du moment où l'eau s'arrête de couler.

**Première expérience : pluies de faibles intensités et régulières pendant un moment,**

**puis pluies de faibles intensités en continu pendant un moment, puis fortes pluies d'un coup pendant un moment et de nouveau pluies de faibles intensités en continu pendant un moment.**

**Ces pluies sont sous forme de débits irréguliers.**

Injecter 7 fois 10 mm d'eau du robinet toutes les 5 minutes (scénario 1),

Injecter 7 fois 10 mm d'eau du robinet à chaque fois que l'eau s'arrête de couler à l'exutoire et mesurer le temps qu'elle a mis à s'arrêter (scénario 2),

Injecter 3 fois 50 mm d'eau distillée à chaque fois que l'eau s'arrête de couler à l'exutoire et mesurer le temps qu'elle a mis à s'arrêter (scénario 3),

Injecter 7 fois 10 mm d'eau du robinet à chaque fois que l'eau s'arrête de couler à l'exutoire et mesurer le temps qu'elle a mis à s'arrêter (scénario 2).

Les différentes injections d'eau se font par le dessus de la maquette.

## 4.2. Protocole de la deuxième expérience

### **Matériels :**

- Maquette,
- Rigole,
- Sonde DI500, 5nT7418 (pression de l'eau),
- Sonde DI500.m,5nA9778 (pression de l'air),
- Ordinateur,
- Tuyau d'arrosage,
- Tube récipient de 7L,
- Débitmètre,
- Deux pinces et deux supports (ils vont ensembles),
- Réservoir à charge constante où est branché le tuyau qui achemine l'eau du robinet vers ce réservoir, ainsi que le tuyau injectant l'eau du robinet depuis ce réservoir (ce tuyau est aussi utilisée pour injecter l'eau distillée) et le tuyau du trop-plein, déversant l'eau du robinet en trop dans l'évier,
- Eau du robinet,
- Eprouvette graduée,
- Chronomètre,
- Pile de trois rangements,
- Serre-joints,
- 2 Leviers,
- Scotch,
- Escabeau,
- Tendeurs.

### **Mesures :**

- Pression de l'eau : mesure des variations de pression de l'eau dans le tube récipient,
- Pression de l'air : mesure des variations de la pression de l'air très proche du tube récipient,
- Pression de l'eau corrigée : différence entre la pression de l'eau et la pression de l'air,
- Différence de hauteurs d'eau dans le tube récipient : différence entre la hauteur d'eau, corrigée suivante et la hauteur d'eau corrigée précédente,

- Temps : noté à chaque fois que l'eau coule ou s'arrête de couler.

#### **Témoin :**

- Remplir d'eau du robinet par le fond du gouffre jusqu'à ce que l'eau coule,
- Commencer les mesures à partir du moment où l'eau s'arrête de couler.

**Deuxième expérience : pluies régulières de plus en plus intenses sous forme de palier et avec une dernière pluie pour essayer de voir où se situe l'intensité maximale supportable par la maquette avant que l'eau ne s'accumule au-dessus. Ces pluies sont sous forme de débits constants.**

Injecter 2 fois 3,20 mL/s d'eau du robinet à chaque fois que l'eau s'arrête de couler à l'exutoire pendant 10 minutes,

Injecter 2 fois 5,60 mL/s d'eau du robinet à chaque fois que l'eau s'arrête de couler à l'exutoire pendant 10 minutes,

Injecter 2 fois 10 mL/s d'eau du robinet à chaque fois que l'eau s'arrête de couler à l'exutoire pendant 5 minutes,

Injecter 2 fois 16 mL/s d'eau du robinet à chaque fois que l'eau s'arrête de couler à l'exutoire pendant 5 minutes,

Injecter 2 fois 19,66 mL/s d'eau du robinet à chaque fois que l'eau s'arrête de couler à l'exutoire pendant 5 minutes,

Injecter 1 fois 11,80 mL/s d'eau du robinet pendant 2 minutes et 30 secondes environ.

Les différentes injections d'eau se font par le dessus de la maquette.

### **4.3. Protocole de la troisième expérience**

#### **Matériels :**

- Maquette,
- Rigole,
- Conductimètre (conductivité),
- Sonde DI500,5nT7418 (pression de l'eau),
- Sonde DI500.m,5nA9778 (pression de l'air),
- Ordinateur,
- Tuyau d'arrosage,
- Entonnoir,
- Tuyau souple,
- Tube récipient de 7L,
- Débitmètre,
- Deux pinces et deux supports (ils vont ensemble),
- Réservoir à charge constante où est branché le tuyau qui achemine l'eau du robinet vers ce réservoir, ainsi que le tuyau injectant l'eau du robinet depuis ce réservoir (ce tuyau est aussi utilisée pour injecter l'eau distillée) et le tuyau du trop-plein, déversant l'eau du robinet en trop dans l'évier,
- Eau distillée,
- Eau du robinet,
- Epruvette graduée,
- Chronomètre,
- Armoire,

- 2 Leviers,
- Pile de trois rangements,
- Scotch,
- Escabeau,
- Tendeurs.

### **Mesures :**

- Pression de l'eau : mesure des variations de pression de l'eau dans le tube récepteur,
- Pression de l'air : mesure des variations de la pression de l'air très proche du tube récepteur,
- Pression de l'eau corrigée : différence entre la pression de l'eau et la pression de l'air,
- Différence de hauteurs d'eau dans le tube récepteur : différence entre la hauteur d'eau, corrigée suivante et la hauteur d'eau corrigée précédente,
- Conductivité : mesure des variations de conductivité dans le tube récepteur,
- Temps : noté à chaque fois que l'eau coule ou s'arrête de couler.

### **Témoin :**

- Remplir d'eau du robinet par le fond du gouffre jusqu'à ce que l'eau coule,
- Commencer les mesures à partir du moment où l'eau s'arrête de couler.

**Troisième expérience : pluies intenses et régulières pendant un moment, puis pluies de faibles intensités et régulières pendant un moment et pluie intense et régulière pendant un moment.**

**Ces pluies sont sous forme de débits constants.**

Injecter 2 fois 18,46 mL/s d'eau du robinet à chaque fois que l'eau s'arrête de couler à l'exutoire pendant 5 minutes,

Injecter 1 fois 9,94 mL/s et 1 fois 10,20 mL/s d'eau distillée à chaque fois que l'eau s'arrête de couler à l'exutoire pendant 5 minutes,

Injecter 1 fois 19,91 mL/s d'eau du robinet pendant 5 minutes.

Les différentes injections d'eau se font par le dessus de la maquette.

## **5. Résultats**

### **5.1. Résultats de la première expérience**

Dans cette expérience, les différents scénarios sont représentés par des couleurs sur les graphiques : la couleur bleu pour le premier scénario, la couleur orange pour le deuxième scénario et la couleur grise pour le troisième scénario et la couleur jaune ne sera pas abordée.

#### **5.1.1. Variation de la conductivité**

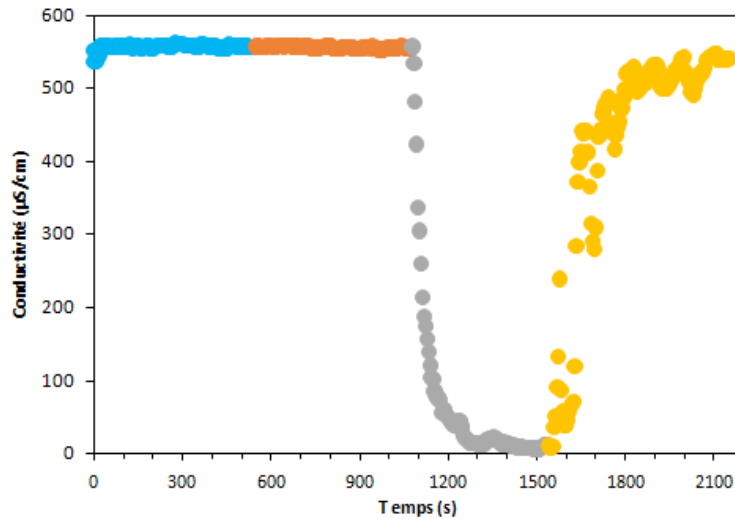


Figure 5 : Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en fonction du temps (s) pour différents scénarios pendant la première expérience

On peut voir que lors des deux premiers scénarios avec l'eau du robinet, la conductivité reste stable à environ  $575 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Par contre lors du troisième scénario, avec l'injection de l'eau distillée, la conductivité chute brutalement presque jusqu'à  $5 \mu\text{S}/\text{cm}$  avec deux rebonds à deux endroits. Enfin, à partir de la fin de ce scénario, les données sont faussées dû à de nombreuses fuites occultes dans le système. Ici l'eau distillée a remplacé presque totalement l'eau du robinet à l'exutoire en tout cas, mais dans le système, sachant qu'à deux reprises, il y a des rebonds de conductivité, de l'eau du robinet y est donc toujours présente.

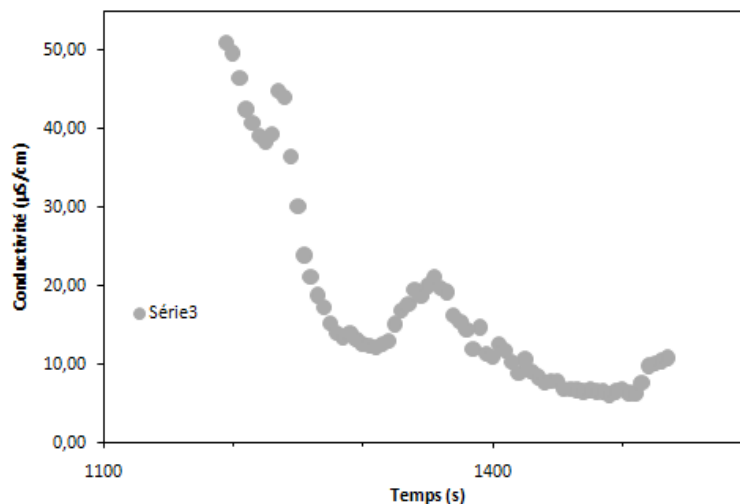


Figure 6 : Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en fonction du temps (s) pendant le troisième scénario de la première expérience

Ici, on voit les deux rebonds de conductivité énoncés précédemment et qui se situent au niveau du troisième scénario. On aperçoit après la fin de la chute, deux légères remontées de  $10 \mu\text{S}/\text{cm}$  environ qui sont significatives pour notre future interprétation.

### 5.1.2. Variations des débits

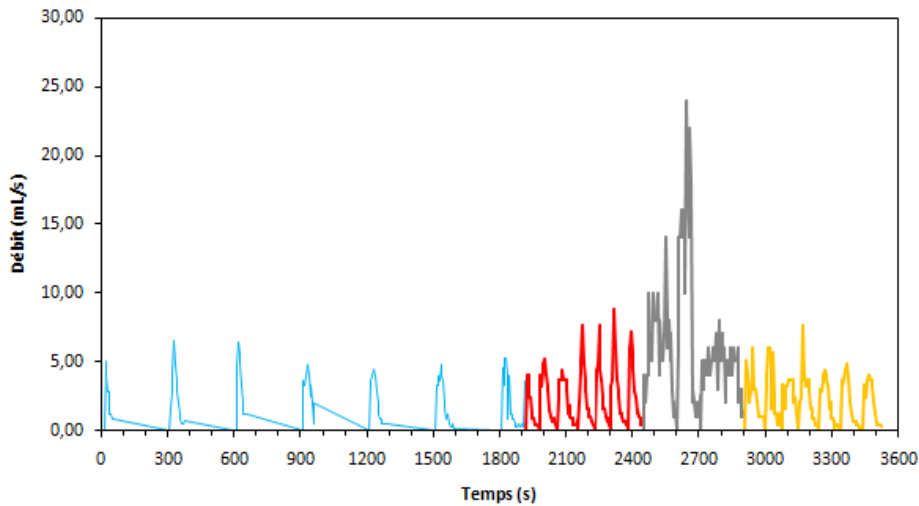


Figure 7 : Débit (mL/s) en fonction du temps (s) pendant la première expérience

On voit que les débits du premier scénario baissent après la troisième injection et restent constants jusqu'à la quatrième injection du deuxième scénario, avant d'augmenter pour dépasser en intensité les tout premiers débits. Pour le troisième scénario, on voit que les débits augmentent subitement pour être jusqu'à cinq fois supérieurs aux plus faibles. Mais à partir de 2 700 secondes, soit la troisième injection du troisième scénario, les données sont faussées à cause de pertes d'eau dues à des fuites dans la maquette.

### 5.1.3. Comparaison des volumes totaux écoulés

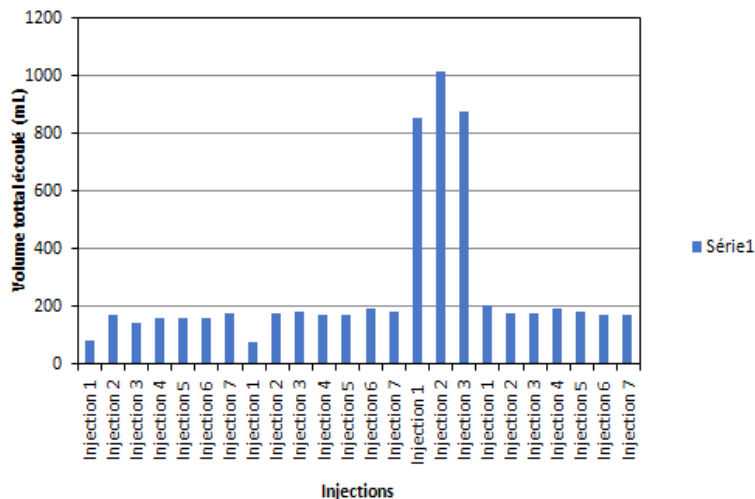


Figure 8 : Volumes totaux écoulés en fonction des différentes injections pendant la première expérience

On voit une certaine constance dans les volumes totaux écoulés, avec une baisse à la première injection du deuxième scénario, pour atteindre un volume écoulé équivalent à la toute première injection, ce qui peut s'expliquer par l'enchaînement à partir de cette injection de ces dernières. En effet, on a saturé le système précédemment, mais avec des temps «de repos», ce qui pour la première injection du deuxième scénario n'est plus le cas et c'est ce qui a causé ce déficit de volume écoulé à l'exutoire. On voit manifestement une grande variation du volume écoulé au niveau du troisième scénario, avec jusqu'à cinq fois plus de volume que précédemment, dû au fait que cinq fois plus d'eau a été injectée dans le système au cours de ce scénario. Aussi, les volumes à partir de la troisième injection du troisième scénario ne peuvent être pris en compte, car de nombreuses fuites

occultes ont été observées faussant ainsi les données et les résultats.

## 5.2. Résultats de la deuxième expérience

Pour la deuxième expérience expérience, la différence de hauteurs d'eau par seconde ( $H_2-H_1$  en cm toutes les secondes) sera utilisée plutôt que les débits ( $Q$  en mL/s), car la première est ici plus représentative de notre expérience. Un exemple de débit sera donné tout de même par rapport à un débit constant de 3,20 mL/s (ci-dessous) et la surface du tube récipient ( $S$  en  $\text{cm}^2$ ) qui est de 72,38 :  $Q = (H_2-H_1 \text{ pris au hasard}) \times S = 0,20 \times 72,38 = 14,476 \text{ cm}^3/\text{s}$ , soit  $0,00014476 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 5.2.1. Différence de hauteurs d'eau à un débit constant de 3,20 mL/s

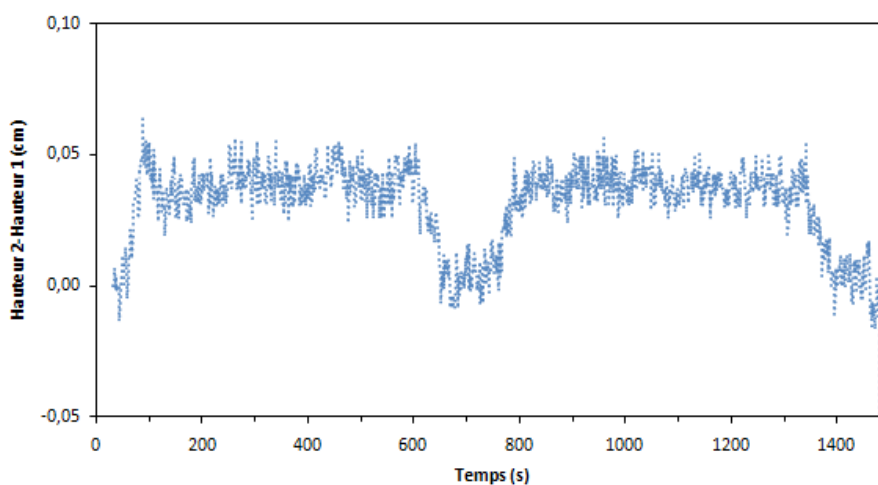


Figure 9 : Différence de hauteurs d'eau ( $H_2-H_1$  en cm) en fonction du temps (s) à un débit constant de 3,20 mL/s pendant la deuxième expérience

Pour un débit constant de 3,20 mL/s, on peut voir deux réponses assez similaires, en effet les deux courbes des deux injections se ressemblent fortement. Egalement, on voit qu'il y a une faible différence de hauteurs d'eau, d'un ordre inférieur à 1 millimètre au maximum.

### 5.2.2. Différence de hauteurs d'eau à un débit constant de 5,60 mL/s



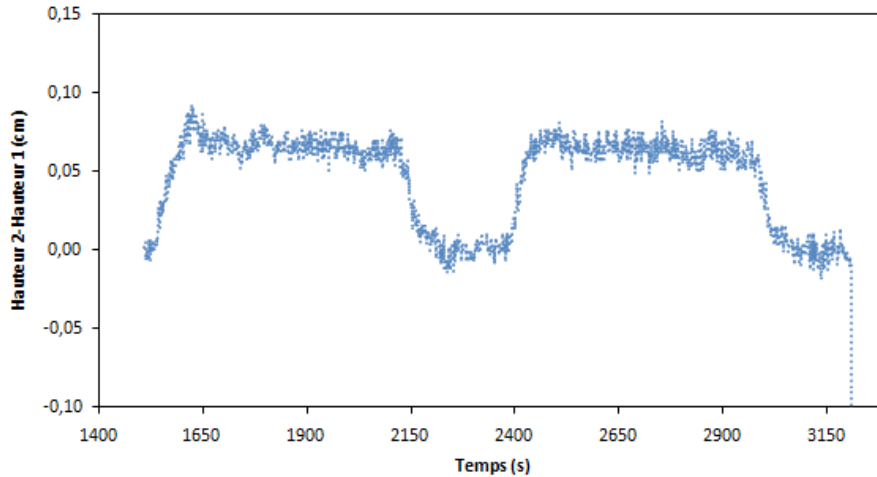


Figure 10 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à un débit constant de 5,60 mL/s pendant la deuxième expérience

Pour un débit constant de 5,60 mL/s, on voit que comme précédemment que les deux courbes des deux injections sont très similaires. Aussi, on voit une assez faible différence des hauteurs d'eau, de l'ordre de 1 millimètre au maximum, ce qui est supérieur au débit constant précédant. Le système réagit donc normalement à une augmentation du débit constant.

### 5.2.3. Différence de hauteurs d'eau à un débit constant de 10 mL/s

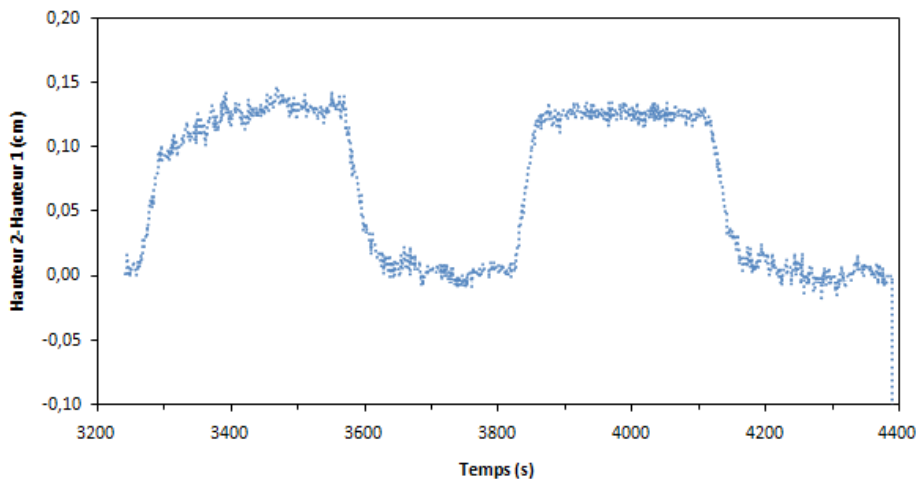


Figure 11 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à un débit constant de 10 mL/s pendant la deuxième expérience

Pour un débit constant de 10 mL/s, on peut voir cette fois-ci deux types de réponses par rapport aux deux injections. On voit qu'un plateau se forme rapidement lors de la deuxième injection, ce qui n'est pas le cas lors de la première, ce plateau arrive plus tard et avec une forte différence de hauteurs d'eau. Cela veut dire que dans un premier temps, une partie de l'eau va venir saturer la zone non-saturée et l'augmentation de cette charge va permettre de stocker une plus grande quantité d'eau dans cette zone. Donc plus la charge augmente, plus on peut stocker de l'eau dans la zone non-saturée. Aussi, la différence de hauteurs d'eau est plus importante que précédemment, de l'ordre du millimètre et atteignant même 1,5 millimètre au maximum.

#### 5.2.4. Différence de hauteurs d'eau à un débit constant de 16 mL/s

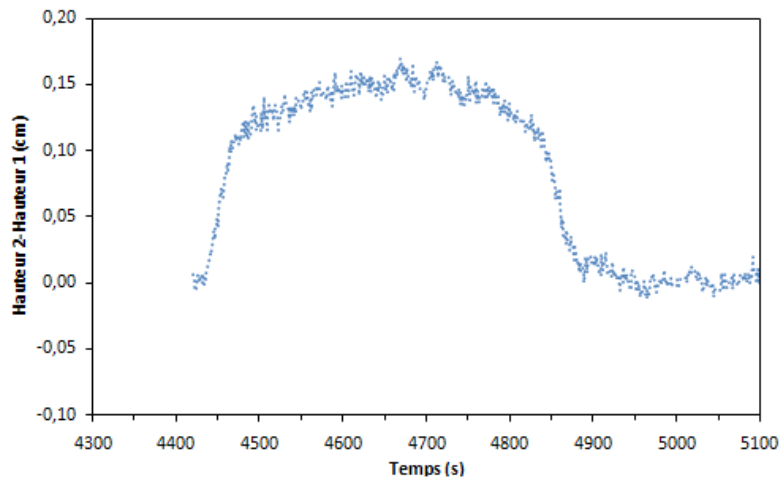


Figure 12 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à un débit constant de 16 mL/s pendant la deuxième expérience

Pour un débit constant de 16 mL/s, on voit que la courbe est peu variable, seulement au niveau du plateau, là où on arrive à un régime permanent du système. Aussi, on peut voir que la montée et la descente sont linéaires. Ici, la différence de hauteurs d'eau continue d'augmenter par rapport aux précédentes et étant de l'ordre du millimètre et dépassant les 1,5 millimètre au maximum.

#### 5.2.5. Différence de hauteurs d'eau à un débit constant de 19,66 mL/s

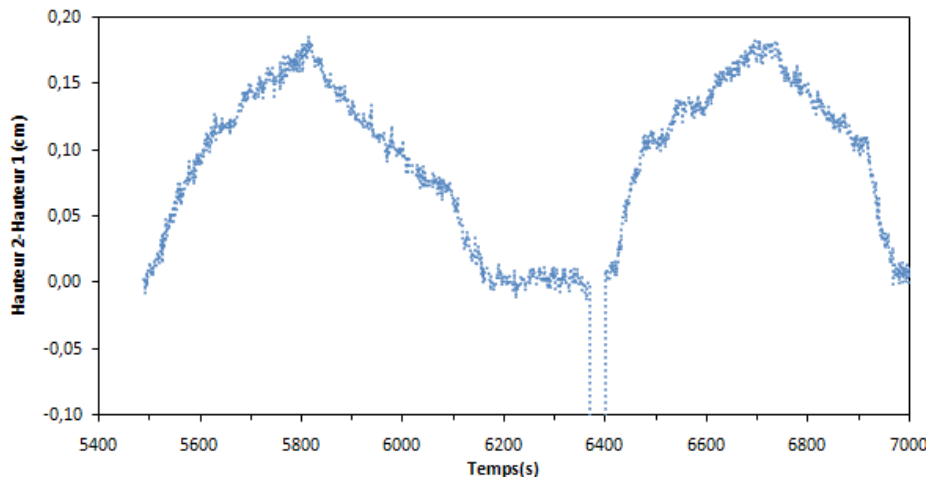


Figure 13 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à un débit constant de 19,66 mL/s pendant la deuxième expérience

Pour un débit constant de 19,66 mL/s, on voit deux courbes pour les deux injections assez différentes, voire même opposées. En effet, la montée de la première courbe est assez linéaire pour une descente assez variable, alors que la montée de la deuxième courbe est assez variable pour une descente assez linéaire. Ces différences sont dues à la très forte charge que subit le système lors de la première injection. En effet, notamment pour la descente des deux courbes, la forte mise en charge de la première injection provoque une descente assez variable pour la première courbe et lors de la deuxième courbe, le

système étant déjà saturé en eau, lors de la descente, c'est normal que la courbe soit plus linéaire que précédemment. On aperçoit aussi un pic de différence de hauteurs d'eau atteignant presque les 2 millimètres au maximum.

### 5.3. Résultats de la troisième expérience

Pour la deuxième expérience expérience, la différence de hauteurs d'eau par seconde (H2-H1 en cm toutes les secondes) sera utilisée plutôt que les débits (Q en mL/s), car la première est ici plus représentative de notre expérience. Un exemple de débit sera donnée tout de même par rapport à un débit constant de 3,20 mL/s (ci-dessous) et la surface du tube récipient (S en cm<sup>2</sup>) qui est de 72,38 :  $Q = (H2-H1 \text{ pris au hasard}) \times S = 0,175 \times 72,38 = 12,667 \text{ cm}^3/\text{s}$ , soit  $0,00012667 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 5.3.1. Différence de hauteurs d'eau à un débit constant de 18,46 mL/s

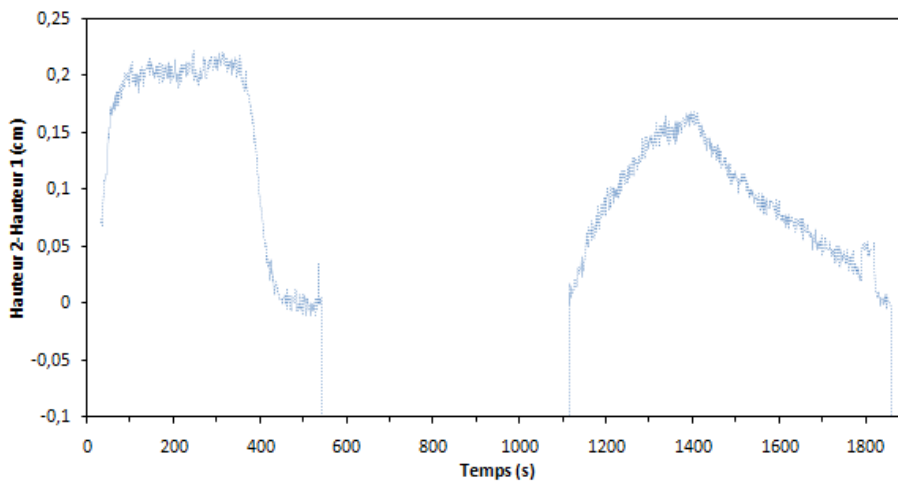


Figure 14 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à un débit constant de 18,46 mL/s pendant la troisième expérience

Pour un débit constant de 18,46 mL/s, on peut voir que les deux courbes des deux injections sont complètement différentes. En effet, la première courbe comporte trois phases, une montée assez linéaire, suivie d'un plateau un peu variable et d'une descente linéaire, alors que la deuxième courbe comporte seulement deux phases, une montée et une descente assez linéaire, avec seulement un pic au sommet. Cette différence est provoquée par la forte mise en charge du système avec la première injection. Sa courbe est une réponse normale à ce type d'injection. Par contre, en injectant de nouveau une charge similaire, le système déjà saturé va réagir autrement, beaucoup plus linéairement que précédemment, sans vraiment arriver à une certaine constance, ce qui est le cas ici. Aussi, on voit une plus grande différence de hauteurs d'eau à la première courbe qu'à la deuxième. Pour la première, cela dépassent les 2 millimètres, alors que pour la deuxième on atteint à peine les 1,5 millimètre au maximum.

#### 5.3.2. Différence de hauteurs d'eau à un débit constant de 9,94 et 10,20 mL/s

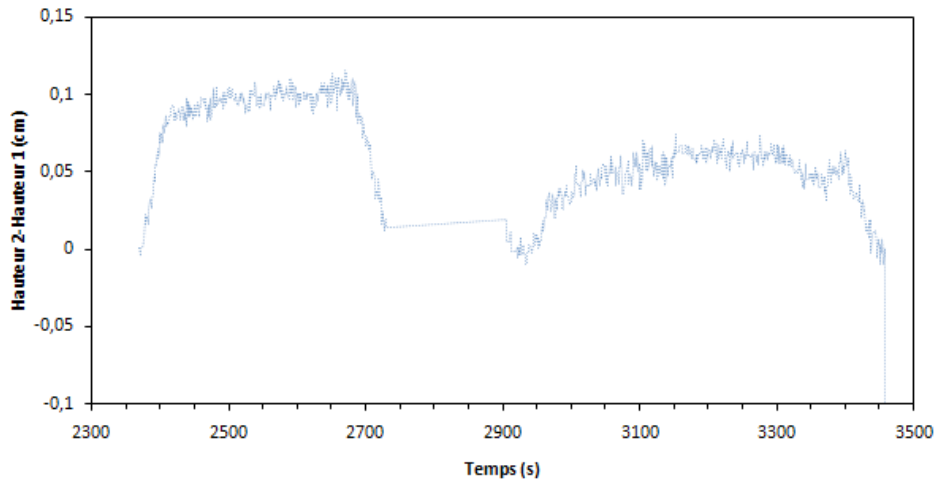


Figure 15 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à un débit constant de 9,94 et 10,20 mL/s pendant la troisième expérience

Pour un débit constant de 9,94 mL/s pour la première injection et 10,20 mL/s pour la deuxième (le débit constant a dû être changé suite à une erreur), on voit également deux courbes totalement différentes. En effet, la première forme un grand plateau peu variable avec une montée et une descente presque linéaire, alors que la deuxième forme une courbe très variable sans trop de « modèle ». Cette différence peut s'expliquer par le fait que la première injection émet une charge maximale sur le système, ce qui provoque par la suite, pour la deuxième injection, un écoulement plus variable et plus long. Ici, la différence de hauteurs d'eau est aussi très différente, avec pour la première courbe un maximum atteignant le millimètre, alors que pour la deuxième, le maximum est inférieur à 1 millimètre.

### 5.3.3. Différence de hauteurs d'eau à un débit constant de 19,91 mL/s

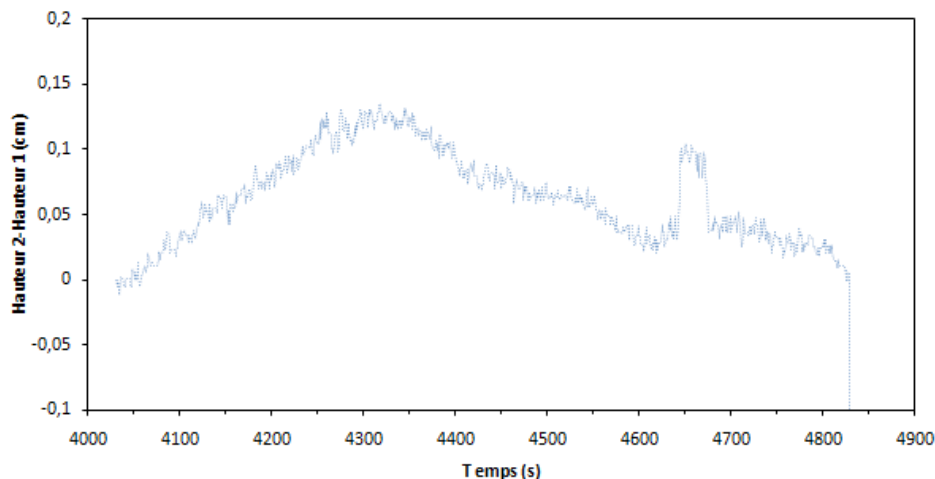


Figure 16 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à un débit constant de 19,91 mL/s pendant la troisième expérience

Pour un débit constant de 19,91 mL/s, on peut apercevoir une courbe très variable sans trop de « modèle ». Aussi, on voit que la différence de hauteurs d'eau est assez faible, atteignant à peine 1,5 millimètre au maximum.

### 5.3.4. Résultats de la conductivité en fonction du temps

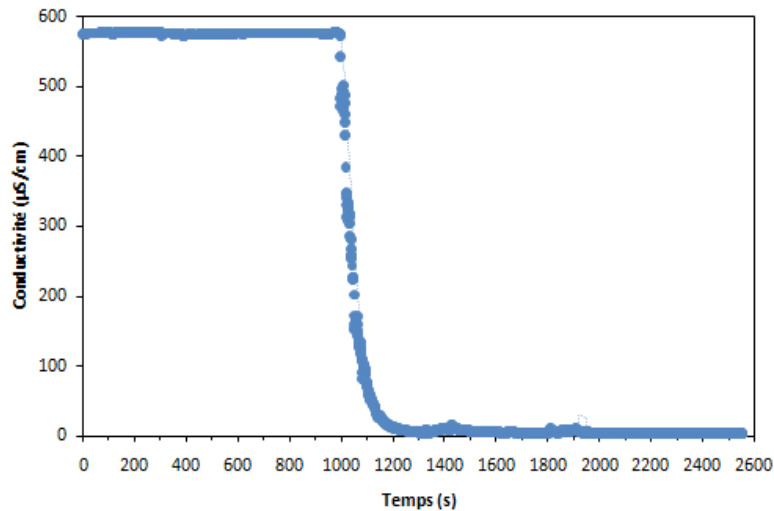


Figure 17 : Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en fonction du temps (s) à des débits constants pendant la troisième expérience

On voit que la conductivité ne bouge pas tant que l'eau du robinet est injectée, soit les débits constants de 18,46 mL/s. Ensuite, une fois que l'eau distillée est injectée, ce qui concerne les autres débits constants, la conductivité chute brutalement pour se stationner vers 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Par contre, on observe par endroit de petites variations de cette conductivité avec des remontées de cette dernière, montrant un possible mélange entre l'eau du robinet et l'eau distillée. Cela veut dire que la première est restée stockée dans le système et est ressortie ensuite lors des injections suivantes.

### 5.3.5. Variation de la conductivité à un débit constant de 10,20 mL/s

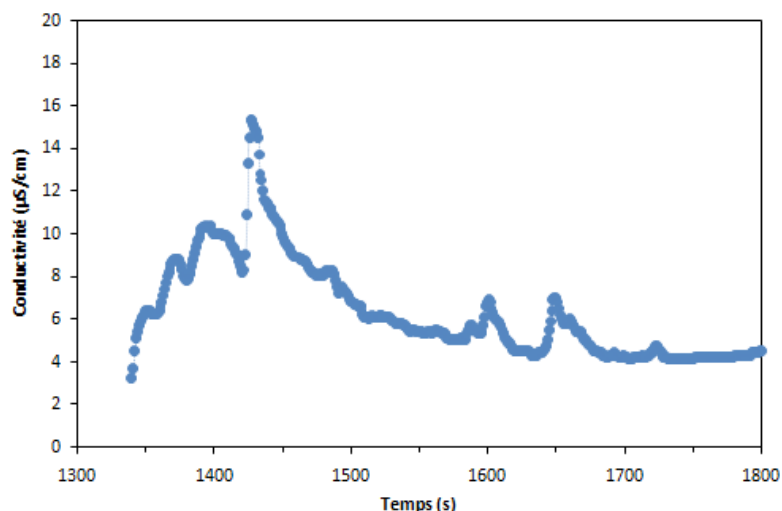


Figure 18 : Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en fonction du temps (s) à un débit constant de 10,20 mL/s pendant la troisième expérience

Ici, on se situe au niveau de la fin de la chute de conductivité vu dans le graphique précédent et on est à un débit de 10,20 mL/s. On voit que par endroit, au début et à la fin de cette courbe, les remontées énoncées précédemment. On voit que celles du début vont

presque jusqu'à  $10 \mu\text{S}/\text{cm}$  d'augmentation environ. Celles de la fin se situent autour de  $5 \mu\text{S}/\text{cm}$  d'augmentation environ. Ces remontées sont significatives pour notre future interprétation.

### 5.3.6. Variation de la conductivité à un débit constant de $19,91 \text{ mL}/\text{s}$

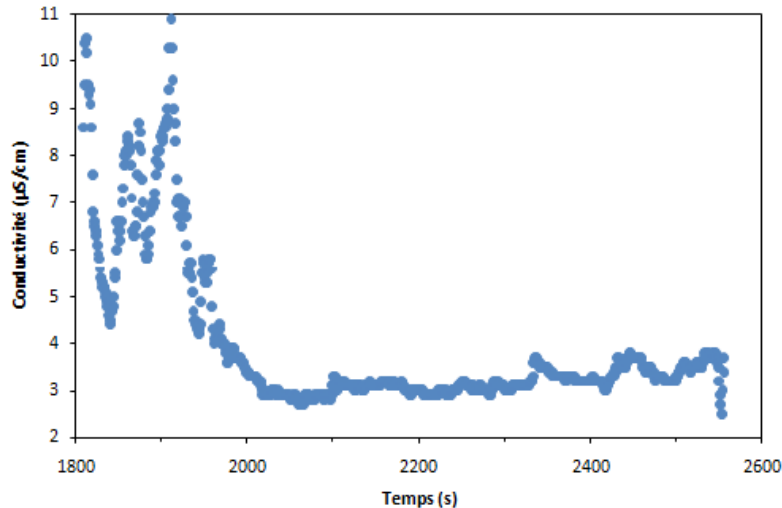


Figure 19 : Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en fonction du temps (s) à un débit constant de  $19,91 \text{ mL}/\text{s}$  pendant la troisième expérience

Ici, on se situe aux alentours du milieu de la partie la plus faible en conductivité et on est à un débit de  $10,20 \text{ mL}/\text{s}$ . On voit aussi au début de cette courbe les remontées énoncés précédemment. On observe de grandes variations de la conductivité, avec une augmentation allant jusqu'à  $7 \mu\text{S}/\text{cm}$  environ. Ces remontées sont significatives pour notre future interprétation.

## 6. Discussion

Nous allons discuter des résultats obtenus expérience par expérience.

### 6.1. Discussion de la première expérience

Pour le premier scénario, on peut dire qu'un déficit d'écoulement est présent à la première injection, mais on constate tout de même des volumes totaux écoulés équivalents à toutes les injections de ce scénario. Le système met une injection à se mettre en charge, puis deux suivantes à forts débits pour se stabiliser. En effet, à partir de la quatrième injection, les débits diminuent assez fortement et sont plus inertiels. On peut donc dire que l'on voit quatre comportements hydrodynamiques différents montrant la non-linéarité de ce système par rapport à une même pluie. Ces différences sont dues à la particularité du système karstique par rapport à son état de saturation.

Pour le deuxième scénario, on constate des débits presque inversés par rapport au scénario 1. En effet, ici le système met trois injections à se mettre en charge, ce qui est assez bizarre, mais les quatre dernières sont correctes au niveau de la stabilisation avec des débits plus forts que le premier scénario. On constate également que les volumes totaux écoulés du deuxième scénario sont supérieurs à ceux du premier scénario. Ici, c'est

le type de pluie injectée qui a modifié la réaction du système par rapport au premier scénario. La différence entre ces deux scénarios est dû au fait que l'on ne laisse pas le temps à la zone non-saturée du système de se ressuyer après l'arrêt de l'écoulement du milieu. Par conséquent, on peut dire que pour une même impulsion pluvieuse l'état de saturation de la zone non-saturée impacte significativement la réponse du système.

Pour le troisième scénario, on voit que le système met une injection à se mettre en charge, puis le débit augmente très fortement pour atteindre le débit maximal. Les volumes écoulés de la première et la deuxième injection ne sont pas égaux ce qui montrent une fois de plus la non-linéarité de la réponse du système. Et à partir de là tous les débits mesurés sont faussés. En effet de fortes fuites occultes ont été constatés au niveau du système.

Aussi, on voit dans le troisième scénario que la conductivité qui aurait dû rester au plus bas, car on injecte encore de l'eau distillée, remonte significativement deux fois d'environ 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Cela veut dire qu'à des endroits dans le système, des zones avec de l'eau du robinet qui avait été bloquée, ont été débloquentes par ces forts débits pour venir se mélanger à l'eau distillée et c'est ce qui a fait remonter la conductivité par deux fois. Par conséquent, on peut dire que plusieurs zones de ce système peuvent être activées par de fortes pluies, mais sûrement pas que et que son eau peut venir se mélanger à celle déjà présente dans le système. C'est ce qui a déjà été constaté réellement sur le terrain, au niveau des zones saturées (ef Perinneau pour ZNS et Emblanch pour ZN).

Pour améliorer cette expérience, il aurait fallu être plus précis sur la prise des valeurs, être plus coordonné. Aussi, il aurait peut-être été plus intéressant d'injecter des débits constants et non irréguliers. Et surtout, il aurait fallu au préalable vérifier les possibles fuites occultes du système, ce qui nous aurait évité de ne pas pouvoir utiliser les données de la fin de cette expérience.

## 6.2. Discussion de la deuxième expérience

Pour des débits constants de 3,20 et 5,60 mL/s, soit de faibles débits, les réponses du système sont très similaires avec une différence de hauteurs d'eau presque nul, ce qui s'explique logiquement par les faibles charges de débits constamment injectés dans le système.

Pour des débits constants de 10 mL/s, on constate deux réponses différentes. En effet, le système se met en charge de manière constante à la deuxième injection. A la première injection, on constate une certaine variation pouvant s'expliquer par le temps que le système met à se mettre en charge. Aussi, on constate à la fin, au niveau des décrues, des écoulements retardés qui sont visibles dans la première injection, mais «invisibles» lors de la deuxième.

Pour des débits constants de 16 mL/s, on constate une similitude dans les réponses du système, avec simplement au niveau des décrues, des écoulements retardés visibles pour les deux injections, mais différente, la première étant plus variable que la deuxième qui est plus linéaire.

Pour des débits constants de 19,66 mL/s, on voit que le système met un peu plus de temps à se mettre en charge, avec la présence d'un palier pour la première injection et de deux pour la deuxième. On constate aussi, qu'on atteint ici pour ces trois expériences, le niveau de charges maximum que le système peut supporter avec ces deux pics et aussi,

ici on est au maximum de la différence de hauteurs d'eau, s'expliquant par les fortes charges de débits constamment injectés dans le système. Et les décrues le montrent également, elles se font par palier montrant cette grande charge que supporte le système et qui prend beaucoup de temps à se «dissiper».

Pour améliorer cette expérience, il aurait fallu avant tout savoir la charge d'eau que le système peut supporter sans que l'eau ne s'accumule au-dessus du système. Cette charge a été trouvée, mais à la fin de l'expérience et elle est à un débit constant de 11,80 mL/s pendant 2 minutes et 20 secondes. Sinon, si l'eau s'accumule, l'expérience n'est plus réelle et c'est ce qui a été le cas donc à partir des débits constants de 16 mL/s.

### 6.3. Discussion de la troisième expérience

Pour des débits constants de 18,46 mL/s, on constate deux réponses complètement différentes. Le système réagit très différemment à cela. Dans la première injection, le système met peu de temps à se mettre en charge, avant de se stabiliser et la décrue est assez rapide, alors que dans la deuxième, la mise en charge est lente, on arrive difficilement à une certaine constance et la décrue est également lente.

Pour des débits constants de 9,94 et 10,20 mL/s, on constate comme précédemment deux réponses très différentes du système. Les deux mises en charge sont rapides, mais après, au niveau de la suite des réponses, cela est très différent. On ne constate pas de stabilisation du système pour la deuxième injection, il varie assez fortement, contrairement à la première injection qui possède un temps de stabilisation du système.

Pour un débit de 19,91 mL/s, on constate une mise en charge lente du système, suivi d'une très rapide stabilisation pour arriver à une très lente décrue. Cela est dû au fort débit injecté dans le système.

Aussi, on voit des variations de la conductivité pour les débits constants de 10,20 mL/s et celui de 19,91 mL/s. On constate des rebonds comme pendant la première expérience, de 5 à 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , confirmant ainsi le fait que des zones de ce système s'active à un moment et ici pas forcément pendant les forts débits comme précédemment, car on a des variations à de faibles débits (10,20 mL/s). Dans tous les cas, on peut dire que plusieurs zones de ce système peuvent être activées par de fortes ou même de faibles pluies et que son eau peut venir se mélanger à celle déjà présente dans le système. C'est ce qui a déjà été constaté réellement sur le terrain, au niveau des zones saturées (Emblanch et al., 1998).

Pour améliorer cette expérience, on aurait pu tester seulement des débits constants inférieur à 11,80 mL/s, pour avoir des réponses réelles et précises sur ce système.

## 7. Conclusion

En conclusion, ces trois expériences ont permis de constater et de confirmer des aspects hydrodynamiques et hydrochimiques du système karstique de Fontaine-de-Vaucluse. Ces constatations sont que même si les quantités de pluie injectées augmentent, les débits en sorties n'augmentent pas forcément de manière logique, il y a par endroit suivant le type de pluie certaines variations de ces débits. Cela est dû entre autres au temps de mise en charge du système qui est variable en fonction des types de



pluies. Mais par contre, on constate que plus le débit constant augmente, plus la différence de hauteurs d'eau augmente, ce qui est ici parfaitement logique. Egalement, cela a permis de confirmer une observation qui avait été faite sur le terrain. En effet, par endroits, des rebonds de conductivité ont été relevés à des endroits où la conductivité devrait être très très faible, car sujette à une eau distillée. Ces rebonds apparaissent lors de fortes injections ou de forts débits constants et même lors de faibles débits constants. Et c'est cela qui avait été observé sur le terrain et qui vient donc confirmer le réalisme de cette nouvelle observation.

De plus, grâce aux résultats obtenus qui sont cohérents et à la confirmation de l'observation de terrain, on peut dire que cette maquette peut être utilisée comme modèle réduit du système karstique de Fontaine-de-Vaucluse.

Pour finir, je trouve qu'il serait intéressant de continuer avec d'autres expériences pour continuer de creuser sur les aspects hydrodynamiques et hydrochimiques de ce système, pour peut-être arriver à connaître et visualiser les différents grands types de cheminements de l'eau de pluie vers l'exutoire de ce système.

## 8. Bibliographie

- Barbel-Perineau, A., Emblanch, C., Danquigny, C., 2015. Spatial and Temporal Hydrodynamic Variations of Flow in the Karst Vadose Zone (Rustrel, France) in Function of Depth and Fracturing Density, in: Andreo, B., Carrasco, F., Durán, J.J., Jiménez, P., LaMoreaux, J.W. (Eds.), Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 11–18. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-17435-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-17435-3_2)
- Barbel-Périneau, A.P., 2013. Caractérisation du fonctionnement de la zone non saturée des aquifères karstiques : Approche directe par études hydrodynamiques et hydrochimiques sur le Bassin de Recherche, d'Expérimentation et d'Observation de Fontaine de Vaucluse – Laboratoire Souterrain à Bas Bruit de Rustrel – Pays d'Apt (phdthesis). Université d'Avignon.
- Emblanch, C., Blavoux, B., Puig, J.-M., Couren, M., 1998. Le marquage de la zone non saturée du karst à l'aide du carbone 13. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science 326, 327–332.
- Mangin, A., 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques (phdthesis). Université de Dijon.
- Perineau, A., Danquigny, C., Emblanch, C., Borgo, E.P. di, Boyer, D., Poupene, J., 2011. Hydrodynamic organisation of the flows in the unsaturated zone of the Fontaine de Vaucluse karst system. First results, in: I-DUST 2010. Presented at the i-DUST 2010, EDP Sciences, p. 01001. <https://doi.org/10.1051/idust/201101001>
- Puig, J.-M., 1987. Le système karstique de la Fontaine de Vaucluse (These de doctorat). Avignon.
- SCHAPI - HydroPortail [WWW Document], 2024. URL <https://hydro.eaufrance.fr/> (accessed 5.24.24).

## 9. Annexes



Photo 1 : Première expérience sur la maquette

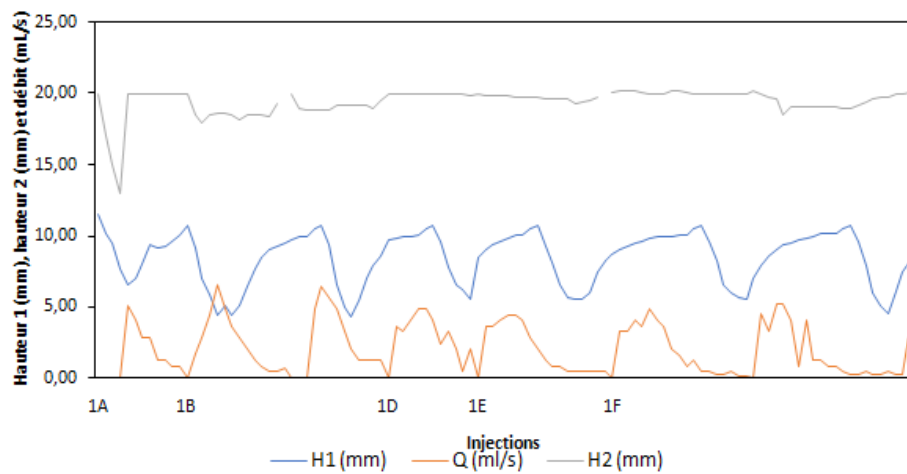


Figure 20 : Hauteur 1 (mm), hauteur 2 (mm) et débit (mL/s) en fonction des différentes injections pendant le scénario 1 de la première expérience

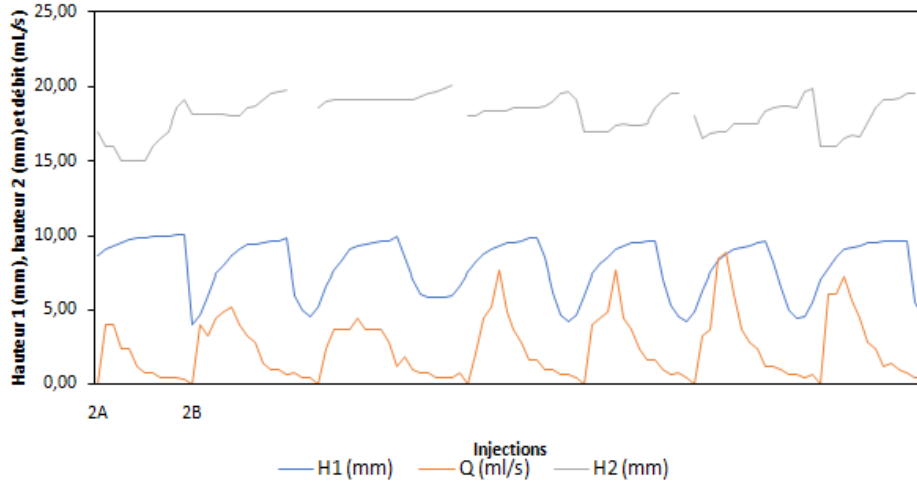


Figure 21 : Hauteur 1 (mm), hauteur 2 (mm) et débit (mL/s) en fonction des différentes injections pendant le scénario 2 de la première expérience

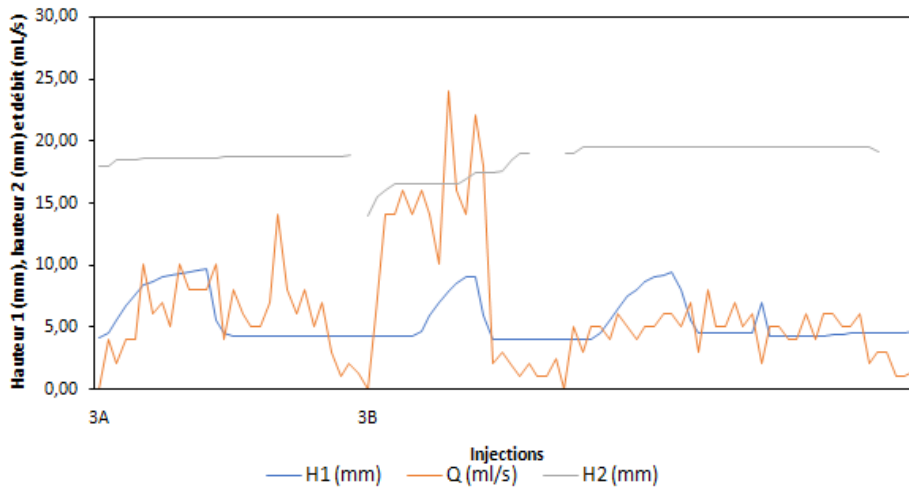


Figure 22 : Hauteur 1 (mm), hauteur 2 (mm) et débit (mL/s) en fonction des différentes injections pendant le scénario 3 de la première expérience

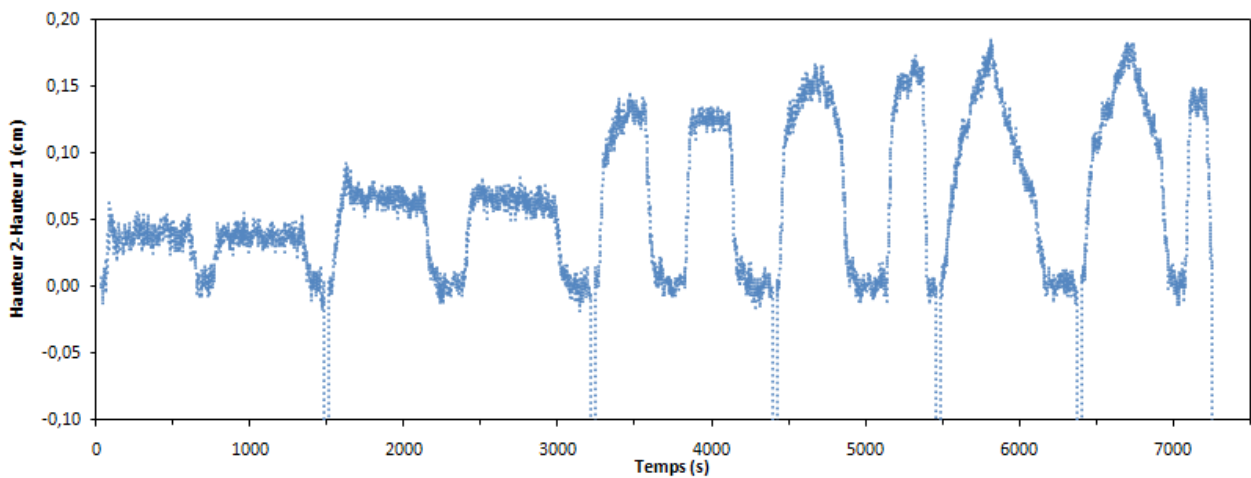


Figure 23 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à des débits constants pendant la deuxième expérience

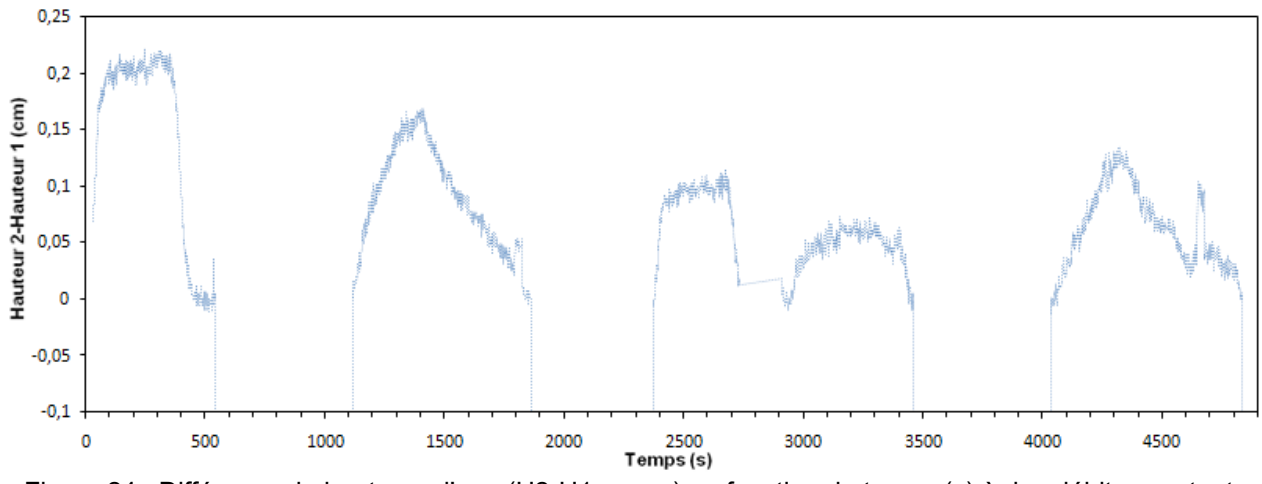


Figure 24 : Différence de hauteurs d'eau (H2-H1 en cm) en fonction du temps (s) à des débits constants pendant la troisième expérience