

## Mémoire de stage de master 2

### **Etude de la relation entre débits des sources karstiques et distributions des temps de séjour**

**Jérôme de La Bernardie**

#### **Tuteurs de stage**

**Valérie Plagnes de Sisyphé (Université Pierre et Marie Curie – Paris 6)**

**Laurent Danneville du Parc naturel régional des Grands Causses**

**Nevila Jozja du CETRAHE (Université d'Orléans)**

*Opération réalisée avec le concours financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne*



AGENCE DE L'EAU  
**ADOUR-GARONNE**

ETABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTRE  
DU DEVELOPPEMENT DURABLE

**2 septembre 2013**

## Abstract

Karst covers an important part of France. Because of its vulnerability, the protection of those systems is essential to maintain karstic spring quality. For this purpose, tracing test is a very powerful tool to predict pollution impacts in karsts.

The result of a tracer test is a breakthrough curve (BTC) which describes the distribution of the tracer concentration at the system exit with time. The residence time distribution (RTD), based on the calculation of the BTC, allows to describe the tracer transit. It is the impulsional response of a dirac injection of tracer. The computation of the RTD can be useful to compare several tracer tests which have been realized in the same tracing system. Because of the non linearity of karstic systems, the RTD varies with hydrologic conditions.

The advection-diffusion equation is not applicable to simulate the transport in karstic environments. This tool is consequently not applicable to predict pollutions. On the contrary, passed researches have shown up that empirical relations between spring discharge and RTD characteristics can be determine in simple systems. That can be a powerful tool to predict the pollution impact in karstic environments.

Several tracer tests were accomplished in different systems at different hydrologic conditions to verify the relationships between spring flowrate and RTD mentioned in the literature. The work was done at the Parc naturel régional des Grands Causses because of the presence of karstic limestone flats. Three tracing systems with varied structural and hydrodynamic characteristics have been chosen to verify the relationships in different contexts.

Links between most of the RTD parameters have been highlighted. Those relationships can be very useful to prepare a tracer test campaign (sampling frequency, tracer mass to inject...). For each system, correlations between those parameters and the spring discharge have been also determine. The relationships are the following:

- The maximum of the RTD is proportional to the mean flow rate
- Mean, minimal and modal travel time is inversely proportional to the mean flow rate
- Tracer speed is proportional to the mean flow rate

The relationship between maximum of the RTD and mean flow rate has not been proved for the small systems (less than 1 km of distance between the injection point and the spring).

The existence of those relationships shows that it is possible to predict the simplified shape of the RTD of a given tracing system for any flow rate. For this purpose, it is essential to realize at least two tracing tests during low and high flows at relatively constant discharge. The ideal situation would be to accomplish three tracer tests at well distributed flow rates.

The next step would be to verify those assumptions in other tracing systems which have diversified characteristics and to find physical explanation of those relationships.



## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Valérie Plagnes pour m'avoir donné l'opportunité de faire ce stage et pour m'avoir suivi tout au long cette étude.

Je remercie tout particulièrement Laurent Danneville qui m'a été d'une grande aide et qui a toujours été très disponible lorsque j'avais besoin de ses conseils, ainsi que la direction du Parc naturel régional des Grands Causses (PnrGC) qui m'a accueilli au sein de sa structure.

Un grand merci à Nevila Jozja, grande spécialiste du traçage, sans qui ce sujet n'aurait pas existé et qui m'a épaulé durant toute l'étude, notamment pendant mes grands moments d'interrogation sur l'interprétation des résultats de traçages.

Je remercie les spécialistes du karst que j'ai rencontré : Paul-Henri Mondain, Philippe Muet, Pierre Marchet et Jacques Ricard pour leurs bons conseils. Toute ma gratitude va aussi à Michel Lepiller qui a beaucoup travaillé sur le sujet mais n'a pas pu le voir aboutir.

Merci à Jean-Louis et à Christophe, mes compagnons de route, sans qui les longues journées de terrain auraient été monotones.

Je voudrais remercier Ugo qui m'a été d'un grand soutien lors de mon arrivée à Millau et qui a toujours été là lorsque j'avais des questions.

Je remercie Laura et Maxime mes deux acolytes de stage, pour tous les bons moments passés au bureau, sur l'eau et dans l'eau, ainsi que les autres stagiaires Chloé, Thomas, Marion et Rémi avec qui j'ai découvert toutes les merveilles que peut offrir l'Aveyron.

Merci à tous les gens du PnrGC qui ont mis la bonne ambiance au bureau et m'ont fait découvrir toutes les nombreuses autres activités du Parc.

En tant que « karstologue », je n'aurais pas pu passer à coté de l'activité phare de la région : la spéléologie. Donc tous mes remerciements à Mathilde et Alexandre qui m'ont initié à cette pratique. Je sais maintenant à quoi m'en tenir quand je parle de karst !

Enfin, je remercie ma mère qui m'a aidé à corriger ce mémoire.

# Sommaire

Introduction.....	7
I Généralités et contexte de l'étude .....	8
1.1 Le karst, une formation sensible aux pollutions.....	8
1.1.1 Formation du karst .....	8
1.1.2 Notion de système karstique.....	8
1.1.3 Classification des systèmes karstiques.....	10
1.2 Le traçage pour caractériser les écoulements et le transport dans le karst .....	12
1.2.1 Notion de système traçage.....	12
1.2.2 Interprétation d'un traçage.....	12
1.2.3 Simuler une pollution .....	14
1.3 Enjeux et méthodologie de l'étude .....	14
1.3.1 Enjeux .....	14
1.3.2 Méthodologie .....	15
II Traçages dans les Grands Causses.....	16
2.1 Présentation de la zone de travail.....	16
2.1.1 Contexte général .....	16
2.1.2 Contexte géomorphologique et géologique de la zone .....	17
2.1.3 Contexte hydrogéologique de la zone.....	18
2.2 Présentation des systèmes traçages .....	19
2.2.1 Système Bassin de rétention A75 – Source du Boundoulaou .....	19
2.2.2 Système trou du Souci – Source de Glassac .....	22
2.2.3 Système St Etienne de Naucoules – Source de la Dragonnière.....	23
2.3 Les traçages .....	25
2.3.1 Mises en œuvre .....	25
2.3.2 Analyses.....	27
2.3.3 Interprétations.....	29
III Recherche d'une relation entre DTS et débit.....	34
3.1 Contexte bibliographique .....	34
3.1.1 Conséquences de la non linéarité du karst sur la prévision de la DTS .....	34
3.1.2 Résultats de Michel Lepiller sur le modèle de drain karstique réduit.....	35
3.1.3 Relations entre les paramètres de la DTS.....	36
3.1.4 Relations entre les paramètres de la DTS et le débit .....	38
3.2 Application aux traçages effectués durant l'étude .....	40
3.2.1 Relations entre les paramètres de la DTS.....	40

3.2.2 Relations entre les paramètres de la DTS et le débit .....	42
3.3. Synthèse et discussion.....	44
3.3.2 Synthèse des résultats.....	44
3.3.1 Utilisation des résultats pour la simulation d'une pollution .....	46
Conclusion .....	48
Bibliographie.....	49
Annexes .....	51
Résumé .....	58

## Introduction

Le karst est une formation très vulnérable aux pollutions. La prévision des impacts des activités humaines est donc un enjeu essentiel pour la protection des environnements karstiques. Pour cela, le traçage artificiel est un des moyens les plus efficaces pour simuler le comportement des polluants dans ces formations. Depuis plus d'un siècle, un grand nombre de scientifiques a ainsi participé à l'amélioration des connaissances sur le comportement des traceurs dans le milieu karstique. Jusqu'à maintenant la simulation du transport du traceur dans le karst afin de prévoir la restitution à l'exutoire reste difficile. Cependant, les recherches tendent à prouver que lors d'un traçage, il existe des relations empiriques entre les paramètres de la restitution du traceur et le débit à l'exutoire du système tracé. C'est dans ce contexte qu'a eu lieu cette étude, le but étant de trouver une relation entre débit des sources karstiques et distributions des temps de séjours à l'aide de traçages artificiels sur le territoire du Parc Naturel Régional des Grands Causses.

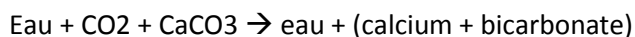
# I Généralités et contexte de l'étude

## 1.1 Le karst, une formation sensible aux pollutions

### 1.1.1 Formation du karst

Les aquifères karstiques sont le résultat des processus de dissolution et d'érosion mécanique des roches carbonatées. Il s'agit de la karstification.

La dissolution chimique est réalisée grâce à la présence de CO<sub>2</sub> dissous dans l'eau de pluie et surtout dans les sols, augmentant son acidité. L'équation chimique est la suivante :



L'eau profite de la présence initiale de discontinuités (fissures, fractures, failles, espaces inter-bancs...) dans la roche pour s'infiltrer et commencer son travail de dissolution. Elle élargit ainsi progressivement les vides pour former un véritable réseau karstique.

Ce processus est accéléré par l'érosion mécanique. En effet, lors de son déplacement à la surface, l'eau se charge en particules minérales (quartz, silice...), et lors de la dissolution de la roche elle se charge en impuretés présentes dans les formations carbonatées (argile, pyrite..). Le déplacement de ces particules a pour conséquence l'érosion mécanique des conduits karstiques.

Le développement du réseau karstique dépend de plusieurs facteurs (Dörfliger, 2010) :

- Le potentiel de karstification (quantité d'eau et de CO<sub>2</sub> disponible, gradient hydraulique, nature de la surface...);
- la structure interne du massif (géologie, fracturation...);
- le temps de séjour de l'eau dans le massif.

La karstification sera ainsi plus ou moins importante suivant les caractéristiques du massif et les conditions extérieures. Si aucun de ces facteurs ne change, l'organisation du réseau karstique dans un massif se poursuivra jusqu'à atteindre un équilibre.

### 1.1.2 Notion de système karstique

L'ensemble du réseau entre la zone où l'eau s'infiltré et le ou les exutoires est appelé système karstique.

Ce système est caractérisé par :

- Sa zone épikarstique (si elle existe), située dans les premiers mètres de l'aquifère. Elle est soumise à d'importants phénomènes d'altération et constitue un espace de stockage temporaire de l'eau de pluie avant quelle ne soit drainée verticalement vers la zone d'infiltration.
- Sa zone d'infiltration, qui est la partie non saturée de l'aquifère. Les écoulements peuvent y être lents ou rapides.
- Sa zone noyée, qui constitue la zone saturée de l'aquifère. Elle est constituée d'un drain principal, où les écoulements sont rapides, autour duquel s'organisent des systèmes annexes de drainage qui constituent des vides importants mais où les écoulements sont lents, aux fonctions capacitives.



La figure 1 présente un schéma conceptuel du système karstique :

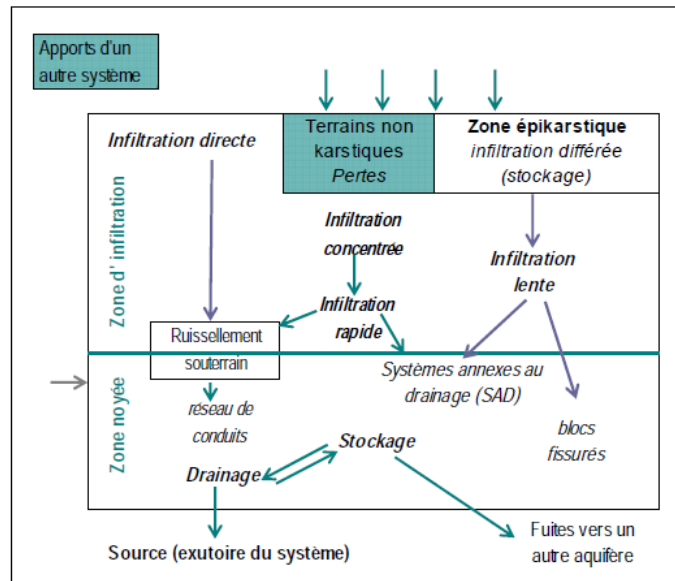
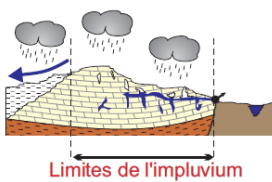


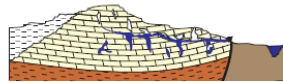
Figure 1 Schématisation d'un système karstique (Dörfliger, 2010, modifié à partir de Mangin, 1975)

Il existe plusieurs types de systèmes karstiques, suivant la configuration structurale, géomorphologique et géologique. De cette configuration dépend l'organisation du réseau karstique. La figure 2 présente la typologie des systèmes karstiques :



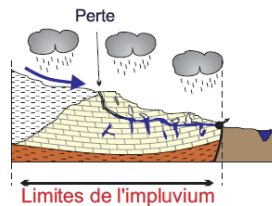
### Système unaire

L'ensemble de l'impluvium est constitué de terrains karstifiables.  
Le drainage s'effectue principalement à l'aval.



### Système jurassien

Degré de fracturation, lithologie, et stratification déterminent une faible résistance à l'écoulement des eaux.  
Le drainage s'organise au voisinage du niveau de l'exutoire.



### Système binaire

Une partie de l'impluvium est constituée de terrains non karstifiables qui concentrent l'infiltration des eaux en un point.  
Le drainage est très développé.



### Système vaclusien

Degré de fracturation, lithologie, et stratification déterminent une forte résistance à l'écoulement des eaux.  
Le drainage s'organise sous le niveau de l'exutoire.

Figure 2 Typologie des systèmes karstiques (Marsaud, 1997)

### 1.1.3 Classification des systèmes karstiques

Une classification de ces systèmes peut être faite en fonction de leurs caractéristiques géométriques et hydrodynamiques.

La classification de la figure 3 se base sur le degré de karstification et la fonctionnalité des aquifères karstiques :

		Fonctionnalité du système	
		Fonctionnel	Non fonctionnel
Karstification	Non développée		1
	Développée	2	3

Figure 3 Classification des aquifères karstiques (Marsaud, 1997). 1 : Aquifères carbonatés fissurés et karstifiés, 2 : Systèmes karstiques au sens strict, 3 : Systèmes karstiques non fonctionnels

1. Systèmes en cours d'évolution sans organisation assimilables à des aquifères fissurés
2. Systèmes dans lesquels vides et écoulements sont organisés
3. Systèmes renfermant des vides organisés ne conditionnant pas les écoulements en raison des conditions hydrauliques extérieures

Dans cette étude, seuls les systèmes développés et fonctionnels nous intéressent.

Une classification plus poussée a été développée. Celle-ci est issue de l'étude des récessions à l'exutoire des systèmes karstiques. La figure 4 présente la décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (1970). Celle-ci permet de déterminer les caractéristiques de la zone d'infiltration (étude de la décrue) et de la zone noyée (étude du tarissement).

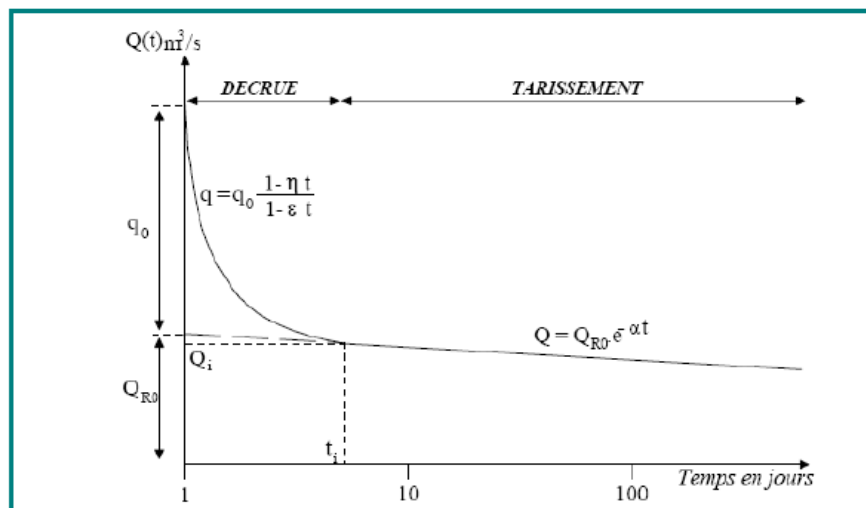


Figure 4 Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (1970) (Dörfliger, 2010)

La décrue est la période pendant laquelle la pluie efficace influence la vidange de la zone noyée. Elle est caractérisée par la formulation suivante :

$$q = q_0 \frac{1 - \eta t}{1 - \varepsilon t}$$

Avec :  $q_0$  le débit d'infiltration à l'instant  $t_0$  marquant la pointe de crue ( $m^3/s$ ),  
 $\varepsilon$  le coefficient d'hétérogénéité d'écoulement ( $s^{-1}$ ),

$\eta$  le coefficient de vitesse d'écoulement égal à l'inverse du temps d'infiltration ( $s^{-1}$ ).

Le tarissement est la période pendant laquelle la zone noyée se vidange sans que la pluie efficace n'influence le débit. Elle est caractérisée par la formule suivante :

$$Q = Q_{R0} e^{-\alpha t}$$

Avec :  $\alpha$  le coefficient de tarissement,

$Q_{R0}$  le débit fictif correspondant au croisement avec l'axe des ordonnées du prolongement de la droite de tarissement.

L'étude de la récession permet de calculer les deux coefficients permettant de classer les systèmes karstiques et ainsi de pouvoir les comparer entre eux : le paramètre  $k$  et le coefficient  $i$ .

Le paramètre  $k$  traduit le pouvoir régulateur du système, c'est-à-dire la capacité à stocker et à restituer les précipitations :

$$k = \frac{V_{dyn}}{V_{trans}}$$

Avec :  $V_{dyn}$  le plus grand volume dynamique observé sur une grande période. Il s'agit du volume écoulé si le tarissement avait été total. Il représente donc le volume d'eau constituant les réserves du système :

$$V_{dyn} = \int_{t_i}^{\infty} Q_{R0} e^{-\alpha t}$$

$V_{trans}$ , le volume de transit interannuel, c'est-à-dire le volume moyen écoulé durant une année.

Une forte valeur de  $k$  est caractéristique d'un système dont les capacités de stockages sont importantes alors qu'une faible valeur (proche de 0) traduit un pouvoir régulateur peu important.

Le coefficient  $i$  traduit les retards à l'infiltration. Il est égal à la valeur de  $q$  (fonctions homographiques), deux jours après le pic de crue. Une forte valeur est significative d'une infiltration lente ou de l'influence importante de la zone épikarstique.

La figure.5 présente la classification proposée par Mangin (1970). et modifiée par et El Hakim et Bakalowicz (2007), pour différents aquifères karstiques, à partir de  $i$  et  $k$  :

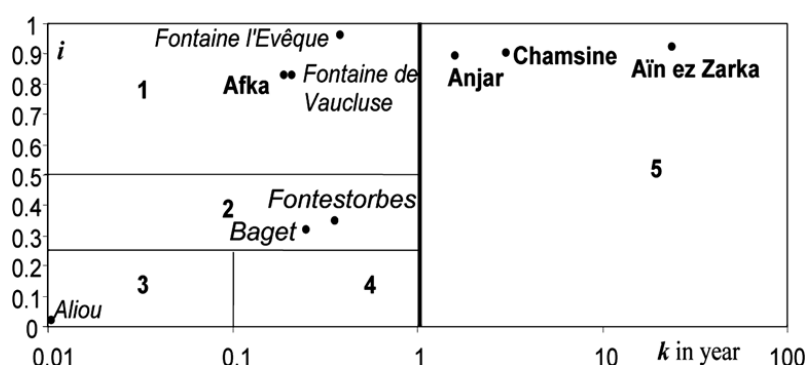


Figure 5 Classification des aquifères karstiques à partir de l'étude des courbes de récession, 1 : Système karstique complexe, constitué de plusieurs sous-systèmes, 2 : Système avec un conduit karstique plus développé dans la partie amont que dans la partie aval et caractérisé par un délai de recharge, 3 : Système très karstifié dans la zone d'infiltration et saturée, avec un conduit bien développé directement connecté à la source, 4 : Système avec une zone d'infiltration bien karstifiée et un important réseau de conduits se terminant par une zone phréatique noyée, 5 : Système avec une zone phréatique profonde, en partie ou totalement confinée sous une couche imperméable de sédiments et largement karstifié (El Hakim et Bakalowicz, 2007).

## 1.2 Le traçage pour caractériser les écoulements et le transport dans le karst

Le traçage artificiel est le meilleur moyen pour simuler le transport de polluant dans un système karstique. Si le traceur est bien conservatif dans l'eau, un traçage permet de caractériser les écoulements ainsi que le système karstique dans lequel il transite.

Il existe deux catégories de traçage :

- Le traçage exploratoire est utilisé dans un premier temps pour déterminer la ou les sources reliées au point d'injection. Il permet de caractériser et délimiter les bassins d'alimentation des sources.
- Le traçage de simulation est utilisé dans un deuxième temps pour déterminer les caractéristiques du transit du traceur entre un point d'injection et un point d'exurgence connu.

### 1.2.1 Notion de système traçage

Dans le karst, il est difficile de déterminer les composantes classiques de l'équation de transport (convection, dispersion, diffusion...) pour caractériser le transit car l'écoulement se fait dans un réseau de drains et non dans un milieu poreux. Le transit dépend complètement de l'agencement des drains karstiques et du degré de karstification du système. L'évaluation du transport se fait grâce à l'étude des signaux d'entrée et de sortie du système sans se préoccuper des lois qui régissent l'écoulement dans le karst. Il s'agit de l'approche systémique (Meus, 1998). Le système en question est appelé système traçage. Il s'agit de l'ensemble de la formation rocheuse (ici la formation karstique) parcourue par le traceur. Il est borné par le point d'injection (entrée du système) et les points de restitution du traceur (sorties du système) et par les zones dans lesquelles le traceur a transité. Il s'agit donc d'une partie du système karstique (Lepiller et Mondain, 1986).

Le système traçage est caractérisé par les spécificités du système karstique qui lui est associé (degré de karstification, fonctionnalité, agencement des différents sous-systèmes) et par la distance apparente qui est la distance la plus courte parcourue par le traceur entre le point d'injection et de restitution.

### 1.2.2 Interprétation d'un traçage

L'étude de la répartition des concentrations du traceur à l'exutoire d'un système traçage en fonction du temps (courbe de restitution) permet de donner un grand nombre d'informations sur le transit, l'écoulement et la structure du système traçage.

Il faut noter que le système traçage n'est qu'une partie du système karstique. Il faut être prudent lorsque l'on veut extrapoler les résultats d'un traçage à l'ensemble du système karstique compte tenu de l'hétérogénéité structurale de celui-ci.

Les principaux paramètres que l'on peut tirer de l'étude du signal de sortie sont :

- Le temps minimal de transit «  $t_{min}$  » qui correspond au temps entre l'injection et la première arrivée de traceur.
- La durée de la restitution «  $t_r$  » qui correspond à la durée entre l'apparition de la première molécule de traceur et la disparition de la dernière molécule.
- Le temps modal de transit «  $t_{mod}$  » qui correspond à l'abscisse du maximum de concentration
- La vitesse maximale de transit :  $V_{max} = L_{app}/t_{min}$  avec «  $L_{app}$  » la distance apparente.

- La vitesse modale de transit :  $V_{mod} = L_{app}/t_{mod}$
- La masse restituée :  $M_r = \int_0^{+\infty} Q(t)C(t)dt$ . Elle permet de critiquer les résultats et de déterminer la fiabilité du traçage.
- Les volumes d'eau caractéristiques du système :  $V_i = \int_0^{t_{min}} Q(t) dt$  et  $V_r = \int_{t_{min}}^{t_{max}} Q(t)dt$   $V_i$  est le volume d'eau passé à l'exutoire avant la première apparition de traceur et  $V_r$  est le volume écoulé au cours de la restitution.

La figure 6 présente un exemple de restitution avec ses paramètres :

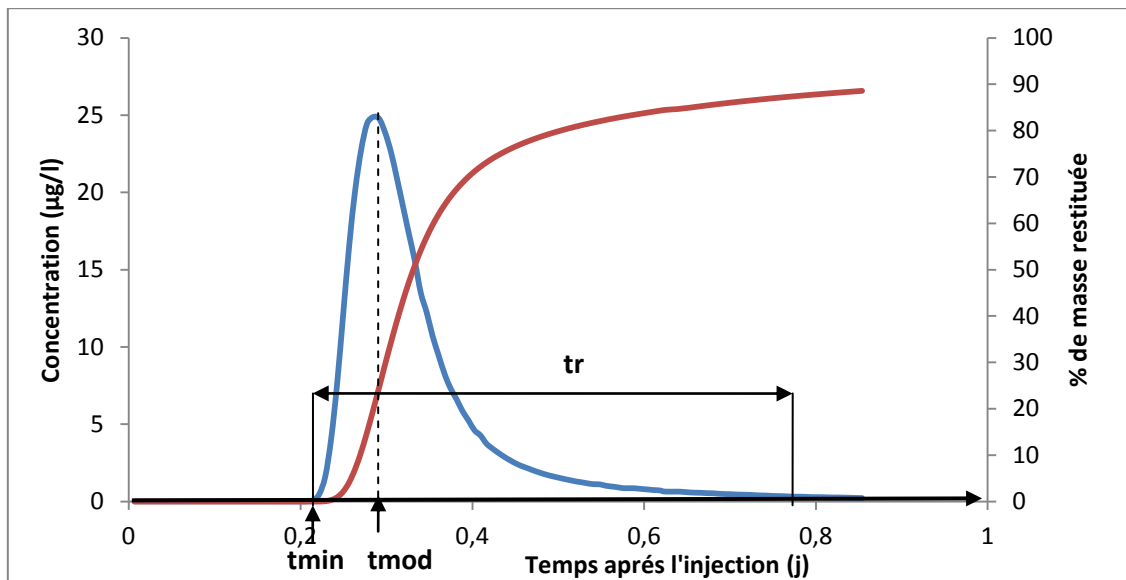


Figure 6 Exemple de courbe de restitution

Lorsque la fonction d'entrée est de très courte durée (Dirac), c'est-à-dire que l'injection du traceur se fait de manière ponctuelle, la fonction de sortie normée sur la masse de traceur restituée correspond à la réponse impulsionnelle du système aussi appelé DTS (Distribution des Temps de Séjour) (figure 7).

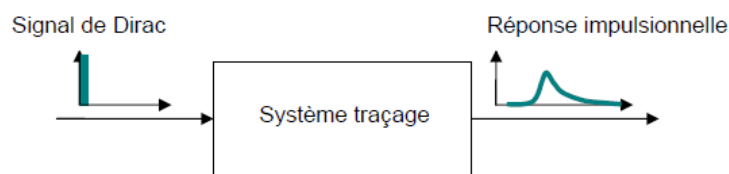


Figure 7 Approche systémique des traçages (Dörfliger, 2010)

Il s'agit de la fonction de densité de probabilité qui donne la probabilité qu'une molécule de traceur de séjourner dans le système durant un temps compris entre  $t$  et  $t+dt$  :

$$h(t) = \frac{C(t)Q(t)}{\int_0^{+\infty} C(t)Q(t)} \text{ ou } h(t) = \frac{\Phi(t)}{M_r(t)}$$

On peut ainsi comparer plusieurs traçages effectués dans le même ou dans différents systèmes karstiques. La connaissance de la DTS permet de décrire le transit du nuage de traceur dans le système traçage et donc de déterminer plusieurs paramètres tels que :

- Le temps moyen de séjour correspondant à l'abscisse du centre de gravité du nuage de traceur :  

$$t_s = \int_0^{+\infty} t * h(t) dt,$$
- la vitesse apparente décrivant la vitesse du nuage du traceur dans son ensemble :  $v_{app} = \frac{L_{app}}{t_s}$ . La vitesse moyenne de transit qui permet d'évaluer le déplacement de chaque molécule de traceur :  

$$v_{moy} = L_{app} \int_0^{+\infty} \frac{1}{t} h(t) dt.$$

La DTS dépend de la structure karstique que le traceur traverse. L'étude de la vitesse apparente de transit peut donner des indications sur les caractéristiques de cette structure. Ainsi, en hautes eaux, des vitesses supérieures à 100 m/h correspondent à un système bien karstifié et bien organisé. Des vitesses situées entre 50 et 100 m/h témoignent d'une moins bonne organisation et des vitesses inférieures à 50 m/h caractérisent un système dont une partie est peu à très peu organisée (Dörfliger, 2010).

La DTS évolue aussi de manière significative avec les débits à l'exutoire de système traçage. En hautes eaux, la forme de la courbe est pointue alors qu'en basses eaux elle est étalée. Cela traduit une dispersion plus importante du traceur en basses eaux. De fortes variations du débit pendant un traçage (lors d'une crue par exemple) vont avoir un impact important sur la DTS et vont empêcher toute utilisation des résultats du traçage. Il est donc essentiel de réaliser les traçages lorsque les débits varient peu.

### 1.2.3 Simuler une pollution

La connaissance de la DTS permet de construire le pollutogramme associé à toute pollution survenant dans le système traçage si on peut quantifier la fonction d'entrée, c'est-à-dire la pollution. Le pollutogramme est la fonction de sortie du système (la courbe de restitution de la pollution à l'exutoire du système). Pour cela, on effectue une convolution de la fonction d'entrée avec la réponse impulsionnelle du système :

$$S(t) = h(t) * E(t)$$

Avec S(t), fonction de sortie du système

h(t), la DTS

E(t), la fonction d'entrée

« \* », l'opérateur de convolution

Ce qui se traduit par :  $S(t) = \int_0^t E(x)h(t-x)dx.$

Dans la pratique, on discrétise la fonction d'entrée et la DTS et on applique la convolution. Il faut prendre en compte le déphasage entre l'injection et le temps minimum d'apparition ( Dörfliger N., 2010).

La DTS évoluant avec le débit, le pollutogramme doit être construit avec la DTS, correspondant aux conditions hydrologiques contemporaines à la pollution.

## 1.3 Enjeux et méthodologie de l'étude

### 1.3.1 Enjeux

Comme on l'a vu précédemment, les systèmes karstiques sont des formations très sensibles aux pollutions du fait des vitesses d'écoulement importantes dans les conduits . La protection de cette ressource est donc

un enjeu important au niveau des secteurs habités. Cela passe par la compréhension des mécanismes de transport dans le karst dont la simulation peut se faire grâce à des traçages.

Jusqu'à maintenant, pour caractériser l'écoulement et le transport dans un système karstique donné, un seul ou deux traçages, généralement en hautes eaux et en basses eaux, étaient effectués. Cependant, comme on l'a expliqué précédemment, la réponse au traçage (ou DTS) à l'exutoire varie de manière significative avec la situation hydrologique pendant le traçage. Afin de connaître la réponse du système et donc de pouvoir construire un pollutogramme sous toutes situations hydrologiques, il est essentiel de réaliser plusieurs traçages à différents débits à l'exutoire (hautes eaux, moyennes eaux, basses eaux).

Le but de ce stage est donc de caractériser l'évolution de la réponse d'un traçage à l'exutoire d'un système karstique en fonction du débit à ce même exutoire et de la formaliser mathématiquement.

### *1.3.2 Méthodologie*

Cette étude fait suite aux travaux non publiés de Michel Lepiller qui avait travaillé sur un modèle miniature de drain karstique pour déterminer plusieurs relations entre les paramètres de la DTS et le débit mesuré à l'exutoire du drain. Cette présente étude permettra de vérifier ces relations pour plusieurs cas réels.

Ce travail s'est effectué en deux temps. Tout d'abord, une étude bibliographique poussée a permis d'évaluer le contexte des connaissances sur le sujet. Cela a notamment permis la création d'une importante base de données de traçages effectués dans le passé.

Ensuite, l'enjeu principal étant de vérifier les relations sur des cas réels, plusieurs traçages ont été réalisés sur le territoire du Parc Naturel des Grands Causses. Plusieurs systèmes traçages ont été sélectionnés et des traçages ont été réalisés dans ces systèmes, sous différentes conditions hydrologiques. Pour le calcul de la DTS et son interprétation, il était souhaitable que les traçages soient réalisés à débit plus ou moins constant. Ils ont donc été effectués préférentiellement pendant la période de récession des systèmes. L'objectif était d'avoir au moins trois points bien répartis par système traçage. Les systèmes ont été choisis de manière à ce que les traçages soient facilement réalisables et rapides compte tenu de la courte durée de l'étude. Les exutoires des systèmes choisis sont tous équipés d'une station hydrométrique afin d'avoir une mesure des débits en continu. Cela permet une bonne interprétation de la DTS. De plus, les systèmes sélectionnés ont des caractéristiques géométriques et hydrodynamiques variées afin de vérifier les hypothèses pour différents types de systèmes traçages. Les traçages se sont appuyés sur un protocole expérimental rigoureux afin d'avoir une bonne précision sur les résultats. Les analyses des échantillons ont été effectuées au CETRAHE à l'université d'Orléans.





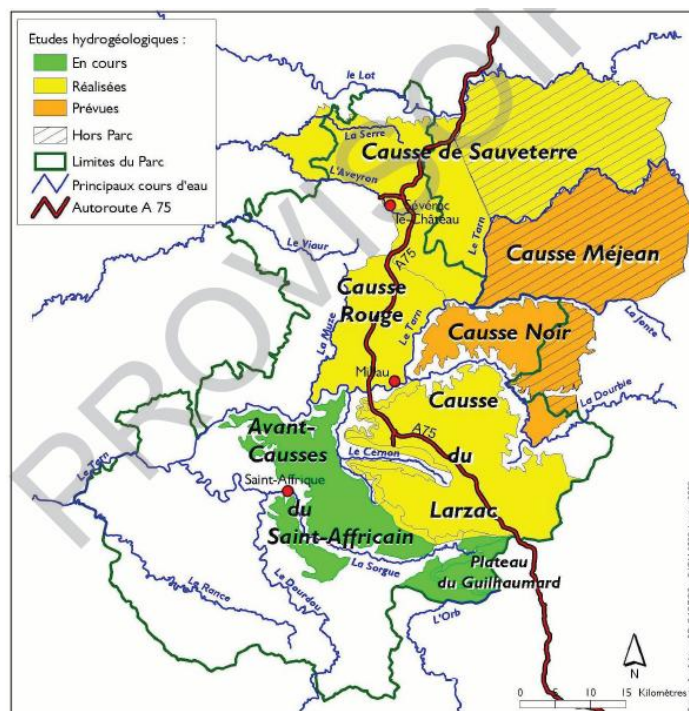


Figure 9 Etudes hydrogéologiques réalisées, en cours et prévues (PnrGC, 2006)

La délimitation des bassins d'alimentation situés dans les systèmes karstiques des Avant-Causse du Saint-Affricain est en cours (zone en vert sur la carte de la figure 9).

Lors de ces études, un grand nombre de traçages ont été effectués et sont prévus. Ce cadre est donc tout à fait favorable à l'étude présente.

### 2.1.2 Contexte géomorphologique et géologique de la zone

Les Grands Causses constituent un ensemble de grands plateaux calcaires séparés par de profondes vallées. Ces plateaux ont été formés pendant une transgression marine progressive au lias (Jurassique inférieur) puis une régression progressive au Jurassique supérieur, résultat d'une extension tectonique O-E pendant le Jurassique inférieur puis N-S pendant le Jurassique supérieur. Ces changements d'environnement ont permis une succession de dépôts de sédiments carbonatés et détritiques fins de durées plus ou moins longues et donc la formation d'un grand plateau constitué de marnes, de calcaires et de dolomies. Le maximum de bathymétrie a lieu pendant le Domérien et Toarcien à la fin du Lias, ce qui se traduit par un dépôt important de marnes imperméables. La dernière étape de sédimentation des Grands Causses est le Malm (Jurassique supérieur), constituée d'importantes séries carbonatées. La sédimentation marine s'arrête définitivement au début du Crétacé (Chanvry et al., 2013). La figure 11 présente la stratigraphie simplifiée caractéristique des Grands Causses.

Le paysage actuel est le résultat d'un réhaussement de toute la série stratigraphique lors de l'orogénèse des massifs alpins et pyrénéens, qui a entraîné une érosion des dernières couches et l'entaillement de la série sédimentaire par les cours d'eau. Cet abaissement du niveau de base a permis l'intensification de la karstification, déjà débutée lors de l'émergence du seuil caussenard à la fin du Jurassique (Chanvry, 2012). Ce réseau karstique est à l'origine d'un grand nombre de sources alimentant les cours d'eau, qui tracent leurs chemins à la base des plateaux. Aujourd'hui, les principales couches sédimentaires qui affleurent sur les Grands Causses sont les dolomies du Bathonien et les roches carbonatées du Malm. Elles forment le paysage ruiniforme propre aux Grands Causses et les falaises, témoins du creusement de la série

sédimentaire par les cours d'eau. Les marnes imperméables du Toarcien forment la base des Grands Causses. Les principaux Grands Causses sont : le causse du Larzac, le causse Noir, le causse Méjean et le causse de Sauveterre. Ils sont séparés par la Dourbie, la Jonte et le Tarn.

Les Avant-Causse du Saint-Affricain sont le résultat d'une érosion plus importante du fait de l'ancienneté des formations et de l'abaissement du niveau de base lorsqu'on se dirige vers l'ouest. Les dolomies de l'Hettangien et les calcaires du Sinémurien arment les plateaux. A la base de ces plateaux, affleurent les formations argilo gréseuses du Trias, qui constituent les versants des vallées creusant les Avant-Causse. La plus importante est la vallée de la Sorgue. La figure 10 présente le contexte géologique de la zone :

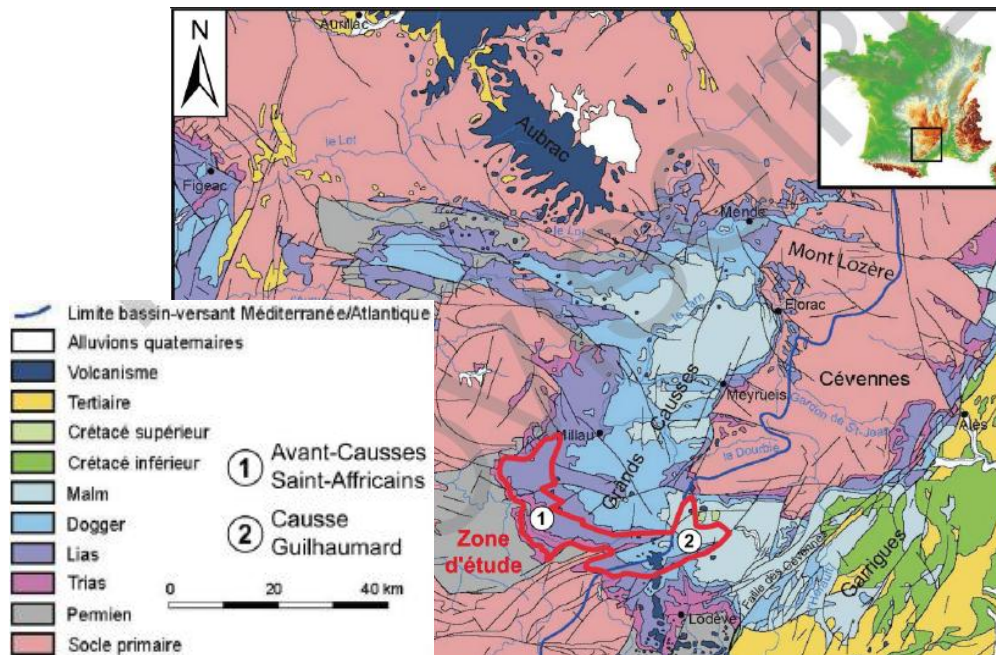


Figure 10 Contexte géologique des Grands Causses (Chanvry, 2013)

### 2.1.3 Contexte hydrogéologique de la zone

Deux aquifères karstiques constituent les réservoirs d'eau de la région. Ils sont séparés par les marnes noires du Toarcien. Dans les Grands Causses, le premier aquifère que l'on rencontre s'écoule dans les karsts du calcaire et des dolomies du Jurassique supérieur et moyen. Il fonctionne en nappe libre et est rechargé par les pluies qui s'infiltrent rapidement dans les karsts très développés des couches supérieures. Cette recharge est facilitée par la présence de nombreux avens, dolines et pertes. Du fait du développement important des systèmes karstiques, le temps de séjour de l'eau est généralement faible. Elle exsurgit rapidement à la base des plateaux et alimente les grandes rivières telles que le Tarn, la Dourbie et la Jonte.

Le deuxième aquifère est captif dans le secteur des Grands Causses et libre dans celui des Avant-Causse. Il est situé dans un karst moins bien développé qui creuse les calcaires et dolomies du Sinémurien et Hettangien. Les sources de cet aquifère exsurgent sur les formations imperméables du Trias qui forment la base des Avant-Causse, alimentant les cours d'eau de cette région tels que la Sorgues et le Cernon. La figure 11 représente la répartition dans la stratigraphie des deux aquifères.

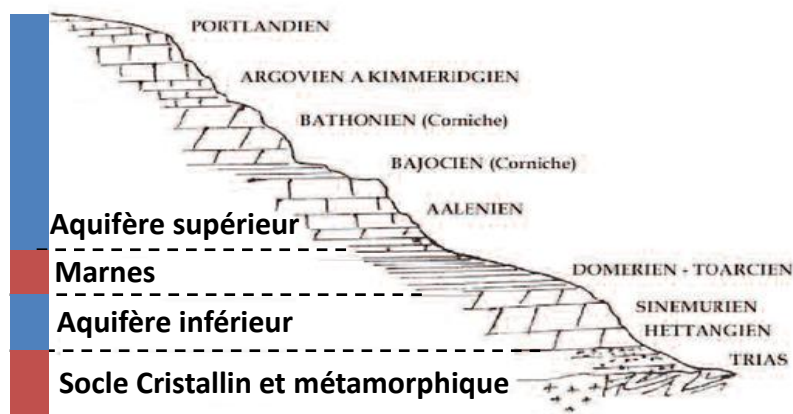


Figure 11 Stratigraphie simplifiée des Grands Causses et configuration des réservoirs (PnrGC, 2006)

## 2.2 Présentation des systèmes traçages

Les systèmes choisis sont des systèmes simples et connus. Les temps de séjour sont courts compte tenu de la durée de l'étude et les restitutions sont unimodales. Afin de simplifier la mise en œuvre des traçages, la plupart des traçages choisis ne demandent pas d'apports d'eau supplémentaires. Pour les besoins de l'étude, les systèmes choisis ont des caractéristiques géologiques, structurales et hydrodynamiques variées. La figure 12 présente la localisation des systèmes traçages.

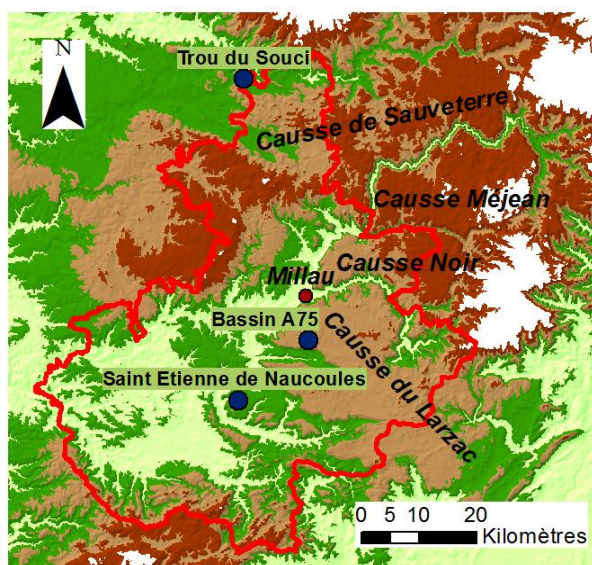


Figure 12 Carte de localisation des systèmes traçages choisis pour l'étude, Points bleus = zone d'injection, Trait rouge = limite du territoire du Parc naturel régional des Grands Causses

### 2.2.1 Système Bassin de rétention A75 – Source du Boundoulaou

#### Contexte

Sur le Causse du Larzac, tout le long de l'autoroute A75, des bassins de décantation et d'infiltration ont été construits afin de retenir les eaux de ruissellement de l'autoroute. Lors du stockage de l'eau dans les bassins, les métaux lourds vont au fond du bassin et les huiles restent à la surface. Après décantation, l'eau est déversée dans un déshuileur puis s'écoule à travers une tranchée d'infiltration.

En 2011, une étude a été menée par le parc afin de connaître les sources concernées par l'eau de ces bassins et d'améliorer leur protection par la constitution d'un pollutogramme. Pour cela, plusieurs traçages ont été mis en œuvre. Un des traçages a mis en évidence la connexion d'un bassin à la source du Boundoulaou qui est captée pour l'alimentation en eau potable des communes de St Georges de Luzençon et Creissels. Son bassin d'alimentation avait d'ailleurs été déterminé lors de l'étude hydrogéologique du causse du Larzac (Ricard et Bakalowicz, 1996). La première carte en annexe 1 montre qu'il ne prend pas en compte le bassin d'autoroute. Les limites du bassin d'alimentation de la source du Boundoulaou devront donc être redéfinies pour que le bassin de rétention soit pris en compte dans la politique de protection de la source.

Ce traçage a été répété plusieurs fois dans le cadre de l'étude présente.

#### **Description du système traçage :**

L'injection se fait dans les calcaires et dolomies du Bathonien inférieur. La source, (Boundoulaou) est un des exutoires de l'aquifère supérieur situé dans les formations calcaires et dolomitiques du Dogger. Elle alimente le ruisseau du Boundoulaou qui s'écoule sur les marnes du Toarcien. Son bassin d'alimentation s'étend sur le causse du Larzac sur une surface de 17,14 km<sup>2</sup> (Ricard et Bakalowicz, 1996) (voir la carte de l'annexe 1).

Ce système traçage a une distance apparente de 5,7 km. Le dénivelé entre le bassin de rétention et la source est de 340 m. Le système est unaire et de type jurassien.

#### **Fonctionnement hydrodynamique de la source du Boundoulaou :**

Contrairement à la plupart des autres sources du Larzac, le Boundoulaou n'est pas une source Vauclusienne. L'exutoire se trouve perché au-dessus des marnes du Lias du fait du creusement de ces formations par le Tarn et donc de l'abaissement du niveau de base en dessous de la limite marnes/calcaires. La présence d'exutoires fossiles au-dessus de l'exutoire en fonctionnement témoigne de l'ancienneté du système et de l'augmentation du gradient hydraulique au cours du temps (Ricard et Bakalowicz, 1996). Pendant les périodes de hautes eaux, un des exutoires peut se mettre en fonctionnement. Il s'agit d'un trop plein qui exurge lorsque les drains principaux se mettent en charge.

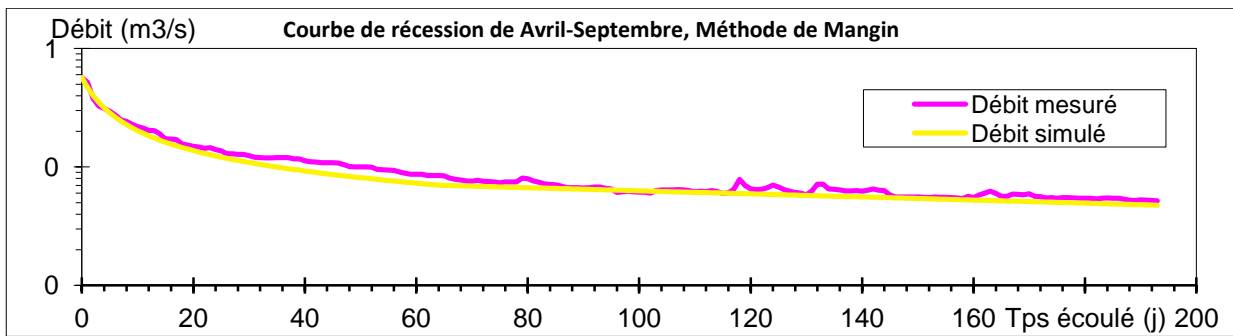
L'étude de la chronique de débit (20 ans) (annexe 2) a permis de caractériser le fonctionnement hydrodynamique du Boundoulaou.

Le débit moyen est de 200 l/s. Il peut varier fortement : le débit maximal mesuré est de 3400 l/s et le débit minimal, 43 l/s. Le rapport Q<sub>max</sub>/Q<sub>min</sub> (indice de variabilité) donne une valeur de 79 ce qui traduit une relativement bonne karstification du système associé (Dörfliger, 2010).

L'étude de huit récessions de durées allant de 5 à 15 mois a permis de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de la zone d'infiltration et de la zone noyée.

Le calage des récessions a été effectué grâce à un tableur Excel. Ce calage a permis le calcul des paramètres caractérisant l'écoulement dans la zone d'infiltration (coefficient de ruissellement, coefficient d'hétérogénéité d'écoulement, volume d'infiltration, retard à l'infiltration) et dans la zone noyée (coefficient de tarissement, volume dynamique, pouvoir régulateur). Le critère de Nash est au-dessus de 0,97 ce qui rend compte du bon calage du modèle pour toutes les récessions.

La figure 13 présente le calage de la récession du 18/03/2011 ainsi que les paramètres associés.



	Date	Débit (m3/s)
Début Récession	18/03/2011	0,570
Fin Récession	27/09/2011	0,050
alpha (coefficient de tarissement)	0,003	
epsilon (coefficient d'hétérogénéité d'écoulement)	0,2400	
QRo	0,085	
ti (tps fin d'infiltration)	64	

Q0 (débit de crue début récession)	0,570
qo (débit d'infiltration à t=0)	0,485
eta (vitesse moyenne d'infiltration)	0,0156
<b>Paramètre i (retard à l'infiltration)</b>	<b>0,65</b>
Critère de Nash (qualité de la simulation) (%)	96,30
Vdyn (Mm3)	2,45

Figure 13 Calage de la courbe de récession du 18/03/2011 par la méthode de Mangin, source du Boundoulaou

La durée de la récession est de 6 mois dont 2 mois d'infiltration et 4 mois de tarissement. Le critère de Nash est de 0,96 ce qui traduit une bonne qualité de la simulation. Le coefficient de tarissement est assez faible : 0,003 ce qui caractérise un tarissement lent et une vidange lente des réservoirs karstiques de la zone noyée. La valeur importante du volume dynamique (2,45 millions de m<sup>3</sup>) montre que le système a d'importantes réserves. Le retard à l'infiltration est élevé. Cela montre que l'infiltration jusqu'à la zone noyée se fait lentement. D'après Ricard et Bakalowicz (1996), cela serait dû à l'influence d'une zone épikarstique noyée importante.

Le tableau de la figure 14 présente un bilan des paramètres déterminés à partir de sept récessions :

Paramètres	Maximum	Moyenne	Minimum
Coefficient de tarissement ( $\alpha$ )	0,011	0,006	0,002
Coefficient d'hétérogénéité d'écoulement ( $\epsilon$ )	0,350	0,230	0,140
Coefficient d'infiltration ( $\eta$ )	0,024	0,016	0,008
V dynamique (Mm3)	4,752	2,722	1,571
Paramètre i (retard à l'infiltration)	0,76	0,67	0,56
Coefficient k (pouvoir régulateur)	0.80	0.46	0.26

Figure 14 Bilan des paramètres déterminés grâce aux calages de sept récessions par la méthode de Mangin, source du Boundoulaou

Le paramètre k qu'il faut prendre en compte est celui correspondant au volume dynamique maximal, soit 0,80. Il a été calculé pour un volume de transit interannuel de 5,94 millions de m<sup>3</sup>. Cela montre que le système a un fort pouvoir régulateur avec des capacités de stockage importantes. La forte valeur de i ( $i > 0,50$ ) traduit la faible karstification de la zone d'infiltration et place le système karstique en classe 1 dans la classification de Mangin. (voir figure 17). Il s'agit donc d'un système karstique complexe, constitué de plusieurs sous-systèmes.



## 2.2.2 Système trou du Souci – Source de Glassac

### **Contexte :**

Le trou du Souci est une vasque dans laquelle le canal de la Ribeyrette se perd. Ce canal est une diffluence de la rivière Serre déviée plus en amont par des moines afin d'alimenter les moulins en aval. Encore aujourd'hui le canal alimente les moulins situés après la résurgence des Douzes alimentant le ruisseau de Glassac.

### **Description du système traçage :**

Le trou du Souci se situe à la limite entre les couches imperméables des marnes du Lias supérieur et des carbonates du Lias inférieur des Avant-Causse constituant les contreforts du causse de Séverac. Le cours d'eau de la Ribeyrette s'écoule sur les marnes grises du Domérien (Lias supérieur) puis se perd dans les calcaires du Carixien (Lias inférieur). Il traverse ensuite les calcaires et dolomies du Sinémurien et de l'Hettangien (Lias inférieur) et réurge sur les argiles et grès du Rhétien (Trias supérieur). La source de Glassac est ainsi alimentée en moyenne dans l'année par 50% des eaux du ruisseau de la Ribeyrette et par 50% des eaux de l'aquifère inférieur localisé dans les carbonates du Lias inférieur (PnrGC, 2006). La carte de l'annexe 1 permet de remettre le système traçage dans son contexte géologique.

La distance apparente de ce système est de 650 m avec un dénivelé de 100 m entre la perte et la source. Il s'agit d'un système binaire jurassien.

### **Fonctionnement hydrodynamique de la source de Glassac :**

L'étude de la chronique d'une durée de 9 ans (2003-2012) des débits journaliers mesurés à la station hydrométrique de Glassac a permis d'établir le fonctionnement hydrologique de l'aquifère karstique traversé par le ruisseau de Ribeyrette.

La moyenne interannuelle a été calculée avec les moyennes annuelles des 6 années complètes de données : de 2003 à 2009. On obtient un débit de 58 l/s. Le débit maximal mesuré est de 228 l/s et le débit minimal est de 6,6 l/s. La gamme de débit mesurée est donc assez large. Le rapport  $Q_{jmax}/Q_{jmin}$  est égal à 35. Cela montre que le système est moyennement karstifié.

La chronique de débits (annexe 2) montre que le système est très réactif aux événements pluvieux. La durée de la décrue étant généralement très courte en période de hautes eaux. Cela est dû au fait que le débit à Glassac dépend en grande partie du comportement du ruisseau de Ribeyrette, compte tenu de la distance entre le trou du Souci et la source de Glassac. En période de basses eaux, le débit diminue lentement de manière significative ce qui correspond à la vidange des réservoirs du système karstique.

L'étude de sept récessions par la méthode de Mangin entre 2003 et 2012 a permis de déterminer les caractéristiques de l'écoulement dans le système karstique. Le critère de Nash des calages se situe en 0,82 et 0,99 ce qui traduit un bon calage du modèle. La figure 15 présente un bilan des paramètres déterminés à partir de sept récessions.

Paramètres	Maximum	Moyenne	Minimum
Coefficient de tarissement ( $\alpha$ )	0,020	0,012	0,005
Coefficient d'hétérogénéité d'écoulement ( $\epsilon$ )	1,600	0,871	0,050
Coefficient d'infiltration ( $\eta$ )	0,333	0,191	0,077
V dynamique (Mm3)	1,296	0,710	0,346
Paramètre i (retard à l'infiltration)	0,470	0,256	0,111
Coefficient k (pouvoir régulateur)	0,722	0,395	0,194

Figure 15 Bilan des paramètres déterminés grâce aux calages de sept récessions par la méthode de Mangin, source de Glassac

Le coefficient de tarissement moyen élevé :  $\alpha=0,012$ , traduit une vidange rapide de la zone noyée. Le coefficient d'infiltration  $i$  reste inférieur à 0,5 ce qui est plutôt faible. Cela montre que la zone épikarstique et d'infiltration est plutôt bien karstifiée. Les réserves d'eau sont beaucoup moins importantes que celles du Boundoulaou. Le volume dynamique maximal est en effet de 1,3 millions de  $m^3$ . Le pouvoir régulateur calculé avec un volume de transit interannuel de 1.8 millions de  $m^3$  est important :  $k=0,72$ . Dans la classification de Mangin, ce système karstique est classé dans la zone 2 (voir figure 17). Ceci correspond à un système avec un conduit karstique plus développé dans sa partie amont que dans la partie aval et caractérisé par un délai de recharge causé par des apports non karstiques. Une partie de l'impluvium est en effet constituée de l'eau de ruissellement apportée par le ruisseau de Ribeyrette. La présence de la perte induit de plus une meilleure karstification dans la partie amont du système.

### 2.2.3 Système St Etienne de Naucoules – Source de la Dragonnière

#### Contexte :

Le premier traçage effectué à St Etienne de Naucoules avait pour cadre l'étude hydrogéologique des Avant-Causse du St Affricain menée par le Parc naturel régional des Grands Causses. Il avait pour but, avec deux autres traçages d'exploration, de déterminer les bassins d'alimentation des sources situés au pied du causse sur lequel se trouve le village de St Etienne de Naucoules et notamment celui de la source de la Dragonnière qui alimente la ville de St Afrique en eau potable. Le traceur dont l'injection a eu lieu à St Etienne a atteint la source avec un temps minimal de transit court et une bonne courbe de restitution. Ce traçage était donc favorable à la présente étude.

#### Description du système traçage :

Ce système traçage se situe dans les calcaires et dolomies du Lias inférieur, caractéristiques des plateaux des Avant-Causse. Le point d'injection se trouve sur le Sinémurien et l'exutoire du système (source de la Dragonnière) se situe à la limite entre l'Hettangien et les couche supérieures du Trias constituées d'argiles et de grès (voir carte géologique de l'annexe 2).

La distance apparente est de 2,5 km et le dénivelé entre le point d'injection et la source est de 200 m. Il s'agit d'un système uniaire.

#### Fonctionnement hydrodynamique de la source de la Dragonnière :

Du fait de l'abaissement du niveau de base que constitue la Sorgues au niveau du Trias, la source de la Dragonnière est de type Jurassienne. En période de hautes et moyennes eaux, un trop plein se met en fonctionnement. En période de basses eaux, lorsque le trop plein n'est pas fonctionnel, le débit du ruisseau est très faible (de l'ordre de 20 l/s), car une grande partie du débit est réservée à la consommation en eau potable (moyenne de volume prélevé journalier de 1880  $m^3$  soit un débit moyen de 22 l/s).

La chronique de débits étudiée s'étend de janvier 2002 à août 2013 soit 10 années de données complètes (annexe 2). La moyenne interannuelle (mesurée à la station) est de 76 l/s. Le maximum des débits est de 1470 l/s et le minimum de 3 l/s. Ces débits mesurés ne tiennent pas compte des volumes pompés pour l'alimentation en eau potable de Saint Affrique. Le rapport  $Q_{jmax}/Q_{jmin}$  est de 490 ce qui est caractéristique d'une très bonne karstification du système.

L'étude des récessions est issue de la pré-étude hydrogéologique effectuée par le parc en 2006 (Montaufier, 2006). Cinq récessions ont été étudiées. Le tableau de la figure 16 résume les résultats des analyses.

Paramètres	Maximum	Moyenne	Minimum
Coefficient de tarissement ( $\alpha$ )	0,009	0,006	0,003
Coefficient d'hétérogénéité d'écoulement ( $\epsilon$ )	0,560	0,420	0,220
Coefficient d'infiltration ( $\eta$ )	0,028	0,016	0,007
V dynamique (Mm <sup>3</sup> )	1,361	1,112	0,668
Paramètre i (retard à l'infiltration)	0,700	0,611	0,437
Coefficient k (pouvoir régulateur)	0,262	0,220	0,165

Figure 16 Bilan des paramètres déterminés grâce aux calages de cinq récessions par la méthode de Mangin, source de la Dragonnière (Montaufier, 2006)

Le coefficient de tarissement est faible, ce qui traduit un tarissement étalé dans le temps. Les faibles volumes dynamiques (de l'ordre du million de m<sup>3</sup>) montrent que les réserves du système sont relativement faibles. Le coefficient k associé est plus faible que ceux calculés avec les récessions du Boundoulaou et de Glassac. Il s'agit donc d'un système dont le pouvoir régulateur est moins important. Le paramètre i (moyenne de 0,6) est quand à lui relativement élevé ce qui se traduit par des écoulements lents dans la zone d'infiltration. Le système se place ainsi dans la zone 1 de la classification de Mangin. Il s'agit donc d'un système complexe constitué de plusieurs sous systèmes (voir figure 17).

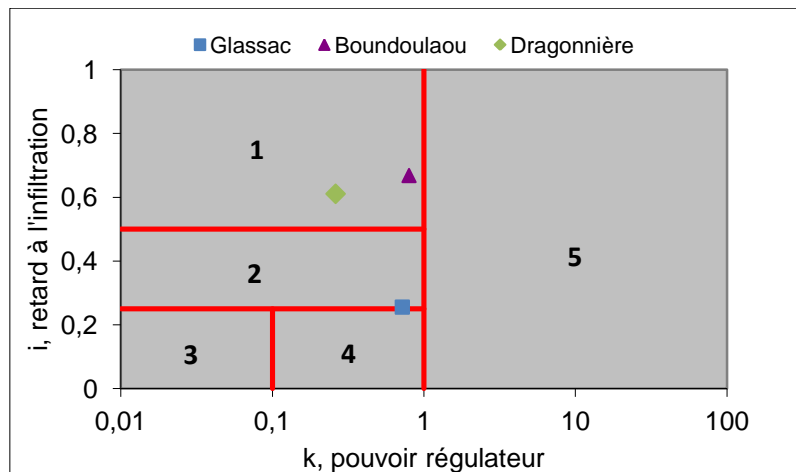


Figure 17 Classification de Mangin (1970) modifiée par El Hakim et Bakalowicz (2007) des trois systèmes traçages étudiés; 1 : Système karstique complexe, constitué de plusieurs sous-systèmes, 2 : Système avec un conduit karstique plus développé dans la partie amont que dans la partie aval et caractérisé par un délai de recharge, 3 : Système très karstifié dans la zone d'infiltration et saturée, avec un conduit bien développé directement connecté à la source, 4 : Système avec une zone d'infiltration bien karstifiée et un important réseau de conduits se terminant par une zone phréatique noyée, 5 : Système avec une zone phréatique profonde, en partie ou totalement confiné sous une couche imperméable de sédiments et largement karstifié.



## 2.3 Les traçages

### 2.3.1 Mises en œuvre

Dans les trois systèmes décrits précédemment, plusieurs traçages artificiels ont été effectués sous des conditions hydrologiques différentes. Les étapes de leur mise en œuvre seront décrites dans cette partie.

#### **Injection :**

##### Contexte de l'injection :

Pour avoir des résultats interprétables, l'injection doit être la plus instantanée possible (signal Dirac) (Lepiller et Mondain, 1986). S'il n'y a pas d'écoulement pérenne, un apport en eau est indispensable : avant le traçage pour remettre en eau le système, pendant et après le traçage pour entraîner le traceur jusqu'à la zone noyée. La quantité d'eau à injecter dépend des conditions de saturation du sous sol et donc des conditions hydrologiques. Moins la zone sera saturée et plus il faudra une quantité importante pour mettre en eau le système.

Pour le traçage « bassin de rétention A 75-source du Boundoulaou », l'eau utilisée est celle du bassin de rétention. La quantité injectée dépend de l'état de remplissage du bassin lors de l'injection. Quelques semaines avant l'injection, il est demandé à la Direction Interdépartementale des Routes (DIR) de fermer les vannes du bassin pour le mettre en charge et avoir assez d'eau pour remettre le système en fonctionnement et pousser les traceurs jusqu'à la zone noyée. La quantité injectée pour mettre en eau est généralement entre 10 et 15 m<sup>3</sup>. Le traceur s'infiltré ensuite dans la tranchée d'infiltration.

L'injection au trou du Souci se fait dans une perte. L'apport d'eau n'est donc pas nécessaire.

Sur le plateau calcaire où se trouve Saint Etienne de Naucoules, le troisième lieu d'injection, il n'y a aucun moyen d'avoir un accès direct à la roche fracturée. Une couche de terre et d'argile recouvre le plateau. Il a donc été nécessaire de réaliser une tranchée à la pelle mécanique et d'évaluer la capacité d'infiltration du sol. L'infiltration doit être suffisante pour que l'injection soit la plus instantanée possible et pour limiter la perte en fluorescence des traceurs par les UV et l'adsorption (voir paragraphe suivant). Pour ce cas, un apport d'eau extérieur a été nécessaire. Entre 2 et 4 m<sup>3</sup> d'eau ont été injectés pour remettre le système en fonctionnement puis entre 4 et 6 m<sup>3</sup> pour entraîner et pousser le traceur jusqu'à la zone noyée.

Les photos en annexe 4 présentent trois injections dans les trois systèmes.

##### Caractéristique des traceurs

Pour chaque traçage, deux traceurs ont été utilisés simultanément : l'uranine et la sulforhodamine B (multitraçage), afin de comparer l'effet du milieu sur ces deux traceurs.

L'uranine est le traceur le plus utilisé car il est le plus conservatif. Le seuil de détection est le plus faible : 0,001 µg/l. La dilution de ce traceur demande peu d'eau car sa solubilité est élevée : 600g/l à 20°C. Le principal inconvénient de ce traceur est qu'il se dégrade au contact des UV et des oxydants tel que le chlore. De plus, les eaux à pH inférieur à 7 peuvent altérer la fluorescence de ce traceur. Il est visible à l'œil nu pour des concentrations entre 50 et 100 µg/l. Il n'est pas nuisible pour l'homme et l'environnement. (Dörfliger, 2010)

La sulforhodamine B quant à elle a un seuil de détection plus élevé : 0,01 µg/l. Elle se dégrade en présence d'oxydants et est sensible à l'adsorption par les matières en suspension. Le traceur est visible pour des concentrations supérieures à 500 µg/l.

### Mise en solution des traceurs :

Les traceurs sont sous forme de poudre. Il faut donc les mettre en solution. Il est essentiel pour cela de respecter les coefficients de solubilité associés aux traceurs : 600 g/l pour l'uranine et 50 g/l pour la sulforhodamine B (Dörfliger, 2010). Il est indispensable d'effectuer le mélange dans un lieu approprié pour éviter toute contamination du matériel de surveillance de l'exutoire. Pour éviter toute altération de la fluorescence, l'eau utilisée est l'eau de la source afin d'avoir un pH supérieur à 7.

### Choix de la masse de traceur à injecter:

Le choix de la masse de traceur à injecter est une étape essentielle pour une bonne mise en œuvre. La quantité doit être suffisante pour être au-dessus du seuil de détection après dilution dans le système et elle ne doit pas être trop importante afin d'éviter une pollution visuelle de la source. L'évaluation de la masse à injecter doit prendre en compte : la distance apparente, la structure karstique que le traceur traverse (degré de karstification, complexité du système, présence d'argile...), le contexte de l'injection (distance par rapport à la zone noyée, temps d'exposition du traceur à la lumière du jour, présence d'argile, vitesse d'infiltration...), le débit à l'exutoire, les caractéristiques des traceurs utilisés (seuil de détection, concentration à ne pas dépasser) . Cette quantité reste difficile à déterminer, surtout lorsqu'aucun traçage n'a été réalisé dans le passé. Plusieurs auteurs ont mis en place des formules empiriques issues des traçages qu'ils ont eux même réalisés. On retiendra la formule proposée par Käss (1998) valable pour une injection dans la zone saturée :

$$M = \alpha \times L \times A$$

Avec : M, la masse injectée

$\alpha$ , le facteur de correction du traceur dépendant des caractéristiques de celui-ci : 1 pour l'Uranine et 4 pour la sulforhodamine B

L, la distance apparente

A, Facteur d'ajustement aux conditions de l'aquifère : entre 0,2 et 1 pour les aquifères karstiques, il dépend du degré de karstification du système.

Pour une injection dans la zone non saturée il faut multiplier par 2 voire par 3 la quantité à injecter.

Cette formule reste une aide à la décision. Rien ne remplace l'expérience pour déterminer la masse à injecter.

### **Surveillance de l'exutoire :**

#### Matériel de surveillance

La surveillance se fait à l'aide d'un fluorimètre et d'un préleveur automatique. Le fluorimètre mesure en continu le signal du traceur. Son fonctionnement sera décrit en annexe 3. Le préleveur automatique prélève à une fréquence donnée les échantillons d'eau dans la source qui sont ensuite envoyés au laboratoire pour les analyses. Il est constitué d'une pompe liée à un tuyau, d'un module de programmation et de 24 flacons.

Pour permettre le calcul précis de la masse restituée et la DTS, une station hydrométrique est présente à chaque exutoire des systèmes. Ces stations sont équipées d'un seuil qui permet d'imposer à l'eau en amont d'avoir un comportement laminaire et donc de stabiliser la surface et d'un thalimède qui mesure en continu la hauteur d'eau. La figure 18 présente le fonctionnement d'une station. La détermination rigoureuse de la courbe de tarage qui décrit la relation entre la hauteur à la station et le débit permet de convertir ces hauteurs en débits. Cette courbe est réalisée en effectuant des mesures de débit ponctuelles sous des conditions hydrologiques variées. Il est admis qu'il faut au minimum sept points répartis sur une large gamme de débits pour avoir une bonne courbe de tarage.

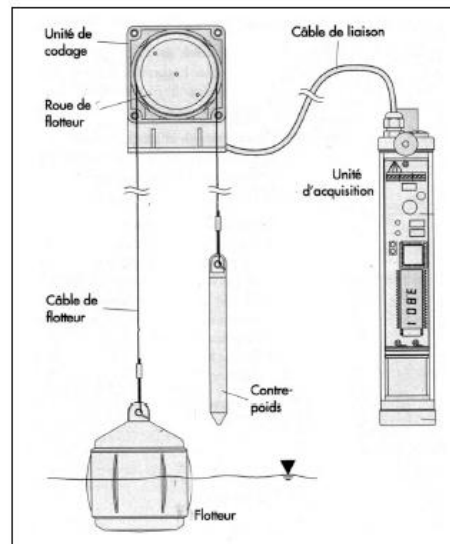


Figure 18 Présentation d'une station hydrométrique et son fonctionnement (Montety (de), 2003)

### L'échantillonnage :

Il est tout d'abord indispensable d'effectuer un blanc à la source avant l'injection. L'analyse de cet échantillon permet de connaître le niveau de base de fluorescence présent dans la source, surtout que pour l'étude, plusieurs traçages sont réalisés à la suite dans les mêmes systèmes. (Voir le paragraphe 2.3.2)

Afin d'avoir une bonne résolution de la courbe de restitution et une bonne précision du temps de première apparition, du maximum de concentration et de la fin de la restitution, il est indispensable de choisir des fréquences d'échantillonnage adaptées aux conditions hydrologiques et à la configuration du système traçage.

Les échantillons sont stockés dans des flacons en verre fumé à l'abri de la lumière afin d'éviter toute dégradation des traceurs par les UV.

### **2.3.2 Analyses**

L'analyse des échantillons est une étape importante pour bien interpréter les résultats. Un protocole analytique rigoureux est indispensable.

#### **Principe**

Comme on l'a vu, deux appareils sont placés à l'exutoire des sources : un fluorimètre et un préleveur automatique. Le fluorimètre mesure en continu le signal de concentration du traceur et permet d'avoir une bonne résolution de la courbe de restitution (10 min) mais une précision moyenne (de l'ordre du  $\mu\text{g/l}$ ). Le préleveur prélève des échantillons à une fréquence moins élevée (plusieurs heures) que les mesures du fluorimètre, mais les analyses permettent d'obtenir des concentrations très précises (de l'ordre du  $\text{ng/l}$ ). Les résultats des analyses au spectrofluorimètre permettent donc de caler la courbe de restitution obtenue grâce au fluorimètre.

#### **Principe de fonctionnement des appareils de mesure :**

Tout traceur fluorescent est excité à une certaine longueur d'onde et émet en réponse une autre longueur d'onde spécifique. Le principe du fluorimètre de terrain et du spectrofluorimètre repose sur la mesure de l'amplitude du signal absorbé et émis par l'eau. L'amplitude du signal de fluorescence mesurée est convertie en concentration. Un étalonnage des appareils avec des concentrations connues est donc essentiel avant leur utilisation. Les traceurs fluorescents ne sont pas seuls à émettre de la fluorescence.

Des composants présents initialement dans l'eau telle que la matière organique peuvent aussi être excités et émettre à certaines longueurs d'onde. Il est important de prendre cela en compte lors des mesures. Les différentes méthodes analytiques peuvent permettre d'éliminer cette composante. L'annexe 3 présente avec plus de détails le fonctionnement des appareils de mesure.

### Protocole d'analyse

L'utilisation seule des données du fluorimètre ne permet pas d'avoir une bonne précision sur la restitution car il mesure le signal brut émis par tous les composants de l'eau et non le signal émis seulement par le traceur.

Le spectrofluorimètre quand à lui peut séparer les différentes composantes du signal.

Le signal brut analysé est la somme de trois composantes:

- la fraction de lumière d'excitation diffusée par l'eau et les particules en suspension à la longueur d'onde d'émission du traceur recherché,
- la lumière émise par la fluorescence des substances présentes, autres que le traceur dans l'eau analysée,
- la lumière émise par la fluorescence du traceur qui constitue le signal vrai ou net

Les deux premières composantes constituent le bruit de fond. C'est cela que l'on veut supprimer pour ne garder que le signal net (Jozja, 2008).

Il existe deux méthodes analytiques. La première permet de mesurer l'intensité de fluorescence de l'échantillon à des longueurs d'onde d'excitation/ émission fixes correspondant à la fluorescence du traceur. La deuxième méthode est utilisée en cas de doute sur les résultats de la première. Elle permet de mesurer le spectre d'excitation de l'eau et de séparer les différents pics de fluorescence. Deux approches sont possibles. Il s'agit de mesurer le signal de fluorescence pour une large gamme d'ondes d'excitation (Meus et al., 2006) ou d'exciter l'échantillon à la longueur d'onde de fluorescence du traceur et de mesurer le signal de fluorescence pour une large gamme de longueurs d'onde. Ces deux méthodes permettent de mettre en évidence respectivement les spectres d'excitation et d'émission de l'échantillon analysé. La figure 19, présente les spectres d'excitation et d'émission types d'une eau contenant de l'uranine.

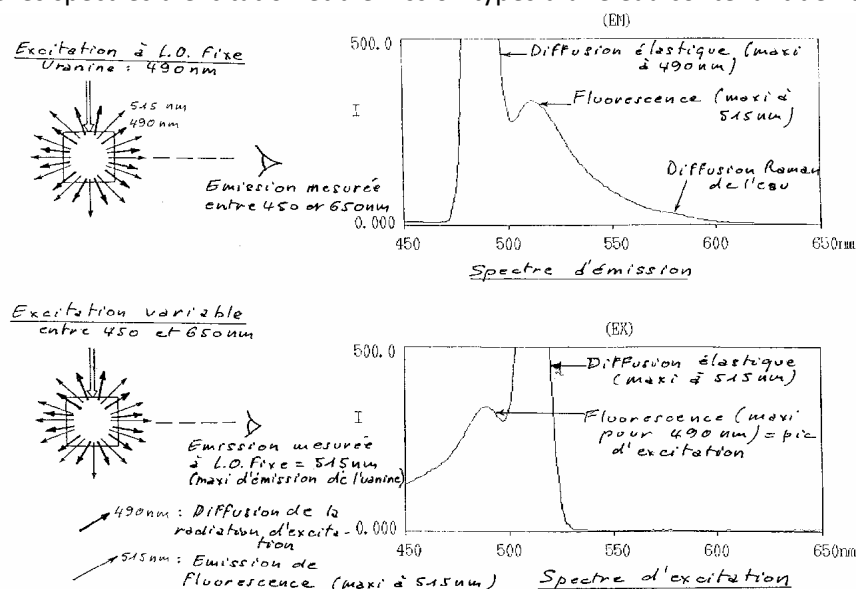


Figure 19 Spectres d'émission et d'excitation d'une eau contenant de l'uranine (Cours de Jozja, 2013)

Par exemple, étant donné que le spectre d'excitation de la matière organique recoupe celui de l'uranine, il est important de mesurer le spectre d'excitation de l'eau s'il y a un doute sur la présence du traceur.

Dans l'eau souterraine, il y a toujours un niveau de base de fluorescence. Cela est principalement dû au fait que l'on utilise des traceurs depuis longtemps et qu'ils se dégradent lentement, et que la matière organique contient des fluorophores (Meus et al., 2006). Il est important de connaître ce niveau de base afin de le supprimer des mesures. Pour cela, il faut analyser un blanc prélevé avant l'injection.

#### Calage des données du fluorimètre :

Les analyses avec le spectrofluorimètre permettent de caler les mesures moins précises du fluorimètre. Il a été vérifié lors de l'étude qu'il existait une relation linéaire, pour les deux traceurs, entre les données du fluorimètre et les résultats des analyses du spectrofluorimètre. Cela montre la fiabilité des résultats du fluorimètre. Le graphique de la figure 20 présente la corrélation linéaire entre les données du fluorimètre et les résultats du spectrofluorimètre associés au 3ème traçage à l'uranine du système traçage Bassin A75-Source du Boundoulaou.

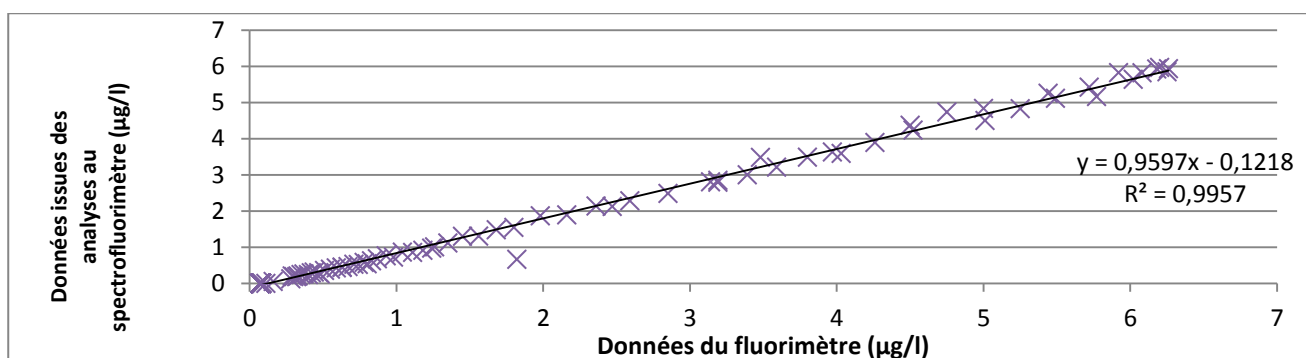


Figure 20 Corrélation linéaire entre les données du fluorimètre et les données issues des analyses au spectrofluorimètre, 3ème traçage à l'uranine dans le système traçage « Bassin d'autoroute – Source du Boundoulaou »

Il faut remarquer aussi que le fluorimètre est moins précis pour de fortes valeurs de concentrations en traceur. Pour des concentrations inférieures à 10 µg/l, les données du fluorimètre corrigées de la concentration de base sont très proches de celles issues des analyses du spectrofluorimètre.

### 2.3.3 Interprétations

#### Traçage Bassin de rétention d'autoroute - Source du Boundoulaou :

Cinq traçages ont été effectués dans des conditions hydrologiques stables, parfaitement adéquates à la mise en œuvre des traçages. Deux en hautes eaux et trois en moyennes et basses eaux. Les taux de restitution sont corrects pour l'uranine : entre 40 et 60 %. Ces bons taux de restitution attestent de la fiabilité des traçages. Les figures 21, 22 et 24 présentent les DTS et leurs paramètres des différents traçages.

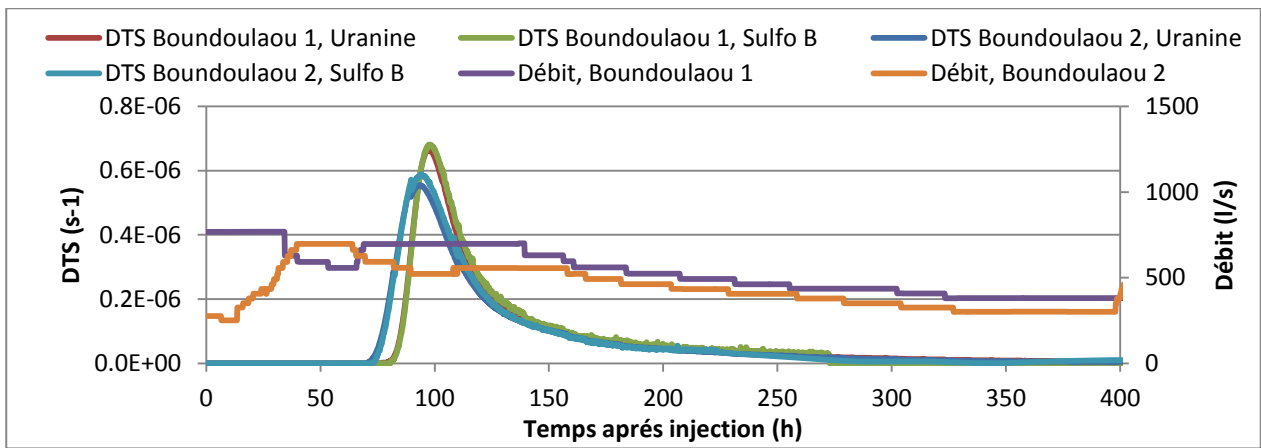


Figure 21 : DTS et débits des traçages réalisés en hautes eaux au bassin de l'A75

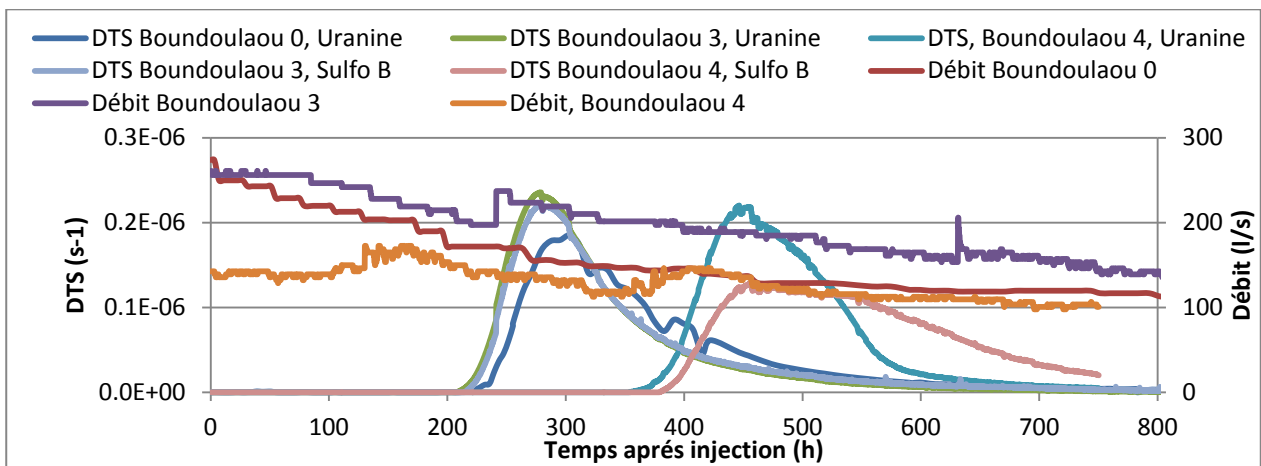


Figure 22 DTS et débits des traçages réalisés en basses eaux au bassin de l'A75

	Traçage 0		Traçage 1		Traçage 2		Traçage 3		Traçage 4	
Date	24/03/2011		04/04/2013		29/04/2013		14/06/2013		24/07/2013	
Traceur utilisé	Uranine	Uranine	Sulforhodamine B	Uranine	Sulforhodamine B	Uranine	Sulforhodamine B	Uranine	Sulforhodamine B	Uranine
Lieu de restitution	Boundoulaou	Boundoulaou	Boundoulaou	Boundoulaou	Boundoulaou	Boundoulaou	Boundoulaou	Boundoulaou	Boundoulaou	Boundoulaou
Dapp (m)	5780,0	5780,0	5780,0	5780,0	5780,0	5780,0	5780,0	5780,0	5780,0	5780,0
tmin (j)	9,0	3,2	3,4	2,9	3,0	8,4	9,0	15,1	14,8	
tmod (j)	12,6	4,0	4,0	3,9	3,9	11,7	11,7	18,9	21,5	
ts (j)	15,5	5,9	6,3	5,6	5,4	14,0	14,4	20,1	22,5	
h(t)max (l/s)	0,0	6,6E-06	6,1E-06	5,5E-06	5,9E-06	2,4E-06	2,2E-06	2,25E-06	1,29E-06	
Vmoy (m/h)	16,8	47,2	45,0	49,5	50,3	18,4	17,9	12,1	11,0	
Vapp (m/h)	15,5	41,1	38,0	43,0	44,7	17,5	16,8	11,9	10,7	
Vmax (m/h)	26,8	76,0	71,7	82,7	79,0	28,8	26,9	16,0	16,3	
Vmod (m/h)	19,1	59,9	60,0	62,1	61,4	279,7	20,6	12,8	11,2	
Qmoy (l/s)	189,0	578,0	578,0	490,0	490,0	172,0	172,0	118,0	118,0	
Restitution (%)	60	40	20	40	20	60	30	29	32	

Figure 23 Résultats des traçages réalisés au bassin de l'A75

Quelque soit les conditions hydrologiques, la forme de la restitution est unimodale avec une bonne homogénéité de la réponse. Cela traduit l'existence d'un seul drain bien karstifié dans la zone noyée. Ce qui limite la dispersion et les restitutions plurimodales.

En hautes eaux (débits supérieurs à 400 l/s), le traceur a mis très peu de temps à arriver jusqu'à la source. Le temps minimal de séjour est d'environ 3 jours et le temps modal de 4 jours. Cela est caractéristique d'une dispersion faible du traceur dans la zone noyée et donc une courbe de restitution pointue. La queue

de la restitution est assez étalée, avec un temps de restitution plutôt élevé de 18 jours. Cela traduit un retard et étalement du traceur dans la zone d'infiltration. La vitesse moyenne de transit est d'environ 50 m/h, ce qui atteste d'une organisation moyenne du karst dans une partie du système traçage. La vitesse modale (61 m/h) et la vitesse maximale de transit (77m/h en moyenne) sont assez proches et sont assez fortes devant la vitesse apparente (42 m/h en moyenne). Cela montre que la partie moins bien organisée se trouve en amont des structures de drainage (Dörfliger, 2010).

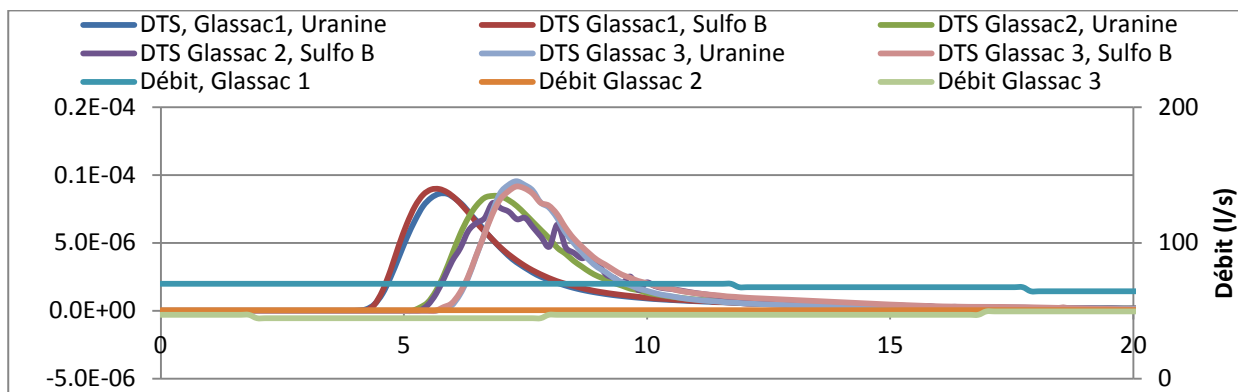
En basses eaux (débits inférieurs à 250 l/s), il y a probablement une dispersion plus grande des traceurs dans les systèmes annexes ainsi qu'un retard plus important dans la zone d'infiltration. Le temps moyen de séjour est beaucoup plus élevé. Il est d'une moyenne de 15 jours (6 jours en hautes eaux).

Pour les trois premiers traçages, les DTS associées à l'uranine et la sulforhodamine sont très semblables. Ceci conforte l'hypothèse que les deux traceurs ont globalement le même comportement dans l'eau. Pour le dernier traçage, la DTS relative à l'uranine est moins étalée que celle de la sulforhodamine B. Il est difficile de donner une explication à cette différence. L'hypothèse d'un problème analytique lors des analyses au spectrofluorimètre peut être écartée, puisque les résultats du fluorimètre et du spectrofluorimètre concordent. Les deux traceurs ont été injectés de la même manière et au même moment ; le problème ne peut donc provenir de cette étape. Cette différence est donc liée au transport des traceurs dans le système. On a vu que les premiers mètres du système étaient constitués d'une zone épikarstique noyée importante dans lesquels les vitesses d'écoulement sont lentes. L'hypothèse que l'on peut faire est que lors du traçage, la sulforhodamine B s'est fait piéger dans cette zone puis a été lentement relarguée dans l'eau avec un retard, d'où la présence d'un plateau sur le sommet de la DTS, caractéristique d'une injection lente, et une longue queue de restitution. La sulforhodamine B serait donc un traceur moins parfait que l'uranine, c'est-à-dire qu'elle ne se comporte pas exactement comme les molécules d'eau. Il est cependant difficile d'imaginer que ce phénomène ne se soit pas manifesté pendant les autres traçages réalisés en basses eaux. D'autres traçages dans les mêmes conditions hydrologiques permettraient de mieux comprendre cette différence entre les deux traceurs.

On peut remarquer que pour les deux premiers traçages réalisés en basses eaux, le taux de restitution d'uranine est plus élevé qu'en hautes eaux (60% contre 40%). Cela est certainement dû à une dilution plus importante en hautes eaux qui a entraîné le passage sous le seuil de détection d'une partie de la restitution. D'après Ricard et Bakalowicz (1996), lors de crues, il y a une augmentation de la minéralisation de la source. Cela est expliqué par le fait qu'en hautes eaux, il y a une mise en mouvement d'eau stockée soit dans la zone épikarstique soit dans la zone noyée. Cela peut contribuer à la dilution du traceur. Il y a aussi une différence de restitution entre l'uranine et la sulforhodamine B. Le taux de restitution de l'uranine est presque le double de celui de la sulforhodamine B. La première hypothèse que l'on a émise est que la sulforhodamine B est plus exposée que l'uranine à l'adsorption par les matières en suspension. Mais les faibles temps de séjour (notamment en hautes eaux), ne permettent pas de valider cette explication. La deuxième hypothèse que l'on peut faire est un problème d'impureté du produit, attesté lors des analyses au laboratoire, qui a pour conséquence une diminution de la fluorescence du traceur. Pour le dernier traçage, la restitution en uranine est anormalement faible. Cela a été constaté aussi sur d'autres traçages. Ce problème serait dû à une longue exposition des échantillons à la chaleur pendant leur transport, source de dégradation de la fluorescence. En effet, ce traçage a été réalisé en août, la période qui a été la plus chaude de l'été et les échantillons sont parfois restés une journée entière dans le véhicule sans protection particulière contre la chaleur.

### Traçage trou du Souci – Source de Glassac :

Trois traçages ont été effectués dans ce système traçage. Les taux de restitution sont relativement bons : entre 40% et 70% pour les traçages à la sulforhodamine B et entre 70 et 95% pour ceux à l'uranine. Ces bons taux de restitution attestent de la fiabilité des traçages. La figure 24 présente les DTS et leurs caractéristiques de ces traçages.



	Traçage 1		Traçage 2		Traçage 3	
Date	17/05/2013		04/07/2013		02/08/2013	
Traceur utilisé	Uranine	Sulforhodamine B	Uranine	Sulforhodamine B	Uranine	Sulforhodamine B
Lieu de restitution	Source de Glassac	Source de Glassac	Source de Glassac	Source de Glassac	Source de Glassac	Source de Glassac
Dapp (m)	861	861,0	861,0	861,0	861,0	861,0
tmin (h)	4,06	4,1	5,2	5,2	5,6	5,8
tmod (h)	5,72	5,7	6,8	6,8	7,3	7,3
ts (h)	9,357	8,0	10,5	9,8	12,1	9,1
h(t)max (l/s)	8,62E-05	8,97E-05	8,47E-05	7,94E-05	9,01E-05	9,17E-05
Vmoy (m/h)	118,98	124,7	102,8	101,8	95,7	101,4
Vapp (m/h)	89,99	108,0	82,3	87,5	73,3	94,7
Vmax (m/h)	212,24	212,2	167,0	167,0	148,2	148,2
Vmod (m/h)	150,44	150,4	126,2	126,2	117,6	117,8
Qmoy (l/s)	70	70,0	50,0	50,0	46,3	46,3
Restitution (%)	75	41	89	71	81	65

Figure 24 DTS et leurs paramètres des traçages réalisés au trou du Souci

Compte tenu de la petite taille du système, les temps minimum de transit et modaux sont très courts (entre 4 et 11 heures). Les temps moyens de séjour sont faibles et varient très peu suivant les conditions hydrologiques. La moyenne est de 12h avec un écart type de 4h, pour des débits allant de 20 l/s à 70 l/s. Cela traduit une faible dispersion du traceur dans le système et donc des DTS pointues que l'on soit en basses eaux ou hautes eaux.

En hautes eaux (débits à partir de 50 l/s), la vitesse moyenne de transit est en moyenne égale à 112 l/s. Cette forte valeur est caractéristique d'un système très bien karstifié et organisé dans son ensemble, avec un drain karstique principal qui donne la forme unimodale de la restitution (Dörfliger, 2010).

Les taux de restitution sont assez variables suivant les conditions hydrologiques et les traceurs utilisés. Cependant, pour chaque traçage, on retrouve les mêmes proportions de restitution entre l'uranine et la sulforhodamine B. La différence suivant les traçages est certainement due au manque de précision de la balance (de l'ordre de la dizaine de grammes) qui peut induire une erreur sur la quantité de traceur injectée. Cela peut avoir un impact important sur le calcul des taux de restitution lorsque les quantités de traceurs injectées sont faibles comme ici. Comme pour le traçage du bassin d'autoroute, le taux de restitution en sulforhodamine B est pratiquement divisé par deux par rapport à celui de l'uranine. Cela renforce l'hypothèse émise plus haut sur l'impureté du produit.



### Traçage St Etienne de Naucoules– Source de la Dragonnière :

Deux traçages ont été réalisés à St Etienne de Naucoules. Un troisième était en cours lors de la rédaction de ce rapport. Les résultats n'étaient donc pas encore disponibles. Les figures 25 et 26 présentent les DTS et leurs paramètres des différents traçages.

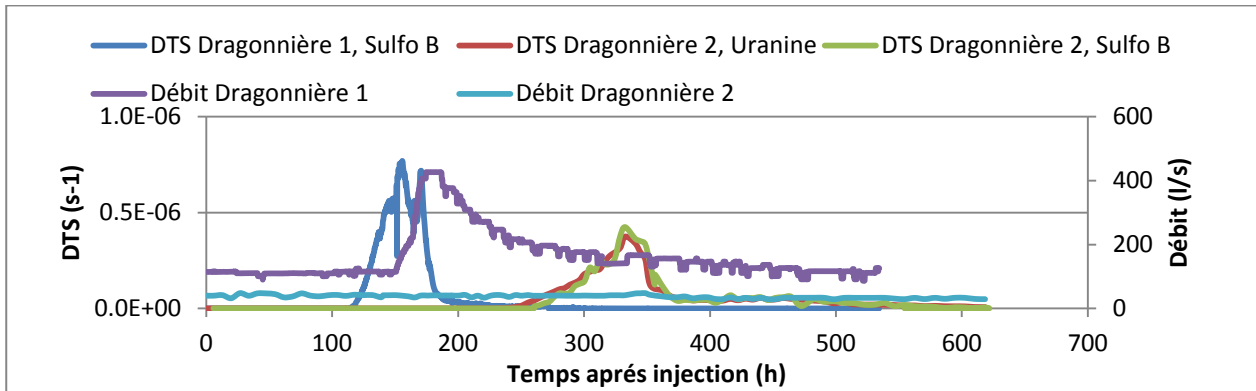


Figure 25 DTS et débits des traçages réalisés à Saint Etienne de Naucoules

	Traçage 1		Traçage 2	
	23/04/2013	25/07/2013	26/07/2013	
Date	23/04/2013	25/07/2013	26/07/2013	
Traceur utilisé	Sulforhodamine B	Uranine	Sulforhodamine B	
Lieu de restitution	Dragonnière	Dragonnière	Dragonnière	
Dapp (m)	2455,0	2455,0	2455,0	
tmin (j)	4,7	9,8	9,6	
tmod (j)	6,3	13,9	13,9	
ts (j)	6,6	15,0	15,1	
h(t)max (l/s)	7,7E-06	3,8E-06	4,3E-06	
Vmoy (m/h)	15,8	7,1	7,0	
Vapp (m/h)	15,5	6,8	6,8	
Vmax (m/h)	21,7	10,4	10,7	
Vmod (m/h)	16,3	7,4	7,4	
Qmoy (l/s)	184,0	38,0	38,0	
Restitution (%)	22	6	2	

Figure 26 Résultats des traçages réalisés à Saint Etienne de Naucoules

Pour les deux traçages effectués, les taux de restitution sont très faibles, avec, lors du premier traçage réalisé en hautes eaux (débit moyen de 180 l/s), un taux de restitution en sulforhodamine B de 22% et lors du deuxième (débit moyen beaucoup plus bas de 40 l/s), un taux de restitution en uranine de 6% et en sulforhodamine de 2.33%. Ceci est très faible.

On peut émettre deux hypothèses pour expliquer ces faibles taux de restitution en basses eaux. Premièrement, étant donné que les conditions d'injection sont beaucoup moins simples que pour les deux autres systèmes, les traceurs ont pu rester bloqués dans les formations superficielles. Pour limiter cela, il aurait fallu plus d'eau pour pousser les traceurs jusqu'à la zone noyée. La deuxième hypothèse que l'on peut faire est qu'une partie du nuage de traceur est restée prisonnière dans des systèmes annexes, d'où les plus faibles taux en période de basses eaux, période pendant laquelle le traceur a plus tendance à se disperser dans le système. En hautes eaux, le faible taux peut être en partie expliqué par la présence d'une importante crue qui a eu lieu après le maximum de la restitution (maximum de débit de 425 l/s). Cela a eu pour conséquence une dilution importante de la queue du nuage de traceur de façon à ce qu'une partie de la concentration soit passée sous le seuil de détection du spectrofluorimètre. Lors du traçage d'exploration, plusieurs sources avaient été surveillées et aucune trace de sulforhodamine n'y avait été détectée. Il est donc peu probable que le traceur se soit dispersé vers un autre exutoire. Ces faibles taux de restitution nous amènent à rester critique sur les résultats des traçages et sur les conditions d'injection.

Les vitesses moyennes de transit sont très faibles (15 m/h en hautes eaux et 6 m/h en basses eaux), ce qui montre qu'une partie du système est très peu organisée. Cela peut apporter une explication aux faibles restitutions.

La forme de la DTS en hautes eaux présente deux pics. Cela est complètement intrinsèque au calcul de la DTS puisque la courbe de restitution ne présente pas ces deux pics. En effet, la DTS dépend du débit et donc de fortes variations de celui-ci pendant la restitution impacte la forme de la DTS.

### **III Recherche d'une relation entre DTS et débit**

#### **3.1 Contexte bibliographique**

##### ***3.1.1 Conséquences de la non linéarité du karst sur la prévision de la DTS***

Dans un premier temps, beaucoup d'auteurs sont sceptiques quand à la possibilité de prévoir la DTS d'un traçage dans un système karstique.

La réponse impulsionnelle varie avec le débit mais pas de manière simple. En effet pour un même débit, on peut avoir différentes DTS. Cela est principalement dû au fait que le karst n'a pas un comportement linéaire face à l'écoulement (Meus, 1998 ; Mangin, 1997). La non linéarité est expliquée par Mangin (1997) par les trois constats suivants :

- Les vitesses d'écoulement particulièrement importantes dans le réseau karstique engendrent des pertes de charges quadratiques qui sont difficiles à estimer.
- La réponse impulsionnelle n'est pas constante. Elle varie suivant le débit et peut présenter plusieurs modes.
- Le fonctionnement de l'aquifère karstique est discontinu en raison de sa structure hétérogène. En effet, suivant que l'on se trouve en hautes eaux, moyennes eaux ou basses eaux, le comportement de l'aquifère karstique est différent. En hautes eaux, les réponses sont courtes et de forte amplitude alors qu'en basses eaux, le fonctionnement est plus régulateur et inertiel. C'est-à-dire que les pluies peuvent ne provoquer aucune crue ou des crues de faible amplitude.

Les aquifères karstiques sont le siège d'une organisation de vides qui forment des chemins préférentiels pour l'eau qui peuvent être différents suivant les conditions hydrologiques. La complexité et la non linéarité de ces systèmes karstiques engendrent donc des problèmes sur la prévision de la DTS à partir des modèles dispersifs basés sur la loi de Fick que l'on utilise pour modéliser le transport dans les milieux poreux et fissurés (Lepiller, 2001).

Cependant, il est légitime de penser que pour des systèmes karstiques relativement simples constitués d'un drain principal et de quelques systèmes annexes de drainage, il est possible, par une approche empirique, de déterminer des relations entre le débit à l'exutoire et les paramètres de la DTS, si le débit ne varie pas trop pendant les traçages.

### 3.1.2 Résultats de Michel Lepiller sur le modèle de drain karstique réduit

Michel Lepiller a réalisé un modèle réduit de drain karstique pour simuler des traçages sous des conditions hydrologiques différentes. Il est constitué d'un drain principal avec plusieurs arrivées d'eau annexes constituant des systèmes annexes de drainage. Les figures 27 et 28 présentent ses résultats.

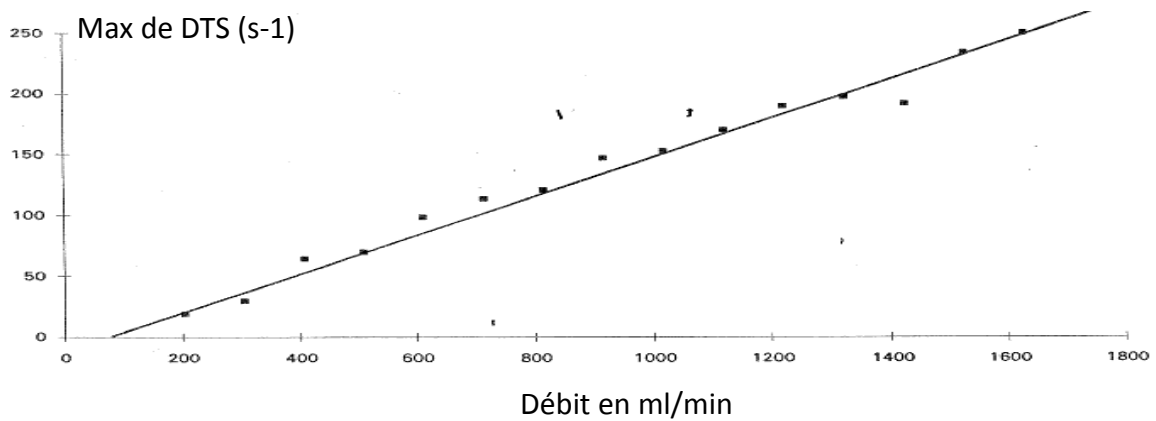


Figure 27 Relation entre la valeur maximale de la D.T.S et le débit à l'exutoire, traçages dans un modèle réduit de drain karstique (sans sédiment) par M. Lepiller (non publié)

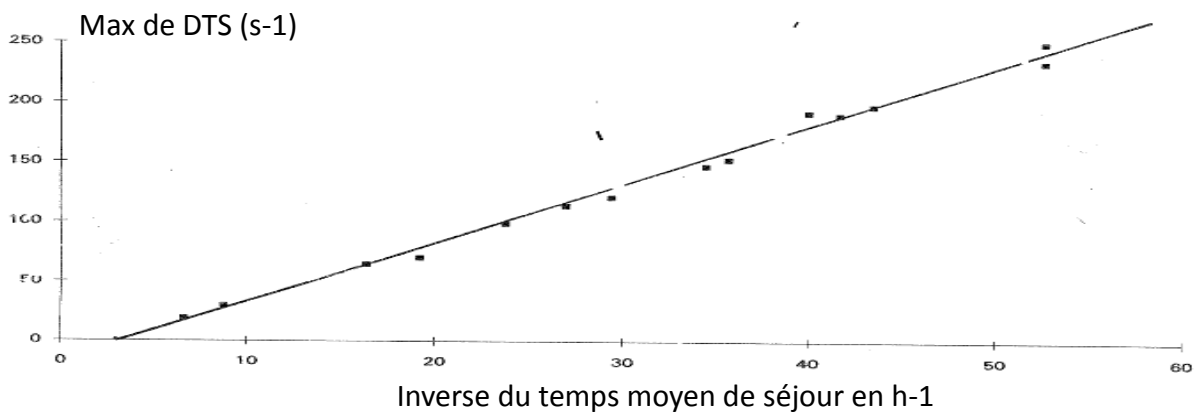


Figure 28 Relation entre la valeur maximale de la D.T.S et l'inverse du temps moyen de séjour, traçages dans un modèle réduit de drain karstique (sans sédiment) par M. Lepiller (non publié)

Michel Lepiller a ainsi mis en évidence une relation linéaire entre la valeur maximale de la DTS et le débit à l'exutoire et entre la valeur maximale de la DTS et l'inverse du temps moyen de séjour. En effet, on a vu que plus le débit était bas, plus la DTS était étalée dans le temps du fait de la dispersion plus importante dans le système. L'hypothèse que l'on peut faire est qu'il existe une relation linéaire entre le débit à l'exutoire et l'inverse du temps moyen de séjour.

Dans la suite, on essaiera de prouver que ces relations sont valables dans des cas réels et qu'il peut exister d'autres relations entre les paramètres de la DTS et le débit.

### 3.1.3 Relations entre les paramètres de la DTS

Plusieurs auteurs ont travaillé dans le passé sur la détermination de relations entre les différents paramètres de la DTS, dans le but d'améliorer la prévision de la forme de la DTS et donc d'adapter la mise en œuvre des traçages (masse du traceur à injecter, fréquence d'échantillonnage...). Il s'est avéré qu'il existe des relations globales applicables à beaucoup de systèmes karstiques.

#### Relations empiriques :

##### Belayachi (1987)

Grâce à l'exploitation d'un grand nombre de traçages réalisés dans le cadre de thèses soutenues entre 1975 et 1985, Belayachi (1987) a déterminé quelques relations entre les paramètres de la DTS, qui sont :

- Relation linéaire entre le maximum de la DTS et l'inverse du temps moyen de séjour. Cette relation avait déjà été prouvée par Michel Lepiller grâce au modèle de drain réduit.
- Relation linéaire entre le temps moyen de séjour et le temps modal
- Relation linéaire entre le temps minimal de transit et le temps moyen de séjour
- Relation linéaire entre le temps minimal de transit et le temps modal de séjour

Ces relations sont valables lorsque le débit à l'exutoire pendant la restitution est relativement constant.

##### Morales et al. (2007)

Morales et al. (2007) ont aussi travaillé sur l'étude des relations entre les paramètres de la DTS afin d'améliorer la prévision des temps de séjour dans le karst. L'article met en évidence une relation linéaire entre le temps minimal de transit et le temps modal ( $t_{min}=0,8066 \times t_{mod}$ ) et entre le maximum de DTS et l'inverse du temps modal grâce à plusieurs traçages dans les karsts bien développés et fonctionnels du pays basque. Cette dernière relation est mise sous la forme :  $h_{max} = 350,242 \times t_{mod}^{-0,8516}$ .

#### Relations théoriques :

Bailly-Comte et Pistre (2011) ont trouvé une explication physique à ces relations empiriques mentionnées plus haut entre temps moyen de séjour, temps modal et maximum de la DTS. Ils ont pour cela utilisé la solution 1D de l'équation de la diffusion, représentant la distribution temporelle du nuage de traceur:

$$h(t) = \frac{L}{t\sqrt{4\pi\alpha Vt}} e^{-\frac{(L-Vt)^2}{4\alpha Vt}} \quad (1)$$

Avec :  $h(t)$ , la réponse impulsionnelle en  $s^{-1}$

L, la distance au point d'injection en m

$\alpha$ , la dispersivité en m

V, la vitesse cinématique

Si on considère que le traceur est parfait, on peut assimiler la vitesse V à la vitesse moyenne de transit du traceur.

Cette façon d'écrire la solution 1D de l'équation de diffusion permet de s'affranchir de la porosité qui est une notion difficile à appliquer au milieu karstique.

De l'expression (1), découle les expressions :

$$t_{mod}(\varepsilon) = k(\varepsilon) \cdot \bar{t}$$

$$h_{max}(\varepsilon) = a(\varepsilon) \cdot t_{mod}^{-1}$$

$$h_{\max}(\varepsilon) = \frac{a(\varepsilon)}{k(\varepsilon)} \cdot \bar{t}^{-1}$$

Avec,  $\varepsilon$  la dispersivité spécifique,  $\varepsilon = \alpha/L = 1/Pe$ ,  $Pe$  le nombre de Peclet

$$k \text{ et } a \text{ des constantes dépendant seulement de } \varepsilon, k = \sqrt{(3\varepsilon)^2 + 1} - 3\varepsilon \text{ et } a = \frac{e^{-\frac{(1-k)^2}{4\varepsilon k}}}{\sqrt{4\pi\varepsilon k}}$$

Ces relations ne sont donc dépendantes que de la dispersivité spécifique, qui elle-même est dépendante de l'échelle d'observation.

La vérification de ces relations avec des données de traçages effectués sur des systèmes karstiques variés (distances apparentes entre 650 m et 15 km), issues de la bibliographie ont permis de caractériser la dispersivité spécifique dans les milieux karstiques. Celle-ci est proche de 0,01 m, soit un nombre de Peclet de 100 m ce qui est caractéristique d'un milieu où l'advection est prépondérante.

Cela montre que, même s'il n'est pas possible de simuler l'ensemble de la DTS avec les équations classiques du transport (Lepiller, 2001), il est possible de prévoir son maximum, en estimant la vitesse moyenne de transit du traceur.

#### Vérification des relations avec les données de la bibliographie et la base de données du Parc :

Un grand nombre de données de traçages issues de la bibliographie et de la base de données du Parc a été compilé afin de vérifier les relations mentionnées précédemment. Les systèmes traçages pris en compte sont situés dans le massif des Bauges (Belayachi, 1987), sur le causse du Sauveterre (PnrGC, 2006) et sur le causse du Larzac. Les données sont compilées en annexe 5.

Le graphique de la figure 29 montre que la relation établie par Bailly-Comte et Pistre (2011) entre Maximum de DTS et temps modal de transit peut être appliquée à la plupart des systèmes traçages. La dispersivité spécifique des systèmes karstiques se situant entre  $10^{-3}$  et  $10^{-1}$ .

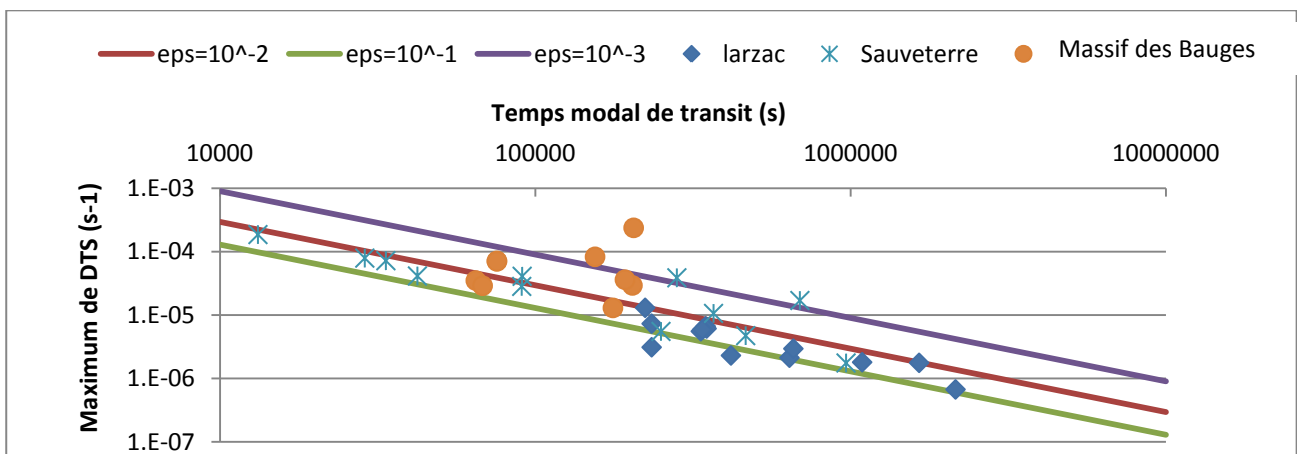


Figure 29 Maximum de DTS en fonction du temps modal de transit pour plusieurs traçages réalisés dans des systèmes situés sur le causse du Larzac, du Sauveterre et dans le massif des Bauges et courbes théoriques issues de Bailly-Comte et Pistre (2011) pour différentes dispersivités spécifiques sur une échelle bi logarithmique.

On retrouve les relations linéaires entre temps minimum de transit et temps modal de transit et entre temps minimum et temps moyen de séjour avec respectivement des coefficients égaux à 1, 3 et 1,4 (figure 30).

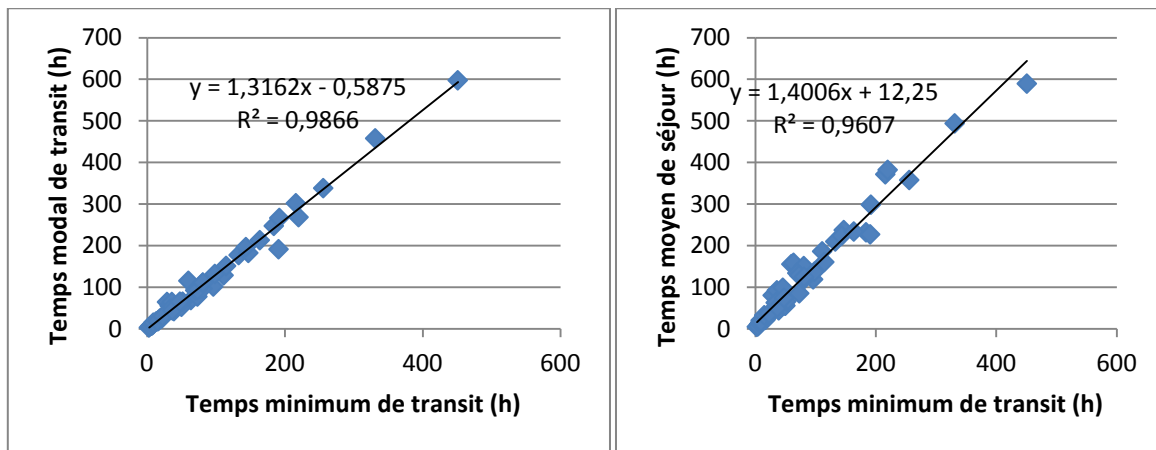


Figure 30 Corrélations linéaires entre temps minimum de transit et temps modal de transit (à gauche) et entre temps minimum de transit et temps moyen de séjour (à droite) pour des traçages réalisés sur le causse du Larzac, du Sauveterre et dans le massif de Bauge

Il est ainsi clair qu'il existe des relations entre tous les paramètres de la DTS, qui sont complètement indépendantes des conditions hydrologiques pendant les traçages à condition que les débits soient relativement constants (Bailly-Comte et Pistre, 2011) et qui peuvent être appliquées à la plupart des systèmes karstiques. La connaissance d'un seul de ces paramètres permettrait donc de prévoir la forme simplifiée de la DTS. Ce paramètre dépendra du débit à l'exutoire du système tracé d'où la nécessité de mettre en évidence une relation entre le débit et les paramètres de la DTS.

### 3.1.4 Relations entre les paramètres de la DTS et le débit

Les recherches de Michel Lepiller et les résultats de la recherche bibliographique sur les relations entre paramètres de la DTS, laissent penser qu'il existe des relations entre la plupart des paramètres de la DTS et le débit à l'exutoire des systèmes. La non linéarité du karst implique qu'on ne peut pas trouver une relation DTS/débit applicable à tous les systèmes et donc que s'il est possible de relier le débit avec la DTS, cette relation sera caractéristique à chaque système.

#### Stanton et Smart (1981)

Stanton et Smart (1981) ont réalisé plusieurs traçages dans trois systèmes traçages situés dans le calcaire des collines de Mendip, au sud de Bristol et Bath, sous des conditions hydrologiques différentes afin de déterminer le lien entre le temps de séjour minimum du traceur et le débit à l'exutoire. En tout, 43 traçages ont été réalisés. Ces systèmes sont appelés «Underground stream» par les auteurs, soit « cours d'eau souterrains », ce qui signifie qu'il s'agit de systèmes assez simples, fonctionnels et très bien développés, constitués d'un drain principal. Les injections des traceurs ont été effectuées dans des avens communiquant directement avec les cours d'eau souterrains.

Grâce à la réalisation de ces différents traçages, les auteurs ont déterminé pour chaque système, une relation linéaire entre l'inverse du temps minimum de séjour et le débit à l'exutoire. D'après les auteurs, on retrouve cette relation pour des traçages effectués dans des canalisations.

Cet article montre donc qu'il y a une relation entre temps minimum de transit et le débit à l'exutoire pour des systèmes traçages très simples dont le lieu de l'injection est connecté directement par un drain à la résurgence.

### Mull et al. (1988)

L'article de Mull et al. (1988) fait mention de la réalisation de plusieurs traçages dans un système karstique calcaire situé dans l'état du Kentucky près de Elizabethtown. Il s'agit d'un système bien développé et fonctionnel constitué d'un grand nombre d'avens et de dolines. Le système traçage en question est petit (900 m de distance apparente) et l'injection se fait directement depuis la surface dans une ouverture donnant sur la zone noyée de l'aquifère. L'exutoire est la source Dyers. Sept traçages ont été réalisés sous des conditions hydrologiques différentes, afin de déterminer des relations entre les caractéristiques du transport du traceur et le débit.

Les relations mises en évidence sont les suivantes :

- La vitesse apparente augmente linéairement avec le débit à l'exutoire,
- le temps moyen de séjour est inversement proportionnel au débit à l'exutoire,
- le maximum de la DTS est directement proportionnel au débit à l'exutoire.

Encore une fois, il s'agit d'un système très simple, dont le point d'injection est directement relié à l'exutoire. Le traceur ne transite pas dans la zone d'infiltration.

### Morales et al. (2007)

Grâce à plusieurs traçages dans des systèmes karstiques basques, l'article met en évidence une relation entre la vitesse modale et le débit au temps correspondant au centre de gravité du nuage de traceur. Pour cela dans chaque système, plusieurs traçages ont été effectués sous différentes conditions hydrologiques. Les systèmes traçages ont des distances apparentes variées (entre 475 m et 7 km) et les injections ont toutes eu lieu dans des avens directement reliés à la zone noyée.

La relation est :  $V_{mod} = A Q r^\alpha$ . Les coefficients A et  $\alpha$  étant dépendants de la structure du système traçage.  $\alpha$  se situe entre 0,4 et 1. D'après les auteurs, plusieurs traçages dans des rivières ont donné la même relation avec  $\alpha$  se situant entre 0,2 et 0,5 (Jobson, 1996). Cela signifierait que lorsque le système karstique « se comporte » comme une rivière souterraine, c'est-à-dire que le point d'injection est directement relié par un drain à l'exutoire, le terme  $\alpha$  est faible. Et au contraire, plus ce coefficient est proche de 1, plus le système est complexe (ou moins le mode d'injection est direct vis-à-vis de la zone noyée). Pour expliquer cela physiquement, il faudrait se pencher sur le fonctionnement hydraulique des systèmes karstiques.

Les caractéristiques des restitutions des traçages sont compilées dans l'article (temps modal, temps minimal de transit, DTS maximal, temps moyen de séjour, débit...). Ces données ont ainsi pu être utilisées pour déterminer des relations entre ces paramètres et le débit pour chaque système traçage. Les figures en annexe 6 présentent les différents graphiques associés. On retrouve les relations mises en évidence par Stanton et Smart (1981) et par Mull et al. (1988). Notamment tous les temps caractéristiques de la DTS ( $t_s$ ,  $t_{min}$  et  $t_{mod}$ ) sont inversement proportionnels au débit (ici, le débit au temps correspondant au centre de gravité du nuage de traceur). Cela signifie aussi que la corrélation est de la forme :  $t = A Q r^{-\alpha}$ . Pour chaque système traçage, on retrouve les mêmes coefficients  $\alpha$ , entre 0,5 et 1, mentionnés plus haut. Ce coefficient permettrait-il de caractériser la structure du système karstique ? Le tableau de la figure 31 présente la moyenne des coefficients de chaque corrélation pour chaque système (calculés à partir des courbes de l'annexe 6) :

Systèmes traçages	Olalde	Olaorta	Urgitxi	Rekalde
Moyenne des $\alpha$	1,16	0,58	0,61	0,57
Ecartype des $\alpha$	0,10	0,16	0,02	0,05

Figure 31 Coefficients  $\alpha$  associés aux systèmes traçages étudiés par Morales et al. (2007)

Les données de l'article ne permettent pas de classer les systèmes en termes de complexité structurale. Une étude plus poussée de ces systèmes permettrait d'associer le coefficient  $\alpha$  aux caractéristiques des systèmes étudiés.

Tous les systèmes traçages étudiés dans les articles mentionnés précédemment sont relativement simples. En effet, les injections se faisant directement dans la zone noyée, le traceur ne passe pas par la zone d'infiltration. De plus, pour les systèmes tracés par Stanton et Smart (1981) et par Mull et al. (1988), les points d'injection sont directement reliés aux exutoires. Dans la suite, on essaiera de vérifier les relations pour des systèmes traçages plus complexes. Pour cela, on utilisera les résultats des traçages effectués sur le territoire du Parc naturel régional des Grands Causses.

### 3.2 Application aux traçages effectués durant l'étude

Dans cette partie, les résultats des traçages effectués sur le territoire du PnrGC seront utilisés pour tester les relations mises en évidences précédemment. Des résultats de traçages antérieurs réalisés au trou du Souci et au Bassin de l'A75 par le Parc et l'université de Montpellier ont été introduits. N'ayant pas encore les résultats du dernier traçage du système St Etienne de Naucoules-Dragonnière, les relations n'ont pas pu être vérifiées pour ce cas. Cependant, grâce aux résultats des deux premiers traçages qui ont été effectués en hautes et basses eaux, on a pu prévoir les caractéristiques de la DTS en utilisant les relations établies. Ces hypothèses seront vérifiées puis présentées pendant l'oral, lorsque les résultats du troisième traçage seront accessibles.

#### 3.2.1 Relations entre les paramètres de la DTS

On a vu dans la partie 3.1.3 qu'il existait des relations empiriques entre chaque paramètre de la DTS. La relation linéaire entre inverse du temps de séjour et maximum de DTS peut être expliquée physiquement. Les résultats des traçages réalisés sur le territoire de PnrGC ont permis de tester ces relations. Les graphiques des figures 32 et 33 présentent respectivement la DTS maximale en fonction du temps modal de transit, le temps minimal de transit en fonction du temps modal de transit et le temps minimal de transit en fonction du temps moyen de séjour pour chaque système traçage.



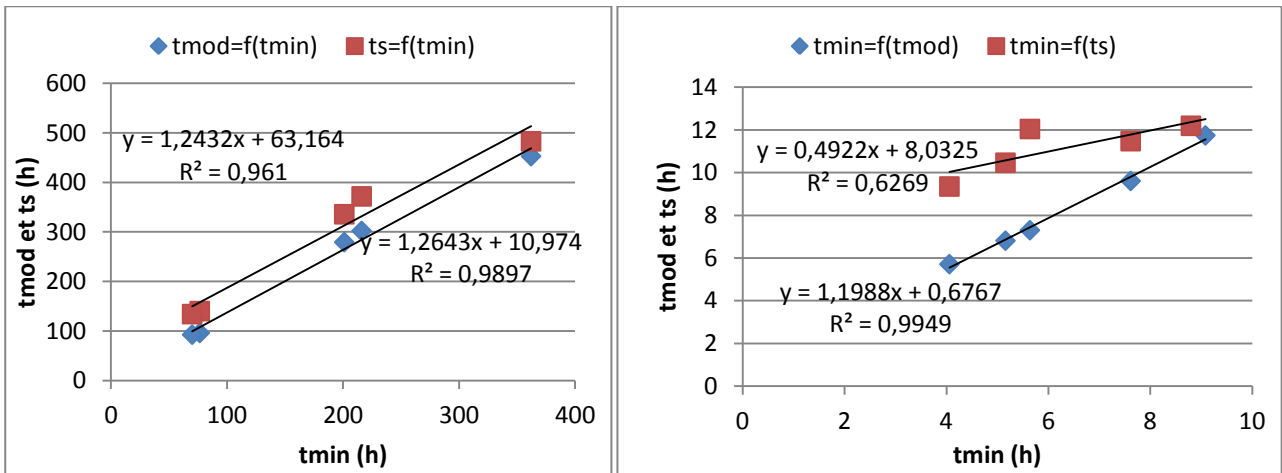


Figure 32 Temps modal de transit et temps moyen de séjour en fonction du temps minimal de transit pour les systèmes traçages Bassin A75-Boundoulaou (1<sup>er</sup> graphique) et trou du Souci-Glassac (2eme graphique)

Pour le système Bassin A75-Boundoulaou, on retrouve les relations linéaires mentionnées plus haut entre les temps caractéristiques de la DTS. Pour le système du trou du Souci, la corrélation ts/tmin est moins évidente.

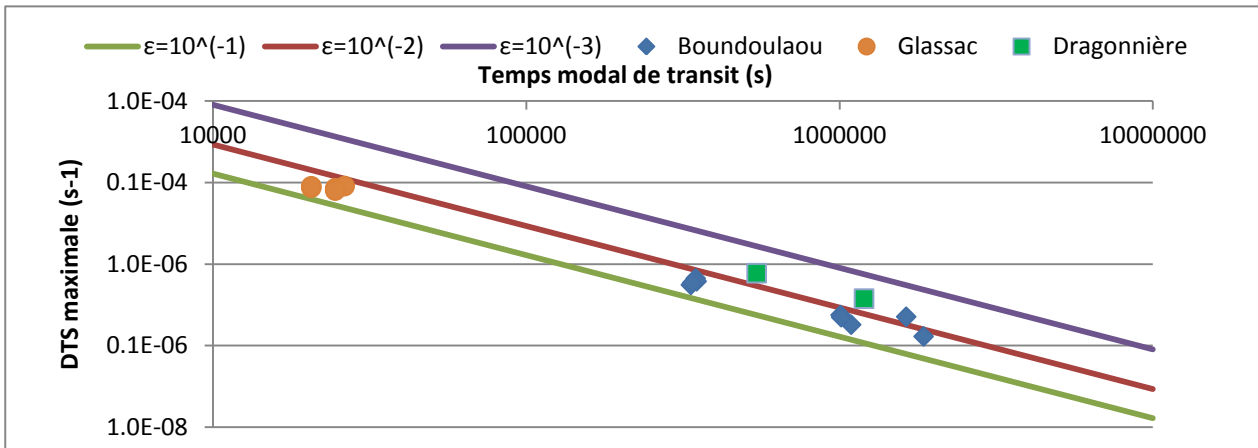


Figure 33 Maximum de DTS en fonction du temps modal de transit pour les trois systèmes traçages et courbes théoriques issues de Bailly-Comte et Pistre (2011) pour différentes dispersivités spécifiques sur une échelle bi logarithmique.

Le graphique de la figure 33 permet de déterminer la dispersivité spécifique (introduite par Bailly-Comte et Pistre (2011)) des trois systèmes traçages. On remarque tout d’abord que celles de système du trou du Souci et du Bassin de l’A75 sont très similaires (0,020 environ). La dispersivité spécifique du système St Etienne de Naucoules-Dragonnière est plus faible, mais reste autour de 0,01. On peut remarquer que la dispersivité spécifique reste globalement la même suivant les traçages. Elle est indépendante des conditions hydrologiques.

On a utilisé la solution 1D de l’équation de la diffusion mentionnée par Bailly-Comte et Pistre (2011) pour simuler les DTS des traçages réalisés dans le système Bassin 75 – Boundoulaou. Les deux données d’entrée du modèle sont : la vitesse moyenne de transit, la dispersivité spécifique et la distance apparente, en utilisant l’expression :  $\epsilon = \alpha/L$ . Un calage a ensuite été effectué avec les DTS calculées à partir des courbes de restitution mesurées. Le graphique de la figure 34 présente le calage effectué à l’aide d’un tableur Excel.

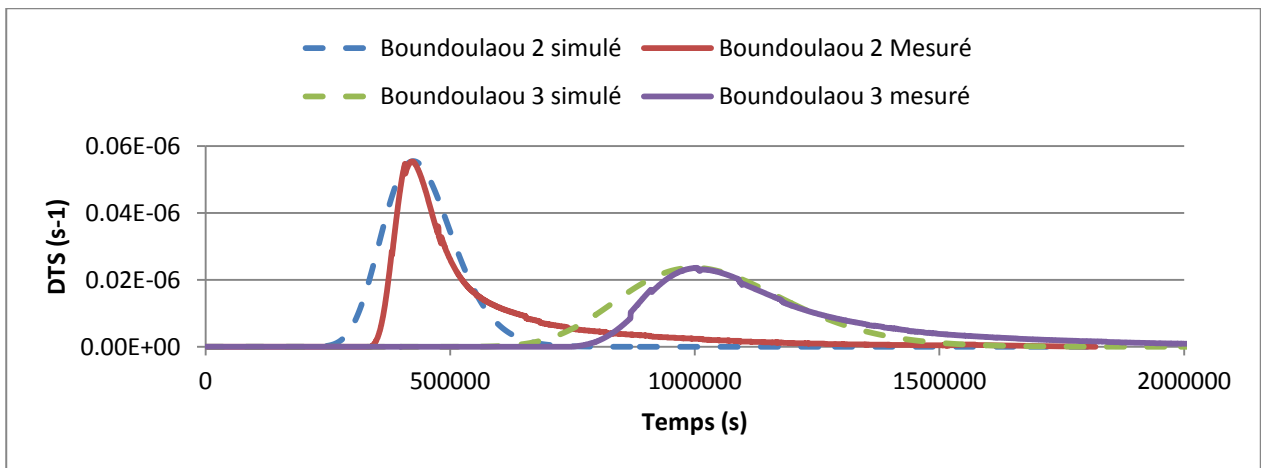


Figure 34 DTS des traçages réalisés dans le bassin de l'A75 mesurées et simulées à partir de la solution 1D de l'équation de la diffusion

Le tableau de la figure 35 présente les données d'entrée utilisées :

	Boundoulaou 2	Boundoulaou 3
L (m)	5780	5780
eps	0,014	0,014
Vmoy (m/h)	47	20

Figure 35 Données d'entrée utilisées pour les simulations des DTS des traçages réalisés dans le bassin de l'A75

Comme on l'avait présumé, l'utilisation de l'équation de la diffusion permet de bien simuler le centre du nuage de traceur. Dans les deux cas, la vitesse moyenne de transit utilisée en entrée est très proche de celle déterminée à partir des données (voir figure 23). La dispersivité spécifique est de plus de l'ordre de  $10^{-2}$ , qui est la dispersivité caractéristique d'un système karstique (Bailly-Comte et Pistre, 2011). La figure 34 montre qu'il est difficile de simuler entièrement la DTS avec la solution 1D de l'équation de la diffusion. Cela est certainement dû au fait que le milieu karstique est très hétérogène. Il est par exemple difficile d'évaluer l'effet d'étalement et de retard dû à la zone d'infiltration, d'où la difficulté de simuler le début et la queue de la restitution.

### 3.2.2 Relations entre les paramètres de la DTS et le débit

On a vu dans la partie 3.1.3 que plusieurs auteurs ont mis en évidence des relations empiriques entre les paramètres de la DTS et le débit à l'exutoire pour plusieurs systèmes traçages. On a testé ces relations aux traçages réalisés sur le territoire du PnrGC. Les graphiques des figures 36, 37 et 38 présentent pour les différents systèmes traçages chaque paramètre de la DTS en fonction du débit.

Une discussion à propos des débits utilisés pour la réalisation des graphiques est nécessaire. En effet, lors des traçages, le débit varie dans le temps. Faut-il utiliser le débit moyen pendant toute la durée de la restitution ? Faut-il utiliser le débit à l'abscisse du paramètre considéré ? Le choix qui a été fait pour cette étude est d'utiliser la moyenne des débits qui ont influencé le paramètre. Par exemple, le maximum de DTS a été corrélé avec la moyenne des débits se situant entre le début de l'injection et le temps modal (temps du maximum de DTS). On a vu que pour une bonne interprétation de la DTS, les débits devaient être relativement constants pendant la restitution. Lors des traçages du Bassin de l'A75 et du trou du Souci, il n'y a pas eu de trop grosses variations de débits. Le premier traçage à St Etienne de Naucoules a eu lieu lors

d'une importante crue. Mais elle n'a pas eu d'impact sur tmod, hmax et tmin puisqu'elle s'est manifestée après le maximum de la restitution.

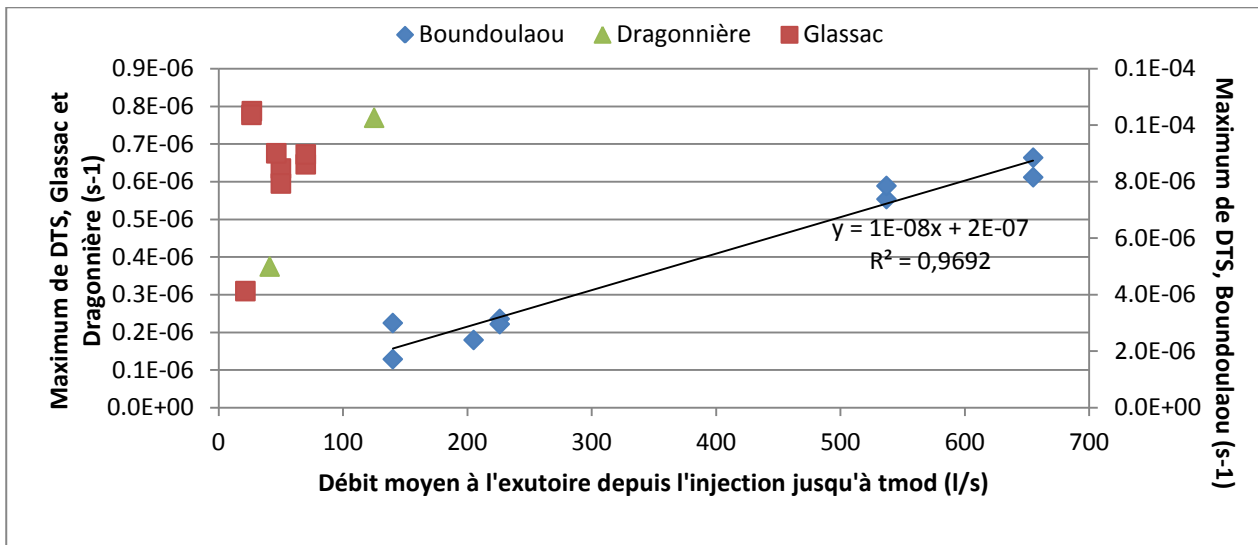


Figure 36 Maximum de DTS en fonction du débit pour les trois systèmes traçages

Les cinq traçages du bassin d'autoroute de l'A75 ont permis d'établir la relation linéaire entre maximum de DTS et le débit à la source du Boundoulaou. On ne retrouve pas cette relation pour le système du trou du Souci car on a une dispersion importante des données.

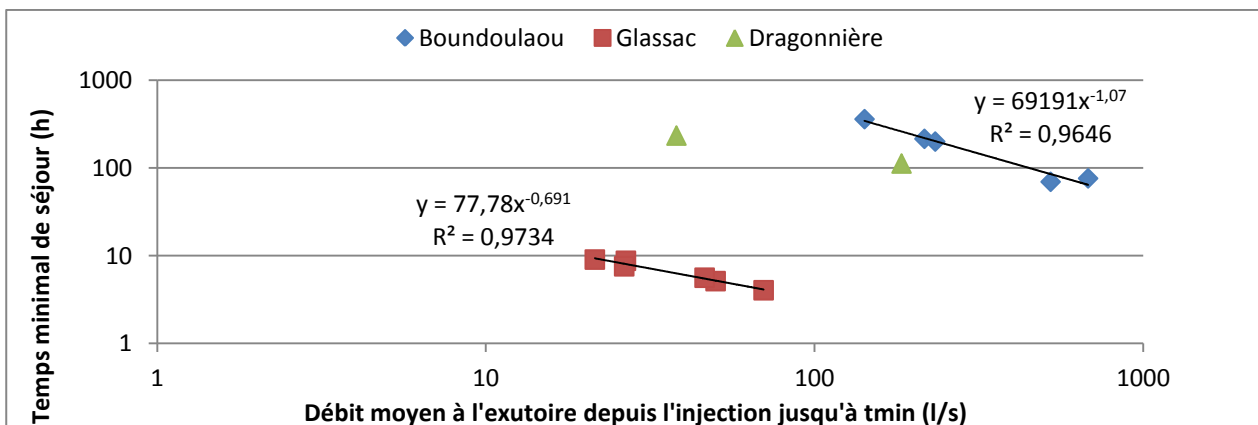


Figure 37 Temps minimal de séjour en fonction du débit pour les trois systèmes traçages

Il y a bien une relation de type  $t_{min} = AQR^{-\alpha}$  entre débit et temps minimum de séjour ( $t_{min}$  est donc inversement proportionnel au débit). Elle est vérifiée pour les systèmes traçages du trou du Souci et du bassin d'autoroute. Comme pour les systèmes étudiés par Morales et al. (2007), le coefficient  $\alpha$  varie entre 0,5 et 1. On a vu précédemment que les temps caractéristiques de la DTS étaient tous corrélés linéairement. On a donc la même relation entre le débit à l'exutoire et ces paramètres avec les mêmes coefficients. Pour le système de Glassac, le coefficient moyen est de 0,6 et pour le système du Boundoulaou, il est de 1. Cela conforte l'hypothèse émise précédemment qui est que plus  $\alpha$  est important, plus le système karstique est complexe.

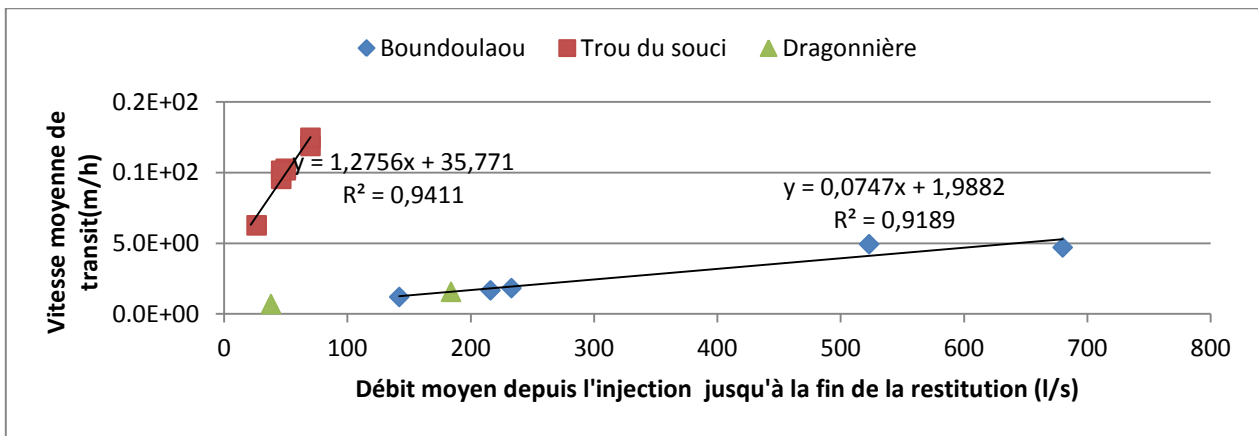


Figure 38 Vitesse moyenne de transit en fonction du débit pour les trois systèmes traçages

Il y a une relation linéaire entre le débit à l'exutoire et la vitesse moyenne de transit pour les deux systèmes traçages (trou du Souci et bassin A75).

Pour le système du bassin de l'A75, il y a clairement des relations entre la plupart des paramètres de la DTS et le débit à l'exutoire. Cela montre que les relations peuvent être valables pour des systèmes complexes. Pour le trou du Souci, on retrouve les relations linéaires entre débit et l'inverse du temps modal et du temps minimum de transit. C'est moins évident pour les corrélations entre débit et maximum de DTS et entre débit et temps moyen de séjour. Cela amène à penser que pour des petits systèmes, il n'est pas possible de corréler la DTS avec le débit du fait des incertitudes sur le calcul de la DTS qui deviennent non négligeables.

Les hypothèses sur les relations déterminées grâce aux traçages de la Dragonnière ont permis de prévoir les caractéristiques de la DTS associée en connaissant le débit à la Dragonnière lors de l'injection (28l/s). Sachant qu'aucun événement hydrologique notable n'a eu lieu, on a utilisé ce débit. Les résultats sont représentés dans le tableau de la figure 39 :

Paramètres	tmin(j)	tmod (j)	ts (j)	hmax (1/s)	V moy de transit (m/h)
Prévisions	11	18	17	3,4E-06	6,5

Figure 39 Tableau de prévision des paramètres de la DTS associés au troisième traçage en cours de la Dragonnière

Le calcul de hmax, permet de prévoir la concentration maximum en uranine mesurée à l'exutoire :  $C_{max} = \frac{h_{max} \cdot M_{rest}}{Q}$ . Le pourcentage de restitution en uranine a été évalué à 6% comme pour le dernier traçage. La concentration maximum obtenue est de 13 µg/l.

### 3.3. Synthèse et discussion

#### 3.3.2 Synthèse des résultats

Une analyse en Composante Principale (ACP) centrée réduite a été effectuée à partir de toutes les données de traçages dont nous disposons (voir annexe 5), soit 50 traçages. Le logiciel StatBox 6 a été utilisé à cet effet. La méthode a aussi été appliquée aux résultats des traçages réalisés dans les deux systèmes « Bassin A75-Boundoulaou » et «trou du Souci-Glassac». Les figures 40 et 41 qui représentent les espaces des variables permettent ainsi de faire une synthèse de toutes les observations que l'on a faite sur les corrélations entre paramètres de DTS et débit.

La figure 40 présente l'espace des variables associé à l'ACP réalisée sur les données des 50 traçages (50 échantillons et 7 variables). Le pourcentage de variance pour le premier facteur est élevé (59%). Cela montre que les données sont structurées. On peut donc interpréter les résultats principalement à partir de l'axe F1. On arrive ainsi aux conclusions suivantes :

- Tous les paramètres de la DTS sont corrélés entre eux. Cette corrélation est la même pour tous les systèmes traçages,
- Les temps caractéristiques de la DTS (ts, tmin, tmod) sont très bien corrélés et sont proportionnels entre eux,
- Les temps caractéristiques sont inversement proportionnels au maximum de la DTS (hmax),
- Les vitesses caractéristiques (vmoy, vapp, vmax, vmod) sont proportionnelles au maximum de DTS (hmax),
- Il n'y a pas de corrélation entre le débit à l'exutoire et les paramètres de la DTS applicables à tous les systèmes traçages.

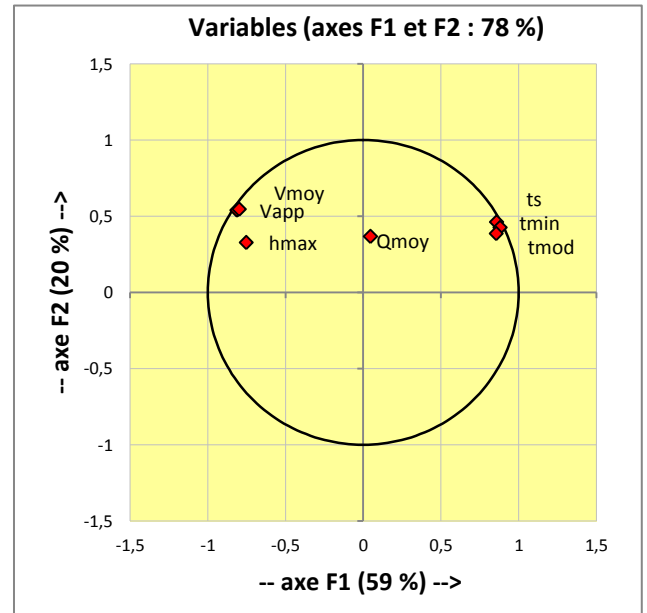


Figure 40 Espace des variables, ensemble des données de traçages

Les figures 41 présentent l'espace des variables pour les données des traçages du bassin d'autoroute et du trou du Souci :

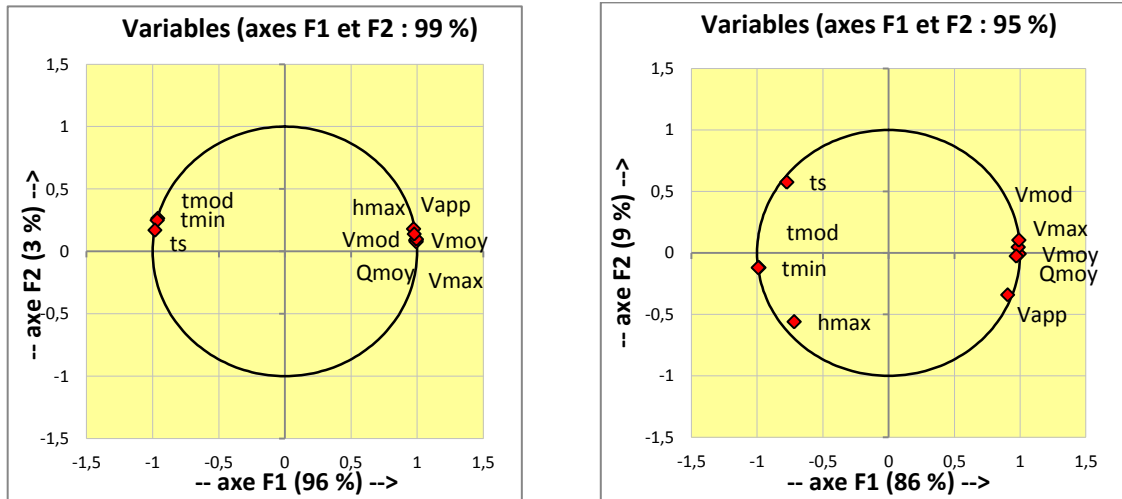


Figure 41 Espace des variables, données des traçages du bassin de l'A75 (gauche) et du trou du Souci (droite)

Les pourcentages de variance pour le premier facteur sont très élevés : 96% et 86%. Les données sont donc très bien structurées. Pour le traçage du bassin de l'A75, toutes les variables sont bien corrélées entre elles. On remarque notamment que le débit à l'exutoire est proportionnel aux vitesses caractéristiques et au maximum de DTS et il est inversement proportionnel aux temps caractéristiques de la DTS. Pour le traçage du trou du Souci, on remarque une plus grande dispersion des données. On retrouve une bonne corrélation entre tmin, tmod, vmax, vmod et le débit. Par contre, le temps moyen de séjour et la DTS maximum ne semblent pas bien corrélés avec le débit.

### 3.3.1 Utilisation des résultats pour la simulation d'une pollution

Les corrélations mises en évidence dans les systèmes traçages étudiés peuvent être un outil puissant pour simuler et prévoir des pollutions. Même si il est difficile de simuler la totalité de la DTS, on a montré que pour un système traçage donné, en connaissant le débit à l'exutoire, il est possible de prévoir les paramètres de la DTS les plus importants pour évaluer l'impact que peut avoir une pollution sur la ressource. C'est-à-dire le temps minimal de transit, la DTS maximale qui peut être convertie en concentration maximale si on connaît la fonction d'entrée, le temps modal de transit et le temps moyen de séjour. Pour cela, il est nécessaire d'effectuer au moins deux traçages dans des conditions hydrologiques très différentes (en hautes eaux et basses eaux) à débits relativement constants pour mettre en évidence les relations associées au système. La réalisation de trois traçages avec des débits à l'exutoire bien répartis serait l'idéal. Le seul paramètre important qu'il est difficile de prévoir est la durée de la restitution. Mais on peut le déduire de la connaissance du temps moyen de séjour et du temps minimum de transit. (Voir figure 42).

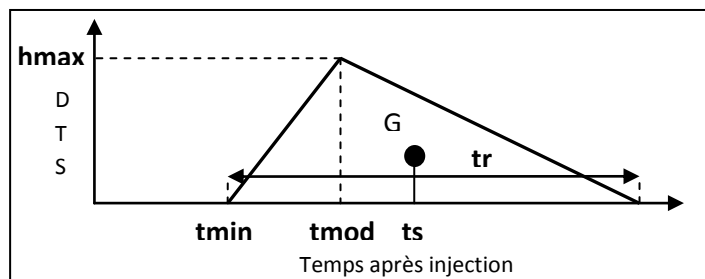


Figure 42 DTS simplifiée et ses paramètres

On peut remarquer qu'il est parfois difficile de déterminer la relation linéaire entre le maximum de DTS et le débit (dans les petits systèmes par exemple). En effet, la DTS dépend de beaucoup de paramètres (débit, concentration, masse restituée) son calcul peut donc être sujet à une accumulation d'imprécisions. Par contre, la corrélation entre temps modal et débit est semble t-il généralement plus évidente. On pourra donc coupler cette relation à celle déterminée par Bailly-Comte et Pistre (2011) pour calculer le maximum de DTS.

Une autre méthode serait d'utiliser la solution 1D de l'équation de la diffusion, représentant la distribution temporelle du nuage de traceur, mentionnée par Bailly-Comte et Pistre (2011) pour calculer la DTS maximale. Les deux paramètres à connaître sont la vitesse moyenne de transit et la dispersivité spécifique. Un seul traçage permet de déterminer la dispersivité spécifique, et la vitesse moyenne de transit peut être déduite de la connaissance de la structure du système karstique et des conditions hydrologiques (Dörfliger, 2010). Une étude plus poussée sur un plus grand nombre de systèmes karstiques permettrait de caractériser la dispersivité spécifique en fonction des caractéristiques des systèmes.

Le BRGM a élaboré un logiciel de simulation de traçage dans les milieux poreux et fissurés (Trac). Celui-ci est basé sur l'équation de la diffusion. Il existe deux modes : le mode simulation qui permet de simuler le transport et de dimensionner un traçage et le mode interprétation. Ces deux modes utilisent les solutions analytiques (1D, 2D ou 3D) adaptées à la géométrie du traçage (type d'injection, géométrie de l'écoulement, conditions aux limites) (Gutierrez et al., 2012). Ce logiciel qui utilise une approche déterministe pour simuler le transport n'est pas applicable à l'environnement karstique. Cependant, il pourrait être intéressant d'y inclure l'approche systémique pour simuler et interpréter un traçage dans un milieu karstique. Pour cela l'utilisation des relations que l'on a mises en évidence pourrait être un outil puissant.

Le schéma de la figure 43 présente l'approche 1D qui pourrait être utilisée dans Trac pour simuler le transport dans les milieux karstiques. Les seules entrées du modèle seraient l'allure de l'injection, la masse injectée, le pourcentage de restitution (utilisé pour la convolution), le débit à l'exutoire et la relation entre débit et DTS associée au système traçage étudié. Il s'agit de l'approche idéale puisque jusqu'à maintenant, on est capable de prévoir une DTS simplifiée grâce aux relations déterminées dans cette étude.

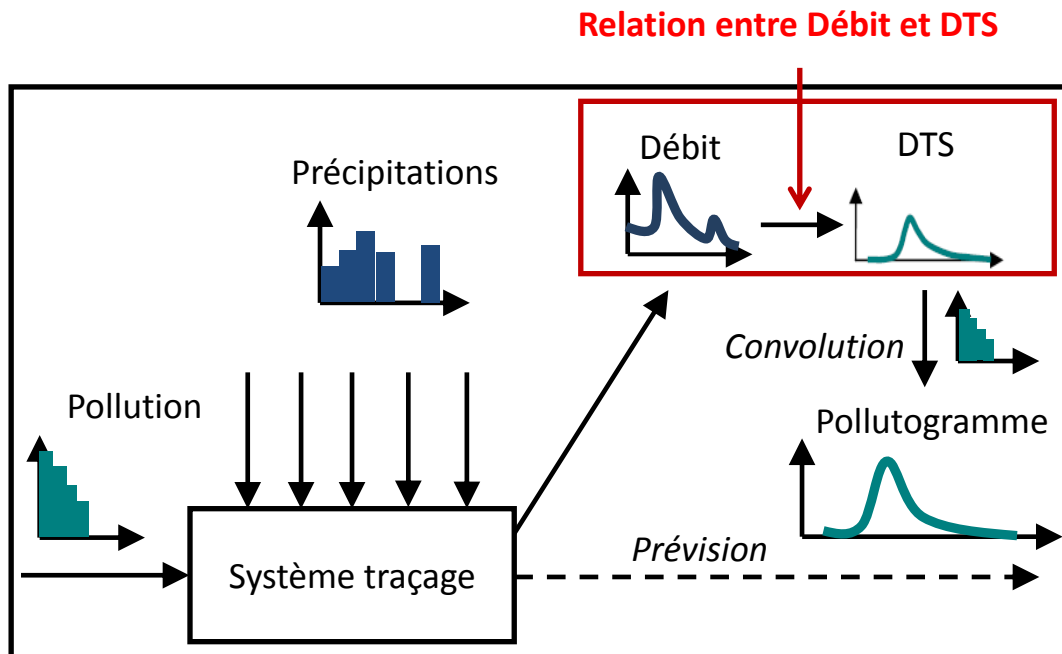


Figure 43 Schéma de la méthodologie proposée pour simuler une pollution dans un système karstique

## Conclusion

Grâce à une recherche bibliographique et des traçages sur le territoire du Parc naturel régional des Grands Causses, cette étude a permis de mettre en évidence l'existence de relations entre les paramètres de la courbe de distribution des temps de séjour et le débit à l'exutoire pour plusieurs systèmes traçages. Il est donc possible, à partir de ces corrélations, de prévoir l'arrivée, la fin ainsi que la concentration maximale d'une pollution à l'exutoire d'un système traçage. Pour cela, au moins deux traçages réalisés sous des conditions hydrologiques différentes sont nécessaires, afin de déterminer l'évolution des paramètres de la DTS avec le débit. Ces relations peuvent donc être très utiles aux études d'impact de pollutions dans les environnements karstiques, par exemple pour l'élaboration des périmètres de protection des sources captées. Il faut cependant rester vigilant quant à l'application de ces relations sur tous les systèmes traçages. Trois traçages à des débits bien répartis permettraient de vérifier que les corrélations existent pour les systèmes étudiés.

La mise en évidence de ces relations peut permettre l'amélioration de la simulation du transport dans les systèmes karstiques qui ne peut être approchée avec l'équation classique de la diffusion. Il serait notamment intéressant d'intégrer et de tester les relations dans le logiciel Trac développé par le BRGM. Mais des questions restent en suspens. En effet, les relations déterminées dans l'étude, représentant les entrées de la simulation des caractéristiques de la DTS, sont propres à chaque système karstique. Une explication physique des corrélations serait essentielle pour pouvoir étendre la prévision des paramètres à n'importe quel système. Pour cela, l'étude du fonctionnement hydraulique de ces systèmes pourrait être envisagée. On a de plus démontré la possibilité de simuler une forme simplifiée de la DTS. L'étape suivante serait d'être capable de prévoir entièrement la DTS pour permettre la simulation d'un pollutogramme sous n'importe quelles conditions hydrologiques.

Des multitraçages simultanés d'uranine et de sulforhodamine B ont été réalisés pendant cette étude afin de comparer leurs comportements dans les systèmes karstiques. La sulforhodamine B serait ainsi un traceur moins parfait que l'uranine. D'autres multitraçages et des interprétations croisées permettraient de mieux comprendre les différences entre les deux traceurs.



## Bibliographie

- Bailly-Comte V., Pistre S. (2011), A physical explanation of the empirical relationship between modal time, mean residence time and peak concentration derived from tracer breakthrough curves, 9th Conference on Limestone Hydrogeology, H2Karst, 1-3 Septembre, Besançon, France
- Belayachi N., 1987, Exploitation approfondie de données de traçages, Rapport de stage, DEA, Université d'Orléans
- Chanvry E., Malié P., Duvail C., 2013, Etude hydrogéologique des avant causes St Affricain et du causse Guillaumard, Geoter, PnrGC
- Dörfliger N., 2010, Guide méthodologique, Les outils de l'hydrogéologie karstique. Avec la collaboration de Crochet P., Guerin R., Jozja N., Marsaud B., Mondain P-H., Muet P., Plagnes V., Rapport BRGM RP-58237-FR ,246pp., 82 ill., 5 ann.
- El Hakim M., Bakalowicz M. (2007), Significance and origin of very large regulating power of some karst aquifers in the Middle East. Implication on karst aquifer classification, *Journal of hydrology*, 333, 329-339
- Goldscheider N., Drew D., 2007, *Methods in Karst Hydrogeology – Chapter 8: Tracer techniques*, IAH Book Series n°26, Taylor & Francis, Londres, pp 147-170
- Gutierrez A., Klinka T. Thiéry D., 2012, Manuel d'utilisation de TRAC : Aide à l'interprétation de traçages en milieux poreux, BRGM rapport RP-60660-FR
- Jobson H.E., 1996, Prediction of traveltime and longitudinal dispersion in rivers and streams, *Water-Resource Investigations Rep*, 96-4013, US Geological Survey
- Jozja N., 2008, Importance de la composante analytique dans la fiabilité de l'interprétation d'un traçage, Actes du colloque "Hydrogéologie et karst au travers des travaux de Michel Lepiller", Journée technique du Comité français de l'Association Internationale des Hydrogéologues, Orléans, 16-17 mai 2008, p. 207-218
- Jozja N., 2013, Traçage artificiel appliqué à l'hydrogéologie et à l'environnement, Cours, CETRAHE, 06-07 mars 2013
- Käss W., 1998, *Tracing Technique in Geohydrology*, Bakema, Rotterdam
- Lepiller M., Mondain P.-H., 1986, Les traçages artificiels en hydrogéologie karstique. Mise en œuvre et interprétation, *Hydrogéologie*, n°1, pp. 33-52, 12 fig., 3 tabl.
- Lepiller M., 2001, Traçages appliqué à la dynamique des aquifères : possibilités et limites, *Géologues N°129*, pp. 79-84
- Mangin A., 1970, Contribution à l'étude d'aquifères karstiques à partir de l'analyse de courbes de décrues et de tarissement, *Annales de Spéléologie*, 25, 3, p.581-609
- Mangin A., 1975, Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, thèse de Doctorat ès Science, Université de Dijon, *Annales Spéléologiques*, 1975, 30 (1), pp. 21-124
- Mangin A., 1997, Structure et fonctionnement des aquifères karstiques : Les concepts et les approches, BRGM Département Eau, Pour une gestion active des ressources en eau d'origine karstique, Rapport BRGM 40126, pp. 124-145
- Marsaud B., 1997, Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux, Thèse de doctorat, Paris XI Orsay, 301p
- Meus P., 1998, Les traçages artificiels, outils de reconnaissance et d'étude des aquifères karstiques, BRGM Département Eau, Pour une gestion active des ressources en eau d'origine karstique, Rapport BRGM R 40126, pp. 228-246
- Meus P., Käss W., Schnegg P.-A., 2006, Background and detection of fluorescent tracers in karst groundwater. In: Durán, J.J., Andreo, B. y Carrasco, F. (Eds.). *Karst, climate change and groundwater*. *Hidrogeologia y Aguas Subterráneas* 18:65-75.
- Montaufier J.-C., 2006, Pré-étude hydrogéologique des Avant-Causse St-Affricain et du Causse du Guillaumard, Parc naturel régional des Grands Causse
- Montety (de) V., 2003, Participation à l'étude hydrogéologique de la partie Ouest du Causse de Sauveterre et de ses Avant-Causse : détermination de systèmes hydrogéologiques karstiques à l'aide

de campagnes de multitraçages. Etude de l'influence de la nature du milieu sur le transit de divers traceurs fluorescents par multitraçages simultanés, Rapport de stage ingénieur, Parc Naturel Régional des Grands Causses

Morales T., de Valderrama I F., Uriarte J A., Antigüedad I., Olazar M., 2007, Predicting travel times and transport characterization in karst conduits by analyzing tracer-breakthrough curves, *Journal of hydrology*, 334, 183-198

Mull D.S., Liebermann T.D., Smoot J.L., Woosley L.H., 1988, Application of dye-tracing techniques for determining solute-transport characteristics of ground water in karst terranes, U.S. Geological Survey Water Resources Division, U.S. Environmental Protection Agency, Atlanta, GA 30365

Office Fédéral des Eaux et de la Géologie, 2002, Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie – Guide Pratique, Série Géologie, Rapport n°3, Berne

PnrGC, 2006, Etude hydrogéologique de la partie ouest du Causse de Sauveterre et de ses avant Causses, Parc naturel régional des Grands-Causses, Millau

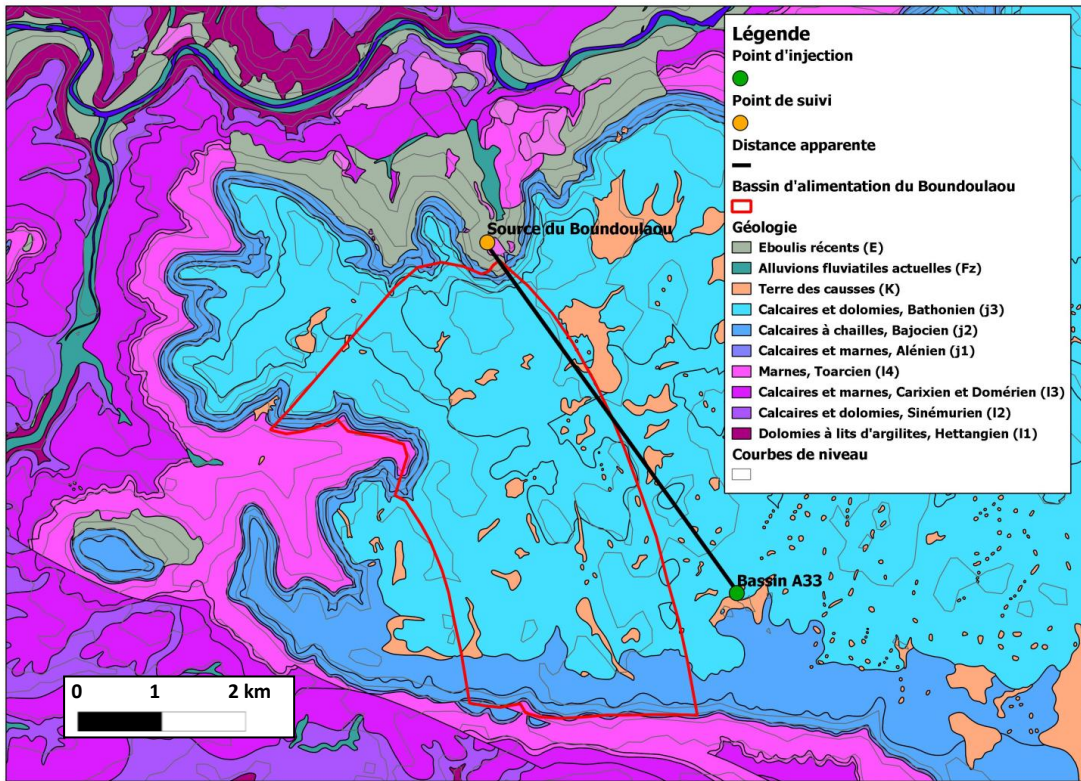
Ricard J., Bakalowicz M., 1996, Connaissance, aménagement et protection des ressources en eau du Larzac Septentrional., Aveyron (France), Rap. BRGM R38953, 94 p., 200 annexes (format A4), 7 planches hors texte (format A3), 5 planches hors texte (format A1)

Schnegg P.-A., Meus P., Jozja N., Défarge C., 2011., Le fluorimètre de terrain, une sonde multicapteurs appliquée aux études hydrogéologiques et environnementales *in situ*, Colloque Capteurs et instrumentations pour l'environnement et les géosciences., Orléans, 27-28 septembre 2011

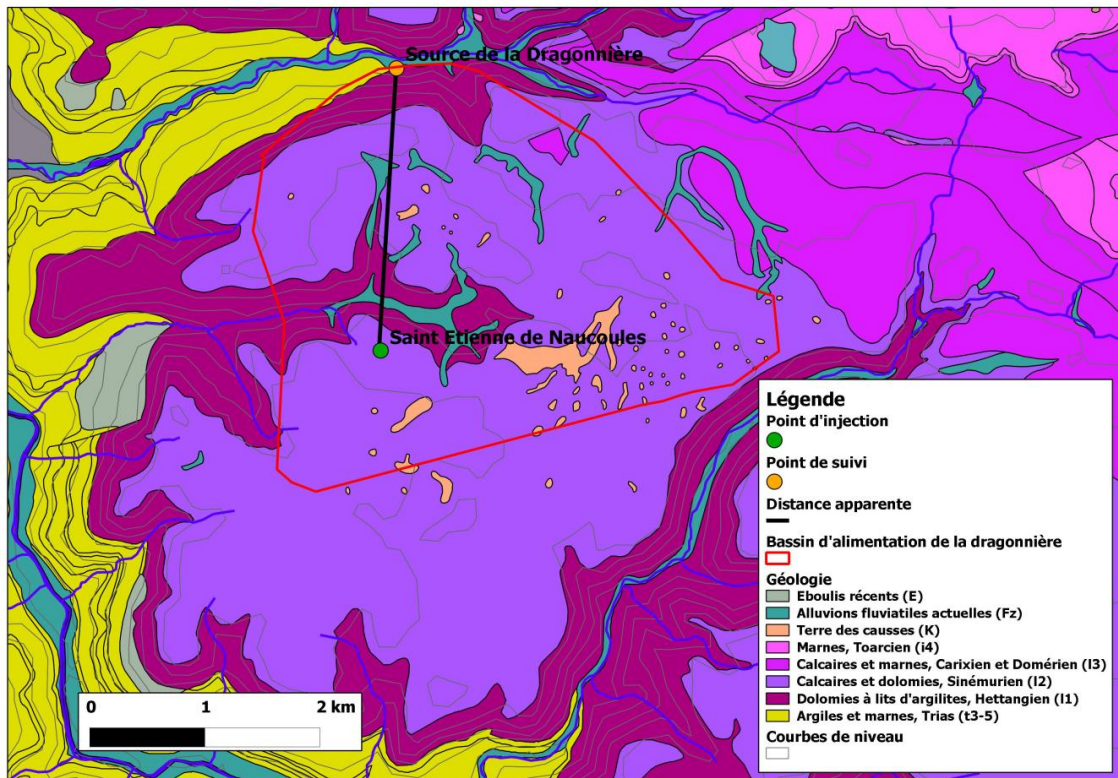
Stanton W. I., Smart P.L., 1981, Repeated dye traces of underground streams in the Mendip Hills, Somerset, *Proc. Univ., Bristol Spelaeol. Soc.*, 16 (1), pp47-58

# Annexes

## Annexe 1 : Cartes des traçages

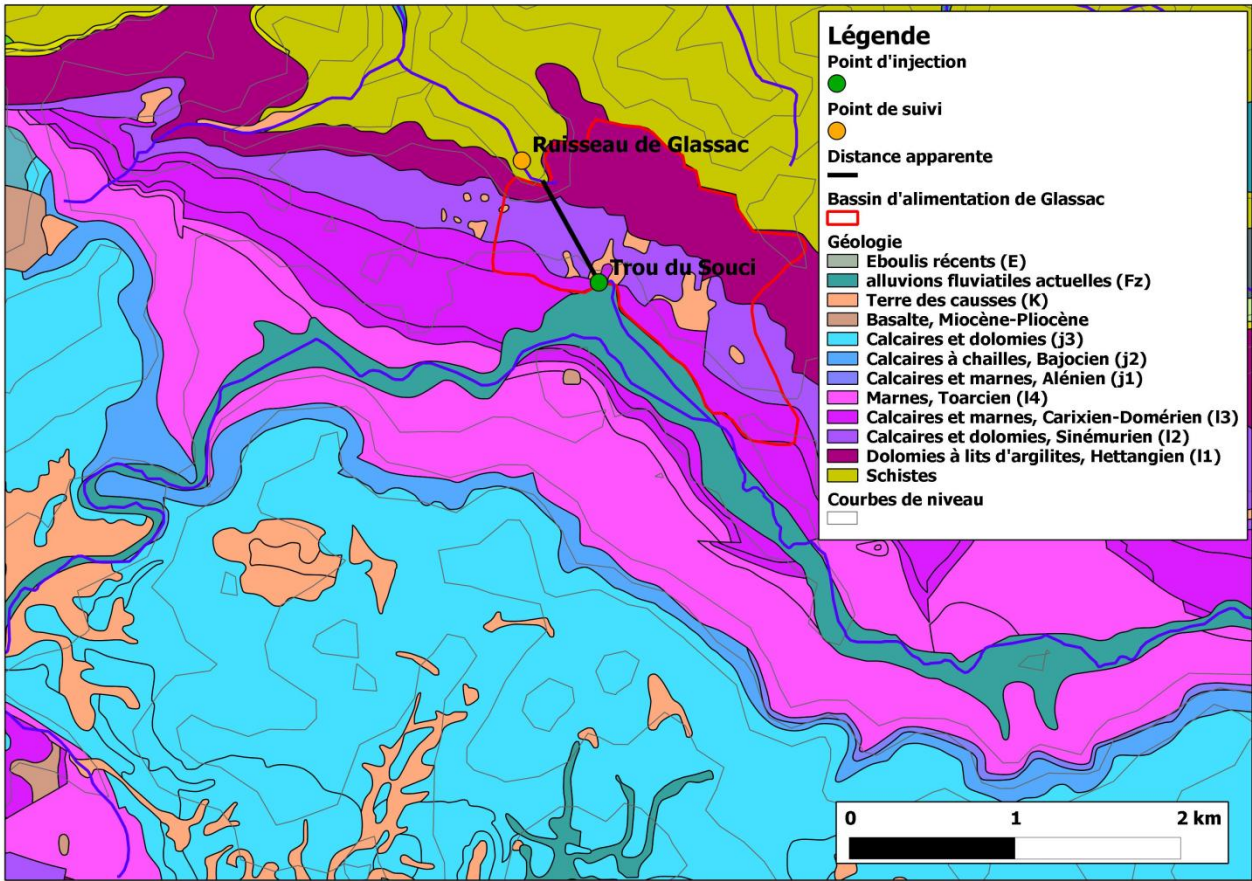


Système traçage Bassin A75-Boundoulaou



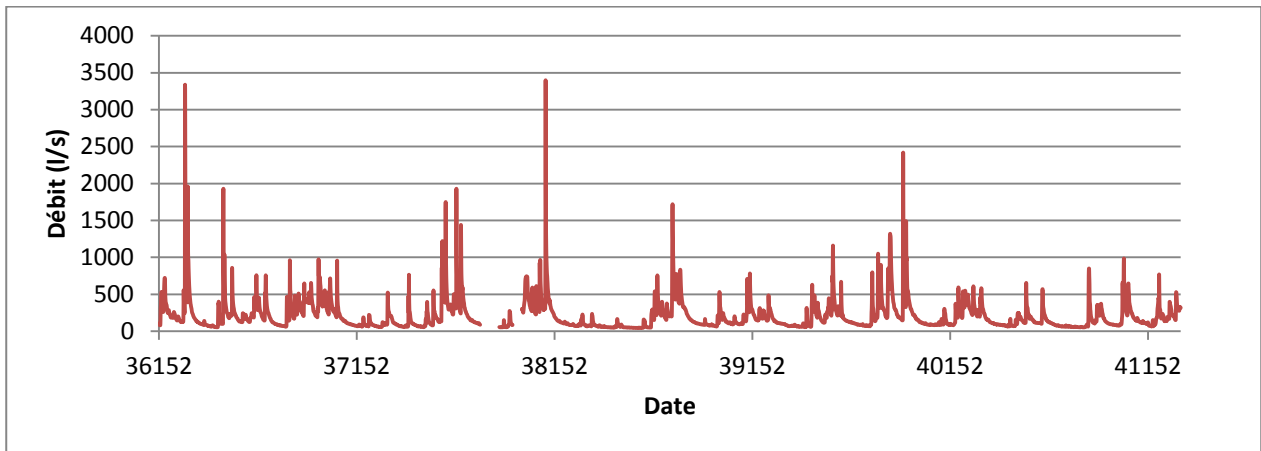
Système traçage St Etienne de Naucoules-Dragonnière



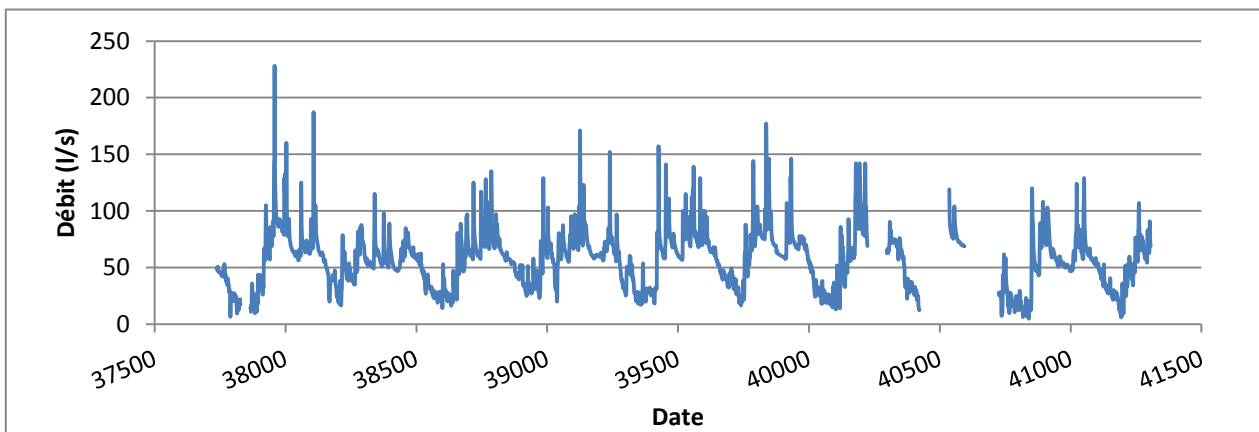


Système traçage trou du Souci-Glassac

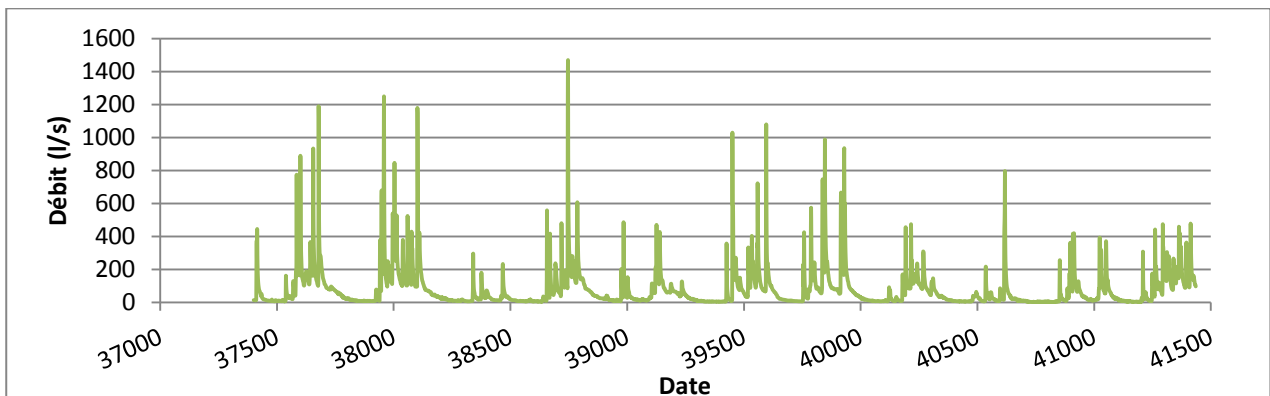
## Annexe 2 : Chroniques de débits mesurés aux exutoires des trois systèmes karstiques



Chronique de débits de la source du Boundoulaou (1998-2013)



Chronique de débits de la source de Glassac (2002-2013)



Chronique de débits de la source de la Dragonnière (2002-2013)

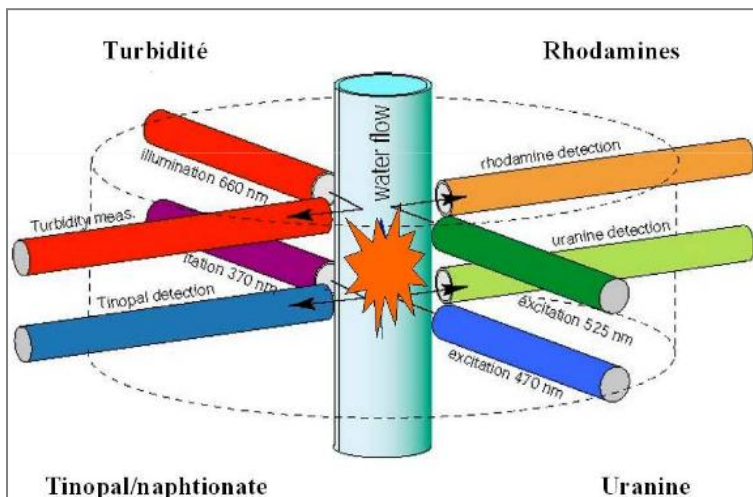
## Annexe 3 : Fonctionnement des appareils de mesure de fluorescence utilisés lors d'un traçage

### Fluorimètre de terrain :

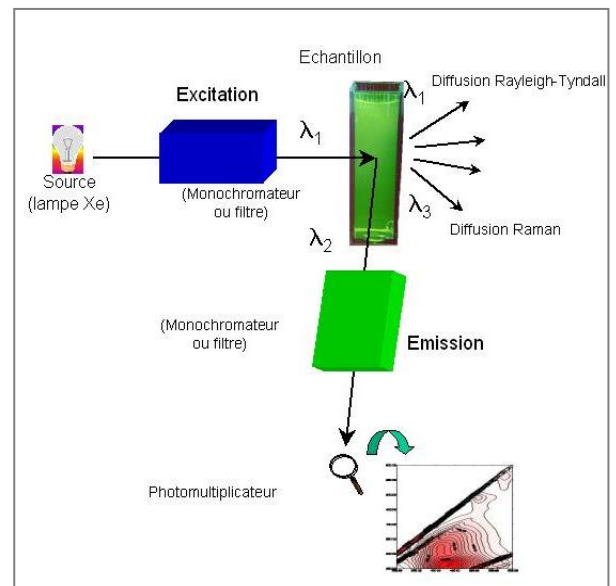
Le fluorimètre de terrain est directement immergé dans la source que l'on veut analyser. L'eau transite à l'intérieur d'une chambre optique. Celle-ci est connectée à 4 lampes et 3 photodiodes montées sur 4 axes et sur 2 étages qui constituent le système optique (voir figure ci dessous). Les Lampes s'allument à tour de rôle et excitent l'eau traversant l'axe optique à une longueur d'onde spécifique au traceur choisi. Les photodiodes mesurent le signal émis et le convertissent en signal électrique. Trois traceurs peuvent donc être détectés en même temps, à condition que leurs spectres d'excitation/émission ne se recoupent pas. La quatrième lampe sert à mesurer le signal émis par les matières en suspension. Cette mesure permet d'éliminer dans le signal de fluorescence des traceurs la composante due à la turbidité. (Schneegg et al., 2011).

### Spectrofluorimètre :

Le spectrofluorimètre analyse les échantillons récupérés sur le terrain (par le préleveur automatique ou « à la main »). Il est basé sur le même principe que celui du fluorimètre. Le monochromateur permet de filtrer le rayon de la source et d'exciter l'échantillon à une ou plusieurs longueurs d'onde. En réponse, si un traceur fluorescent est présent, l'échantillon absorbe en partie le rayon et émet une longueur d'onde plus élevée, caractéristique du traceur en présence (Goldscheider et Drew, 2007). L'amplitude du signal est convertie en concentration.



Montage optique du fluorimètre (Schneegg, 2002)



Fonctionnement du spectrofluorimètre (Cours de Jozja, 2013)

## Annexe 4 : Photos d'injections dans les trois systèmes traçages :



Injection d'uranine et de sulforhodamine B au trou du Souci



Injection de sulforhodamine B au bassin de l'A75

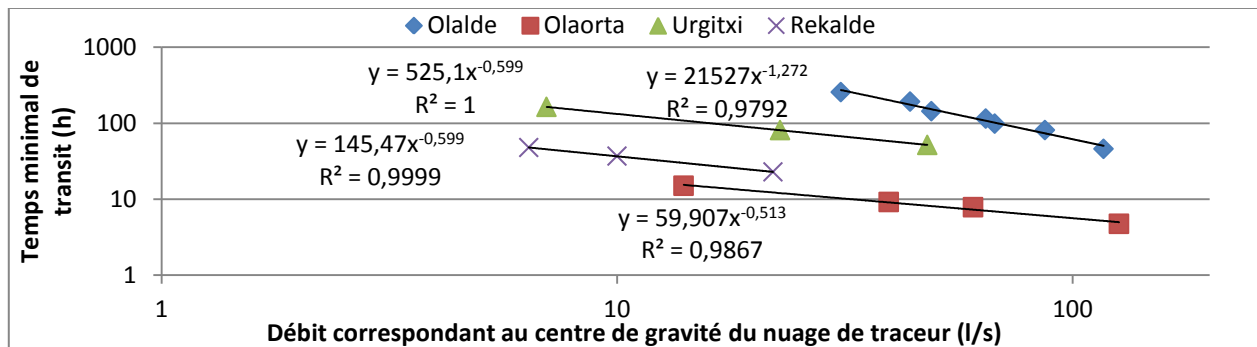


Injection de sulforhodamine B à St Etienne de Naucoules

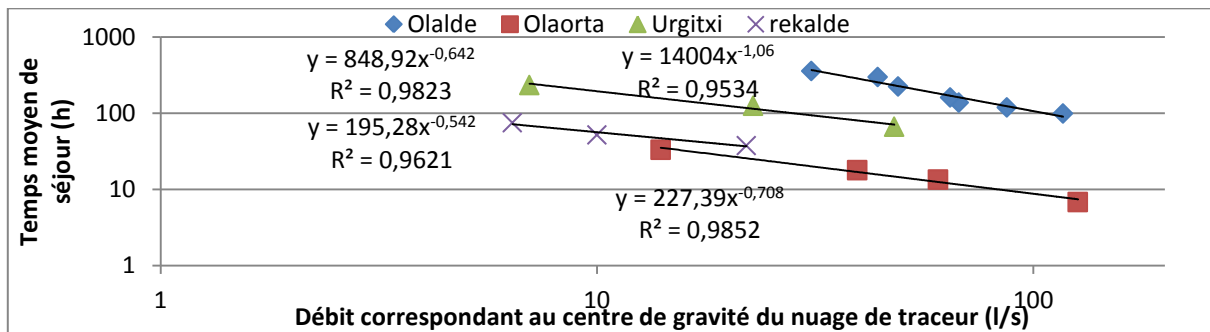
## Annexe 5 : Tableaux de données des traçages issues de la bibliographie et de la base de données du parc

	Nom du traçage	Traceur utilisé	Lieu de restitution	Date	Dapp	tmin (h)	tmod (h)	ts (h)	h(t)max (1/s)	Restitution (%)
Sauveterre	Perte du ruisseau de Serre	Eosine	Campagnac Gare	19/11/2002	1550	2,7	3,7	5,4	1,9E-04	64,38%
	Trou du souci	Amino G	Glassac	18/06/2003	674	6,3	8,0	11,2	7,9E-05	84,00%
	Trou du souci	Eosine	Glassac	18/06/2003	674	7,7	9,3	12,1	7,2E-05	83,00%
	Trou du souci	Uranine	Glassac	25/10/2011	674	9,1	11,8	20,9	4,1E-05	95%
	Perte du ruisseau de Serre	Eosine	Courtineaux 1	19/11/2002	1850	18,7	25,2	26,5	2,8E-05	89%
	Aven de Cassagnes	Eosine	Mayrinhac	24/05/2004	1750	21,3	25,3	33,5	4,1E-05	543%
	Perte des Pradels	Eosine	Verlenque	18/11/2002	2710	63,6	69,6	159,2	5,5E-06	91,41%
	Perte du Soucis	Uranine	Rouveyrol	18/11/2002	8712	73,1	78,1	85,9	3,9E-05	20,00%
	Aven d' Agues	Uranine	Eparse	06/05/2004	1690	96,2	102,2	119,4	1,1E-05	2,13%
	Perte des Sâgnes	Uranine	Rouveyrol	05/03/2003	10250	111,2	129,2	186,7	4,7E-06	75,00%
	Perte du soucis bis	AminoG	Rouveyrol	18/06/2003	8712	190,9	191,9	227,6	1,7E-05	24,00%
	Fontaine St Urbain	Sulfo B	Beldoire	22/11/2004	16631	219,9	268,9	382,7	1,8E-06	10,65%
Larzac	Ségala de la Vialette	Eosine	Source d'Aiguebelle	25/05/2009	1120	29,0	65,0	81,0	7,3E-06	77,75%
	Loublacat, doline	Naphtionate	Source de Bollenc	05/05/2009	1390	36,0	65,0	93,0	3,1E-06	23,59%
	Ourtiguet, Effondrement	Sulfo B	Source d'Aiguebelle	25/05/2009	1290	47,0	62,0	81,0	1,3E-05	25,20%
	castelmindit, doline	Eosine	Source du Brias	06/05/2009	2500	60,0	116,0	156,0	2,3E-06	14,00%
	Aven de la STEP couvertirafe	Sulfo B	Foux de la Vis	11/05/2010	13000	133,0	177,8	210,5	2,1E-06	51,27%
	Station du viala du Pas de Jaux	Uranine	Balastière	24/03/2003	2720	147,0	183,0	237,9	2,9E-06	20,45%
	Bassin de rétention A 33	Uranine	Boundoulaou	24/03/2011	5078	216,0	302,4	372,0	1,8E-06	60,46%
	Bassin de rétention A 37	Uranine	Durzon		6970	331,2	458,4	494,4	1,8E-06	32,30%
	Forêt domaniale du Larzac	Uranine	Source du Cernon	06/05/2009	5068	451,0	598,0	590,0	6,7E-07	7,73%
Bassin de rétention A 10	Uranine	Source de Cayrac		1930		152,0	264,0			
Massif des bauges	T13 Lacost sorpt		Sorpt	08/04/1982	1050	13,0	18,0	20,9	3,5E-05	60,00%
	T3 Vaux		Tigran		2850	15,9	18,9	27,8	2,9E-05	74,40%
	T1 Grand bois	fluoresceine	Source du cimetière	06/06/1978	1450	16,9	21,0	22,0	7,1E-05	20,50%
	T2 Grand bois	fluoresceine	la marche		1450	16,9	21,0	23,8	7,0E-05	100%
	T14 cost blagour		Pisciculture blagour	26/06/1982	2725	34,0	49,0	63,4	1,3E-05	95,90%
	T8 Event du boulet		Pisciculture blagour		1452	39,0	43,0	45,0	8,3E-05	100%
	T12 fontamille blagour		Pisciculture blagour		7125	48,0	57,0	60,9	2,4E-04	82,10%
	T9 perte de Tournon	fluoresceine	Pisciculture blagour		8514	49,5	56,5	56,3	2,9E-05	84,60%
	T10 perte de Tournon	fluoresceine	griffons du boulet	26/05/1981	8040	50,0	53,5	56,3	3,6E-05	10,18%

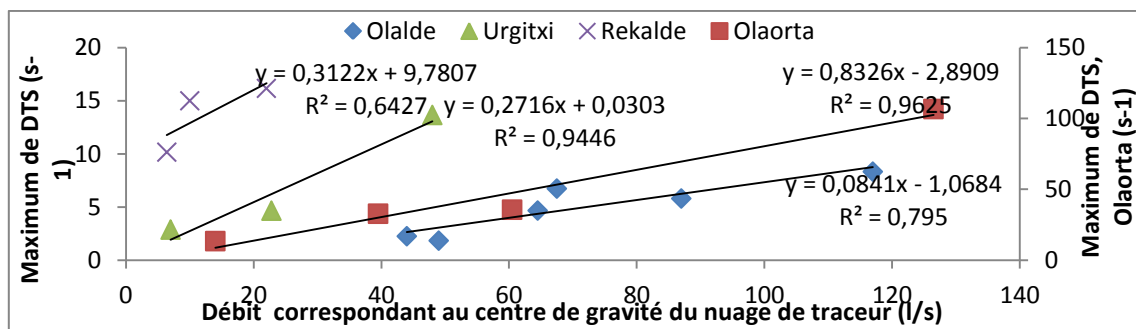
## Annexe 6 : Relations entre paramètre de la DTS et débit à l'exutoire pour des traçages réalisés par Morales et Al (2006) dans quatre systèmes traçages sous différentes conditions hydrologiques



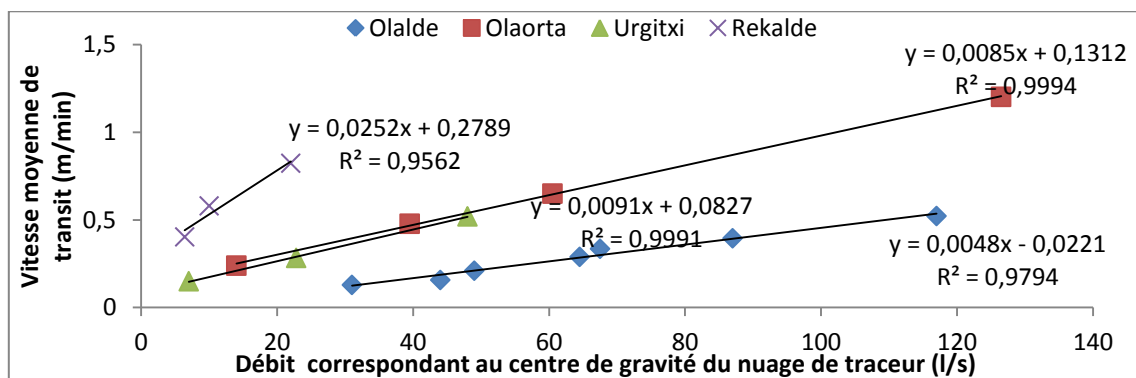
Temps minimal de transit en fonction du débit



Temps moyen de séjour en fonction du débit



Maximum de la DTS en fonction du débit



Vitesse moyenne de transit en fonction du débit





## Résumé

Le karst recouvre une importante partie de la France. En raison de sa vulnérabilité, la protection de ces systèmes est essentielle pour maintenir la qualité des sources karstiques. A cet effet, le traçage est un outil très puissant pour prédire l'impact de la pollution dans un système karstique.

Le résultat d'un traçage est une courbe de restitution qui décrit la distribution de la concentration du traceur à la sortie du système avec le temps. La distribution des temps de séjour (DTS) permet de décrire le transit du traceur. Il s'agit de la réponse impulsionnelle du système traçage. Le calcul de la DTS peut être utilisé afin de comparer plusieurs traçages qui ont été réalisés dans le même système. En raison de la non linéarité des systèmes karstiques, la DTS varie avec les conditions hydrologiques.

L'équation de la diffusion n'est pas applicable à la simulation du transport en milieu karstique. Cet outil n'est donc pas utilisable pour prédire les pollutions. Par contre, les recherches passées ont montré que des relations empiriques entre le débit à l'exutoire et les caractéristiques de la DTS peuvent être déterminées dans des systèmes simples.

Plusieurs essais de traçage ont été réalisés dans plusieurs systèmes et sous différentes conditions hydrologiques afin de vérifier les relations entre débit et DTS mentionnées dans la littérature. Le travail a été effectué sur le territoire du Parc naturel régional des Grands Causses en raison de la présence de grands plateaux calcaires karstiques. Trois systèmes traçages ayant des caractéristiques structurales et hydrodynamiques variées ont été choisis de manière à vérifier les relations dans différents contextes.

Des relations entre la plupart des paramètres de la DTS ont été mises en évidence. Elles peuvent être très utiles pour préparer une campagne de traçages (fréquence d'échantillonnage, masse de traceur à injecter ...). Pour chaque système, des corrélations entre ces paramètres et le débit ont été également déterminées. Les relations sont les suivantes :

- Le maximum de la DTS est proportionnel au débit moyen pendant la restitution ;
- Les temps de séjour moyen, minimum et modal sont inversement proportionnels au débit moyen ;
- La vitesse du traceur est proportionnelle au débit moyen.

La relation entre le maximum de la DTS et débit moyen pendant la restitution n'a pas été prouvée pour les petits systèmes karstiques (moins d'1 km de distance apparente).

L'existence de ces relations montre qu'il est possible de prédire la forme simplifiée de la DTS d'un système donné pour n'importe quel débit à l'exutoire. Pour cela, il est essentiel de réaliser au moins deux traçages en basses et hautes eaux à des débits relativement constants. L'idéal serait de réaliser trois traçages à des débits bien répartis.