

MAIRIE DE ROQUEFORT

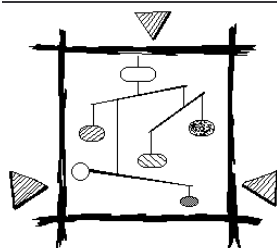
**ETUDES PREALABLES A L'ETABLISSEMENT DES
PERIMETRES DE PROTECTION**

SOURCE CAPTEE DE TENDIGUES

COMMUNE DE ROQUEFORT (12)

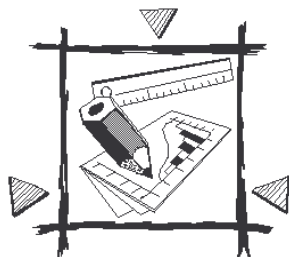
RAPPORT CALLIGEE Périmpro Sout T05-12053

N° rév	Rédaction	Visa	Vérification	Visa	Technicien	Visa	Date application
1	Davy DOUAY		Christophe SUBIAS		Maxime CARBONNIER		Mars 2006



SOMMAIRE

LISTES DES FIGURES.....	3
1 – INTRODUCTION	4
2 – CONTEXTES GEOGRAPHIQUE, GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE.....	5
2.1 – Localisation	5
2.2 – Cadre géologique.....	5
2.2 – Contexte hydrographique.....	7
2.3 – Cadre hydrogéologique.....	7
3 – TRAÇAGE DES EAUX SOUTERRAINES	9
3.1 – Objectifs	9
3.2 – Généralités.....	9
3.3 – Points d'injection	10
3.4 – Traceurs utilisés	10
3.5 – Conditions d'injection	11
3.6 – Déroulement des injections.....	11
3.6 – Acquisition des débits	13
3.7 – Suivi de la restitution	14
3.8 – Analyse des échantillons.....	15
3.9 – Résultats des traçages.....	16
4 – APPORT DES TRAÇAGES A LA DEFINITION DE L'AIRE D'ALIMENTATION DE LA SOURCE CAPTEE.....	28
4.1 – Traçage à partir du fossé de la RD 993	28
4.2 – Traçage à partir du forage de Mme Couderc.....	28
4.3 – Traçage à partir de l'Aven de la Combe.....	29
4.4 – Traçage à partir du Ravin de la Merderie.....	29
4.5 – Traçage à partir du forage de M. Malleviale.....	29
5 – CONCLUSION.....	30
CARTES.....	31
PHOTOS.....	34
ANNEXES	40



LISTES DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Récapitulatif des injections réalisées	10
Tableau 2 : Caractéristiques spectrales des traceurs utilisés	15
Tableau 3 : Résultats du traçage du fossé de la RD 993 à l'Uranine.....	17
Tableau 4 : Résultats du traçage au NaCl dans le forage de Mme Couderc	19
Tableau 5 : Résultats du traçage de l'aven de la Combe au KI	21
Tableau 6 : Résultats du traçage du ravin de la Merderie.....	23
Tableau 7 : Résultats du traçage du fossé de la RD 993 à l'Uranine.....	25

LISTE DES FIGURES

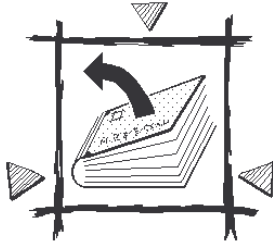
Figure 1 : Conditions pluviométriques.....	11
Figure 2 : Débits enregistrés à la source de Tendigues.....	16
Figure 3 : Courbe de restitution en Uranine – fossé RD 993	18
Figure 4 : Courbe de conductivité – traçage dans le forage de Mme Couderc	20
Figure 5 : Courbe des concentrations mesurées en ions Iodures – aven de la Combe.....	22
Figure 6 : Courbe des concentrations mesurées Sulforhodamine – Ravin de Merderie.....	24
Figure 7 : Courbe des concentrations mesurées en Uranine – Forage de M. Malleviale	26

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Carte des points d'injection	32
Carte 2 : Carte et coupe géologique	33

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Injection d'Uranine dans le fossé de la RD 993 à Tiergues	35
Photo 2 : Injection de KI dans l'Aven de la Combe (1)	35
Photo 3 : Injection de KI dans l'Aven de la Combe (2)	36
Photo 4 : Injection de NaCl dans le forage de Mme Couderc	36
Photo 5 : Injection de Sulforhodamine dans le Ravin de Merd Erie (1).....	37
Photo 6 : Injection de Sulforhodamine dans le Ravin de Merd Erie (2).....	37
Photo 7 : Injection d'Uranine dans le forage de M. Malleviale (1)	38
Photo 8 : Injection d'Uranine dans le forage de M. Malleviale (2)	38
Photo 9 : Restitution de l'Uranine dans la source de Tendigues.....	39
Photo 10 : Restitution de l'Uranine dans le ruisseau de Tendigues.....	39



1 – INTRODUCTION

Suite à la réunion interservices effectuée à la Mairie de Roquefort en présence des services de l'Etat (DDAF, DDASS, MISE) et de l'Assistant à Maître d'Ouvrage (ATD12), notre bureau d'étude a présenté une synthèse des études préalables aux périmètres de protection de la source de Tendigues, captée par la commune et de l'avis de M. RICARD, hydrogéologue agréé.

Cette ressource en eau constitue un enjeu très important puisqu'elle sert à l'alimentation de l'ensemble de la commune et de son annexe Lauras. 70% de la consommation de la commune provient principalement des caves de Roquefort.

De plus, il n'existe aucune interconnexion avec un autre réseau ou une autre ressource en eau, utilisables pour la commune en cas de pollution du captage.

Les études préalables et l'avis de Monsieur RICARD, hydrogéologue agréé, indiquent une forte vulnérabilité de la ressource (système karstique) associée à une sensibilité importante d'un point de vue qualitatif (rejets et installations non conformes aux normes) et quantitatif (présence de puits privés).

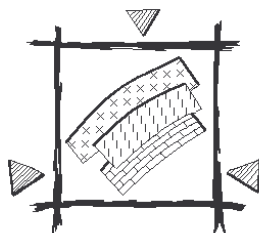
Les limites de périmètres de protection ont été définies en mai 2004 par M. RICARD. Comme il l'indique dans son avis, ces limites ont été définies « à titre d'expert puisque les résultats des études hydrogéologiques sont maigres voire inexistantes :

- *pas de résultats d'expérience de traçage,*
- *pas de bilan global d'eau du débit de la source,*
- *pas de connaissance des types de sol, de leur extension et de leur caractéristiques."*

Il délimite toutefois un bassin d'alimentation de la source d'une surface de 8 km² environ en se basant sur des arguments structuraux et hydrauliques notamment à partir d'une estimation du débit moyen de la source à 80 l/s et d'une estimation du débit spécifique à 10 l/s/km².

Vu l'importance et la vulnérabilité de la ressource, il nous a été demandé la réalisation d'un multitraçage hydrogéologique ayant pour buts :

- de confirmer les limites du bassin d'alimentation proposées par J. RICARD dans son avis d'hydrogéologue agréé,
- d'évaluer les vitesses de circulation des eaux souterraines dans les formations géologiques entre un point d'injection donné (fossé, doline, aven, forage, ruisseau) et la source captée,
- d'apprécier la vulnérabilité de l'aquifère à partir des taux de dilution observés,
- de quantifier les pertes du ruisseau de Tendigues vers la source.



2 – CONTEXTES GEOGRAPHIQUE, GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

2.1 – LOCALISATION

Le captage AEP se situe en rive droite du ruisseau de Tendigues, sur la commune de Roquefort (12) (**carte 1**).

Coordonnées Lambert II étendue (m)		Z (m NGF)	Indice National
650 610	2 186 765	445 ± 5	09356X0027/HY

Commune	Section	Parcelles
Roquefort	?	124 – 677 - 680

2.2 – CADRE GEOLOGIQUE

2.2.1 – Contexte géologique et géomorphologique

Le captage se situe dans l'avant-causse liasique qui constitue une zone de transition entre le Causse du Larzac (calcaires jurassiques) et le Bassin de Saint-Affrique (schistes permians). (carte et coupe géologique en **carte 2**)

Le relief est caractérisé par des massifs marneux parfois surmontés d'épaisses strates calcaires, dont la plus importante sur Roquefort forme le Causse du Combalou. Au pied de ce dernier, au niveau du versant nord effondré, est construite la cité fromagère de Roquefort, sous laquelle est aménagé un important réseau souterrain où a lieu l'affinage du fromage.

2.2.2 – Description des terrains

Les formations les plus représentées sur le secteur d'étude sont celles du Jurassique moyen à inférieur : de l'Aalénien au Bathonien au niveau des Causses du Combalou et du Larzac et sur le reste du territoire étudié affleurent les formations de l'Hettangien au Toarcien recouvertes au niveau du ruisseau de Tendigues par des alluvions récentes.

➤ FORMATIONS SECONDAIRES

L'Hettangien (I₁₋₂) correspond à des dolomies et calcaires dolomitiques pouvant atteindre une épaisseur de 100 à 200 m.

La suite de la formation se présente ainsi du sommet à la base :

- Calcaire marneux dans sa partie supérieure ;
- Calcaire à cargneules avec bancs de marnes intercalés dans sa partie médiane ;
- Calcaire dolomitique et dolomies dans sa partie inférieure. Vers la base, s'intercalant parfois des bancs de grès conglomératiques ou des lits de dolomies à grains ou graviers de quartz.

Cette formation est observée dans la vallée du Cernon, sous les alluvions récentes.

Le Sinémurien (I₃) est constitué de calcaires plus ou moins dolomitiques, lithographiques, compacts et durs, à grain fin, grisâtres ou blanchâtres, souvent en bancs.

Le Lotharingien (I₄) est formé dans sa partie inférieure de calcarénites fines et de calcaires oolithiques et bioclastiques. Sa partie supérieure paraît manquer en général sous le Carixien.

Le Carixien (I₅) se compose d'une alternance de calcaires argileux et de marnes grises subordonnées. Il fait de 30 à 60 mètres d'épaisseur.

Le Domérien (I₆) correspond à des marnes feuilletées. Sa puissance peut varier de 30 à 60 m d'ouest en est.

Le Toarcien inférieur (I₈) est constitué de marno-calcaires et schistes bitumineux (10 m).

Le Toarcien supérieur et Aalénien inférieur (I_{8-9a}) est constitué par des marnes feuilletées d'une épaisseur variant de 50 à 70 m.

L'Aalénien supérieur (I_{9b}) se compose d'une alternance de calcaires noduleux, de sables et de marnes.

➤ FORMATIONS SUPERFICIELLES

Les alluvions récentes sont observées au niveau des fonds de vallée, essentiellement sous la forme de cailloutis calcaires, plus rarement de sédiments fins.

Elles sont en général peu épaisses et le lit des rivières montre souvent la roche en place.

2.2 – CONTEXTE HYDROGRAPHIQUE

La source de Tendigues se situe en rive droite du ruisseau du même nom. Le ruisseau de Tendigues est formé par :

- le Ravin de Puech Rouge (temporaire),
- le Ravin de Merderie (temporaire),
- le Ravin de Pradelles (temporaire),
- le Ravin de Claveyrolles.

Le ruisseau de Tendigues est permanent à partir de la source. Il se jette ensuite dans le Soulzon, affluent du Cernon, lui-même affluent du Tarn.

Les débits d'étiage de références de ces cours d'eau sont estimés à :

- 0,12 m³/s pour le Soulzon à l'amont du ruisseau de Tendigues ;
- 0,15 m³/s pour le Soulzon à l'aval du ruisseau de Tendigues ;
- 0,04 m³/s pour le ruisseau de Tendigues.

2.3 – CADRE HYDROGEOLOGIQUE

2.3.1 – Contexte hydrogéologique

Les aquifères rencontrés dans ce secteur sont essentiellement de type karstique. Ils concernent les formations du Jurassique moyen et supérieur et celle du Lias inférieur, séparées par les terrains marneux du Lias supérieur (**carte 2**).

L'aquifère du Lias inférieur (Hettangien, Sinémurien et Lotharingien) est limité à sa base par les formations argilo-gréseuses du Trias qui constituent un mur imperméable et à son sommet par les formations marneuses du Lias supérieur (Carixien à Toarcien).

La présence importante de dolomite (80 à 90 %), moins soluble que le calcaire limite la karstification dans ces formations. Elle est responsable de la prédominance de conduits et de fissures de petites dimensions ayant un rôle régularisateur dans le régime des sources. La vitesse moyenne d'écoulement rencontrée est de 35 m/h.

L'aquifère du Jurassique moyen à supérieur (Aalénien, Bajocien et Bathonien) est limité au mur par les marnes du Toarcien.

La nature de ces formations (80 % de calcite) a permis le développement d'une karstification plus importante sous forme de conduits de grandes dimensions. La vitesse moyenne d'écoulement y est de 60 m/h.

Ces ensembles sont compartimentés par des accidents et les principales vallées en plusieurs unités et on peut distinguer deux types de systèmes karstiques :

- les précipitations qui s'infiltrent sur les affleurements calcaires gagnent les niveaux de base marneux en donnant au contact des sources dont le débit est variable suivant le bassin versant. Ce type de karst est dit « perché » ;
- lorsque les rivières ont entaillé ces formations calcaires karstifiées, c'est leur cours qui constitue le niveau de base et on peut envisager l'existence de karsts profonds noyés.

Les alluvions peu développées sur le secteur offrent des ressources en eau limitées.

2.3.2 – Hydrogéologie du secteur

• DONNEES HYDROGEOLOGIQUES DISPONIBLES SUR LE SECTEUR

Nous disposons de peu d'informations sur les caractéristiques hydrogéologiques de la nappe captée par la source AEP de Tendigues (absence d'essai de pompage et de traçage).

Le captage de Tendigues est une source de débordement qui émerge au contact entre les marnes du Domérien et les calcaires du Carixien. Elle semble être essentiellement alimentée par des infiltrations d'eaux superficielles au niveau des calcaires perméables du plateau de Luras et probablement par des pertes au niveau du ruisseau de Tendigues.

Des mesures de débit ont été réalisées en 1979 (DDAF) et 2003. Ceux-ci ont été mesurés à 28 l/s. M. Ricard a estimé dans son rapport un débit de crue entre 100 et 200 l/s (mars 2004).

Le débit de la source a été suivi pendant toute la durée du traçage (**paragraphe 3.9.1.**). Celui-ci a varié entre 10 et 45 l/s sur la période de suivi (29/11/05 – 30/01/06).

• RELATION AVEC LE RUISSEAU DE TENDIGUES

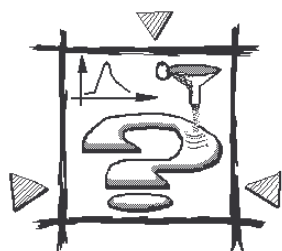
Lors des études préalables à la mise en place des périmètres de protection, un lien entre les écoulements du ruisseau et le captage a été suspecté : en effet, des pollutions antérieures du captage ont été mises en relation avec des polluants affectant le ruisseau à l'amont du captage. De plus lors d'une visite sur le terrain en mai 2002, une zone de pertes située entre le pont de la D93 et le cours du ruisseau au droit du captage a pu être observée.

En période d'étiage, le ruisseau de Tendigues est à sec sur une partie de son cours. Il est en grande partie alimenté par le trop-plein de la source dans sa partie aval.

2.3.4 – Bassin d'alimentation du captage

En l'absence de données hydrogéologiques (traçage, suivi de débit de la source...), le bassin d'alimentation de la source a été délimité par l'hydrogéologue agréé M. RICARD, par recoupement entre le bassin versant superficiel de la source et la zone d'affleurement du Lias, soit une surface de 8 km² environ.

Le traçage a pour but de conforter ou réfuter cette délimitation.



3 – TRAÇAGE DES EAUX SOUTERRAINES

3.1 – OBJECTIFS

La technique du traçage artificiel est couramment utilisée en hydrogéologie karstique pour vérifier l'existence d'une relation entre une perte et un ou plusieurs exutoires afin de préciser les limites de bassins d'alimentation des sources.

La limite du bassin d'alimentation de la source de Tendigues n'étant pas connue avec certitude, il a été décidé d'entreprendre un multitraçage hydrogéologique à partir de 5 points situés sur le bassin versant supposé.

3.2 – GENERALITES

L'opération de traçage est facile à mettre en œuvre mais nécessite cependant de respecter certaines conditions, notamment :

- la masse de traceur injectée doit être suffisante pour que sa présence puisse être détectée à l'exutoire. Les limites de détection des laboratoires actuels sont cependant très faibles (de 0,1 à 0,2 µg/l pour les traceurs fluorescents, 2 µg/l pour le KI),
- l'échantillonnage à la sortie du système karstique (source) doit être réalisé avec un pas de temps adapté pour établir les variations de concentration du traceur restitué en fonction du temps,

Des mesures de débits doivent être réalisées afin de calculer notamment le pourcentage de traceur restitué à l'exutoire.

L'interprétation des traçages permet alors d'obtenir des informations très intéressantes :

- sur la **structure** d'un système karstique si on s'intéresse au flux de traceur ayant transité par ce système,
- sur le **transit** de l'eau si on s'intéresse aux vitesses et aux temps de circulation de l'eau,
- sur la **capacité de dilution** du système.

Le traceur injecté ne va parcourir qu'une partie seulement du système karstique (appelé **système-traçage**). Les résultats que l'on obtiendra nous donneront donc des informations sur les modalités de transit de l'eau marquée et par conséquent sur la structure de la partie du système concerné par ce transit.

Les bases théoriques de l'interprétation des traçages sont données en **annexe 1**.

3.3 – POINTS D'INJECTION

L'étude a été réalisée en 2 phases. La 1^{ère} a consisté en l'injection en 4 points :

Point d'injection	Lieu-dit	Commune	Altitude (m NGF)	Distance de la source (m)
Fossé de la D993	Tiergues	St Afrique	585	2 600
Aven de la Combe	St Privat	Roquefort	545	1 820
Forage de Mme Couderc	Lauras	Roquefort	478	1 185
Ravin de la Merderie	Tiergues	Roquefort	490	1 500

A la demande de la mairie, un second traçage a été réalisé :

Point d'injection	Lieu-dit	Commune	Altitude (m NGF)	Distance de la source (m)
Forage M. Malleviale	Lauras	Roquefort	480	1 000

La localisation des points d'injection est illustrée sur la **carte 1**.

3.4 – TRACEURS UTILISES

Les traceurs utilisés étaient des traceurs fluorescents et salins faciles à mettre en oeuvre et à analyser par les laboratoires spécialisés.

Ont été utilisés :

- **5 000 g d'Uranine (Fluorescéine)** préalablement dilués dans 50 litres d'eau pour l'injection dans le fossé de la RD 993,
- **10 000 g de NaCl** préalablement dilués dans 40 litres d'eau pour l'injection dans le forage de Mme Couderc,
- **10 000 g de KI** préalablement dilués dans 20 litres d'eau pour l'injection dans l'aven de la Combe,
- **500 g de Sulforhodamine** préalablement dilués dans 4 000 litres d'eau,
- **1 000 g d'Uranine (Fluorescéine)** préalablement dilué dans 15 litres d'eau pour l'injection dans le forage de M. Malleviale.

Tableau 1 : Récapitulatif des injections réalisées

Point d'injection	Traceur	Quantité	Dilution
Fossé de la D993	Fluorescéine	5 kg	100 g/l
Aven de la Combe	Iodure de Potassium	10 kg	500 g/l
Forage de Mme Couderc	Chlorure de Sodium	10 kg	250 g/l
Ravin de la Merderie	Sulforhodamine G	500 g	125 mg/l
Forage M. Malleviale	Fluorescéine	1 kg	67 g/l

3.5 – CONDITIONS D'INJECTION

La 1^{ère} phase de l'opération de traçage s'est déroulée du 6 au 8 décembre 2005 par temps de pluie. En effet, il était primordial d'injecter les traceurs dans des conditions pluviométriques favorables pour entraîner la totalité du colorant vers la zone noyée.

Malgré ces conditions hydrogéologiques, il est à noter que l'ensemble des injections ont eu lieu après une période de déficit pluviométrique important lié aux faibles précipitations sur les derniers mois.

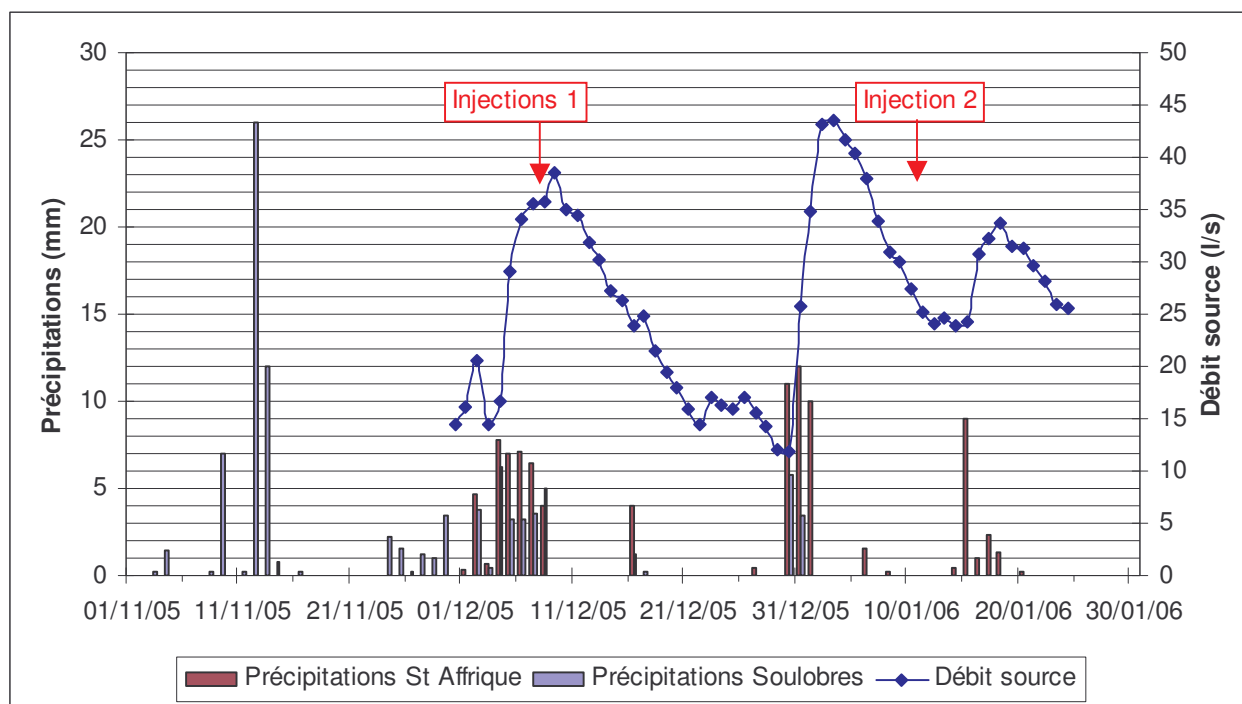


Figure 1 : Conditions pluviométriques

3.6 – DEROULEMENT DES INJECTIONS

3.6.1 – Traçage à l'Uranine dans le fossé de la RD 993

Le traceur a été injecté dans le fossé Nord-Ouest de la RD 993 dans les calcaires du Carixien. Ceux-ci, très fracturés, affleuraient largement dans le fossé. L'eau et le colorant se sont infiltrés sur 50 m de linéaire.

Date	Heure	Tache	Détail
6/12/2005	14 h30 – 15 h 00	Test de perméabilité et mise à saturation du fossé avec 10 m ³ d'eau	30 m ³ au total injectés Infiltration totale
	15 h 40	Injection de 5 kg de fluorescéine diluée dans 50 l d'eau	
	15 h 45 – 17 h 00	Injection de 20 m ³ d'eau	

3.6.2 – Traçage au NaCl dans le forage de Mme Couderc

Le forage de Mme Couderc est implanté dans les calcaires argileux du Carixien. Sa profondeur est de 90 m. Il est supposé atteindre, par conséquent, les calcaires et dolomies du Sinémurien. Le niveau statique avant l'opération était de 10,30 m/sol

Date	Heure	Tache	Détail
6/12/2005	16 h 00 – 17 h 20	Injection de 1000 l d'eau	4000 l de solution injectée à une concentration moyenne de 2,5 g/l
	22 h 45	Injection de 10 kg de NaCl dilué dans 40 l d'eau	
	23 h 00 – 2 h 00	Injection de 3000 l d'eau	

3.6.3 – Traçage à l'Iodure de Potassium dans l'aven de la Combe

D'après la carte géologique, l'aven est implanté dans les calcaires argileux du Carixien. Cependant, les observations de terrain laissent penser à une implantation dans les calcaires dolomitiques du Sinémurien, remontant ainsi légèrement la limite entre les 2 formations vers le Nord. L'Aven n'a pu être visité.

Date	Heure	Tache	Détail
7/12/2005	14 h 30	Essai d'infiltration avec 1000 l d'eau	3000 l de solution injectée à une concentration moyenne de 3,33 g/l
	15 h 00	Injection de 10 kg de KI dilué dans 20 l d'eau	
	15 h 10 – 16 h 30	Injection de 2000 l d'eau	

3.6.4 – Traçage à la Sulforhodamine dans le ruisseau de la Merd Erie

L'injection a été réalisée dans le ravin de la Merderie, sur le parking situé en dessous de l'école. L'injection des 4000 l de solution de Sulforhodamine à 0,125 g/l s'est déroulée sur 5h10.

Date	Heure	Tache	Détail
8/12/2005	10 h 00	Dilution de 500 g de sulforhodamine G dans 20 l d'eau	4000 l de solution injectée à une concentration de 0,125 g/l. Débit moyen d'injection : 13 l/h
	11 h 00	Dilution de la solution dans la citerne de 40 m3	
	11 h 25 – 16 h 35	Injection de la solution dans le ruisseau, régulation du débit d'injection	

3.6.5 - Traçage à l'Uranine dans le forage Malleviale

Le forage de M. Malleviale est implanté dans les calcaires argileux du Carixien. La profondeur et le niveau statique n'ont pu être mesurés (forage équipé ne pouvant pas laisser passer la sonde).

Date	Heure	Tache	Détail
11/01/2006	11 h 04- 11 h 15	Injection de 350 l d'eau dans le forage	4000 l de solution injectée à une concentration de 0,25 g/l. Débit moyen d'injection : 3160 l/h
	11 h 15 – 11 h 25	Injection de la solution d'Uranine (1kg dans 15 l d'eau)	
	11 h 25 – 12 h 30	Injection de 3650 l d'eau	

3.6 – ACQUISITION DES DEBITS

L'acquisition des débits a été réalisée à partir :

- d'un enregistreur de niveau d'eau en continu et d'une échelle limnimétrique dans le bassin de captage,
- de mesures au micromoulinet au niveau des 2 déversoirs de trop plein.

Les courbes de tarage ainsi établies et les variations débitmétriques des sources sont données en **annexe 2**. Les valeurs sont données avec 5% d'incertitude. En effet, les sources n'étant pas équipées de seuil calibré, il est souvent difficile d'effectuer des mesures précises. De plus, les heures de prélèvement pour l'AEP et les débits sont inconnus, ne permettant pas d'additionner les débits d'exhaure jaugés et les débits prélevés au même moment.

Les premières injections de traceur se sont effectuées dans des conditions favorables (lors d'une petite crue qui débute le 3 décembre)

L'injection dans le forage de M. Malleviale a été réalisée à la fin d'une phase de décrue (**figure 1**).

3.7 – SUIVI DE LA RESTITUTION

3.7.1 – Suivi au moyen de préleveurs automatiques

Le suivi de la restitution du traceur s'est fait grâce à des préleveurs automatiques installés dans le bassin du captage sur l'ensemble de la période de mesure (6/12/2005 18:00 au 25/01/06 18:00) avec un pas de temps variant de 1 h à 8 h suivant la période de mesure.

3.7.2 – Suivi en continu

Un Fluorimètre de terrain type SCHNEGG a été installé dans le ruisseau de Tendigues au droit de la source pour mesurer la restitution de Sulforhodamine lors de l'injection dans le ravin de Merderie. Le pas de temps d'enregistrement était de 10 minutes. L'appareil est constitué d'une sonde que l'on plonge dans l'eau et d'un boîtier d'acquisition.

L'eau, grâce au courant naturel, transite à l'intérieur d'une chambre optique équipée de 4 lampes différentes et de 3 photodiodes. Les 4 lampes s'allument à tour de rôle ce qui permet de mesurer les tensions et par conséquent les concentrations de 3 traceurs différents ainsi que la turbidité et la température.

3.8 – ANALYSE DES ECHANTILLONS

3.8.1 – Analyse des traceurs fluorescents par Spectrofluorimétrie

Les échantillons prélevés ont été stockés dans des flacons en verre brun fumé rincés à l'eau prélevée. L'analyse par spectrofluorimétrie a été réalisée au Laboratoire d'Hydrogéologie d'Orléans. Le spectrofluorimètre est un appareil mono-faisceau dont la résolution du balayage spectral est de l'ordre de 2 nm.

Sous l'action d'un rayon lumineux de longueur d'onde bien précise (**pic d'excitation**), les produits fluorescents émettent un rayonnement (**pic d'émission**) dont l'amplitude est proportionnelle à la concentration du produit analysé. La comparaison entre l'amplitude obtenue sur l'échantillon et l'amplitude d'une gamme étalon réalisée sur le même colorant permet alors de déterminer la concentration du produit.

La comparaison entre les longueurs d'ondes des échantillons analysés (**spectres d'émission et d'excitation**) et du traceur utilisé lors de l'injection permet de vérifier que l'intensité mesurée correspond bien aux produits recherchés.

Ainsi le spectre positif signifie que le colorant est présent dans l'échantillon analysé. A l'inverse, si le spectre est négatif, le produit analysé n'est pas le colorant mais un tout autre produit comme la matière organique ou divers polluants pouvant contenir un mélange fluorescent interférent avec la mesure.

Les caractéristiques spectrales des traceurs utilisés sont données dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Caractéristiques spectrales des traceurs utilisés

Traceur	Longueur d'onde d'excitation (λ_{exc})	Longueur d'onde d'émission ($\lambda_{ém}$)	Ecart ($\lambda_{ém} - \lambda_{exc}$)
Uranine	452	513	61
Sulforhodamine G	532	558	26

* en l'absence d'Uranine ** en présence d'Uranine

Dans la mesure où les concentrations en traceur sont très faibles, il peut être réalisé une **extraction** sur colonne à partir d'un échantillon moyen de 50 ml. La méthode permet de concentrer le produit et de l'extraire à l'aide d'une solution de méthanol d'1 ml.

Les analyses réalisées par la Laboratoire d'Orléans ont porté sur les éléments suivants :

- concentration corrigée de traceur en $\mu\text{g/l}$ détectée dans l'échantillon,
- spectre d'excitation,
- spectre d'émission.

3.8.2 – Analyse des traceurs salins

Les traceurs salins (Iodure de Potassium et Chlorure de Sodium) ont été analysés par le Laboratoire Départemental de la Charente Maritime (LDA 17).

Les ions Iodure ont été analysés en flux continu par la méthode de Sandell Kolthoff (seuil de détection 2 $\mu\text{g/l}$). Les ions Sodium ont été analysés par chromatographie ionique.

3.9 – RESULTATS DES TRAÇAGES

3.9.1 – Résultats de débit

Les données de débits et les courbes de tarage sont rassemblées en **annexe 2**. La méthode de mesure est présentée dans le **paragraphe 3.6**.

L'évolution sur la période de suivi est présenté sur la **figure 2**. La période a été marquée par 3 petites crues faisant suite à des phénomènes pluvieux (**figure 1**).

Sur la figure, les débits sont associés à la conductivité enregistrée à la source. Nous remarquons lors d'une crue, une baisse soudaine de la conductivité. Ce phénomène peut être lié à une dilution des eaux de nappe par des eaux d'infiltration rapide faiblement minéralisées (donc peu conductrices). Ensuite, nous observons une augmentation de la conductivité qui peut être due à la diminution de la part d'eau d'infiltration rapide et/ou à la mobilisation d'eau plus minéralisée (dont le temps de transit est plus important). Puis la conductivité diminue parallèlement au débit (vidange des eaux de pluie contenues dans le réservoir karstique?).

Il est à noter que des perturbations de conductivité peuvent être engendrées par des phénomènes anthropiques tels que le salage des routes, l'épandage...

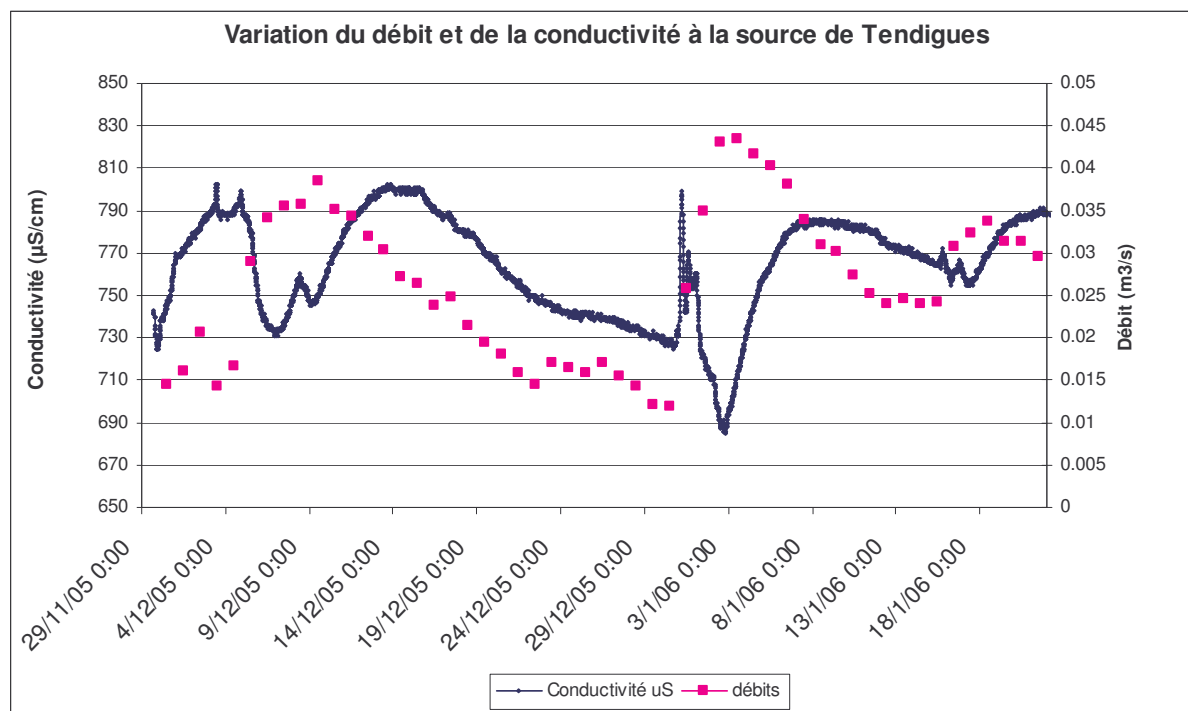


Figure 2 : Débits enregistrés à la source de Tendigues

3.9.2 – Résultats des traçages

3.9.2.1 – Résultats de l'injection d'Uranine dans le fossé de la RD 993

Une restitution en Uranine a été observée visuellement le 7 décembre 2005 à la source de Tendigues et dans le ruisseau en aval de la source. Aucune coloration n'a été remarquée en amont de la source.

Sur la courbe de restitution du traceur, les premières arrivées se situent le 7/12/05 vers 4h00 (soit environ 12h après l'injection). Le maximum (312,3 µg/l) est atteint très rapidement (le 7/12/05 vers 6h00 soit 14h après l'injection et 2h après le début de la restitution).

La courbe de restitution présente une forme globale uni-modale assez caractéristique. Les concentrations deviennent plus faibles à partir du 8 décembre. L'extrapolation des valeurs en fin de restitution donnent une durée totale d'environ 10 jours.

La vitesse d'apparition du traceur est de 487 m/h et la vitesse modale de 181,4 m/h.

Le taux de restitution, calculé grâce au débit de la source, est de 4,3 % soit 215 grammes de traceur restitué.

Le taux de dilution unitaire de $6,25 \cdot 10^{-8} \text{ l}^{-1}$ est important. Il permet de calculer la concentration maximale prévisible en cas de pollution par un produit dont les caractéristiques seraient semblables au traceur utilisé. Ainsi pour 10 kg de substance déversée, les teneurs maximales attendues à la source captée seraient de l'ordre de 625 µg/l pour des conditions hydrologiques identiques (source en crue).

Tableau 3 : Résultats du traçage du fossé de la RD 993 à l'Uranine

Lieu d'injection	Fossé RD 993
Date d'injection	6/12/05 15h40
Traceur	Uranine (5 kg)
Restitution	Source de Tendigues
Distance apparente	2 600 m
Masse restituée	215 g

TEMPS	
apparition du traceur	12 h
temps modal	14 h
durée de restitution	10 j

VITESSES	
Vitesse d'apparition	487 m/h
Vitesse modale	181 m/h

CONCENTRATIONS ET DILUTIONS	
Concentration initiale	100 g/l
Concentration max	312,3 µg/l
Dilution minimale	$3,12 \cdot 10^{-6}$
Dilution unitaire	$6,25 \cdot 10^{-8} \text{ l}^{-1}$

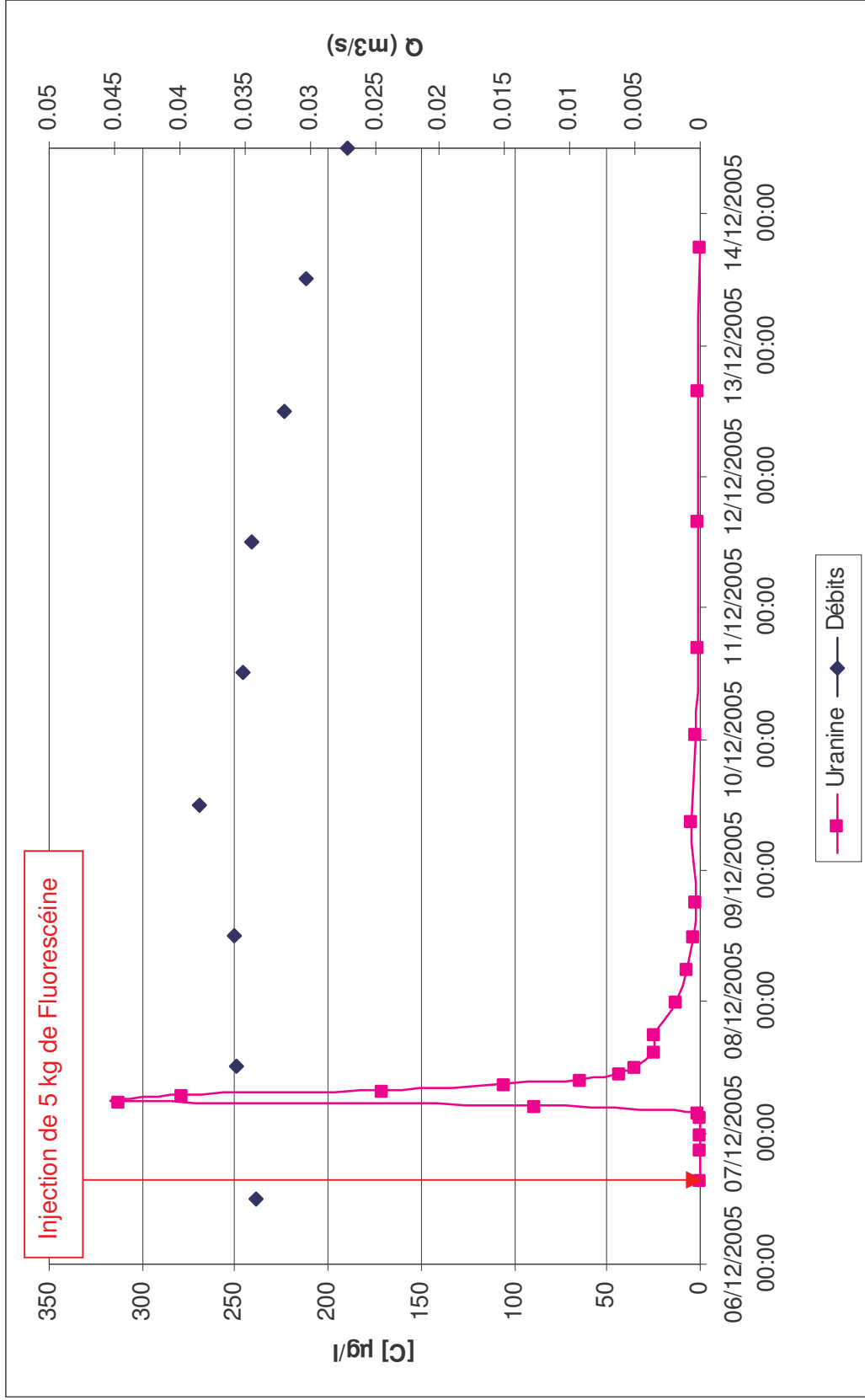


Figure 3 : Courbe de restitution en Uranine – fossé RD 993

3.9.2.2 – Résultats de l'injection de Chlorure de Sodium dans le forage de Mme Couderc

Les analyses réalisées par le laboratoire ne montrent aucune restitution de NaCl. Cependant, on observe, une augmentation soudaine de la conductivité des eaux de la source à partir du 7/12/05 vers 10h avec un pic le 8/12/05 à 10h30. La conductivité diminue jusqu'au 9/12/05 9h et réaugmente. Les débits ne variant pas de manière significative à ce moment, cette augmentation soudaine de conductivité pourrait être attribuée à l'arrivée du NaCl à la source.

Dans cette supposition, le temps d'arrivée du traceur serait de 12 h, soit une vitesse maximale de 98,75 m/h. Le temps d'arrivée du mode serait d'environ 36 h, soit une vitesse modale de 32,9 m/h. Ces données seront rapprochées des autres traçages (**paragraphe**).

Les conductivités variant naturellement, il n'est pas possible de réaliser d'étalonnages. Les concentrations, masse et taux restituées ne peuvent être calculés.

Tableau 7 : Résultats du traçage au NaCl dans le forage de Mme Couderc

Lieu d'injection	Forage Mme Couderc
Date d'injection	6/12/05 22h45
Traceur	NaCl (10 kg)
Restitution	Source de Tendigues
Distance apparente	1185 m
Masse restituée	?

TEMPS	
apparition du traceur	12 h
temps modal	36 h
durée de restitution	?

VITESSES	
Vitesse d'apparition	99 m/h
Vitesse modale	33 m/h

CONCENTRATIONS ET DILUTIONS	
Concentration initiale	?
Concentration max	?
Dilution minimale	?
Dilution unitaire	?

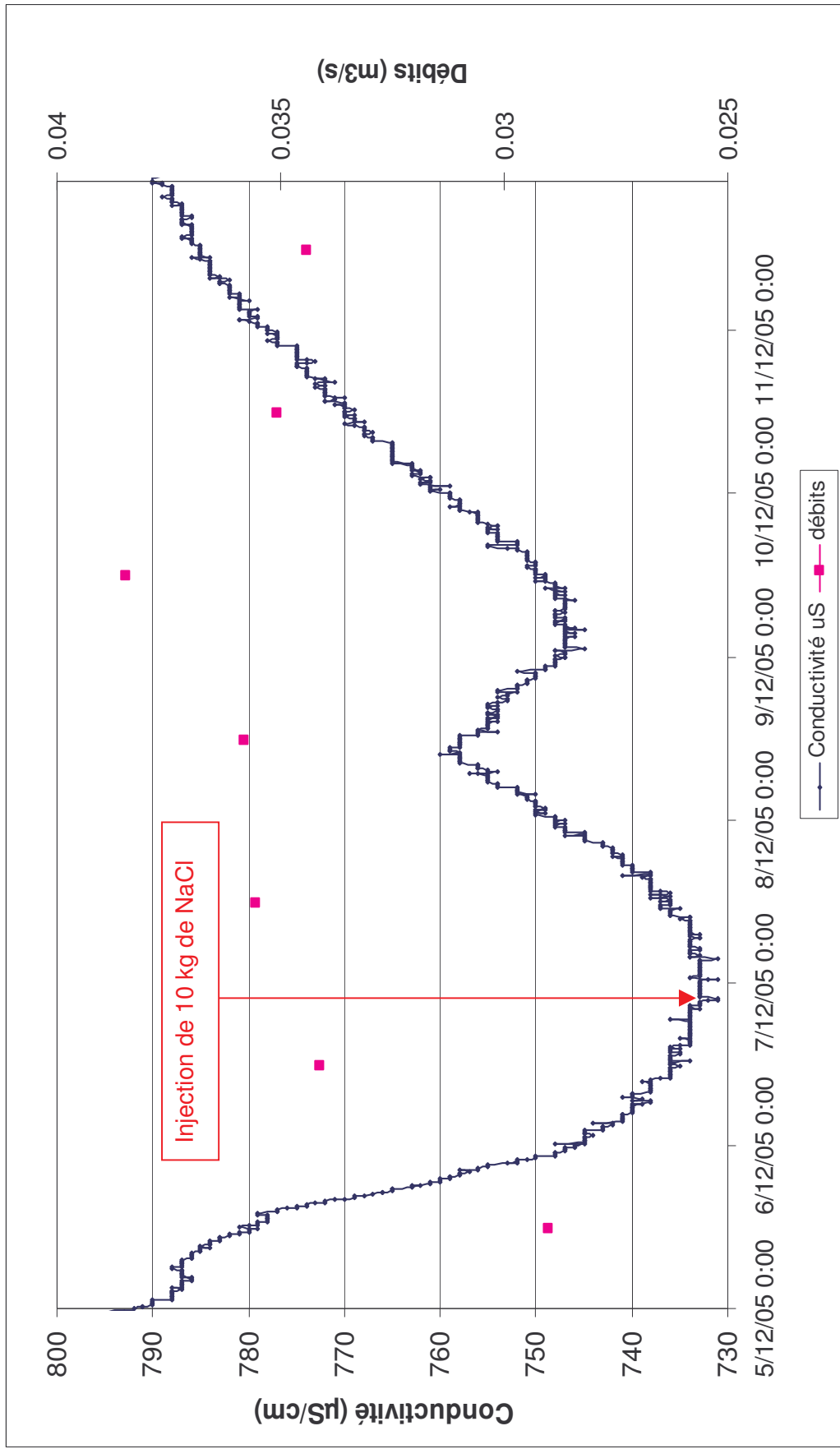


Figure 4 : Courbe de conductivité – traçage dans le forage de Mme Couderc

3.9.2.3 – Résultats de l'injection de Iodure de Potassium dans l'Aven de la Combe

Une faible signal en ion iodure a été observé sur les échantillons entre le 8 et le 21 décembre 2005 (**figure 5**). Cependant, le signal est trop faible pour parler de restitution (concentrations entre 2 et 3 µg/l pour une limite de détection de 2 µg/l).

Les raisons pouvant expliquer l'absence apparente de restitution :

- une concentration en ions Iodure trop faible pour être détectée due :
 - à une masse injectée insuffisante par rapport au volume d'eau mobilisé,
 - au piégeage du traceur dans un siphon entraînant un relargage étalé dans le temps,
- l'aven ne se situe pas dans l'aire d'alimentation de la source de Tendigues.

Tableau 8 : Résultats du traçage de l'aven de la Combe au KI

Lieu d'injection	Aven de la Combe
Date d'injection	07/12/05 15:00
Traceur	KI (10 kg)
Restitution	?
Distance apparente	1 820 m
Masse restituée	50 g

TEMPS	
apparition du traceur	?
temps modal	?
durée de restitution	?

VITESSES	
Vitesse d'apparition	?
Vitesse modale	?

CONCENTRATIONS ET DILUTIONS	
Concentration initiale	500 g/l
Concentration max	3 µg/l
Dilution minimale	?
Dilution unitaire	?

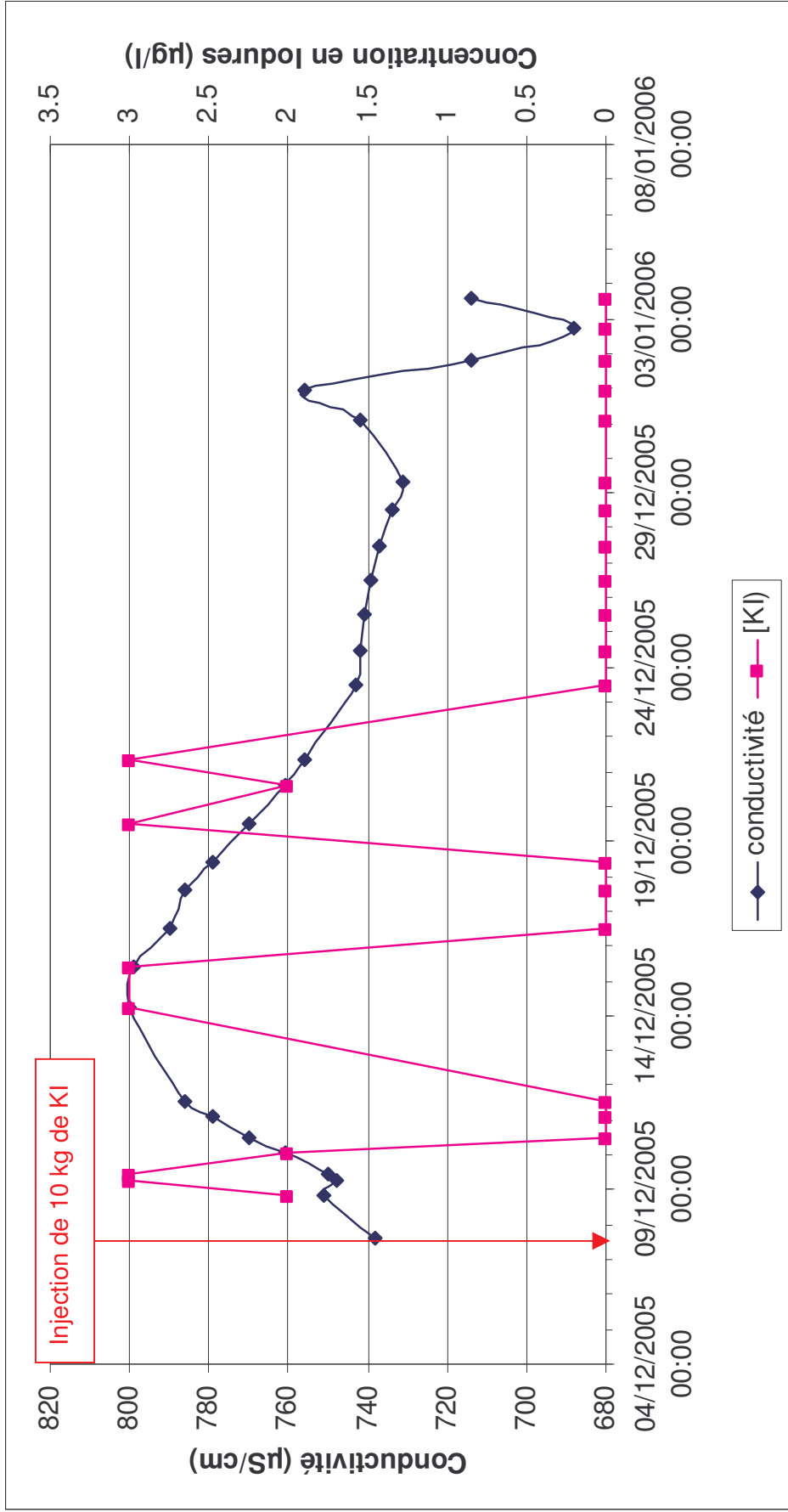


Figure 5 : Courbe des concentrations mesurées en ions iodures – aven de la Combe

3.9.2.4 – Résultats de l'injection de Sulforhodamine dans le ravin de Merderie

Le but de ce traçage était de vérifier l'alimentation ou non de la source de Tendigues par le ravin de la Merderie.

La restitution de la sulforhodamine a été suivie dans le ravin de Tendigues au droit de la source grâce à un fluorimètre de terrain. Les concentrations ont parallèlement été suivies à la source par l'intermédiaire d'un préleveur automatique. Les échantillons prélevés ont ensuite été analysés au laboratoire d'Orléans. Les courbes de restitution sont présentées sur la **figure 6**.

On observe une belle restitution du traceur dans le cours d'eau.

Dans la source, seuls 3 échantillons sont positifs sur les 24 analysés. De plus les concentrations sont très faibles, ne garantissant pas une réelle restitution du traceur dans la source.

Par conséquent, dans les conditions de traçage, le ravin de Tendigues ne semble pas alimenter la source.

Tableau 9 : Résultats du traçage au ravin de la Merderie

	Ravin
Lieu d'injection	Ravin de la Merderie
Date d'injection	8/12/05 11h25-16h35
Traceur	Sulforhodamine(500 g)
Restitution	Ravin de Tendigues
Distance apparente	1 500 m
Masse restituée	186 g

TEMPS	
apparition du traceur	1h36min
temps modal	
durée de restitution	7 h

VITESSES	
Vitesse d'apparition	941 m/s
Vitesse modale	

CONCENTRATIONS ET DILUTIONS	
Concentration initiale	125 mg/l
Concentration max	138 µg/l
Dilution minimale	$1,1.10^{-3}$
Dilution unitaire	$2,77.10^{-7} l^{-1}$

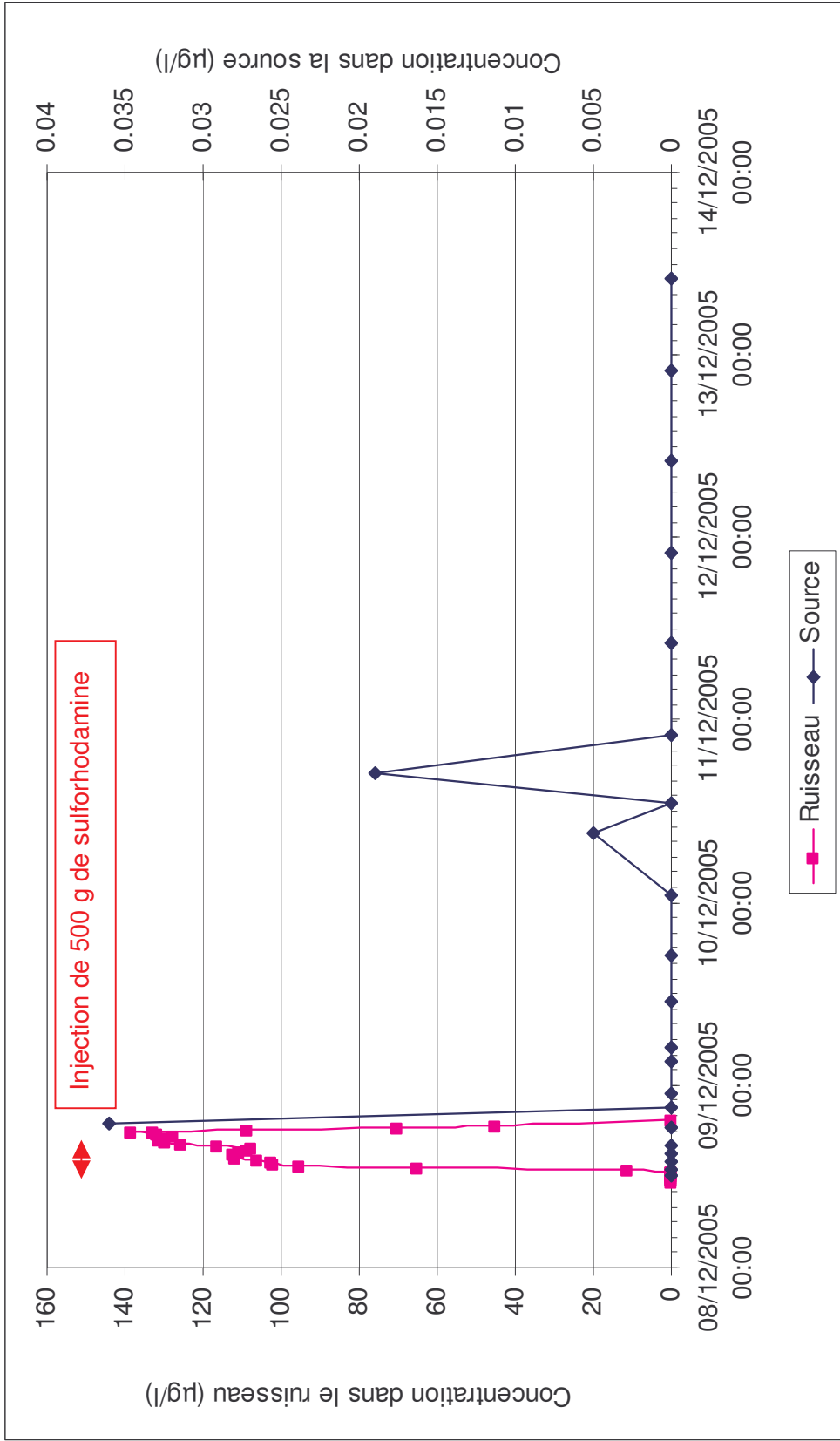


Figure 6 : Courbe des concentrations mesurées Sulfathiazole – Ravin de Merderie

3.9.2.5 – Résultats de l'injection d'Uranine dans le forage de M. Malleviale

Une restitution en Uranine a été observée après analyse des échantillons à la source de Tendigues.

Sur la courbe de restitution du traceur (**figure 7**), les premières arrivées se situent le 12/01/06 vers 18h00 (soit environ 30h45min après l'injection). La concentration maximale (4,7 µg/l) est atteinte le 13/01/06 vers 12h00 soit 48h45min après l'injection et 18h après le début de la restitution.

La courbe de restitution présente une forme globale uni-modale assez caractéristique. Les concentrations deviennent plus faibles à partir du 25 janvier. L'extrapolation des valeurs en fin de restitution donnent une durée totale d'environ 13 jours.

La vitesse d'apparition du traceur est de 32,5 m/h et la vitesse modale de 20,5 m/h.

Le taux de restitution, calculé grâce au débit de la source, est de 1,8 % soit 18 grammes de traceur restitué, ce qui est très faible.

Le taux de dilution unitaire est de $4,7 \cdot 10^{-9} \text{ l}^{-1}$. Il permet de calculer la concentration maximale prévisible en cas de pollution par un produit dont les caractéristiques seraient semblables au traceur utilisé. Ainsi pour 10 kg de substance déversée, les teneurs maximales attendues à la source captée seraient de l'ordre de 47 µg/l pour des conditions hydrologiques identiques.

Tableau 10 : Résultats du traçage du fossé de la RD 993 à l'Uranine

Lieu d'injection	Forage Malleviale
Date d'injection	11/01/2006 11:15
Traceur	Uranine (1 kg)
Restitution	Source de Tendigues
Distance apparente	1 000 m
Masse restituée	18 g

TEMPS	
apparition du traceur	30 h 45 min
temps modal	48 h 45 min
durée de restitution	13 j

VITESSES	
Vitesse d'apparition	32,5 m/h
Vitesse modale	20,5 m/h

CONCENTRATIONS ET DILUTIONS	
Concentration initiale	67 g/l
Concentration max	4,7 µg/l
Dilution minimale	$7 \cdot 10^{-8}$
Dilution unitaire	$4,7 \cdot 10^{-9} \text{ l}^{-1}$

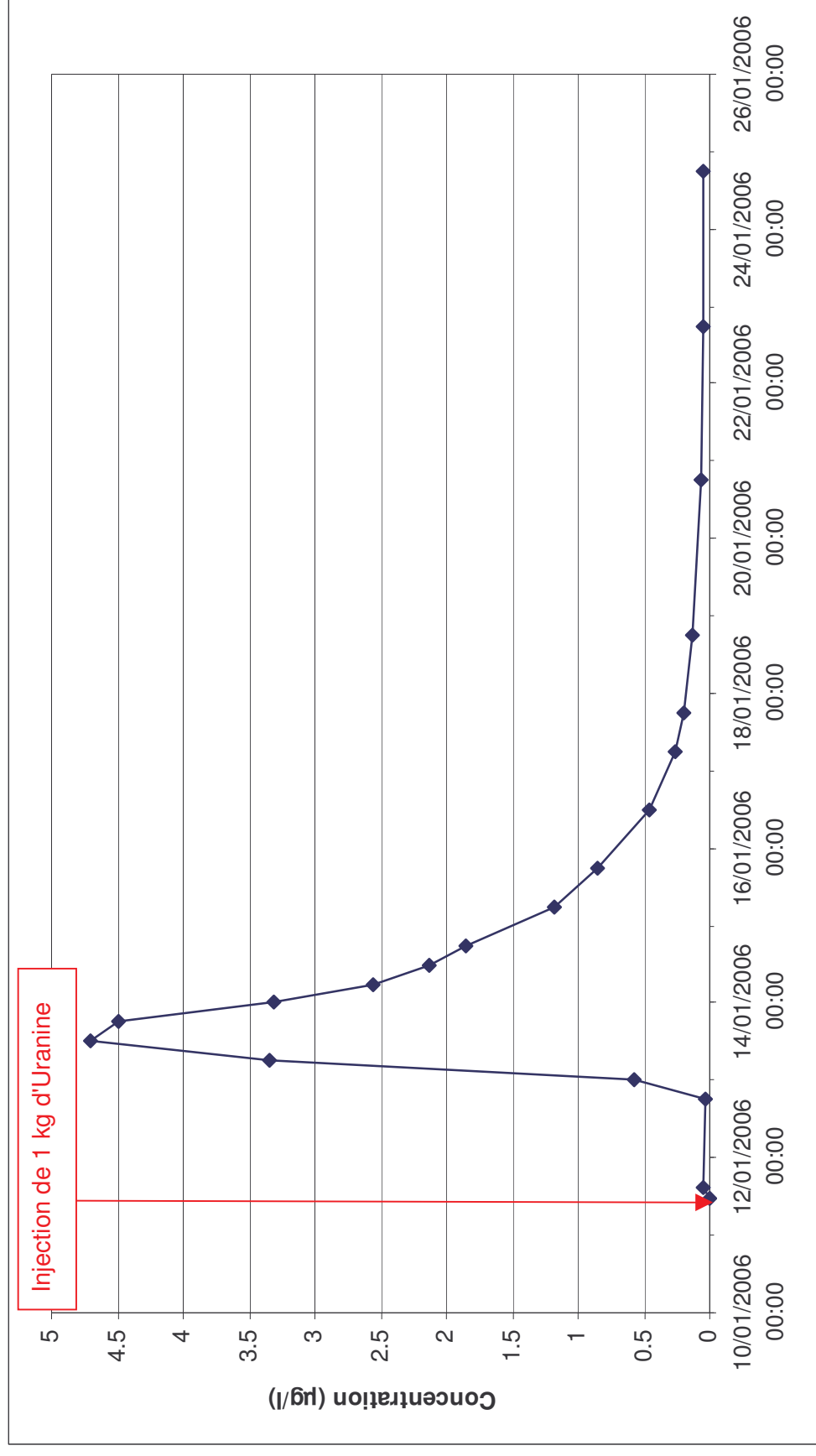
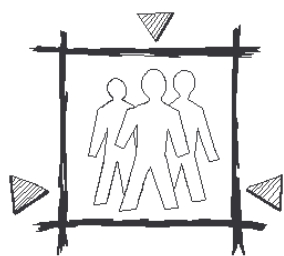


Figure 7 : Courbe des concentrations mesurées en Uranine – Forage de M. Malleviaie

Tableau 11 : Récapitulatif des résultats du multitraçage

Lieu d'injection	Fossé RD 993	Forage Mme Couderc	Aven de la Combe	Ravin de la Merderie	Forage Mallevalie
Date d'injection	6/12/05 15h40	6/12/05 22h45	07/12/05 15:00	8/12/05 11h25-16h35	11/01/2006 11:15
Traceur	Uranine (5 kg)	NaCl (10 kg)	KI (10 kg)	Sulforhodamine(500 g)	Uranine (1 kg)
Restitution	Source de Tendigues	Source de Tendigues	?	Source de Tendigues	Source de Tendigues
Distance apparente	2 600 m	1185 m	1 820 m	1 500 m	1 000 m
Masse restituée	215 g	?	50 g	2,2 g	18 g
TEMPS					
apparition du traceur	12 h	12 h	?	?	30 h 45 min
temps modal	14 h	36 h	?	?	48 h 45 min
durée de restitution	10 j	?	?	?	13 j
VITESSES					
Vitesse d'apparition	487 m/h	99 m/h	?	?	32,5 m/h
Vitesse modale	181 m/h	33 m/h	?	?	20,5 m/h
CONCENTRATIONS ET DILUTIONS					
Concentration initiale	100 g/l	?	500 g/l	?	67 g/l
Concentration max	312,3 µg/l	?	3 µg/l	?	4,7 µg/l
Dilution minimale	3,12 10 ⁻⁶	?	?	?	7 10 ⁻⁸
Dilution unitaire	6,25 10 ⁻⁸ l ⁻¹	?	?	?	4,7 10 ⁻⁹ l ⁻¹



4 – APPORT DES TRAÇAGES A LA DEFINITION DE L'AIRE D'ALIMENTATION DE LA SOURCE CAPTEE

D'après les résultats analytiques des traçages, nous pouvons émettre quelques conclusions quant à la définition de l'aire d'alimentation de la source de Tendigues.

4.1 – TRAÇAGE A PARTIR DU FOSSE DE LA RD 993

Ce traçage permet de conforter la partie Ouest de l'aire d'alimentation de la source. Même si, topographiquement, la RD 993 coupe le bassin versant de surface et rattache la butte de Tiergues au bassin versant topographique du Ravin de Maxillou (sources de Baldassé, Roquefort), les fortes perméabilités dues à la fracturation importante des calcaires ont entraîné l'infiltration des eaux et une restitution du traceur à la source de Tendigues.

La vitesse d'apparition du traceur est très élevée (487 m/h). Malgré une faible masse restituée, les dilutions minimales et unitaires sont faibles. Par conséquent, la source est très vulnérable aux pollutions diverses et notamment aux pollutions accidentelles d'origine routière.

Les causes possibles de cette faible restitution sont :

- l'existence d'autres exutoires non surveillés (le ruisseau de Tendigues est apparu vert en aval de la source mais il est possible qu'il y est une alimentation directe de la rivière),
- des absorptions importantes du traceur au cours de son transit,
- une mauvaise quantification des débits qui pourrait sous-évaluer la masse restituée,
- l'existence d'une zone noyée importante qui stockerait le traceur.

L'analyse des courbes de restitution et DTS indique que le traceur a emprunté un système bien organisé selon un drain actif dont l'exutoire principal est la source de Tendigues. Ce drain serait de même direction (WNW-ESE) que les accidents régionaux principaux (failles de Tiergues, de St Jean d'Alcapies...). Le pendage des couches est également favorable à un écoulement en direction de la source.

4.2 – TRAÇAGE A PARTIR DU FORAGE DE MME COUDERC

Les mesures de conductivité permettent de soupçonner une restitution du NaCl dans la source de Tendigues. Cependant, des mesures quantitatives n'ont pu être réalisées. Si l'augmentation de conductivité correspond à l'arrivée de NaCl, les vitesses d'arrivées sont rapides (pratiquement 100 m/h).

4.3 – TRAÇAGE A PARTIR DE L'AVEN DE LA COMBE

Ce traçage soulève des incertitudes sur la circulation des eaux depuis l'aven de la Combe.

De très faibles concentrations en ion iodure ont été décelées, par bouffées, dans la source de Tendigues ce qui n'exclue pas que le traceur ait pu apparaître à cet exutoire mais à des teneurs proches des seuils de détection des appareils.

Cependant, il n'est pas exclu que le traceur ne soit pas ressorti à la source de Tendigues. En effet, il semblerait que le traceur ait été injecté dans les calcaires et dolomies du Sinémurien (I₃₋₄), en limite avec les calcaires argileux et marnes du Carixien. Ces derniers, de plus faible perméabilité, peuvent former une barrière et dévier les eaux.

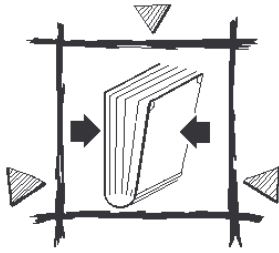
De ce fait, la liaison entre l'aven de la Combe et la source de Tendigues pourra être confirmée par un nouveau traçage réalisé avec une masse de traceur plus forte.

4.4 – TRAÇAGE A PARTIR DU RAVIN DE LA MERDERIE

Ce traçage n'a pas pu certifier l'hypothèse selon laquelle la source de Tendigues est alimentée par le ravin de Merderie. En effet, quelques traces de sulforhodamine ont été retrouvées dans les eaux de la source mais les faibles concentrations et leur irrégularité dans le temps ne permettent pas de conclure à une restitution, tout du moins dans les conditions de traçage.

4.5 – TRAÇAGE A PARTIR DU FORAGE DE M. MALLEVIALE

Ce traçage a permis de déterminer les modes d'écoulement souterrain depuis Lauras, zone de résidence et d'activités de l'aire d'alimentation de la source. Les vitesses de transit sont élevées (32,5 m/h) mais semblent moins élevées que les vitesses de transit supputées depuis le forage de Mme Couderc (99 m/h).



5 – CONCLUSION

Ces résultats ont permis de confirmer les limites du bassin d'alimentation proposées par J. RICARD dans son avis d'hydrogéologue agréé même si aucun traçage n'a pu être réalisé dans l'aire des formations liasiques connexes au bassin versant faute de points d'injection. La surface proposée de 8 km² devra être confirmée par une connaissance plus précise des débits de la source (flux de surverse et débit d'exploitation) avec la mise en place d'une station hydrométrique.

Une alimentation de la source par le ravin de Merderie n'a pu être démontrée dans les conditions de traçage, malgré quelques échantillons positifs. Les conditions de moyennes eaux du ravin semblent être moins favorables à des pertes du ruisseau par rapport à une situation d'étiage sévère ou les eaux du ravin semblent se perdre en quasi totalité. De ce fait, un traçage en basses eaux (septembre) pourrait être envisagé.

D'un point de vue vulnérabilité, la source apparaît comme très sensible à une pollution accidentelle se produisant sur la RD 993. Les vitesses d'arrivées sont très importantes (12h) laissant peu de temps à l'exploitant pour intervenir en cas de pollution. L'impact sur la qualité des eaux de la source serait très important avec des valeurs qui dépasseraient largement les limites des eaux destinées à la consommation humaine.

De même, le traçage du forage de M. Malleviale a démontré qu'un déversement non contrôlé de produits potentiellement toxiques dans un forage situé sur le bassin d'alimentation aurait un impact non négligeable sur la qualité des eaux. Un inventaire et une régularisation de l'ensemble des ouvrages devront être réalisés. Les têtes de chaque forage doivent faire l'objet d'une protection renforcée afin d'éviter toutes pollutions malencontreuses et ruissellements dans l'ouvrage.

Cependant, cette étude n'a pas pu confirmer avec certitude une alimentation depuis l'Aven de la Combe. Aucune restitution n'a pu être mesurée. Elle est à mettre en relation avec les conditions difficiles d'injection (accessibilité très délicate) et la présence de niveaux marneux à proximité (piégage possible du traceur). Il serait préférable de renouveler l'opération avec des quantités de traceurs plus importantes.



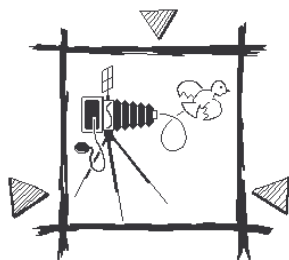
CARTES

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Carte des points d'injection	32
Carte 2 : Carte et coupe géologique	33

Carte 1 : Carte des points d'injection

Carte 2 : Carte et coupe géologique



PHOTOS

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Injection d'Uranine dans le fossé de la RD 993 à Tiergues	35
Photo 2 : Injection de KI dans l'Aven de la Combe (1)	35
Photo 3 : Injection de KI dans l'Aven de la Combe (2)	36
Photo 4 : Injection de NaCl dans le forage de Mme Couderc	36
Photo 5 : Injection de Sulforhodamine dans le Ravin de Merd Erie (1)	37
Photo 6 : Injection de Sulforhodamine dans le Ravin de Merd Erie (2)	37
Photo 7 : Injection d'Uranine dans le forage de M. Malleviale (1)	38
Photo 8 : Injection d'Uranine dans le forage de M. Malleviale (2)	38
Photo 9 : Restitution de l'Uranine dans la source de Tendigues	39
Photo 10 : Restitution de l'Uranine dans le ruisseau de Tendigues	39



Photo 1 : Injection d'Uranine dans le fossé de la RD 993 à Tiergues



Photo 2 : Injection de KI dans l'Aven de la Combe (1)



Photo 3 : Injection de KI dans l'Aven de la Combe (2)



Photo 4 : Injection de NaCl dans le forage de Mme Couderc



Photo 5 : Injection de Sulforhodamine dans le Ravin de Merd Erie (1)



Photo 6 : Injection de Sulforhodamine dans le Ravin de Merd Erie (2)



Photo 7 : Injection d'Uranine dans le forage de M. Malleviale (1)



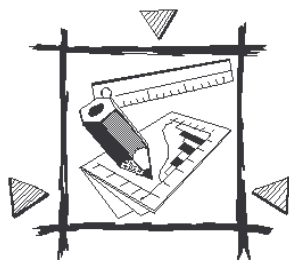
Photo 8 : Injection d'Uranine dans le forage de M. Malleviale (2)



Photo 9 : Restitution de l'Uranine dans la source de Tendigues



Photo 10 : Restitution de l'Uranine dans le ruisseau de Tendigues



ANNEXES

LISTES DES ANNEXES

Annexe 1 : Base théorique de l'interprétation des traçages.....	41
Annexe 2 : Résultats des traçages.....	42
Annexe 3 : Calcul des débits.....	43
Annexe 4 : Données météorologiques	44

Annexe 1 : Base théorique de l'interprétation des traçages

Annexe 2 : Résultats des traçages

Annexe 3 : Calcul des débits

Annexe 4 : Données météorologiques