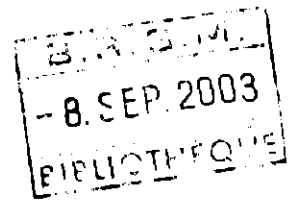


Document public



Evaluation de la ressource en eau souterraine des Corbières karstiques

Essai de traçage des pertes du Verdoble (juillet 2001)

BRGM/RP-52211-FR
juin 2003

Étude réalisée dans le cadre du projet de Recherche
PDR03EAU KARSTEAU, Module Corbières

N. Courtois
avec la collaboration de
N. Dörfliger, B. Ladouche, M. Bakalowicz, J. Cubizolles, JL. Izac

Mots clés : Karst, Hydrogéologie, Essais de traçage, Agly, Verdoube, Corbières, Pyrénées-Orientales.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Courtois N. avec la collaboration de Bakalowicz M., Cubizolles J., Dörfliger N., Izac J.L., Ladouche B. (2003) – CORBIERES : Évaluation de la ressource en eau souterraine des Corbières karstiques. Essai de traçage des pertes du Verdoube. Rapport BRGM/RP-52211-FR, 82 p., 25 fig.

© BRGM, 2003, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'essai de traçage décrit ici s'inscrit dans le cadre du projet « Corbières », financé par les Conseils Généraux de l'Aude et des Pyrénées Orientales, ainsi que l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse et le BRGM (dotation de recherche scientifique), et dont l'objectif est d'évaluer les ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières. A l'issue d'une première étude bibliographique, le bassin d'alimentation des deux sources karstiques majeures de Fontestramar et Fontdame y compris le synclinal du Bas-Agly (secteur de Cases-de-Pène) a été sélectionné, avec deux autres secteurs, comme potentiellement intéressant pour la ressource en eau.

En juillet 2001, le BRGM a procédé à l'injection de 20 kg de fluorescéine dans les pertes (totales en cette période de basses eaux) du Verdoble (affluent principal de l'Agly), en aval de Tautavel (66). L'objectif de cet essai de traçage était d'essayer d'apporter des réponses à différentes interrogations :

- Existe-t-il une relation hydraulique entre ces pertes d'eaux de surface et le système karstique de Fontestramar/Fontdame, et pourra-t-elle être démontrée par traçage ?
- Pourrait-on mettre en évidence une relation hydraulique au contact entre les massifs calcaires et l'aquifère sédimentaire plio-quadernaire du bassin du Roussillon ?
- Existe-t-il une relation entre ces eaux de surface et le flanc sud du synclinal du Bas-Agly, système dans lequel est implanté le forage de Cases-de-Pène, qui faisait l'objet dans la même période d'un essai de pompage dans la perspective d'une exploitation future pour l'alimentation en eau potable ?

15 points ont fait l'objet d'un suivi temporel plus ou moins serré en fonction de l'intérêt stratégique :

- sources de Fontdame et Fontestramar (échantillonnage journalier, et suivi en continu par fluorimètres installés in situ),
- 3 sources de la forteresse de Salses (échantillonnage deux à trois fois par semaine),
- forage de Cases-de-Pène (échantillonnage journalier),
- et enfin 10 forages implantés dans les formations pliocènes (échantillonnage deux à trois fois par semaine).

Sur ces 15 points, les résultats synthétiques sont les suivants :

- la restitution en traceur fluorescent est avérée sur les sources karstiques de la forteresse de Salses, de Fontdame et de Fontestramar,
- un doute existe quant aux résultats positifs ponctuels (en juillet et août 2002) à des concentrations très peu supérieures au bruit de fond, sur le forage de Cases-de-Pène et le forage F3 exploité pour l'alimentation en eau potable de Rivesaltes,
- aucun des 9 autres forages implantés dans le Pliocène n'a révélé de concentration en fluorescéine supérieure au bruit de fond.

Le temps de première arrivée est de l'ordre de 1,5 mois aux sources de Salses, et de deux mois à Fontdame et Fontestramar, ce qui donne, pour ces trois points, une vitesse de l'ordre de 15 à 19 m/h. Les concentrations restent très faibles, inférieures au ppb. La restitution se présente sous forme de « bouffées » de traceur associées aux épisodes de crues, et qui apparaissent encore plus d'un an après l'injection.

Les taux de restitution qui ont pu être estimés à Fontdame et Fontestramar restent faibles : à fin août 2002, sur les 20 kg de fluorescéine injectés, la masse restituée est de l'ordre de 61 g à Fontdame, et 2,7 kg à Fontestramar, soit une restitution en masse d'environ 14 % cumulée sur les deux sources. L'ordre de grandeur du rapport des taux de restitution des deux sources est proportionnel à celui de leurs débits respectifs.

Au vu des caractéristiques de la restitution, il apparaît que le traçage n'a pas concerné un conduit karstique unique connecté à l'exutoire, mais plutôt une large part de la zone noyée du système karstique qui ne semble pas drainée par un (des) drain(s) principal(aux) actuellement fonctionnel(s). Seules les pluies notables paraissent capables de mobiliser une partie des eaux de cette zone. Ainsi, le traceur semble stocké (« piégé ») dans des volumes sans doute importants du système karstique (cavités noyées, systèmes annexes au drainage,...), et ne rejoint les exutoires que par sollicitation à la faveur des crues.

La complexité des résultats de cet essai de traçage est le reflet de celle des systèmes karstiques des Corbières, et en particulier celui de Fontestramar/Fontdame.

*Il scintille le Verdoble
Mais le cours de son argent
Ni les dollars, ni les roubles
Ne te le paieront comptant*

*Pas la peine que tu te mouilles
A percer ses coffres forts
C'est dans l'œil de ses grenouilles
Que sont ses pépites d'or*

« Une rivière des Corbières »

de Claude Nougaro (extrait)

Sommaire

1. Contexte et objectifs de l'essai de traçage	11
1.1. Contexte : le projet "CORBIERES"	11
1.2. Objectifs de l'essai de traçage des pertes.....	14
1.2.1. Rôle et importance des pertes de l'Agly et du Verdoble.....	14
1.2.2. Contact calcaires jurassiques / Pliocène du Roussillon	16
1.2.3. Relation avec le synclinal du Bas-Agly	16
1.3. Contexte amenant au choix du traçage du Verdoble.....	16
2. Description de la mise en œuvre de l'essai de traçage des pertes du Verdoble	17
2.1. Choix du point d'injection	17
2.2. Choix et équipement des points de suivi en aval.....	19
2.2.1. Sources de Fontdame et de Fontestramar	19
2.2.2. Sources de la forteresse de Salses	21
2.2.3. Forage de Cases-de-Pène	22
2.2.4. Forages dans le Pliocène	22
2.3. Protocole d'injection.....	25
2.3.1. Choix du traceur fluorescent.....	25
2.3.2. Détermination de la quantité de fluorescéine à injecter	25
2.3.3. Conditions d'injection	28
3. Résultats de l'essai de traçage	31
3.1. Points positifs, points négatifs.....	31
3.2. Vitesses et temps de passage	31
3.2.1. Sources de la Forteresse de Salses	31
3.2.2. Source de Fontdame.....	32
3.2.3. Source de Fontestramar.....	35
3.3. Analyses quantitatives sur les courbes de restitution	39
3.3.1. Masse restituée, temps moyen de résidence, vitesse moyenne	39
3.3.2. Taux de restitution de la fluorescéine à la source de Fontdame	40
3.3.3. Taux de restitution de la fluorescéine à la source de Fontestramar	42
3.4. Critique des données	44

3.4.1. Sources d'incertitudes sur les données	44
3.4.2. Fluorescence induite par la turbidité	45
3.4.3. Réponse en uranine induite par un autre traceur.....	46
3.4.4. Analyse corrélatoire.....	48
4. Implications sur la connaissance du système karstique de Fontestramar-Fontdame.....	57
4.1. Caractéristiques principales de la restitution	57
4.2. Conséquences sur le système karstique.....	57
5. Bibliographie.....	59

Liste des annexes

Annexes	61
Ann. 1 : Planches photographiques	63
Ann. 2 : Résultats des analyses en uranine au laboratoire	67
Analyses des sources de la Forteresse de Salses	69
Analyses des échantillons de Fontdame	70
Analyses des échantillons de Fontestramar.....	71
Ann. 3 : Interprétation des résultats de Fontdame par épisode de crue	73
Ann. 4 : Interprétation des résultats de Fontestramar par épisode de crue	79

Liste des figures

Figure 1 : Carte de la zone d'étude avec les différents secteurs retenus à la suite de la synthèse bibliographique (extraite du rapport BRGM (Dörfliger, Schoen, Giroux, 2001)	12
Figure 2 : Carte des secteurs des Corbières Orientales et du synclinal du Bas-Agly. Système de Fontestramar-Fontdame et de Cases-de-Pène (extraite du rapport BRGM (Dörfliger, Schoen, Giroux, 2001).....	13
Figure 3 : Carte de localisation du réseau hydrographique Agly-Verdoble.....	15
Figure 4 : Localisation des profils de jaugeages sur l'Agly et le Verdoble	18
Figure 5 : Localisation du point d'injection et des points de suivi du traçage du Verdoble	23
Figure 6 : Estimation d'une masse de traceur équivalente.....	27
Figure 7 : Concentrations en uranine sur les sources de la forteresse de Salses	32
Figure 8 : Concentrations en uranine mesurées aux sources de Fontdame et de Salses, avec les pluies journalières à Tautavel (08-11/2001)	33
Figure 9 : Concentrations en uranine mesurées aux sources de Fontdame et de Salses, avec les pluies journalières à Tautavel (02-08/2002) - Les données de pluie de juillet et août 2002, non disponibles, n'ont pas été reportées	34
Figure 10 : Concentrations en uranine mesurées aux sources de Fontestramar et de Salses, avec les pluies journalières à Tautavel (08-11/2001).....	36
Figure 11 : Concentrations en uranine mesurées aux sources de Fontestramar et de Salses, avec les pluies journalières à Tautavel (02-08/2002) - Les données de pluie de juillet et août 2002, non disponibles, n'ont pas été reportées	37
Figure 12 : Taux de restitution cumulé de la fluorescéine à la source de Fontdame ...	41
Figure 13 : Taux de restitution cumulé de la fluorescéine à la source de Fontestramar	43
Figure 14 : Concentrations en uranine et turbidité mesurées à Fontdame.....	45
Figure 15 : Concentrations en uranine et turbidité mesurées à Fontestramar.....	46
Figure 16 : Fontdame : Concentrations en uranine et sulfo G, et turbidité, en 2002 ...	47
Figure 17 : Fontdame : Concentrations en uranine et sulfo G, et turbidité, en 2001 ...	47
Figure 18 : Fontestramar : Concentrations en uranine et sulfo G, et turbidité	48
Figure 19 : Fontdame : Corrélogrammes simples du signal en fluorescence, de la turbidité, et du débit de la source (pas de temps des données = 1 h)	49
Figure 20 : Fontdame : Corrélogramme croisé du signal en fluorescence et turbidité en fonction du débit de la source (pas de temps des données = 1 h)	50

Figure 21 : Fontdame : Corrélogramme croisé du signal en fluorescence et turbidité en fonction de la pluie journalière à Tautavel (pas de temps des données = 1 j)	51
Figure 22 : Fontdame : Corrélogramme croisé du signal en fluorescence en fonction de la turbidité (pas de temps des données = 1 h).....	52
Figure 23 : Fontestramar : Corrélogrammes simples du signal en fluorescence, de la turbidité, et du débit de la source (pas de temps des données = 1 h)	53
Figure 24 : Fontestramar : Corrélogramme croisé du signal en fluorescence et turbidité en fonction du débit de la source (pas de temps des données = 1 h)	54
Figure 25 : Fontestramar : Corrélogramme croisé du signal en fluorescence et turbidité en fonction du débit de la source (pas de temps des données = 1 h)	54

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résultats de jaugeage de l'Agly au micro-moulinet (cf. Figure 4)	17
Tableau 2 : Résultats de jaugeage du Verdoble au micro-moulinet (cf. Figure 4).....	17
Tableau 3 : Spécifications des fluorimètres de terrain GGUN-FL	20
Tableau 4 : Récapitulatif des points de suivi du traçage du Verdoble.....	24
Tableau 5 : Seuils de toxicité pour l'uranine	25
Tableau 6 : Masse de fluorescéine selon la formule 2 de l'Unesco (1973-1983).....	27
Tableau 7 : Masses de fluorescéine estimées	32
Tableau 8 : Vitesses et temps de passage des principaux pics enregistrés à Fontdame (d'après les données enregistrées par le fluorimètre de terrain)	35
Tableau 9 : Vitesses et temps de passage des principaux pics enregistrés à Fontestramar (d'après les données enregistrées par le fluorimètre de terrain)	38

1. Contexte et objectifs de l'essai de traçage

1.1. CONTEXTE : LE PROJET « CORBIERES »

L'essai de traçage qui est décrit dans cette note technique, s'inscrit dans le cadre du projet « CORBIÈRES », financé par les Conseils Généraux de l'Aude et des Pyrénées-Orientales, ainsi que par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse et le BRGM (dotation de recherche scientifique). L'objectif de ce projet, qui a débuté en Janvier 2001, pour une durée totale de 56 mois, est d'évaluer les ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières.

La zone d'étude du projet « Corbières », qui s'étend du Nord au Sud, globalement de Narbonne à Perpignan, et d'Est en Ouest, de la mer Méditerranée au cours de l'Aude, a été subdivisée en 6 secteurs (fig. 1) :

- le secteur des Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly,
- le secteur du synclinal de St-Paul-de-Fenouillet,
- le secteur du synclinal de Boucheville,
- le synclinal de Soulatgé (situé en zone limitrophe de la zone d'étude),
- le secteur de Lapalme,
- le secteur de Fitou.

Un premier état des lieux de la connaissance hydrogéologique de la zone d'étude a été réalisé en 2001, et a fait l'objet d'un rapport BRGM (Dörfliger et al., 2001). L'objectif était, à partir des données existantes (pluviométrie, stations de mesures des cours d'eau de la zone d'étude, suivi des eaux souterraines, ouvrages ou rapports concernant des études antérieures et des travaux de recherche,...), de proposer une liste de priorités¹ quant aux systèmes à étudier en détail.

A l'issue de cet état des lieux, trois secteurs de la zone d'étude ont été identifiés qui présentent des potentialités en ressource en eau souterraine importante et intéressante en vue d'une caractérisation future (fig. 2) :

- le bassin d'alimentation de Fontestramar/Fontdame y compris le synclinal du Bas-Agly (secteur de Cases-de-Pène),
- le synclinal de St-Paul-de-Fenouillet dans son ensemble,
- le synclinal de Roquefort du secteur de Lapalme.

¹ Cette liste de priorités prend uniquement en considération des caractéristiques hydrogéologiques et techniques ; elle est indépendante de toute considération socio-économique de l'expression des besoins en eau des départements concernés.

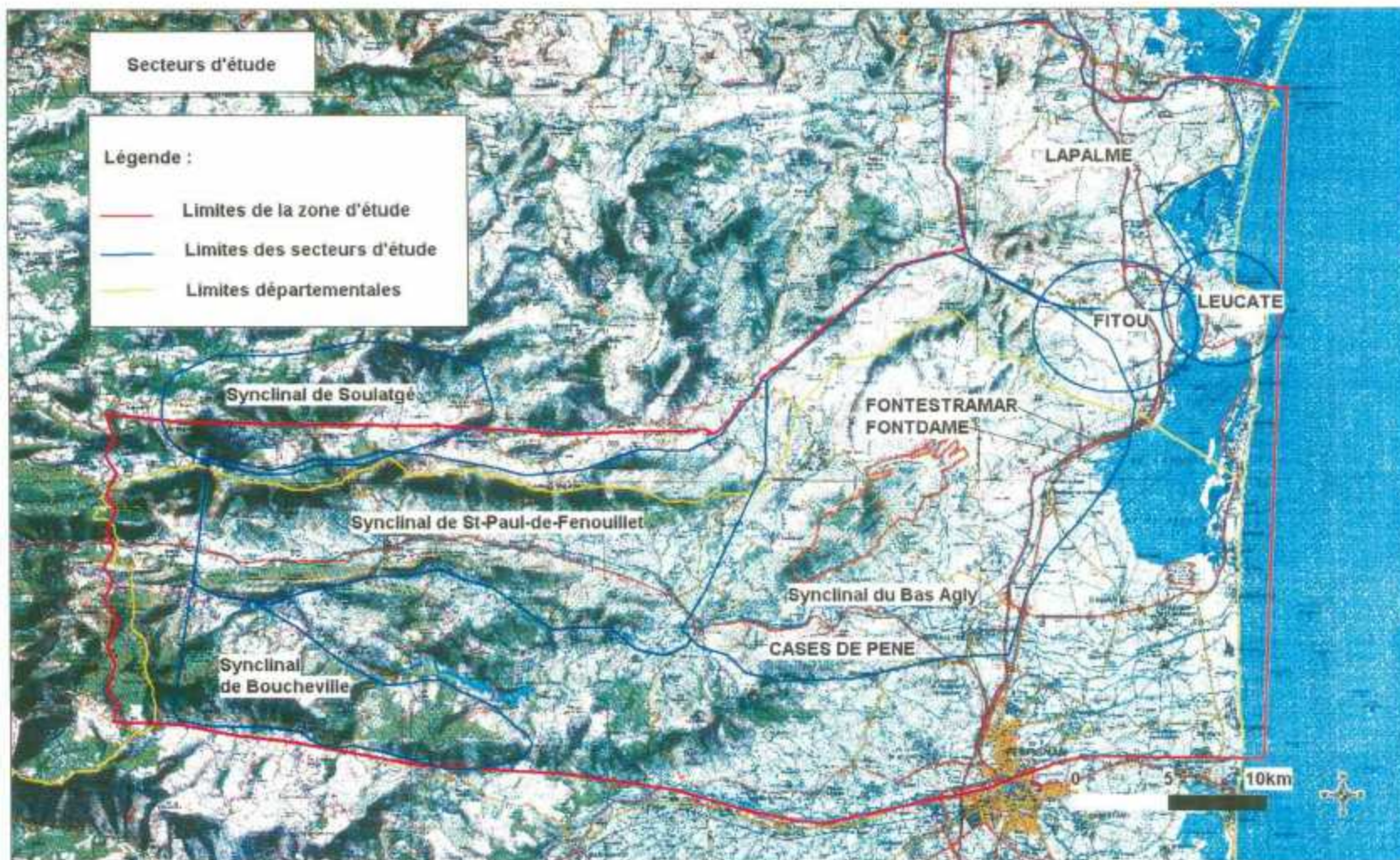


Fig. 1 - Carte de la zone d'étude avec les différents secteurs retenus à la suite de la synthèse bibliographique (extraite du rapport BRGM (Dörfliger, Schoen, Giroux, 2001).

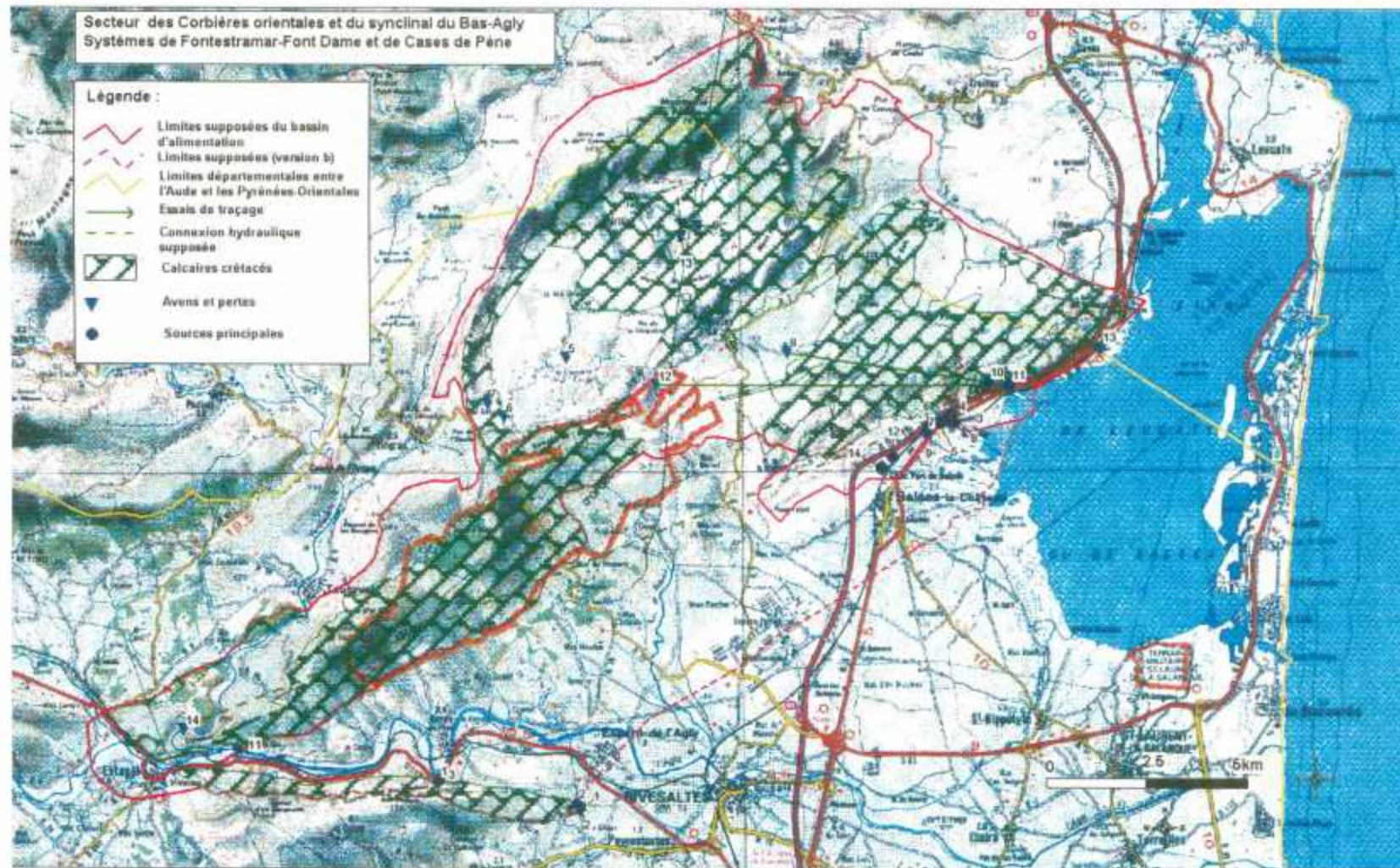


Fig. 2 - Carte des secteurs des Corbières Orientales et du synclinal du Bas-Agly. Système de Fontestramar-Fontdame et de Cases-de-Pène (extraite du rapport BRGM (Dörfliger, Schoen, Giroux, 2001).

1.2. OBJECTIFS DE L'ESSAI DE TRAÇAGE DES PERTES

1.2.1. Rôle et importance des pertes de l'Agly et du Verdouble

a) Contexte hydrographique Agly - Verdouble

L'Agly et le Verdouble prennent leur source dans les Corbières, dans le secteur du synclinal calcaire de Soulatgé orienté ouest-est.

Agly

L'Agly prend sa source au pied du Pech de Bugarach qui culmine à 1230 m (fig. 3). Son cours est pérenne à partir de la source karstique de l'Agly. Sur 80 km de cours, il draine un bassin versant de 1200 km². Dans sa partie amont, l'Agly occupe l'axe synclinal qu'elle suit vers l'est, puis bifurque vers le sud-est après Cubières-sur-Cinoble, traverse les gorges de Galamus et de Saint-Paul de Fenouillet, s'oriente à nouveau vers l'est jusqu'au défilé d'Estagel, puis passe dans l'axe du synclinal du Bas-Agly avec une direction globalement ouest-est. En aval d'Espira, l'Agly coule sur les formations plio-quadernaires de la plaine du Roussillon.

Dans la traversée des calcaires aptiens, l'Agly subit des pertes, que des études antérieures situent principalement entre la coopérative viticole d'Estagel et le trou de la Pastère en amont de la station de Mas de Jau, pour un débit maximal estimé à 1 m³/s (BRL, 1970 ; DDAF 66, 1986).

Verdouble

Le Verdouble, qui draine un bassin versant de 322 km², est l'affluent principal de l'Agly, qu'il rejoint sur sa rive gauche en aval d'Estagel. Il prend naissance sur les pentes du synclinal de Soulatgé, dont il suit l'axe à l'est.

En période de basses eaux, le lit est généralement sec à la confluence avec l'Agly. Il subit des pertes dans la traversée des massifs jurassiques en aval de Tautavel, en particulier dans les méandres du Cimetière des Maures. Le débit maximal de ces pertes a été estimé aux alentours de 700 à 800 l/s (Serrat, 2000).

b) Questions posées

Plusieurs questions se posent sur le rôle de ces pertes sur le système karstique de Fontestramar/Fontdame :

- Ces pertes sont-elles en relation hydraulique avec ce système, appartiennent-elles à son bassin d'alimentation, et si oui, pourra-t-on démontrer cette relation par traçage artificiel ?
- En participant au soutien d'étiage de l'Agly, le barrage de Caramany contribue-t-il à renforcer la recharge du système karstique via les pertes de l'Agly ?
- Si une relation est démontrée, elle peut jouer un rôle complexe pour le système : cet apport en eaux de surface contribue à sa recharge, mais peut le rendre vulnérable aux pollutions superficielles. Il est donc important de connaître les vitesses de transit et la dilution entre les pertes et les sources exutoires du système.

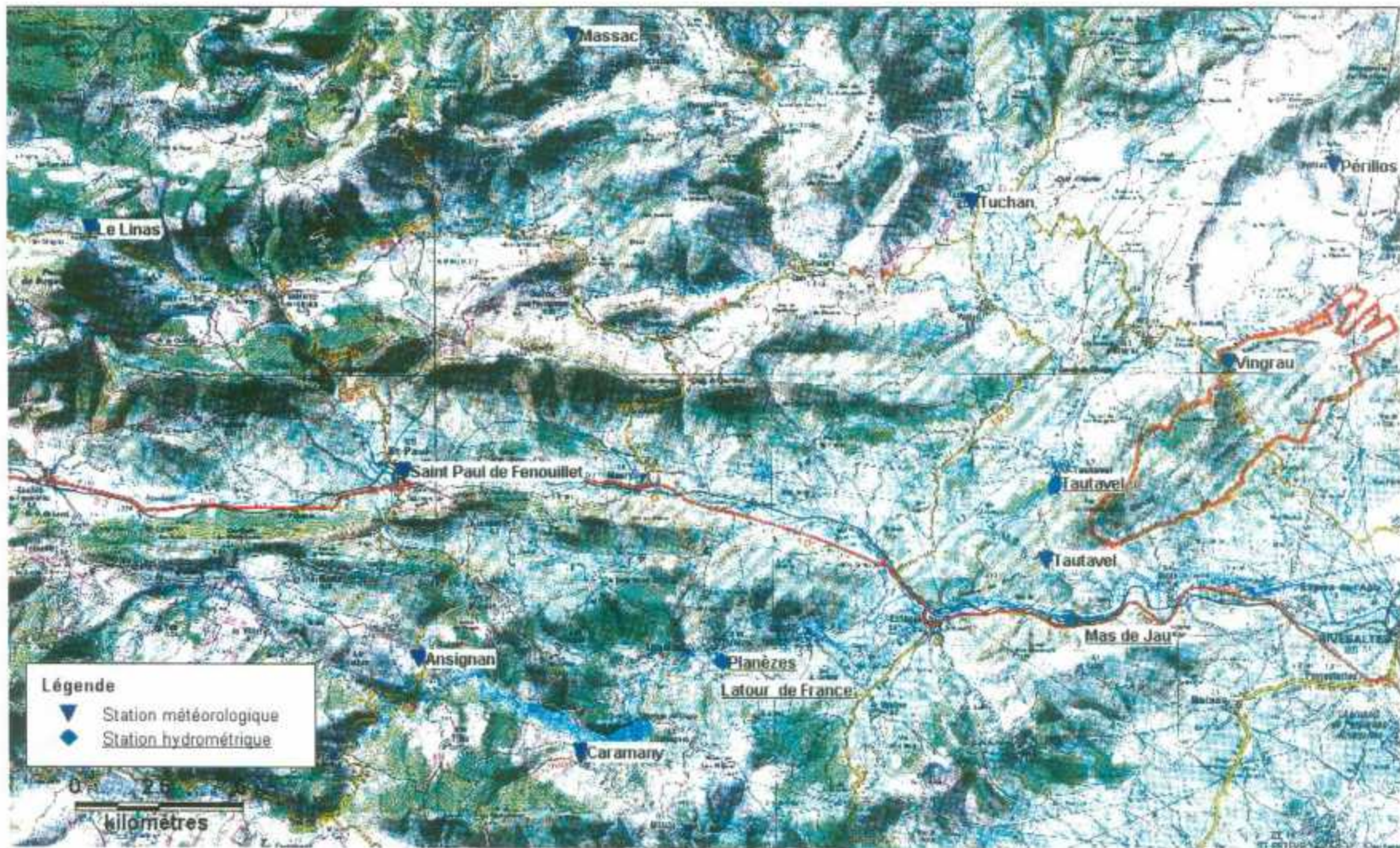


Fig. 3 - Carte de localisation du réseau hydrographique Agly-Verdouble.

1.2.2. Contact calcaires jurassiques/Pliocène du Roussillon

Une des questions qui se posent concerne le contact entre les massifs calcaires des Corbières, et les formations sédimentaires du remplissage plio-quadernaire du bassin du Roussillon (Duvail *et al.*, 2001).

- Existe-t-il des relations hydrauliques entre le massif calcaire et l'aquifère multi-couches du plio-quadernaire ?
- Si oui, le massif karstique contribue-t-il à la recharge de l'aquifère multi-couches du plio-quadernaire intensément exploité dans le bassin du Roussillon ?
- Si cette recharge existe, pourra-t-elle être mise en évidence par le traçage des pertes des eaux de surface dans les massifs karstiques ?

1.2.3. Relation avec le synclinal du Bas-Agly

Dans le cadre du projet Corbières, le forage de Cases-de-Pène a fait l'objet en 2001 d'un essai de pompage de longue durée, pour caractériser le système composé par le flanc sud du synclinal du Bas-Agly, dans la perspective d'une exploitation future pour l'alimentation en eau potable (Petit *et al.*, 2002).

Là aussi, plusieurs questions se posent :

- Les eaux de surface contribuent-elles à la recharge de cet aquifère ?
- Cette relation pourra-t-elle être démontrée par traçage ?
- Dans ce cas pourrait se poser le problème de la vulnérabilité de l'aquifère aux pollutions superficielles ?

1.3. CONTEXTE AMENANT AU CHOIX DU TRAÇAGE DU VERDOUBLE

Il a été décidé de pratiquer un essai de traçage artificiel en contexte de pertes totales, afin de contrôler la fonction d'entrée du traceur dans le réseau souterrain. En effet, ce contexte permet d'estimer à la fois le débit des pertes, et la durée d'injection du traceur dans le système. De plus, l'absence d'écoulements de surface évite de devoir sur-doser la quantité de traceur pour tenir compte de la partie qui partirait dans le cours d'eau en aval des pertes...et ne passerait pas inaperçue des riverains.

Au début de l'été 2001, l'étiage était très prononcé dans les Corbières. Lors de la campagne de jaugeages menée sur l'Agly le 20 juin 2001 (cf. tableau 1 et fig. 4), pour estimer ses pertes, celles-ci n'étaient pas totales. En revanche, le Verdoble était à sec à sa confluence avec l'Agly. Il a donc été décidé de procéder en premier lieu au traçage des pertes totales du Verdoble.

L'essai de pompage sur le forage de Cases-de-Pène a été mis à profit pour effectuer des prélèvements réguliers.

2. Description de la mise en œuvre de l'essai de traçage des pertes du Verdoble

Cette partie est consacrée à la description technique de la mise en œuvre de l'essai de traçage, depuis le choix des points d'injection, au choix et à l'équipement des points de suivi en aval.

2.1. CHOIX DU POINT D'INJECTION

Pour guider le choix du point d'injection, des campagnes de jaugeage au micro-moulinet ont été menées en juin et juillet 2001 sur l'Agly et le Verdoble (fig. 4, tableau 1 et tableau 2). Ces jaugeages différentiels avaient pour objectifs (i) de localiser les zones de pertes et d'avoir une estimation de leur nature (pertes ponctuelles, pertes diffuses), et (ii) d'estimer le débit des pertes pour évaluer la durée de la fonction d'entrée du traceur.

N° de profil	Situation du profil	Date du jaugeage	
		20/06/2002	
1	Aval Confluence Maury	1443	-
2	Amont Pont SNCF Estagel	1224	15 %
3	Aval seuil Mas Jau (Verdoble à sec à sa confluence)	1186	3 %
4	300 m amont maisons Mas de Jau	1128	5 %
Pertes totales entre amont et aval ⁽²⁾		315	22 %

(1) : entre deux profils consécutifs
(2) : entre les profils les plus éloignés

Tableau 1 - Résultats de jaugeage de l'Agly au micro-moulinet (cf. fig. 4).

N° profil	Situation du profil	Date du jaugeage							
		03/07/2001		18/07/2001		23/07/2001		25/07/2001	
1	Aval du seuil de la Caune de l'Arago	302	-						
2	Passage à gué Auberge d'Alzine	293	3 %						
3	5m amont seuil					163	-		
4	Après virage - Calcaires très fracturés			209	-	150	8 %	132	-
5	Sortie de la large vasque	Sec	100 %	95	54 %	55	63 %	27	79 %
6	Aval vasque baigneurs	Sec	-	48	49%			sec	-
Pertes totales entre amont et aval ⁽²⁾		302	100 %	161	77 %	107	66 %	132	100 %


(1) : entre deux profils consécutifs  : Non mesuré
(2) : entre les profils les plus éloignés

Tableau 2 - Résultats de jaugeage du Verdoble au micro-moulinet (cf. fig. 4).

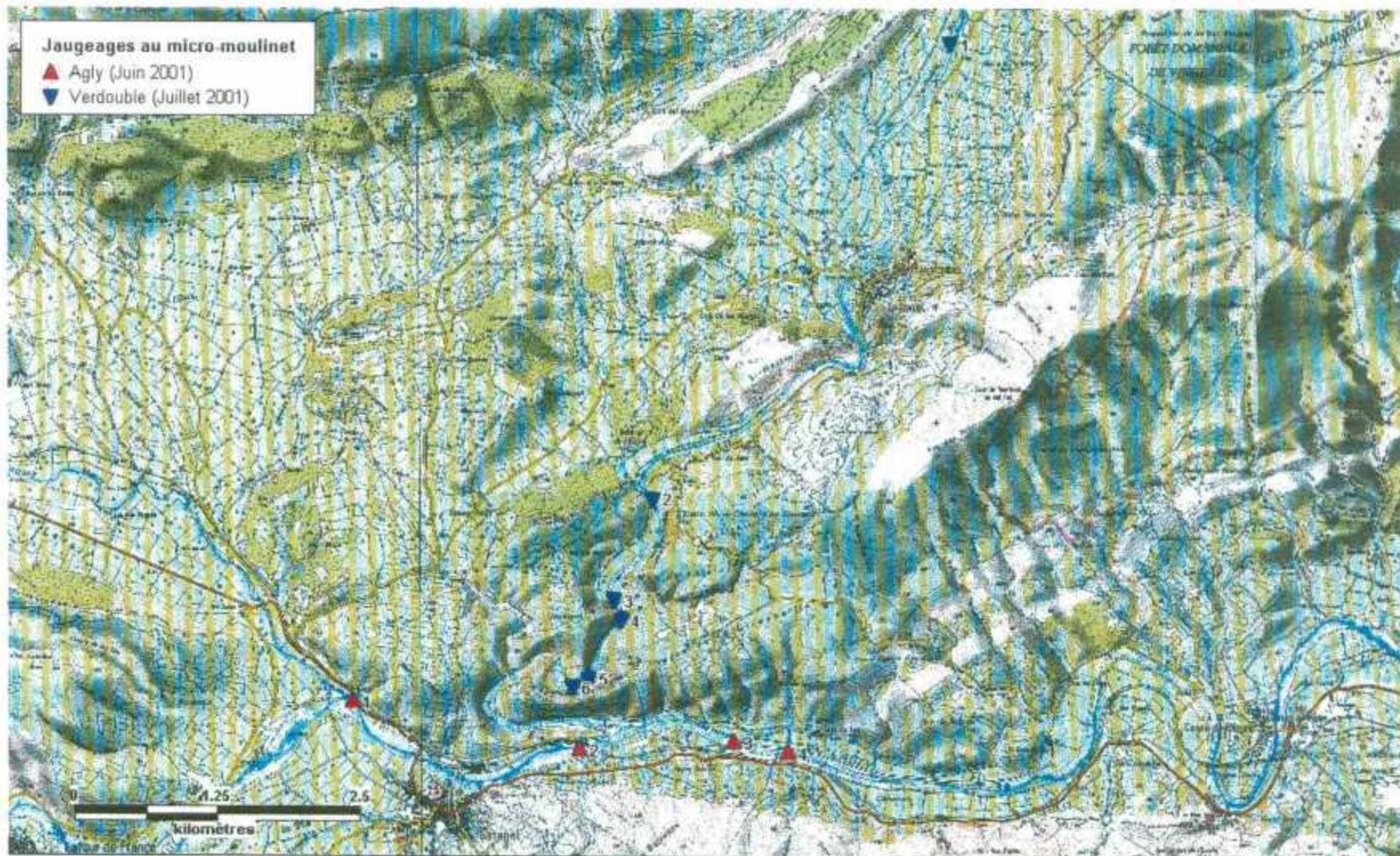


Fig. 4 - Localisation des profils de jaugeages sur l'Agly et le Verdoble.

Trois autres facteurs ont également été pris en compte pour le choix de l'injection :

- Point d'injection à choisir suffisamment en amont des pertes, et avec un courant non négligeable pour assurer le bon mélange du traceur avant son entrée dans le système,
- Eviter les zones d'eaux stagnantes trop importantes avant les pertes, qui conduiraient à une dispersion de la fonction d'entrée du traceur, et à un risque de photo dégradation du traceur,
- Facilité d'accès pour le matériel.

Les jaugeages du Verdoble du 3 juillet 2001 montrent que la différence de débit entre les profils 1 et 2 (tableau 2 et fig. 4) est peu importante, mais les pertes dans cette section sont difficiles à estimer car des apports peuvent avoir lieu, notamment à Tautavel (eaux pluviales, rejets de la station d'épuration). De plus, cette section entre la Caune de l'Arago et le Mas d'Alzine comporte de larges zones d'eau stagnantes, elle était donc peu favorable à l'injection.

Lors des jaugeages du 3 juillet 2001, le Verdoble subissait des pertes totales dans les méandres du Cimelière des Maures : aucun écoulement n'était visible au sortir de la grande vasque creusée dans les alluvions, entre les profils 4 et 5 (annexe 1, photo 1). Une part importante des pertes semblait se produire entre les profils 3 et 4, dans le méandre en aval du seuil installé pour l'ancienne prise d'eau d'un petit canal, suivant la rive droite du Verdoble. Dans ce méandre, les calcaires en rive gauche montrent des indices de karstification importante. Ce seuil de 40 cm environ engendre un écoulement turbulent à son aval immédiat. Nous avons donc choisi de verser le traceur depuis le seuil, pour profiter de l'effet de mélange dû à la chute, et garantir l'isolement de l'aval avec l'amont (annexe 1, photo 3).

L'injection était programmée initialement pour le 18 juillet 2001, mais un orage violent dans les jours précédents a fait augmenter le débit du Verdoble, et les pertes n'étaient alors plus totales. Un débit de l'ordre de 95 l/s sortait de la vasque (profil 5, fig. 4), pour aller se perdre totalement dans le dernier méandre avant la confluence avec l'Agly. L'injection a donc été reportée d'une semaine, au 23 juillet 2001. Ce jour-là, un débit de 55 l/s sortait encore de la vasque, mais les pertes étaient ensuite totales à moins de 200 m en aval du profil 6. La tendance était à la décrue, et la météo annonçait plusieurs jours sans pluies, l'injection a donc été effectuée ce jour-là.

2.2. CHOIX ET EQUIPEMENT DES POINTS DE SUIVI EN AVAL

Pour ce traçage des pertes du Verdoble, 15 points ont été suivis, qui sont récapitulés dans les fig. 5 et tableau 4.

2.2.1. Sources de Fontdame et de Fontestramar

Les sources de Fontestramar et Fontdame constituent les deux exutoires principaux du système karstique. Un accent particulier a donc été mis sur leur suivi.

a) Source de Fontdame

Le suivi de la source de Fontdame a été effectué dans le ruisseau longeant la pisciculture « Méditerranée pisciculture », au Mas Grange.

1. Nous avons installé dans la rigole, un fluorimètre de surface GGUN-FL, développé par le Groupe de Géomagnétisme de l'Institut de Géologie, de l'Université de Neuchâtel, en Suisse. Cet appareil permet la mesure autonome (alimentation par batterie 12V, et stockage des données sur carte mémoire) par pas de temps fixe, de deux traceurs, ainsi que de la turbidité, dans des rivières jusqu'à 10 m de profondeur (annexe 1, photo 8.a). Les spécifications de l'appareil sont précisées dans le tableau 3.

Fourchette de mesure de la turbidité	0,02 à 400 NTU
Traceurs détectables	- Uranine (émet dans les verts) - Sulforhodamine G (émet dans les rouges)
Sensibilité ⁽¹⁾	> 0,2 V/10 ⁻⁷ g/ml (soit > 0,2 V/100 ppb ⁽²⁾)
Seuil de détection ⁽¹⁾	< 5.10 ⁻¹¹ g/ml (soit < 0,05 ppb)
Seuil de saturation ⁽¹⁾	2500 mV (soit > 1250 ppb)
Bruit de fond électrique	< 0,1 mV
Pas d'acquisition	15 min
Stockage des données	Carte mémoire SRAM
Alimentation	12 V
Dimensions fluorimètre de surface	Ø 160 mm, Hauteur 170 mm (Photo 8.a)
Dimensions fluorimètre de forage	Ø 48 mm, Hauteur 184 mm (Photo 8.b)
(1) pour l'uranine	(2) 1 ppb = 1 µg/l

Tableau 3 - Spécifications des fluorimètres de terrain GGUN-FL²

2. Un échantillonneur automatique autonome de 24 flacons polyéthylène de 500 ml, alimenté par batterie 12V, a également été installé pour prélever dans le ruisseau au pas de temps journalier. Les échantillons ont été relevés par le BRGM lors de ses tournées de routine, avec transvasement des échantillons dans des flacons de 250 ml en polyéthylène ambré pour les garantir de la lumière.
3. Enfin, lors de ses tournées de routine sur le terrain, le BRGM a également effectué des prélèvements manuels de contrôle dans le ruisseau.

b) Source de Fontestramar

1. Lors d'une visite de terrain préparatoire au traçage en juillet 2001, nous avons rencontré les plongeurs spéléologues de l'Association de Recherches de Font Estramar (ARFE, 1997), en camp de plongée estival dans le réseau noyé. Ils nous ont gracieusement offert leur aide pour installer le fluorimètre de terrain dans la vasque. Ils ont ainsi pendu la sonde du fluorimètre (annexe 1, photo 8.b) devant le puits d'entrée de la galerie, à environ -6 m sous la surface de l'eau (annexe 1, photo 7.a), et fixé le câble reliant la sonde immergée au boîtier électronique (installé dans la cabane de la DDAF 66, cf. photo 7.b en annexe 1) le long de la falaise en posant plusieurs spils.

² <http://www-geol.unine.ch/GEOMAGNETISME/tract.html>

2. Un échantillonneur automatique autonome de 24 flacons polyéthylène de 500 ml, alimenté par batterie 12V, a également été installé pour prélever dans la vasque, derrière la cabane de la DDAF 66, au pas de temps journalier. Cet échantillonneur a été dérobé entre le 14 et le 18 septembre 2001. Nous avons alors sollicité la pisciculture Extramer, dont le personnel a assuré un échantillonnage journalier (en flacons polyéthylène ambré de 250 ml) dans la rigole de Fontestramar au niveau de la pisciculture.
3. Enfin, lors de ses tournées de routine sur le terrain, le BRGM a également effectué des prélèvements manuels de contrôle dans la vasque de Fontestramar. Sur les conseils de Cyrille Brandt, correspondant de l'ARFE (ARFE, 1997), nous avons effectué des contrôles sur trois points pour éventuellement mettre en évidence une distinction de la restitution entre les différentes galeries du karst noyé :
 - dans la vasque, au pied du figuier derrière la cabane de la DDAF 66, où une arrivée d'eau serait issue de la « galerie sud »,
 - dans la « petite source », venue d'eau visible à droite en bas du chemin d'arrivée, qui pourrait également être une sortie de la « galerie sud »,
 - dans la rigole principale de sortie de la vasque, avant le pont (c'est aussi le lieu des prélèvements du BRGM pour analyses chimiques).

2.2.2. Sources de la forteresse de Salses

L'alimentation en eau de la forteresse de Salses (toilettes, arrosage) est assurée par des sources, qui ont été aménagées lors de la construction même (1497-1503). Une étude a été menée pour déterminer les causes de la contamination bactériologique chronique de ces eaux (Hydro.Geo.Consult (1999)). Elle a suggéré la présence d'un gisement d'eau souterraine profond, volumineux, d'alimentation lointaine, attestée par la grande stabilité des paramètres physico-chimiques, et des températures moyennes anormalement élevées, de l'ordre de 17°C (sur la période 1983-1999), et une relative insensibilité aux épisodes pluvieux. La présence de quelques germes fécaux serait liée à une contamination superficielle de l'émergence, et non de la ressource elle-même, présentée comme le trop-plein pérenne du même réservoir karstique que les sources de Fontestramar et de Fontdame.

La (les) origine(s) des sources de la forteresse n'est (ne sont) pas encore bien connue(s). Pour le suivi du traçage des pertes du Verdoble, avec le conseil du personnel de la forteresse, trois points de prélèvements ont été choisis, le long de la façade nord, et d'ouest en est respectivement :

- 1) Source située à l'angle nord-ouest,
- 2) Source située à l'intérieur d'une galerie aménagée au droit de la place d'armes,
- 3) Source située à l'angle nord-est, à l'extérieur de la forteresse, dont le surplus alimente notamment un lavoir dans le village de Salses.

Sur ces trois points, le personnel de la forteresse a assuré deux à trois prélèvements par semaine, dans des flacons en polyéthylène ambré de 250 ml, fournis par le BRGM.

2.2.3. Forage de Cases-de-Pène

Pour l'essai de pompage de longue durée sur le forage de Cases-de-Pène, une cabane provisoire a été installée pour contenir l'installation électrique, ainsi qu'une dérivation sur le tuyau de sortie pour permettre le prélèvement d'échantillons. L'installation d'un bac, alimenté en continu par surverse, a permis celle d'un échantillonneur automatique autonome de 24 flacons, programmé pour prélever dans ce bac au pas de temps journalier.

Lors de ses tournées de routine sur le terrain, le BRGM a également effectué des prélèvements manuels de contrôle sur la dérivation.

2.2.4. Forages dans le Pliocène

16 forages implantés dans le Pliocène du bassin du Roussillon, et susceptibles d'être intéressants pour le suivi du traçage, ont tout d'abord été recensés. Plusieurs critères ont été pris en compte pour le choix de ces forages :

- Forages en exploitation,
- Renouvellement de l'eau assuré ; par exemple, si le forage alimente une cuve, le prélèvement doit pouvoir se faire avant celle-ci, ou après si le temps de séjour y est court,
- Forages sans chloration à la crépine d'aspiration, car le chlore a la faculté de dégrader les traceurs fluorescents, d'où des risques d'erreur d'interprétation par atténuation et/ou extinction du signal de fluorescence (si signal il y avait). C'est l'exemple du forage AINR à Salses.

Au final, 10 forages ont été suivis :

- 5 de particuliers, en usage pour l'agriculture (vigne, oliviers,...), les jardins, et/ou l'eau potable,
- le forage de la pisciculture de Fontdame,
- le forage de la maison de retraite de Salses (pour l'arrosage des jardins), et
- 3 forages exploités pour l'alimentation en eau potable de Salses, d'Opoul et de Rivesaltes.

Ces forages ont été échantillonnés deux à trois fois par semaine :

- par les propriétaires eux-mêmes, pour les forages de particuliers,
- par le personnel de la maison de retraite de Salses,
- par le personnel technique de la Compagnie Générale des Eaux de Perpignan, exploitante des forages AEP d'Opoul et de Rivesaltes,
- conjointement par le personnel technique de la SAUR-CISE, et le BRGM pour le forage AEP de Salses.

Le BRGM a assuré la distribution de flacons en polyéthylène ambré de 250 ml, et la récupération des échantillons, lors de ses tournées de terrain régulières.

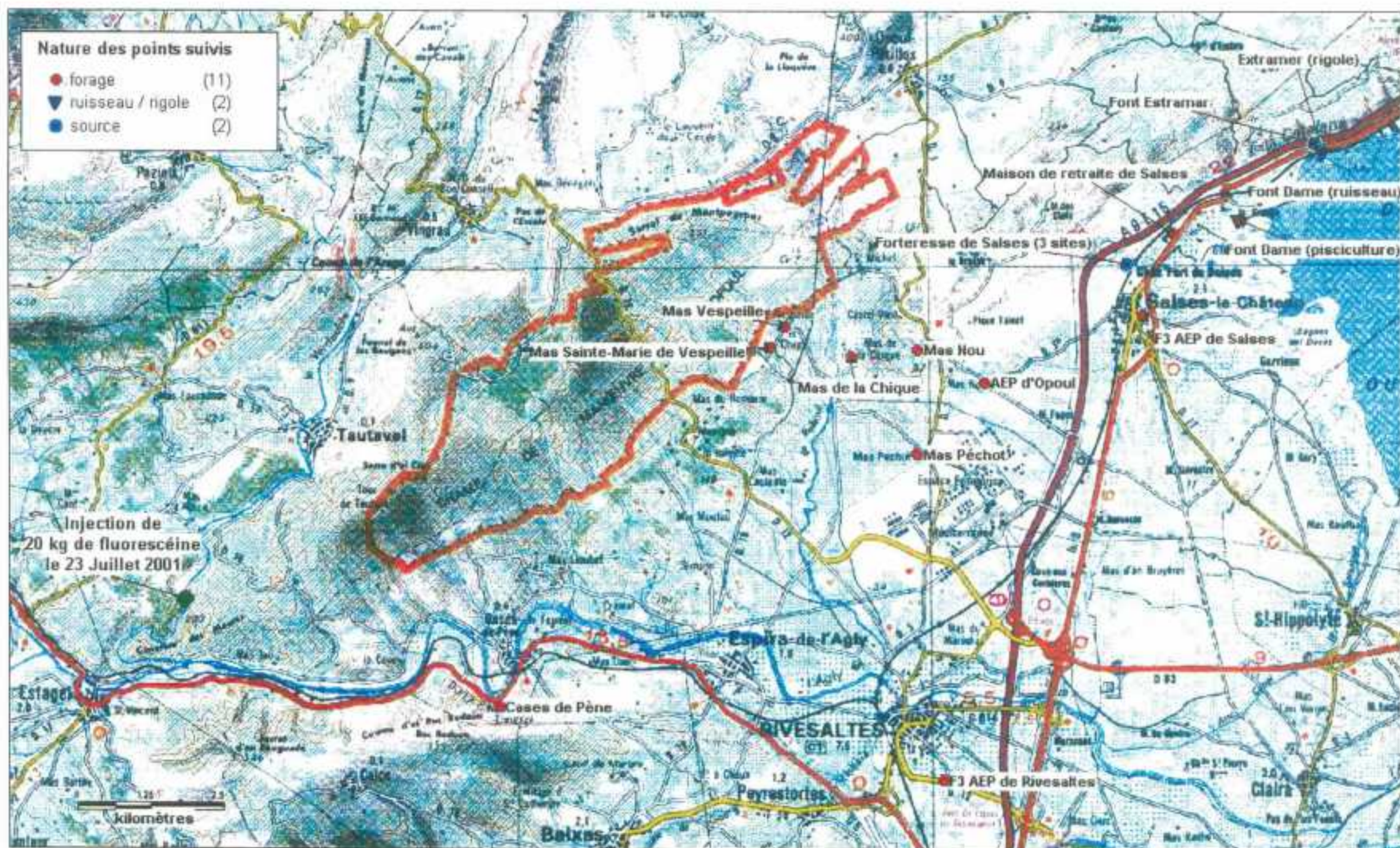


Fig. 5 - Localisation du point d'injection et des points de suivi du traçage du Verdoubert.

N°	Point de suivi du traçage	Commune	Nature	N_BSS	Z (mNGF)	Prof. (m)	Distance injection (km)	Equipement	Prélèvements	Opérateurs
1	Font Dame (ruisseau)	Salses	ruisseau	-	- 1	-	20,0	fluorimètre + échantillonneur automatique	1/jour automatique + 2/mois manuels en contrôle	BRGM
2	Font Dame (pisciculture)	Salses	forage	10795X0066/F2	1	44	20,0	-	1/jour manuel	propriétaire
3	Font Estramar	Salses	source	10795X0001/S	4	-	21,0	fluorimètre + échantillonneur automatique	1/jour automatique + 2/mois manuels en contrôle (sur 3 points)	BRGM
4	Pisciculture Extramer (rigole)	Salses	rigole	-	- 4	-	21,1	-	1/jour manuel (à partir de septembre 2001, en remplacement de l'échantillonnage journalier dans la vasque de Fontestramar)	personnel pisciculture
5	Cases-de-Pène	Cases-de-Pène	forage	10903X0026/PENE	80	90.5	5,7	échantillonneur automatique	1/jour automatique + 2/mois manuels en contrôle	BRGM
6	Forteresse de Salses (3 sites)	Salses	source	10795X0009/S		-	17,3	-	2 à 3/semaine	personnel forteresse
7	Mas Vespeille	Salses	forage	10904X0065/PIGOU	95	194	11,4	-	2 à 3/semaine	propriétaire
8	Mas Sainte-Marie de Vespeille	Salses	forage	10904X0076/VESPEI	100	120	11,0	-	2 à 3/semaine	propriétaire
9	Mas Nou	Rivesaltes	forage	10904X0011/F	60	156	13,4	-	2 à 3/semaine	propriétaire
10	Maison de retraite de Salses	Salses	forage	10795X0026/S	6	54.4	18,2	-	2 à 3/semaine	personnel maison de retraite
11	Mas de la Chique	Salses	forage	10904X0001	65	131.1	12,2	-	2 à 3/semaine	propriétaire
12	Mas Péchol	Rivesaltes	forage	10904X0022/F	47	73	12,8	-	2 à 3/semaine	propriétaire
13	F3 AEP de Salses	Salses	forage	10911X0213/F3	6	72	17,3	-	2 à 3/semaine	SAUR CISE + BRGM
14	F3 AEP de Rivesaltes	Rivesaltes	forage	10911X0113/F3B	22	90.4	13,4	-	2 à 3/semaine	CGE
15	AEP d'Opoul	Salses	forage	10911X0030/111111	41	58	14,3	-	2 à 3/semaine	CGE

Tableau 4 - Récapitulatif des points de suivi du traçage du Verdoble.

2.3. PROTOCOLE D'INJECTION

2.3.1. Choix du traceur fluorescent

Les traceurs fluorescents sont habituellement utilisés dans les études hydrogéologiques, pour leur facilité d'emploi, leur seuil de détection bas, et leur faible toxicité. Ils sont d'autant plus recommandés pour les essais de traçages d'écoulements souterrains, où ils ne seront pas soumis au phénomène de photo-dégradation.

L'uranine, qui émet dans les verts (longueurs d'onde d'excitation et d'émission de 490 et 520 nm, respectivement), est le traceur fluorescent plus couramment utilisé, car il présente la meilleure réponse en fluorescence, et le plus faible taux d'adsorption. Pour cet essai, nous n'avons pas utilisé de l'uranine pure, mais sa forme industrielle la fluorescéine, qu'un spectre effectué en laboratoire a dosé à 75 % d'uranine.

Des études menées sur les traceurs fluorescents (Smart, 1984 ; Leibundgut & Hadi, 1997), ont permis de déterminer leur toxicité pour les organismes vivants. Les seuils indiqués dans le tableau 5, montrent que les effets létaux n'apparaissent que pour des concentrations particulièrement élevées. Smart (1984) indique l'absence de risque cancérogène et mutagène de l'uranine.

DL50	DL50 (mg/kg)	Animal testé Mode d'administration	
(dose létale pour 50 % des animaux testés, exprimée en mg par kg)	4,74	souris, oral	
CL50 pour les poissons			
(concentration létale pour 50 % des poissons pour un temps d'exposition donné, exprimée en mg/l)	CL50 (mg/l)	CL50 (µg/l ou ppb)	Temps d'exposition (h)
truite arc-en-ciel	1372	$1,372 \cdot 10^6$	96
poisson rouge	> 100	$> 10^5$	120

Tableau 5 - Seuils de toxicité pour l'uranine.

Leibundgut & Hadi (1997) indiquent des concentrations maximales résultantes en uranine à ne pas dépasser lors des expériences de traçage de 10 et 100 ppb respectivement pour les eaux souterraines et de surface. Bien que ces limites soient en deçà des seuils de toxicité, ils recommandent par précaution de maintenir les concentrations en traceur les plus basses possibles.

2.3.2. Détermination de la quantité de fluorescéine à injecter

L'estimation de la quantité de traceur à injecter est un point clé des essais de traçage : il s'agit de trouver le bon compromis entre le trop et le trop peu. Il est inutile de trop charger les eaux, et une sous-estimation peut compromettre l'interprétation de l'essai si les concentrations en sortie sont inférieures au seuil de détection.

Les pertes du Verdoble avaient fait l'objet d'une coloration par Henri Salvayre, le 7 juillet 1967, avec injection de 15 kg d'uranine (Salvayre, 1969). Le temps de première réapparition à Fontestramar avait été de 215 jours, mais la fiabilité de cet essai peut cependant être discutée, le contrôle de la restitution n'étant que qualitatif avec l'utilisation de fluocapteurs au charbon actif. En effet, ceux-ci peuvent réagir si les eaux

ont des teneurs en matière organiques importantes, et être interprétés positifs à tort. En outre, un seul fluocapteur avait été déclaré positif.

Cet essai antérieur est cependant une première indication pour obtenir un ordre de grandeur de la masse de fluorescéine à injecter.

a) Abaque de Marsault

Dans sa thèse, Marsault (1997) a donné un abaque permettant d'estimer les quantités de fluorescéine à injecter selon différentes hypothèses de connexion des drains karstiques. En prenant l'hypothèse d'un débit d'étiage à Fontestramar de 1,4 m³/s (valeur issue de jaugeage), il vient :

- Pour un point d'injection sur un drain, à des distances > 5 km : 1,25 kg
- Point d'injection sur un système annexe au drainage bien connecté au drain : 2,25 kg

b) Formules Unesco

L'Unesco donne plusieurs formules approximatives et plus ou moins élaborées pour le calcul de la quantité de traceur à injecter (Unesco, 1973-1983). Une des difficultés pour l'application de ces formules est la diversité des paramètres employés, qui bien souvent manquent.

$$\text{Formule 1 : } M = k \cdot \frac{L}{10}$$

avec :

<i>M</i>	<i>masse de traceur (g)</i>
<i>L</i>	<i>distance entre points d'injection et de prélèvement (m)</i>
<i>k</i>	<i>coefficient, de 2 à 10 pour le karst</i>

Ce qui nous donne pour la source de Fontestramar qui est le point le plus en aval avec une distance de 21 km, une masse de fluorescéine variant de 4,2 kg (*k* = 2) à 21 kg (*k* = 10).

$$\text{Formule 2 : } M = k \cdot \frac{Q \cdot L}{v} + 0,02 \cdot V_r$$

avec :

<i>M</i>	<i>masse de fluorescéine (g)</i>
<i>L</i>	<i>distance entre points d'injection et de prélèvement (m)</i>
<i>Q</i>	<i>débit de la source en m³/s</i>
<i>v</i>	<i>vitesse de l'eau souterraine en m/j</i>
<i>V_r</i>	<i>volume de la réserve souterraine en milliers de m³</i>
<i>k</i>	<i>coefficient de 500 pour les roches fissurées (calcaires), sinon 3000.</i>

Pour estimer les vitesses et volume de l'eau souterraine, nous avons fait des hypothèses sur le débit d'étiage des sources, et sur la durée de la restitution.

Hypothèses	FontDame		Fontestramar	
	Arrivée et restitution en 1 mois	Arrivée et restitution en 2 mois	Arrivée et restitution en 1 mois	Arrivée et restitution en 2 mois
L (m)	20000	20000	21000	21000
Q (m ³ /s)	0.8	0.8	1.4	1.4
v (m/j)	667	333	700	350
V (m/h)	28	14	29	15
Vr (m ³)	2073600	4147200	3628800	7257600
Masse (kg) pour k=500	12	24	21	42
Masse (kg) pour k=3000	72	144	126	252

Tableau 6 - Masse de fluorescéine selon la formule 2 de l'Unesco (1973-1983).

c) Hypothèses sur la durée de restitution, prise en compte des seuils

La troisième méthode consiste à estimer une masse de traceur équivalente sur une fonction de restitution fictive « rectangulaire » (fig. 6), en faisant des hypothèses sur :

- le temps de première apparition et la durée de restitution,
- le débit à l'exutoire (supposé constant),
- la concentration significative minimale à l'exutoire.

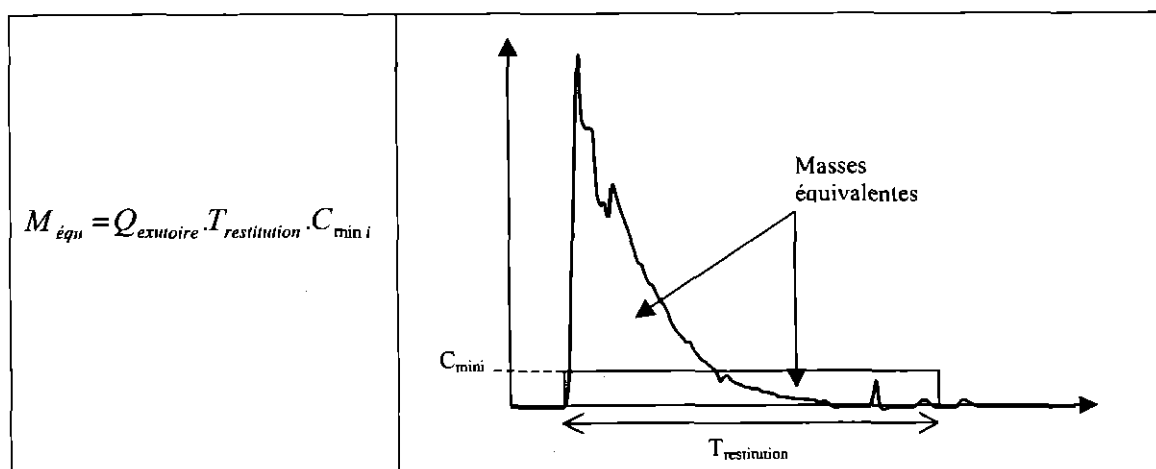


Fig. 6 - Estimation d'une masse de traceur équivalente.

Cette concentration significative minimale est fonction du seuil de détection des fluorimètres de terrain (tableau 3). Ce seuil est supérieur au seuil de détection analytique du fluorimètre fixe utilisé pour l'analyse des échantillons au laboratoire, qui est de 0,02 ppb. L'existence de substances fluorescentes dans l'eau (naturelles ou liées à des pollutions) est responsable d'un bruit de fond supérieur au seuil de détection instrumental ; ce bruit de fond diffère en général d'un point à un autre. La concentration devra être supérieure au bruit de fond pour être estimée significative.

Les résultats sont donnés tableau 7 pour les sources de Fontestramar et Fontdame. Pour obtenir une marge de sécurité, les seuils minimaux testés ont été fixés à 1 ppb

(plusieurs ordres de grandeur au-dessus du bruit de fond courant dans des expériences de traçage précédentes), et 10 ppb (seuil de visibilité de l'uranine dans 30 cm d'eau).

		Hypothèse de temps d'arrivée et de durée de restitution	
		1 mois	2 mois
FontDame Distance = 20 km Hypothèse de débit d'étiage : 0,8 m ³ /s	Vitesse (m/h)	28	14
	Volume à tracer (m ³)	2.10 ⁶	4.10 ⁶
	Masse (kg) à injecter pour un seuil à 1 ppb	2	4
	Masse (kg) à injecter pour un seuil à 10 ppb	21	41
Fontestramar Distance = 21 km Hypothèse de débit d'étiage : 1,4 m ³ /s	Vitesse (m/h)	29	15
	Volume à tracer (m ³)	4.10 ⁶	7.10 ⁶
	Masse (kg) à injecter pour un seuil à 1 ppb	4	7
	Masse (kg) à injecter pour un seuil à 10 ppb	36	73

Tableau 7 - Masses de fluorescéine estimées.

d) Conclusion

La grande diversité de ces différents résultats (de moins de 2 kg, à plus de 200 kg) illustre la difficulté de l'exercice d'estimation de la masse à injecter.

Nous avons opté pour l'injection de 20 kg de fluorescéine, qui nous semble être un bon compromis entre les différents ordres de grandeur, notamment vis-à-vis du traçage antérieur avec 15 kg, en prenant en compte les seuils de détection très bas des fluorimètres de terrain, et des analyses en laboratoire sur les échantillons.

2.3.3. Conditions d'injection

Les 20 kg de fluorescéine utilisés se présentent sous la forme de 4 pots de 5 kg de poudre rouge, très volatile...

Quelques précaution opératoires ont été prises pour limiter les risques de contamination, sources potentielles d'erreur d'interprétation de l'essai de traçage :

- Les 4 pots de poudre ont été transportés dans le véhicule tapissé de sacs poubelles, et n'ont été ouverts que sur le lieu de l'injection.
- Chaque pot a été transvasé dans un bidon étanche de 40 l pour dissoudre les 5 kg de poudre avec l'eau du Verdoube. Les opérateurs étaient équipés de gants, et de combinaison (annexe 1, photo 2).

La fluorescéine en solution a été versée juste en aval du seuil, pour profiter du courant propice au mélange (annexe 1, photo 3). L'injection a commencé le 23 juillet 2001 à 14h (soit 12 h TU), pour se terminer environ une demi-heure plus tard (le temps de rincer chaque bidon plusieurs fois dans le cours d'eau).

Le panache de fluorescéine s'est propagé rapidement jusqu'à la grande vasque creusée dans les alluvions, qui est restée colorée pendant plusieurs heures (annexe 1, photo 4, photo 5, et photo 6).

Lors de la visite de contrôle le 25 juillet 2001, plus aucune trace de fluorescéine n'était visible à l'œil nu le long du Verdoube. Si elle n'a bien sûr pas été instantanée, on peut cependant considérer que l'injection du traceur a été relativement de courte durée, surtout au regard, a posteriori, des temps d'arrivée et de la forme de la restitution, marquée par une faible dispersion. La durée de la fonction d'entrée n'a donc pu avoir que très peu d'influence sur la forme de la restitution.

3. Résultats de l'essai de traçage

3.1. POINTS POSITIFS, POINTS NEGATIFS

Sur les 15 points suivis lors de cet essai de traçage des pertes du Verdoble (tableau 4), les résultats sont les suivants :

- Les sources de Fontdame, de Fontestramar, et de la Forteresse de Salses ont présenté une restitution avérée en uranine,
- Un doute peut exister sur le forage de Cases-de-Pène et le forage F3 AEP de Rivesaltes, qui ont présenté quelques échantillons positifs ponctuels mais seulement en Juillet et Août 2002, avec des concentrations comprises entre 0,12 et 0,2 ppb,
- Aucun des 9 autres forages, suivis et échantillonnés de juillet à décembre 2001, n'a présenté de concentration en uranine supérieure du bruit de fond.

L'interprétation d'un essai de traçage doit toujours être faite avec prudence. Si la présence d'uranine est constatée, et que l'on puisse raisonnablement admettre qu'elle n'est pas due à une contamination, elle met en évidence une circulation depuis le point d'injection. En revanche, l'absence de restitution ne prouve pas qu'il n'existe pas de circulation : elle peut exister, et n'avoir pas pu être mise en évidence si les concentrations sont restées trop faibles pour être décelables, par exemple.

Avec 9 forages s'étant révélés négatifs, et 2 autres avec des concentrations peu significatives lors de cet essai, on ne peut rien en conclure quant à une relation hydraulique entre les formations calcaires et le Pliocène. L'absence de concentrations notables peut être due à une forte dilution engendrée par une forte dispersion : d'une part les distances depuis le point d'injection sont importantes (de 5,7 km pour Cases-de-Pène à 17,7 km pour le forage AEP de Salses), et d'autre part, les formations pliocènes sont assimilables à un milieu poreux, sans doute plus dispersif que le milieu karstique. Enfin, les débits transitant éventuellement du karst dans le Pliocène ne peuvent qu'être faibles par comparaison à ceux émergeant à Fontestramar et Fontdame.

3.2. VITESSES ET TEMPS DE PASSAGE

3.2.1. Sources de la Forteresse de Salses

Les échantillons prélevés sur trois sites différents dans la forteresse de Salses (§ 2.2.2) ont été analysés au fluorimètre en laboratoire. Le seuil de bruit de fond en uranine sur ces échantillons est de l'ordre de 0,05 ppb (0,05 µg/l). N'ont donc été comptabilisés positifs que les échantillons dont la concentration en uranine est supérieure à 0,05 ppb.

Les résultats des analyses sont présentés figure 7 et dans l'annexe 2 (§ 0). Ils ne font pas apparaître de différence majeure de comportement entre les trois points de la forteresse.

Les concentrations en uranine sont notables, mais restent basses. Elles s'inscrivent dans une restitution mal organisée, qui se fait sous forme de « bouffées » multiples, que l'on peut relier aux épisodes de crue, comme nous le verrons dans les résultats de Fontdame et Fontestramar (§ 3.2.2 et 3.2.3). Un maximum de 0,56 ppb a été observé fin octobre 2001 sur le point n°3.

Les premiers échantillons positifs sur les trois points datent du 5 septembre 2001, soit 44 jours après l'injection, ce qui, pour une distance de 17,3 km, donne une vitesse de première réapparition de l'ordre de 16 m/h (393 m/j). Des échantillons positifs ont encore été enregistrés lors de la crue d'août 2002, soit plus d'un an après l'injection.

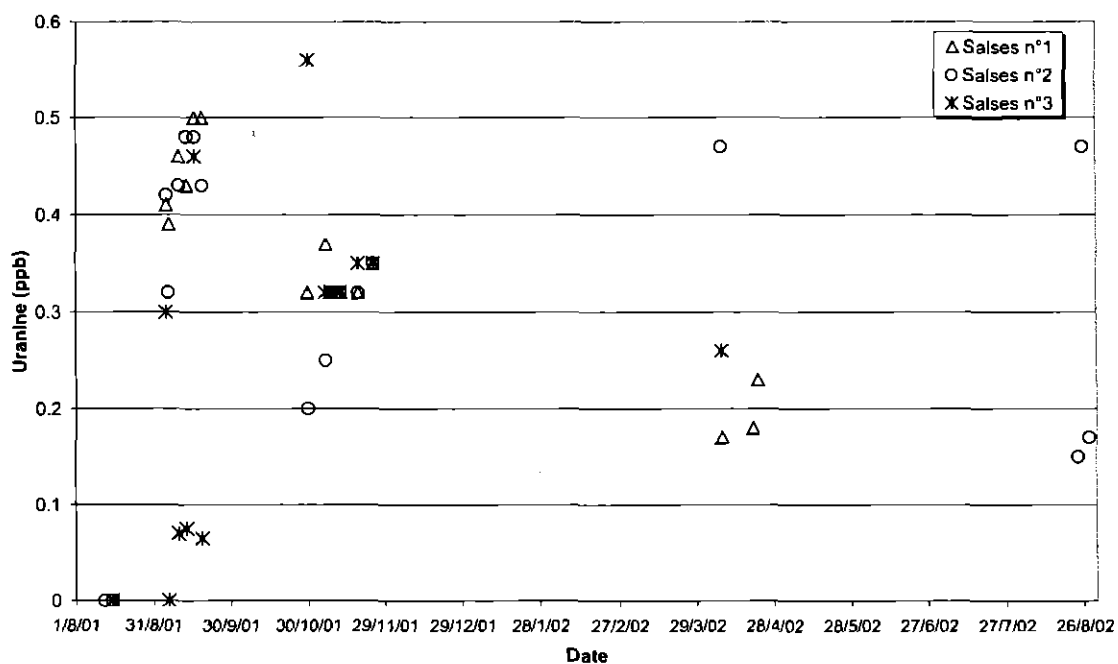


Fig. 7 - Concentrations en uranine sur les sources de la forteresse de Salses.

3.2.2. Source de Fontdame

Les échantillons analysés au fluorimètre au laboratoire présentent un bruit de fond de l'ordre de 0,05-0,07 ppb. N'ont donc été comptabilisés positifs que les échantillons dont la concentration en uranine est supérieure à ce bruit de fond (§ 0).

Sur les figure 8 et figure 9, nous avons fait figurer le signal de fluorescence brut enregistré par le fluorimètre installé dans la rigole de Fontdame, à hauteur de la pisciculture, les analyses des échantillons prélevés à Fontdame, ainsi que celles des sources de la forteresse de Salses. Le signal de fluorescence se présente sous forme de « bouffées » successives, associées pour la plupart à des épisodes de crues, si on les superpose à la pluie journalière mesurée à Tautavel (jusqu'en juin 2002, les données de pluie de juillet et août 2002 n'étant pas disponibles). D'une manière générale, on constate que les concentrations restent faibles.

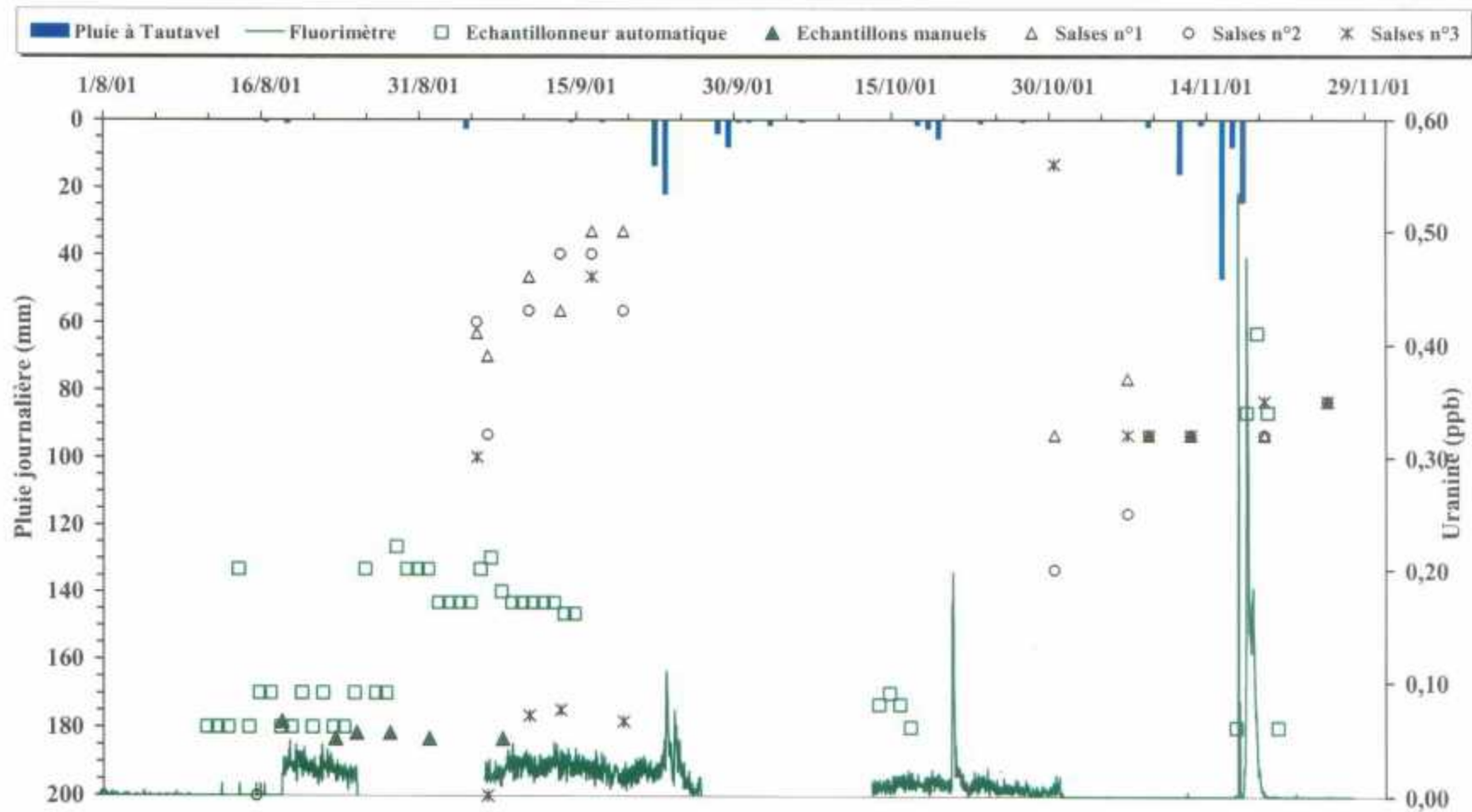


Fig. 8 - Concentrations en uranine mesurées aux sources de Fontdame et de Salses, avec les pluies journalières à Tautavel (08-11/2001).

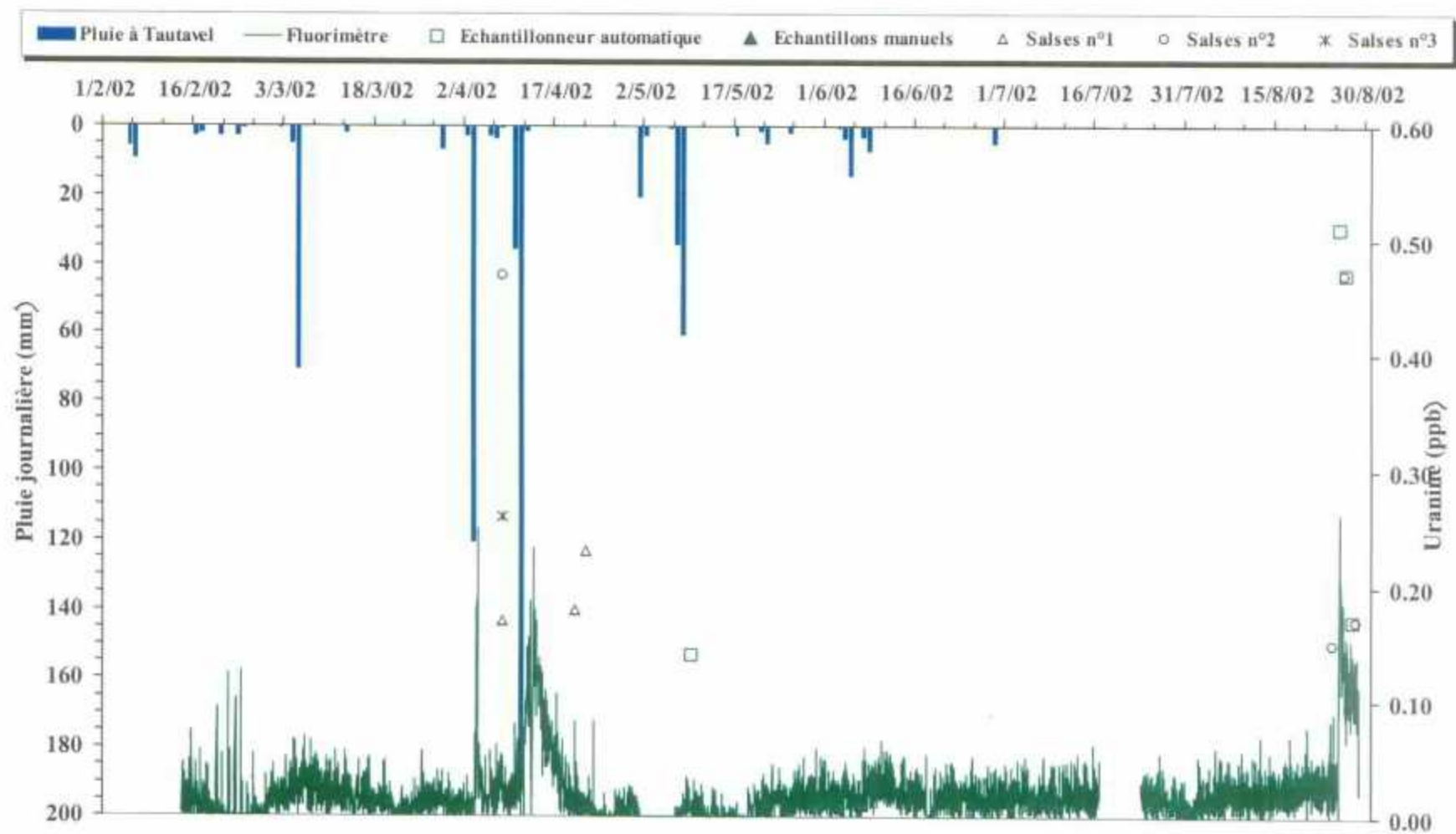


Fig. 9 - Concentrations en uranine mesurées aux sources de Fontdame et de Salses, avec les pluies journalières à Tautavel (02-08/2002) - Les données de pluie de juillet et août 2002, non disponibles, n'ont pas été reportées.

Les échantillons prélevés à Fontdame durant le mois d'août 2001 présentent une fluorescence à peine supérieure au bruit de fond : il pourrait s'agir d'une fluorescence due à la chlorophylle, compte tenu du lieu de prélèvement, en aval de la source dans la rigole traversant les sagnes. Sur cette même période, le fluorimètre n'enregistre qu'un signal proche du bruit de fond, correspondant à des concentrations en uranine non significatives, inférieures à 0,05 ppb.

Le fluorimètre a enregistré un premier pic significatif à 0,1 ppb le 23 septembre 2001, deux mois environ après l'injection (61,6 j), soit une vitesse de l'ordre de 14 m/h (325 m/j). Il est confirmé par l'analyse des échantillons de septembre.

Des pics sont enregistrés en septembre, octobre, et novembre 2001, en avril et août 2002, et sont confirmés par les échantillons (tableau 8). En décembre 2001 et janvier 2002, nous n'avons pas eu de mesures par le fluorimètre suite à un défaut d'enregistrement sur la carte mémoire. Cependant, tous les échantillons sont négatifs sur cette période qui n'a pas connu d'épisode pluvieux significatif.

Une corrélation nette des dates de réapparition peut être observée entre les échantillons de Fontdame et ceux des sources de la forteresse de Salses.

L'examen du signal de sortie du fluorimètre indique que les épisodes de restitution présentent une montée brutale : le maximum est en effet atteint en général quelques heures seulement après le début de l'épisode. Plusieurs pics bien définis peuvent également se suivre à quelques heures d'intervalle, comme c'est le cas en novembre 2001, et avril 2002. Nous verrons dans la partie 3.3.2 comment ces « bouffées » de traceur sont étroitement reliées aux variations de débit de la source de Fontdame.

Date et heure TU d'arrivée du maximum	2001					2002				
	23/09 01:17	20/10 07:55	16/11 13:13	17/11 08:13	17/11 22:13	23/02 12:05	05/03 21:53	03/04 19:06	13/04 01:41	25/08 09:00
Temps depuis l'injection (j)	61,6	88,8	116,1	116,8	117,4	215,0	225,4	254,3	263,6	398
Vitesse (m/j)	325	225	172	171	170	93	89	79	76	50
Vitesse (m/h)	14	9	7	7	7	4	4	3	3	2
C _{uranine} max (ppb)	0,109	0,197	0,534	0,477	0,183	0,128	0,070	0,250	0,233	0,263

Tableau 8 - Vitesses et temps de passage des principaux pics enregistrés à Fontdame (d'après les données enregistrées par le fluorimètre de terrain).

3.2.3. Source de Fontestramar

Comme pour Fontdame et Salses, les échantillons analysés au fluorimètre au laboratoire présentent un bruit de fond de l'ordre de 0,05-0,07 ppb. N'ont donc été comptabilisés positifs que les échantillons dont la concentration en uranine est supérieure à ce bruit de fond (§ 0).

Sur les figure 10 et figure 11 apparaissent le signal de fluorescence brut enregistré par le fluorimètre installé à 6 mètres de profondeur devant le puits d'entrée de la galerie noyée principale, les analyses des échantillons prélevés dans la vasque et à Extramer, ainsi que celles des sources de la forteresse de Salses pour la comparaison.

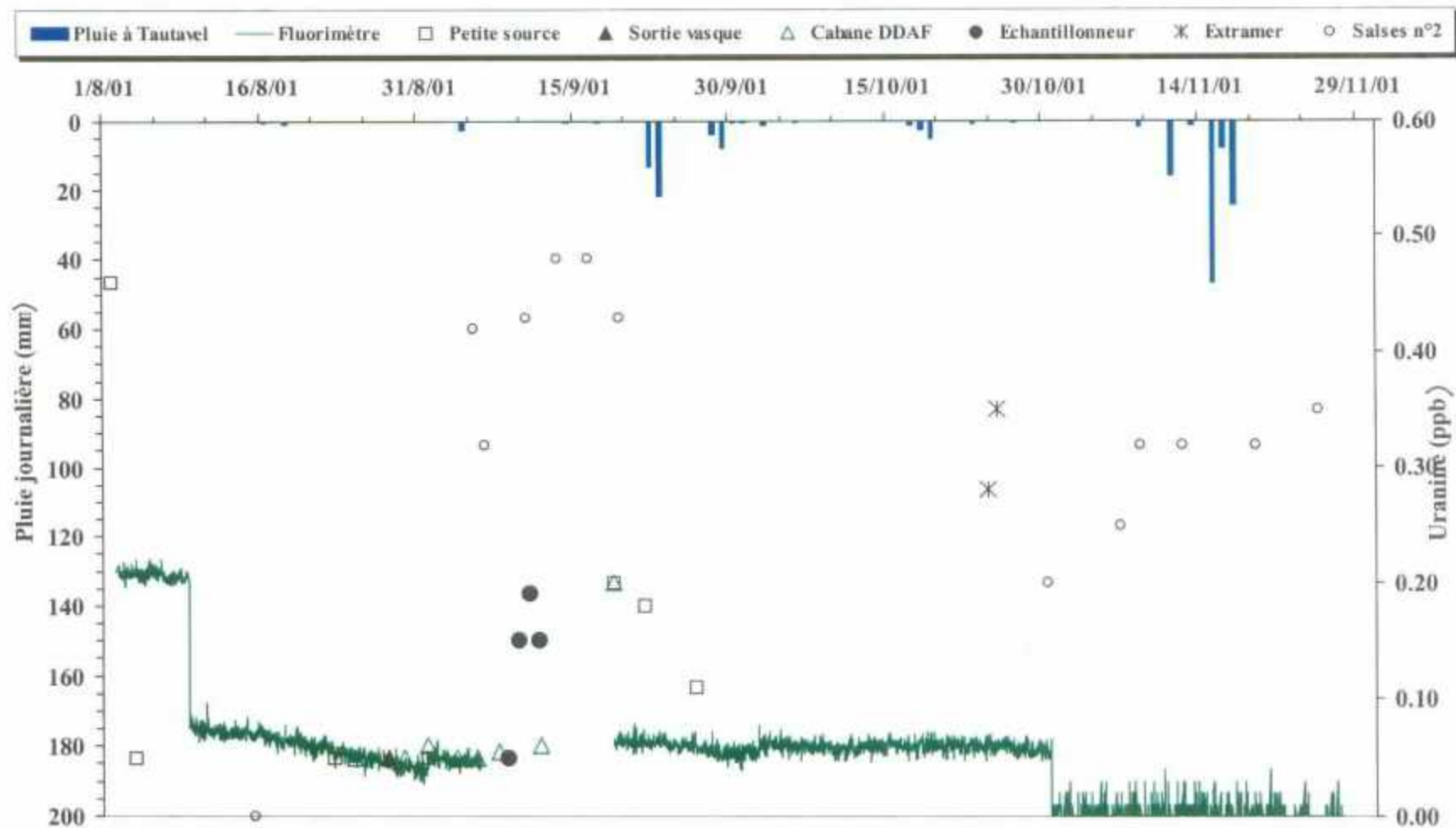


Fig. 10 - Concentrations en uranine mesurées aux sources de Fontestramar et de Salses, avec les pluies journalières à Tautavel (08-11/2001)

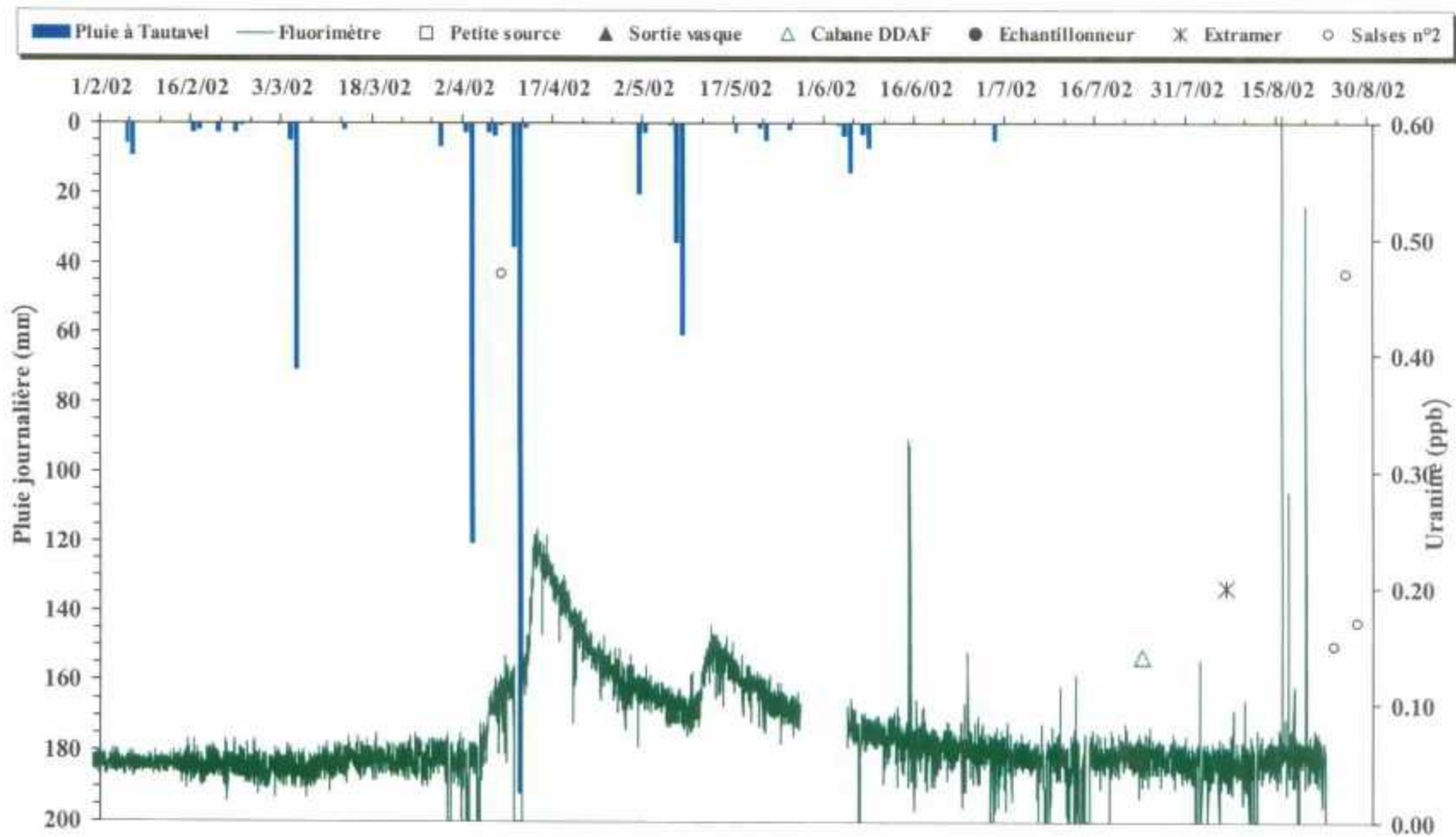


Fig. 11 - Concentrations en uranine mesurées aux sources de Fontestramar et de Salses, avec les pluies journalières à Tautavel (02-08/2002) - Les données de pluie de juillet et août 2002, non disponibles, n'ont pas été reportées.

Le signal de fluorescence enregistré par le fluorimètre installé dans la vasque de Fontestramar n'est pas interprétable durant toute l'année 2001 : il demeure bruité, sans pics significatifs, avec des valeurs de l'ordre de 0,05 ppb. De plus, des variations brutales de fluorescence sont visibles qui sont dues à des problèmes de fonctionnement de l'appareil.

Les tout premiers échantillons prélevés à Fontestramar en août 2001 sont nettement positifs, et incitent à penser à une contamination, peut-être par les spéléologues plongeurs alors présents sur le site, et/ou à la présence de chlorophylle due à la végétation.

Le premier échantillon que l'on estime significatif d'une réapparition de traceur date du 8 septembre 2001, prélevé par l'échantillonneur automatique (0,22 ppb), soit 47 jours après l'injection, ce qui donne une vitesse de 19 m/h (449 m/j). Septembre 2001 voit d'autres échantillons positifs sur les 3 points de prélèvements. Cette première phase de restitution concorde avec celle constatée sur les sources de Salses et de Fontdame.

A partir d'octobre 2001, un échantillonnage manuel journalier effectué par le personnel à la pisciculture Extramer est mis en place pour remplacer l'échantillonneur volé sur le site. Le premier échantillon positif date du 24 octobre 2001 (0,28 ppb), soit 93 jours après l'injection, ce qui donne une vitesse de 9 m/h (226 m/j). Cette phase de restitution est également enregistrée à Fontdame.

L'épisode de crue d'avril 2002 apparaît très nettement sur le signal de fluorescence enregistré par le fluorimètre : deux « bouffées » se succèdent, avec deux maximums les 8 et 13 avril, ce qui conduit à des vitesses de passage de l'ordre de 3 m/h (80 m/j). La décroissance du signal est lente. Une autre « bouffée » importante apparaît lors de l'épisode pluvieux de mai 2002. Les temps et vitesses de passage des maximums sont synthétisés dans le tableau 9.

Date et heure TU d'arrivée du maximum	08/04/2002 14:00	13/04/2002 19:00	12/05/2002 18:43
Temps depuis l'injection (j)	259,1	264,3	293,3
Vitesse (m/j)	81	79	72
Vitesse (m/h)	3,4	3,3	3,0
C _{uranine} max (ppb)	0,140	0,250	0,168

Tableau 9 - Vitesses et temps de passage des principaux pics enregistrés à Fontestramar (d'après les données enregistrées par le fluorimètre de terrain).

3.3. ANALYSES QUANTITATIVES SUR LES COURBES DE RESTITUTION

L'analyse quantitative des courbes de restitution du traceur permet d'accéder à différents paramètres caractérisant le système.

3.3.1. Masse restituée, temps moyen de résidence, vitesse moyenne

a) Définitions

Les analyses quantitatives sur les courbes de restitution reposent sur l'application du principe du transport de masse entre le point d'injection, et le(s) point(s) de restitution. Elles nécessitent la connaissance conjointe de la concentration en traceur, et du débit à l'exutoire concerné.

Les analyses numériques sont basées sur la méthode des moments, elles fournissent des estimations de la masse de traceur restituée, le temps moyen de résidence, et la vitesse moyenne, selon les équations données ci-dessous :

$$M_T = \int_0^T C(t)Q(t)dt$$

Équation 1 : Masse de traceur restituée à l'instant T après l'injection

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} tC(t)Q(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)Q(t)dt}$$

Équation 2 : Temps moyen de résidence

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{\infty} \frac{x_s}{t} C(t)Q(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)Q(t)dt}$$

Équation 3 : Vitesse moyenne du traceur

avec :

$C(t)$ la concentration en traceur mesurée à l'exutoire

$Q(t)$ le débit mesuré à l'exutoire

x_s la distance parcourue par le traceur depuis le point d'injection

Ces équations, établies pour des écoulements en milieu poreux, peuvent être également utilisées dans certains cas d'expériences de traçage en milieu karstique.

b) Cas du traçage des pertes du Verdoble

La restitution ne s'inscrit pas dans une courbe organisée de façon « classique », avec un maximum suivi d'une décroissance caractéristique de la dispersion du milieu.

Elle se présente sous la forme de « bouffées » de traceur successives, et relativement courtes. De ce fait, le calcul de temps moyen, et de vitesse moyenne n'a guère de sens, on ne peut aller plus loin que l'estimation des temps et vitesses d'arrivée des maximums présentée précédemment (§ 3.2).

L'estimation de la masse de traceur restituée est quant à elle possible.

3.3.2. Taux de restitution de la fluorescéine à la source de Fontdame

a) Définition

Pour calculer le taux de restitution de la fluorescéine à la source de Fontdame, nous avons utilisé les mesures de concentrations en uranine données par le fluorimètre, en ne prenant en compte que celles qui sont supérieures au bruit de fond estimé sur les échantillons analysés en laboratoire, soit 0,05-0,07 ppb.

$$R_T = \frac{\int_0^T [C_u(t) - bdf] Q(t) dt}{f_u M_0}$$

Équation 4 : Estimation du taux de restitution du traceur (fluorescéine)

avec :

- R_T le taux de restitution de la fluorescéine à l'instant T après l'injection
- $C_u(t)$ la concentration brute en uranine mesurée par le fluorimètre de terrain
- bdf le bruit de fond en fluorescence dans la source (0,05-0,07 ppb)
- f_u la teneur en uranine de la fluorescéine (75 %)
- M_0 la masse de traceur injectée (20 kg de fluorescéine)
- $Q(t)$ le débit de la source

b) Estimation du débit de la source de Fontdame

Le débit de la source de Fontdame est estimé par le BRGM à partir des variations de niveau de la nappe enregistrées au pas horaire sur le piézomètre 102, pour s'affranchir de l'influence du niveau de l'étang de Salses-Leucate³. Une courbe de tarage est établie à partir des jaugeages effectués dans la rigole de Fontdame à hauteur de la pisciculture, pour différents états hydrologiques (étiage, crues, et moyennes eaux).

c) Résultats

Les résultats sont présentés sur la figure 12, et en annexe 3.

³ Le principe et la méthode de calcul seront détaillés dans un rapport ultérieur.

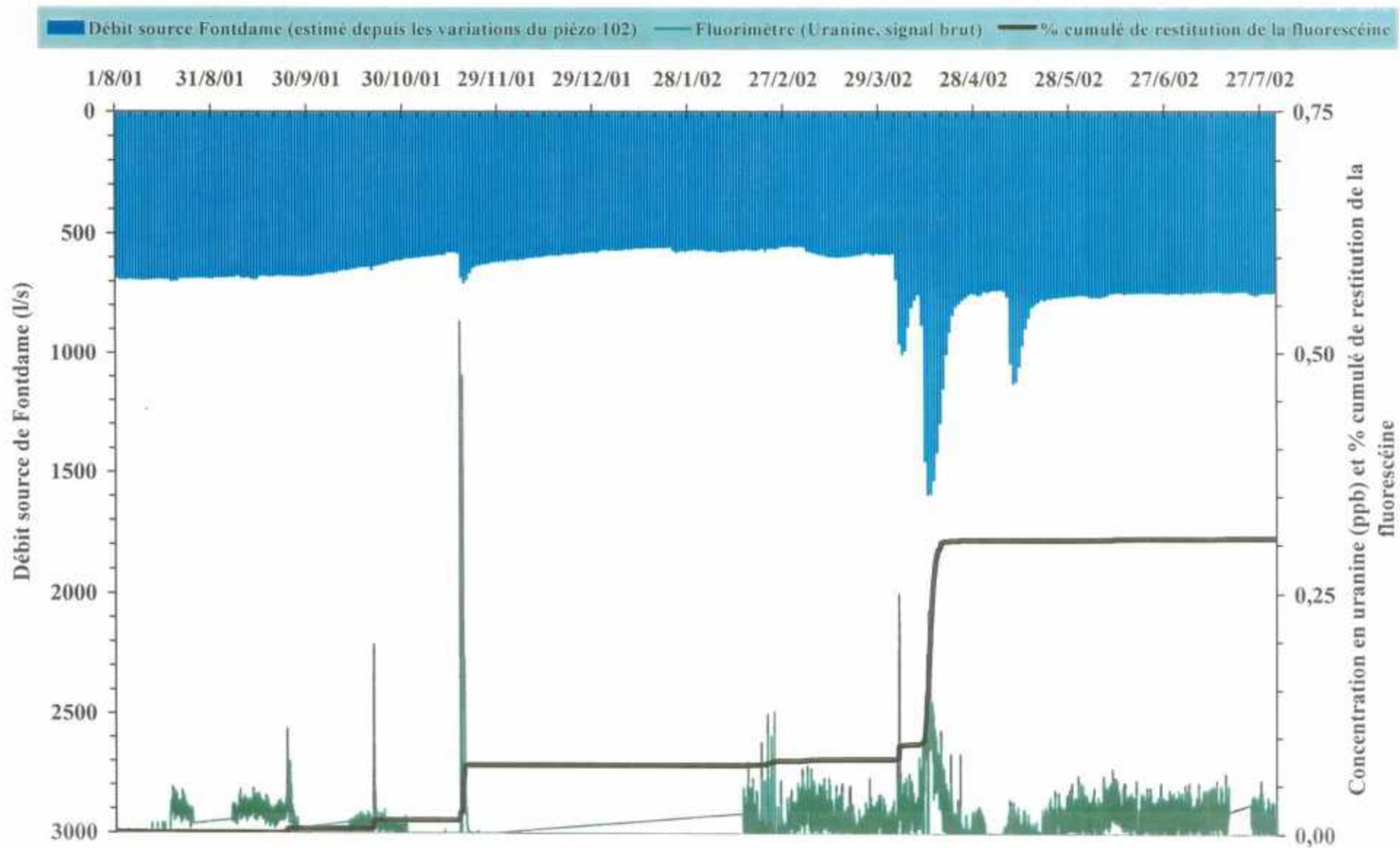


Fig. 12 - Taux de restitution cumulé de la fluorescéine à la source de Fontdame.

Le taux de restitution est calculé jusqu'à fin juillet 2002, période pour laquelle les données de débit sont disponibles. De plus, nous avons enlevé le fluorimètre fin août 2002 pour une révision, et il a été remis en place début octobre 2002.

Les résultats font clairement apparaître que la restitution en traceur s'opère pendant les épisodes de crue, et qu'elle est en proportion des volumes sortant à l'exutoire.

L'épisode de crue de novembre 2001 porte la restitution en fluorescéine de 0,02 % à 0,07 %, et celui d'avril 2002, le plus important avec un débit maximum estimé à plus de 1500 l/s, le porte à 0,3 %.

Si la restitution globale cumulée reste faible, inférieure à 1 % (60 g de fluorescéine restitués fin août 2002 sur les 20 kg injectés), elle est tout de même significative.

3.3.3. Taux de restitution de la fluorescéine à la source de Fontestramar

Le principe de calcul du taux de restitution à Fontestramar est le même que pour Fontdame (équation 4).

a) Estimation du débit de la source de Fontestramar

Le débit de la source de Fontestramar a été estimé par le BRGM, à partir des variations du niveau d'eau dans la vasque mesurées au pas horaire, et de jaugeages effectués en aval de la vasque, sur la « Rigole », formée par la réunion des deux ruisseaux de sortie gauche et droit.

L'écoulement en sortie de la vasque est fortement influencé par la présence (ou non) de végétaux et obstacles rocheux, qui varie en fonction des saisons : phases successives de décroissance et dégénérescence de la végétation aquatique, embâcles emportés par les crues... De ce fait, la relation hauteur/débit n'est pas univoque, mais présente des variations saisonnières : en été, le développement des algues entraîne une augmentation du niveau d'eau dans la vasque, et ne pas tenir compte de ce phénomène saisonnier conduit à une surestimation du débit en basses et moyennes eaux.

Pour pallier ce phénomène, les valeurs de débits données par la Banque HYDRO de 1997 à 2002 ont été reprises manuellement, en intégrant le niveau d'eau mesuré dans la vasque, ainsi que les jaugeages effectués par la DDAF 66 et le BRGM (Thomson, 2002).

b) Résultats

Les résultats sont présentés sur la figure 13, avec les variations de débit de la source, et en annexe 4.

Comme pour la source de Fontdame, le taux de restitution est calculé jusqu'à fin juillet 2002, période pour laquelle les données de débit sont disponibles. De plus, nous avons enlevé le fluorimètre fin août 2002 pour une révision, et il a été remis en place début octobre 2002.

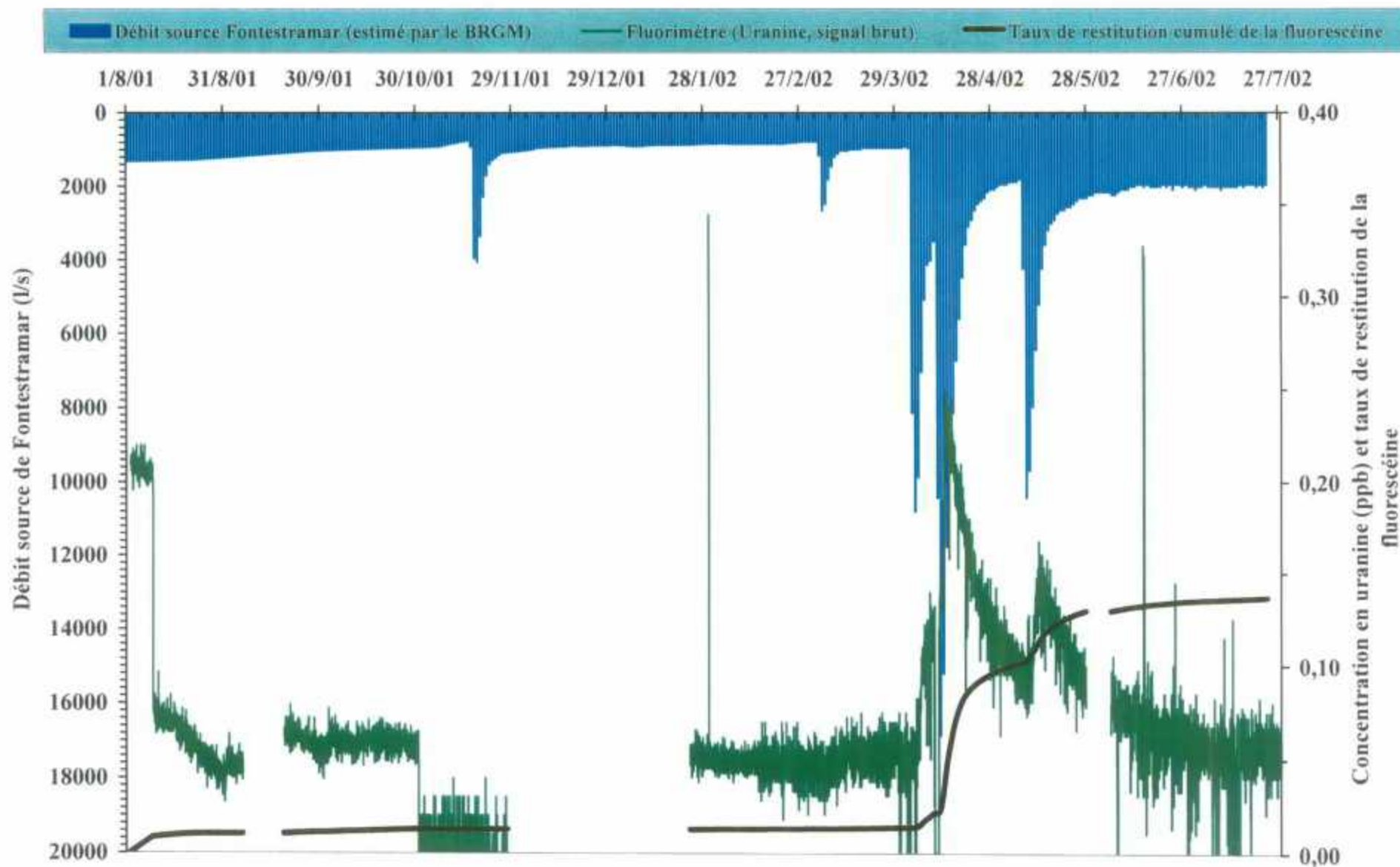


Fig. 13 - Taux de restitution cumulé de la fluorescéine à la source de Fontestramar.

Comme pour la source de Fontdame, les résultats font clairement apparaître que la restitution du traceur s'opère pendant les épisodes de crue, et qu'elle est en proportion des volumes sortant à l'exutoire.

Jusqu'en avril 2002, le taux de restitution augmente lentement jusqu'à 1,5 %, par intégration de concentrations indiquées par le fluorimètre de terrain qui sont très légèrement au-dessus du bruit de fond.

Les deux pics de la forte crue d'avril 2002 (le débit maximal est estimé à près de 17 m³/s), font passer le taux de restitution cumulé de 1,5 % à 10 % environ. Après la crue de la fin du mois de mai 2002, le taux de restitution cumulé est estimé à 13 %, ce qui correspond à une masse de fluorescéine restituée de près de 2,6 kg, sur les 20 kg injectés.

Cette restitution est tout à fait significative, plus de 40 fois plus importante qu'à Fontdame, ce qui est en proportion de leurs débits respectifs.

A la fin du mois de juillet 2002, la masse de fluorescéine restituée est de l'ordre de 60 g à Fontdame, et de plus de 2,7 kg à Fontestramar, ce qui conduit à une restitution globale de près de 2,8 kg, soit environ 14 % pour les deux sources cumulées.

3.4. CRITIQUE DES DONNEES

Les temps d'arrivée, et plus encore les taux de restitution à Fontdame et Fontestramar sont estimés à partir des signaux de fluorescence enregistrés par les fluorimètres de terrain. Or, si les pics enregistrés sont significatifs, et pour la plupart confortés par les analyses effectuées sur les échantillons, les concentrations restent faibles, la plupart du temps à peine supérieures au bruit de fond, les maximums enregistrés restant inférieurs au ppb. De ce fait, les sources d'incertitude sont nombreuses.

3.4.1. Sources d'incertitudes sur les données

Plusieurs sources d'incertitudes peuvent être recensées sur les données de fluorescence enregistrées par le fluorimètre : le calibrage de l'appareil, l'encrassement de la cellule de mesure, et la fluorescence parasite induite par la turbidité, la présence de matière organique, et l'interférence avec un autre traceur.

Le principe de mesure de la fluorescence est le suivant : l'eau passant dans la cellule du fluorimètre est excitée par une lampe dont la longueur d'onde d'excitation correspond au traceur recherché (§ 2.3.1). L'appareil mesure alors la réponse à la longueur d'onde d'émission du traceur recherché, sous forme d'un signal électrique proportionnel à la concentration. Ce signal électrique est converti en fluorescence via une courbe de calibrage (polygone du premier degré, dont les coefficients sont déterminés avec des solutions étalons). Le calibrage de l'appareil a été fait au laboratoire avant son installation sur site.

Au cours de l'étude, la cellule du fluorimètre peut s'encrasser avec des dépôts (les eaux de Fontdame et Fontestramar sont minéralisées), et conduire à une incertitude sur la mesure (surestimation de la turbidité). La cellule a fait l'objet d'un nettoyage pour l'un des deux appareils lors de leur démontage fin août 2002 pour contrôle et entretien (anti-corrosion).

3.4.2. Fluorescence induite par la turbidité

La turbidité de l'eau peut induire un signal de fluorescence parasite. Cette turbidité peut être liée à des matières en suspension, des algues, de la matière organique... Dans les milieux karstiques, il est fréquent que les sources présentent une forte turbidité lors des épisodes de crue, par lessivage des produits d'altération (argiles,...) accumulés dans les chenaux.

Pour les deux fluorimètres installés à Fontdame et Fontestramar, une part de la fluorescence induite par la turbidité est corrigée via le calibrage de l'appareil. La correction n'est cependant pas aussi fiable que lorsque la turbidité est mesurée de façon indépendante par une lampe infra-rouge, mais nos appareils ne possèdent pas cette configuration. Il faut noter de plus, que les valeurs numériques de la turbidité restent indicatives.

L'examen des courbes à Fontdame (fig. 14) et Fontestramar (fig. 15) suggère que les pics de fluorescence en uranine sont associés à des pics de turbidité lors des crues.

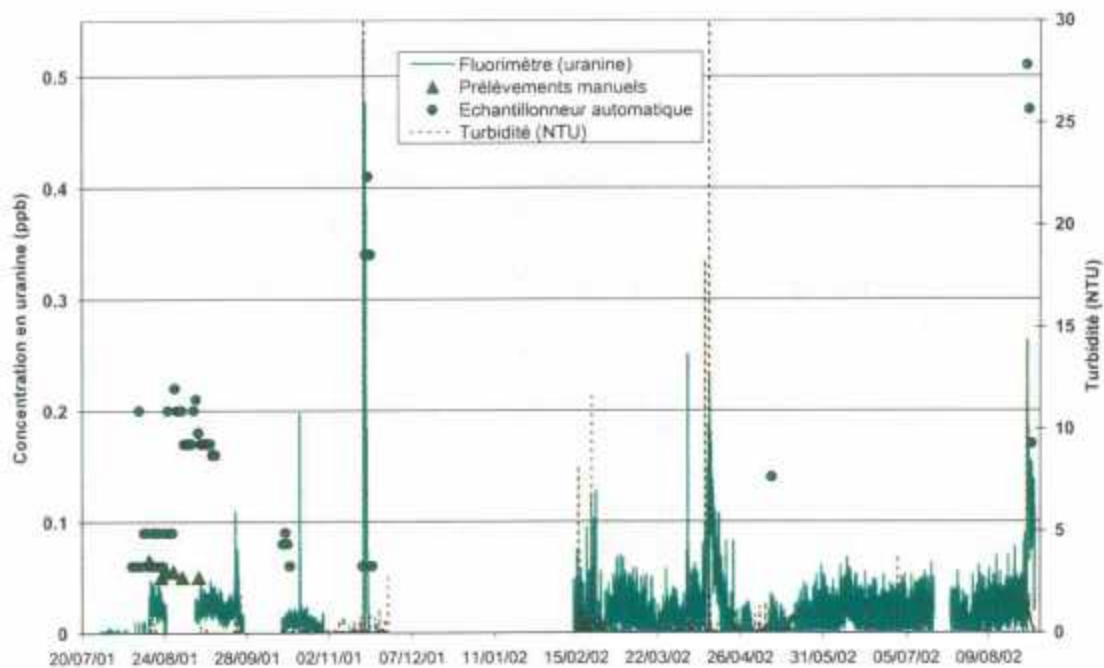


Fig. 14 - Concentrations en uranine et turbidité mesurées à Fontdame.

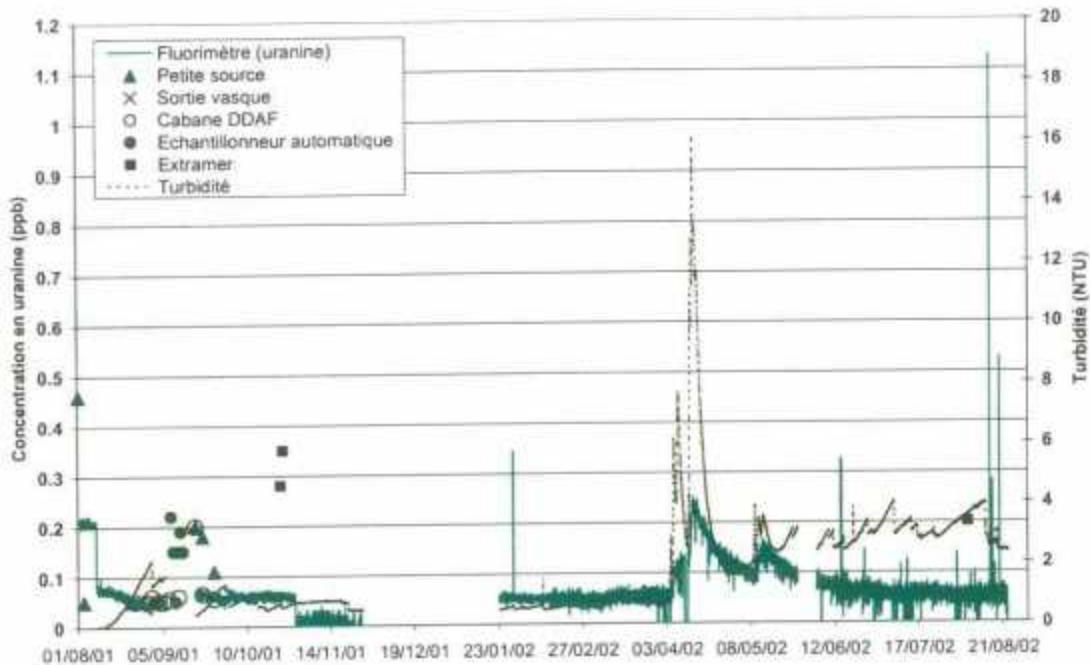


Fig. 15 - Concentrations en uranine et turbidité mesurées à Fontestramar.

Il n'est donc pas exclu qu'une part de la fluorescence soit induite (et non entièrement corrigée) par la turbidité. Un examen plus détaillé des courbes montre cependant que les différents pics ne sont pas complètement concomitants, avec des temps d'arrivée décalés de plusieurs heures (le signal en fluorescence étant généralement en avance), et des durées plus courtes pour la turbidité. Ce fait tend à prouver que la turbidité joue un rôle non prépondérant sur la mesure de la fluorescence.

3.4.3. Réponse en uranine induite par un autre traceur

Les fluorimètres de terrain permettent la mesure conjointe de deux traceurs : l'uranine, et la sulfo-rhodamine G. La différenciation entre les deux traceurs s'effectue grâce à l'écart en longueur d'onde entre leurs spectres d'émission. Les longueurs d'onde correspondant au maximum d'émission sont de 515 nm et 590 nm respectivement pour l'uranine et la sulforhodamine G. Cependant, les spectres d'émission de ces deux traceurs ont une bande passante non négligeable, d'où l'existence d'un certain recouvrement, qui conduit à ce qu'une part de la fluorescence attribuée à un traceur puisse être en réalité due à la présence de l'autre.

Or, en février 2002, nous avons procédé à une injection de sulforhodamine G dans les pertes de l'Agly au niveau du pont submersible d'Estagel. Une ambiguïté pouvait donc exister dans les interprétations des résultats à partir de février 2002, c'est-à-dire, est-ce qu'une part de la fluorescence attribuée à l'uranine peut être en fait due à la sulforhodamine G, et réciproquement ?

Les figure 16 et 18 indiquent qu'à Fontdame et Fontestramar, la plupart des pics d'uranine sont associés à des pics de turbidité et de sulfo G, plus abrupts et de plus courte durée. L'examen des données montre cependant que des pics de sulforhodamine G accompagnent les pics d'uranine avant même l'injection de ce

traceur en février 2002 (fig. 17e plus, le contrôle en laboratoire sur les échantillons prélevés manuellement montre que la sulforhodamine G est absente.

Ces différents arguments nous amènent à penser que les pics de sulforhodamine G sont des artefacts dus à la turbidité. Même s'ils induisent une certaine réponse de fluorescence en uranine, ils ne peuvent l'expliquer, les deux signaux n'ayant pas la même forme : les pics de l'uranine apparaissent plus longs.

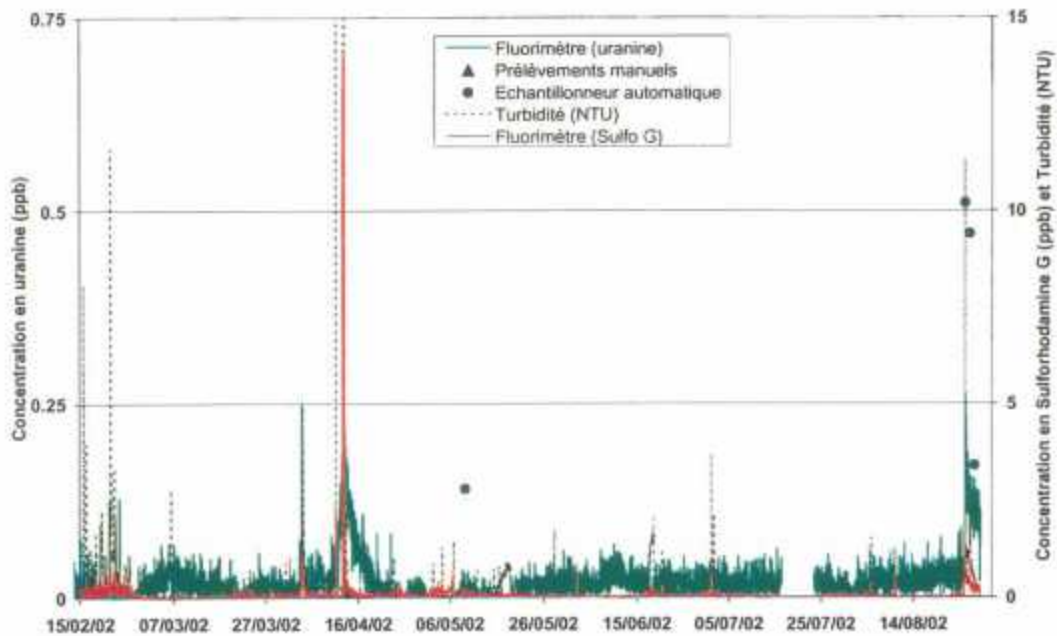


Fig. 16 - Fontdame : Concentrations en uranine et sulfo G, et turbidité, en 2002.

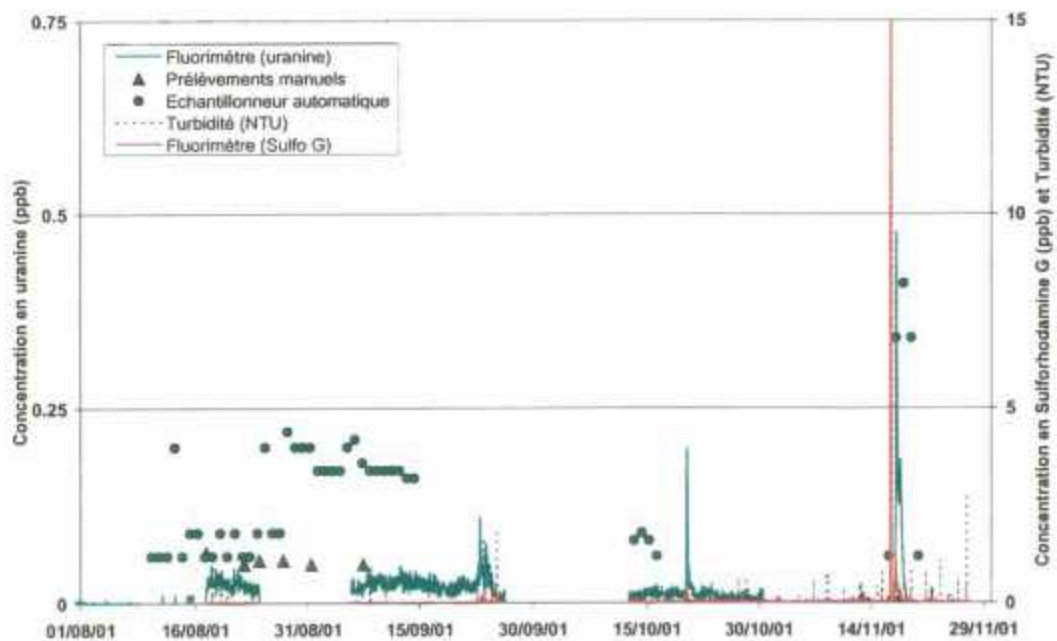


Fig. 17 - Fontdame : Concentrations en uranine et sulfo G, et turbidité, en 2001.

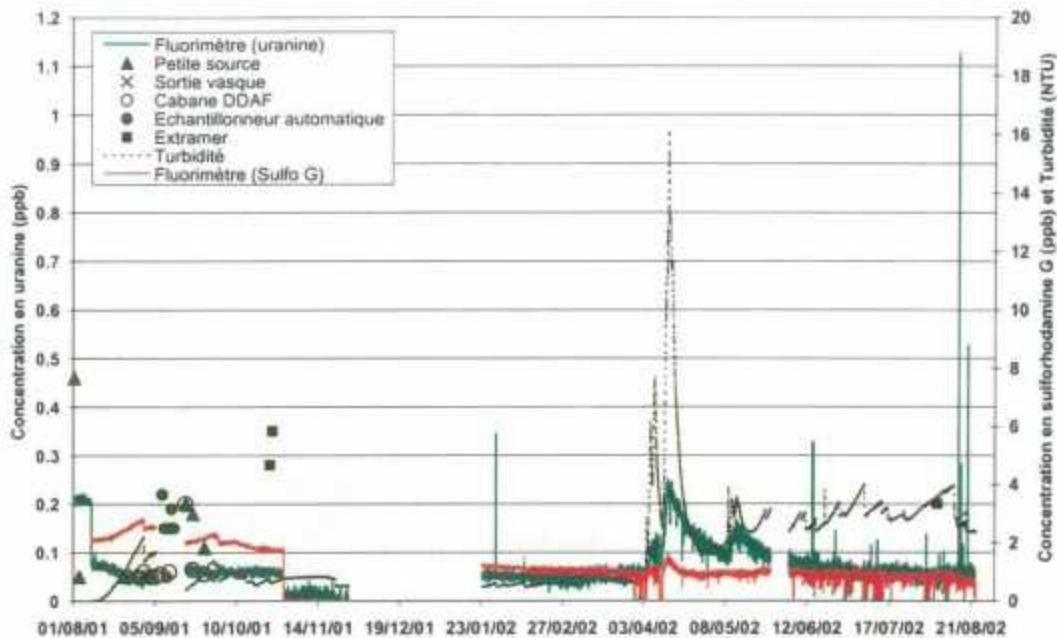


Fig. 18 - Fontestramar : Concentrations en uranine et sulfo G, et turbidité.

3.4.4. Analyse corrélatoire

Pour affiner l'analyse de la fluorescence induite, nous avons mené une étude détaillée du signal en uranine, sulforhodamine G et turbidité à l'aide du logiciel TEMPO développé par le BRGM. Ce logiciel permet de quantifier les corrélations entre signaux.

a) Corrélogrammes simple et croisé

L'analyse corrélatoire permet de caractériser la dépendance dans le temps d'une variable. Un des outils de l'analyse corrélatoire est le corrélogramme, qui permet de caractériser le degré de corrélation entre les valeurs successives d'une même série temporelle (corrélogramme simple), ou entre les valeurs de deux séries temporelles (corrélogramme croisé).

Le corrélogramme simple d'une série temporelle $S(i.dt)$ avec i le nombre de pas de temps (de 1 à N), et dt l'incrément de temps, est défini pour la valeur de h (entier positif, négatif, ou nul), à partir de la moyenne centrée de :

$$S(i.dt) \cdot S((i+h).dt) , i = 1, N$$

Il caractérise le degré de corrélation qui existe entre deux points d'une série temporelle distants de $h.dt$. La valeur de $h.dt$ pour laquelle le corrélogramme tend vers zéro est appelée « longueur de la réponse » ou « portée ». C'est le temps écoulé entre deux événements au-delà duquel ces événements apparaissent comme non corrélés.

Par extension, le corrélogramme croisé entre deux séries temporelles S_1 et S_2 est défini pour la valeur de h (entier positif, négatif, ou nul), à partir de la moyenne centrée de :

$$S_1(i.dt) \cdot S_2((i+h).dt) , i = 1, N$$

Il permet notamment d'analyser les relations de causalité entre deux séries.

L'analyse corrélatrice a été menée sur les données des deux sources de Fontdame et Fontestramar, sur la période du 8 août 2001 au 30 juin 2002, soit sur 326 j.

b) Résultats pour Fontdame

Corrélogrammes simples

- Les corrélogrammes simples de la turbidité et de la sulfo G sont confondus (fig. 19), et ne sont plus significatifs quand le décalage en temps est supérieur à 8 h. Ceci indique que ces deux signaux sont très peu autocorrélés.
- Le signal en uranine montre une plus grande autocorrélation : la portée du signal est inférieure à 200 h (8,3 j), on n'a plus d'autocorrélation pour un décalage en temps supérieur à 200 h.
- La portée du débit de Fontdame est de l'ordre de 900 h (37,5 j), on n'a donc plus d'autocorrélation pour un décalage supérieur à 900 h.

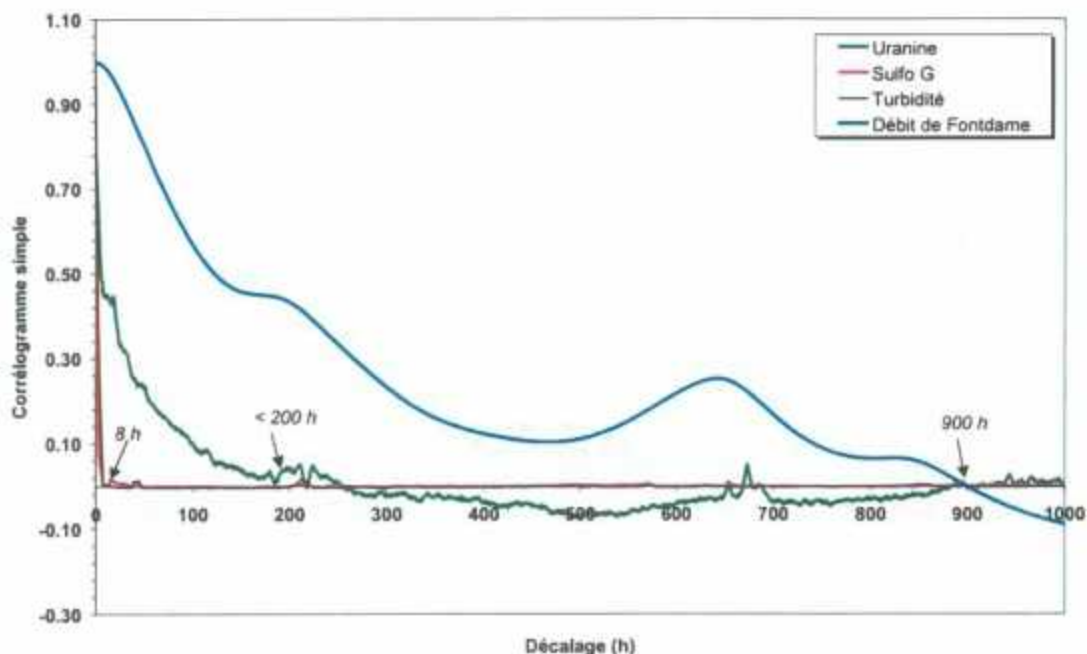


Fig. 19 - Fontdame : Corrélogrammes simples du signal en fluorescence, de la turbidité, et du débit de la source (pas de temps des données = 1 h).

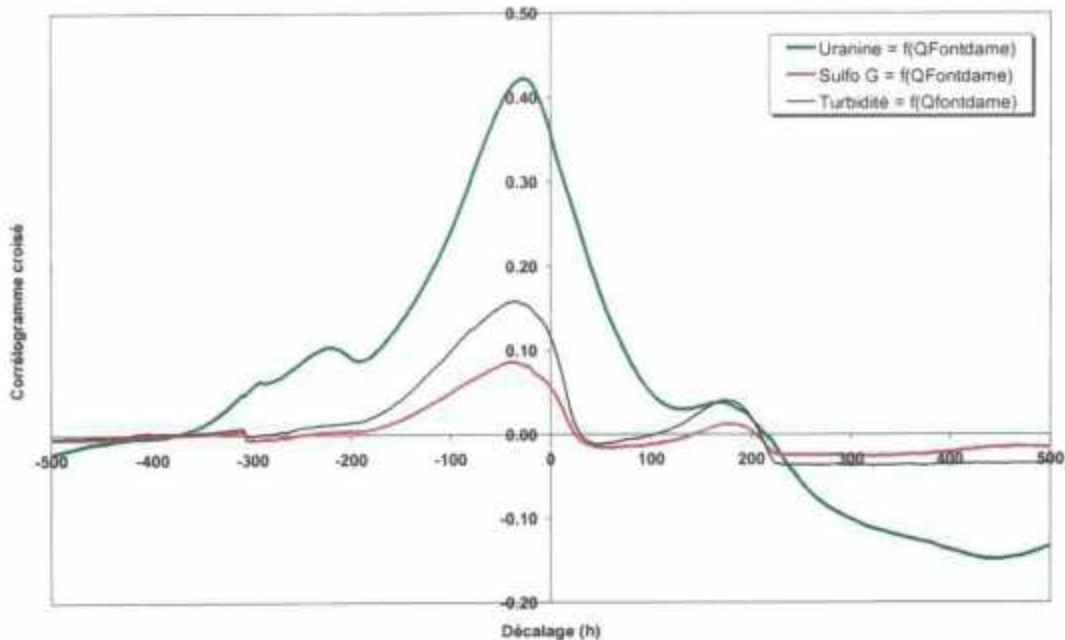


Fig. 20 - Fontdame : Corrélogramme croisé du signal en fluorescence et turbidité en fonction du débit de la source (pas de temps des données = 1 h).

Corrélogrammes croisés : en fonction du débit de la source

La figure 20 montre le corrélogramme croisé du signal enregistré par le fluorimètre à Fontdame en fonction du débit de la source.

- Les valeurs du corrélogramme croisé [Uranine-Débit] restent assez fortes jusqu'à un décalage positif de l'ordre de 100 h (4,2 j).
- Les valeurs des corrélogrammes croisés [Turbidité-Débit] et [Sulfo G-Débit] pour des décalages positifs sont beaucoup moins fortes que celles du corrélogramme croisé [Uranine-Débit]. Les relations de cause à effet entre les signaux sulfo G et turbidité, et le débit de Fontdame, sont donc moins prononcées, voire inexistantes pour la sulfo G. La turbidité est faiblement liée au débit jusqu'à des décalages positifs de l'ordre de 20 h, au delà, elle n'apparaît plus corrélée.
- Les pics de corrélation maximale apparaissent pour un décalage négatif d'une trentaine d'heures : les signaux en uranine, sulfo G, et turbidité apparaissent donc en avance de phase par rapport au débit. Ce résultat étonnant trouve peut-être son explication dans le fait que le débit de la source de Fontdame est estimé à partir des variations de l'aquifère dans le piézomètre 102 (§ 3.3.2) : on peut en effet envisager qu'au passage d'un épisode de crue, les variations de hauteurs d'eau dans l'aquifère soient légèrement en retard par rapport aux variations de débit réel à l'exutoire. Ainsi, en estimant le débit de la source en fonction des variations piézométriques, on pourrait introduire un retard artificiel qui conduirait à ce que le signal enregistré par le fluorimètre semble en avance. Pour évaluer cette hypothèse, nous avons calculé le corrélogramme croisé du signal (moyenné au pas de temps journalier) en fonction de la pluie journalière à Tautavel, pour s'affranchir de l'incertitude liée à l'évaluation du débit de la source (fig. 21). Le décalage apparaît

alors positif : le signal en uranine est en retard de phase de 2 jours par rapport à la pluie, ce qui paraît plus logique, et confirme en partie l'hypothèse.

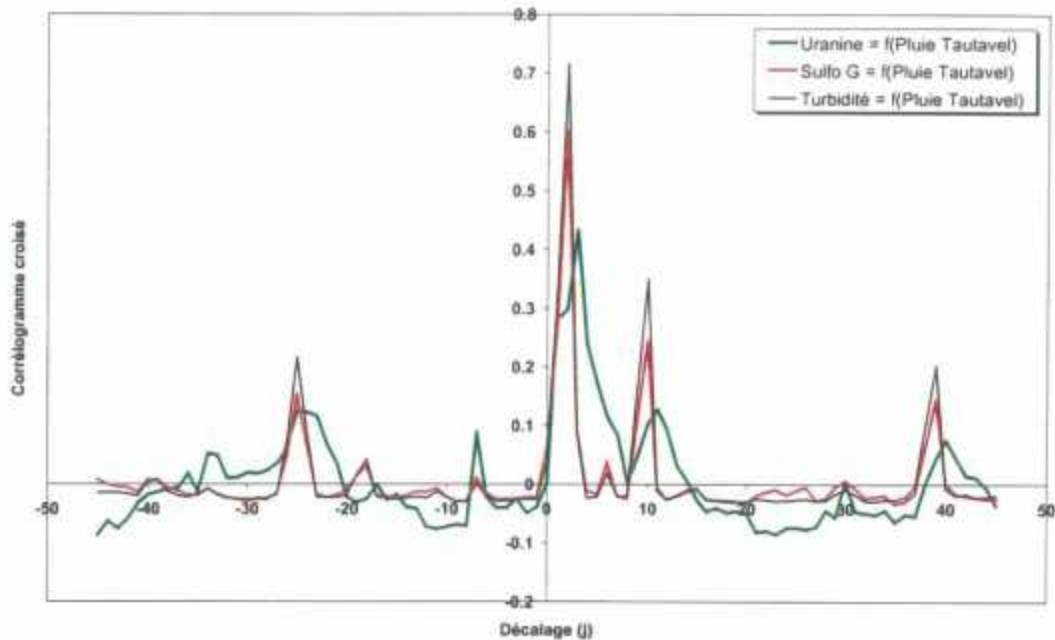


Fig. 21 - Fontdame : Corrélogramme croisé du signal en fluorescence et turbidité en fonction de la pluie journalière à Tautavel (pas de temps des données = 1 j).

Corrélogrammes croisés : en fonction de la turbidité

Pour mieux quantifier la fluorescence induite par la turbidité, nous avons calculé le corrélogramme croisé de la réponse en traceurs en fonction de la turbidité (fig. 22).

- Pour les décalages inférieurs à 8 h, la valeur du corrélogramme croisé [Sulfo G-Turbidité] est forte, puis elle est nulle au delà. L'allure du corrélogramme croisé était prévisible, compte tenu de la très faible autocorrélation des signaux (fig. 19). On peut donc en conclure que le signal en sulfo G n'est qu'un artefact de la turbidité présente dans les eaux de la source lors des épisodes de crue.
- Les valeurs du corrélogramme croisé [Uranine-Turbidité] sont significatives pour les décalages compris entre 13 h et 36 h, ce qui indique que la turbidité semble influencer légèrement le signal en uranine mesuré.

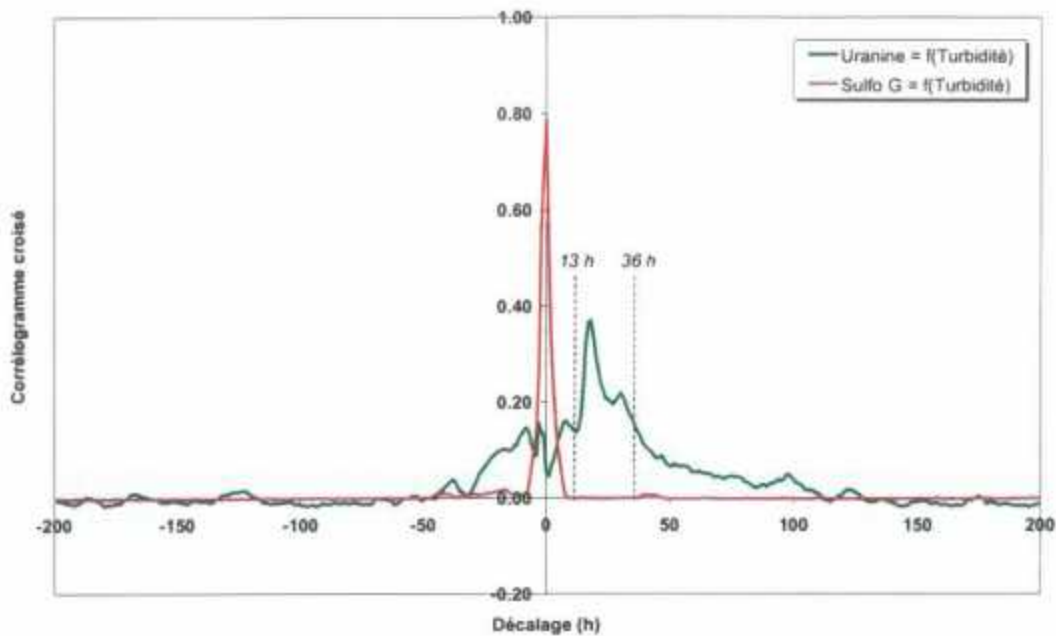


Fig. 22 - Fontdame : Corrélogramme croisé du signal en fluorescence en fonction de la turbidité (pas de temps des données = 1 h).

c) Résultats pour Fontestramar

Le même type d'analyse corrélatrice est mené sur la source de Fontestramar.

Corrélogrammes simples

La figure 23 montre les corrélogrammes simples du signal enregistré par le fluorimètre et du débit de la source.

- Le débit et la turbidité sont fortement autocorrélés jusqu'à des décalages supérieurs à 200 h (8,3 j). La portée est de l'ordre de 400 h (16,6 j) : au delà, ces deux signaux ne sont plus autocorrélés.
- La sulfo G et l'uranine sont fortement autocorrélés jusqu'à des décalages de l'ordre de 400 h (16,6 j). La portée de l'uranine est de l'ordre de 1000 h (41,6 j), et celle de la sulfo G de 625 h (26 j).

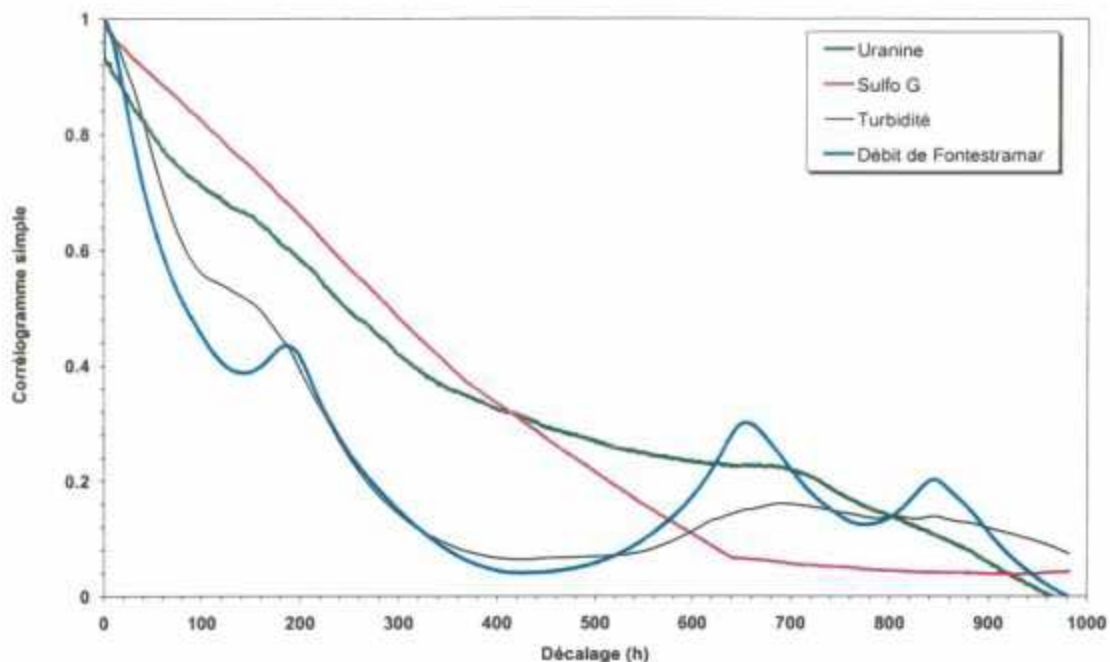


Fig. 23 - Fontestramar : Corrélogrammes simples du signal en fluorescence, de la turbidité, et du débit de la source (pas de temps des données = 1 h).

Corrélogrammes croisés : en fonction du débit de la source

La figure 24 montre les corrélogrammes croisés du signal de fluorescence et turbidité en fonction du débit de la source de Fontestramar.

- Le corrélogramme croisé [Turbidité-Débit] montre une relation de cause à effet forte jusqu'à des décalages de l'ordre de 250 h (10,4 j). Au delà, la corrélation est moins significative.
- Le corrélogramme croisé [Uranine-Débit] montre une relation de cause à effet forte jusqu'à des décalages de l'ordre de 500 h (20,8 j). Au delà, la corrélation est plus faible, mais reste significative.
- Le corrélogramme croisé [Sulfo G-Débit] montre une absence de corrélation : le signal en sulfo G n'est donc pas commandé par les variations de débit de la source.

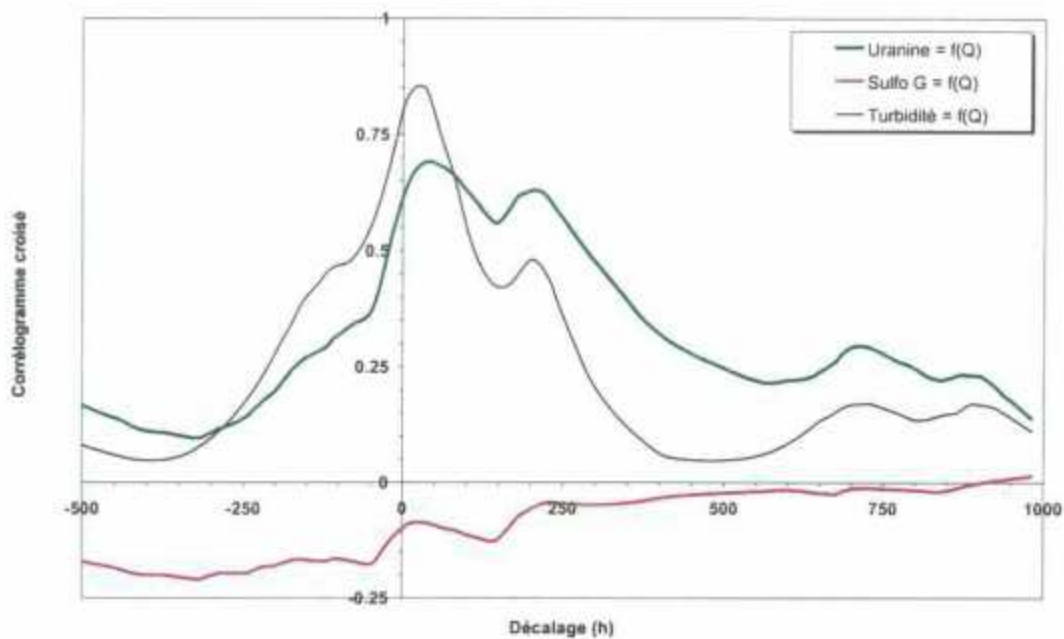


Fig. 24 - Fontestramar : Corrélogramme croisé du signal en fluorescence et turbidité en fonction du débit de la source (pas de temps des données = 1 h).

Corrélogrammes croisés : en fonction de la turbidité

La figure 24 montre les corrélogrammes croisés du signal de fluorescence en fonction de la turbidité.

- Le corrélogramme croisé [Uranine-Turbidité] montre une relation de cause à effet forte jusqu'à des décalages de l'ordre de 250 h (10,4 j), plus faible mais néanmoins encore significative ensuite.
- Le corrélogramme croisé [Sulfo G-Turbidité] montre une absence de corrélation.

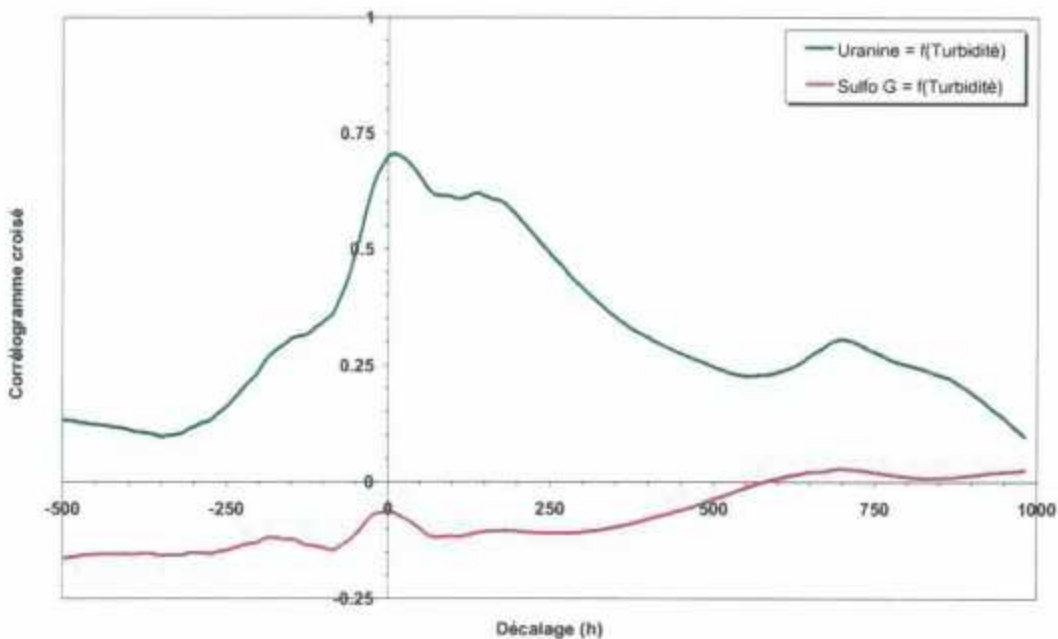


Fig. 25 - Fontestramar : Corrélogramme croisé du signal en fluorescence et turbidité en fonction du débit de la source (pas de temps des données = 1 h).

d) Conclusion

L'analyse corrélatoire effectuée sur les signaux de concentration en uranine et de turbidité donnés par les fluorimètres indiquent que la fluorescence est influencée en partie, mais non totalement expliquée, par la présence de turbidité dans l'eau lors des épisodes de crue : le corrélogramme croisé entre l'uranine et le débit montre une réponse de plus longue durée que pour la turbidité, indiquant qu'il s'agit bien d'une réponse du fluorimètre à un passage effectif de traceur.

Le signal en sulforhodamine G apparaît quant à lui comme un artéfact de la turbidité lors des épisodes de crue.

Le signal en uranine est beaucoup plus influencé par la turbidité à Fontestramar qu'à Fontdame, ce qui peut être dû en partie à une correction moins efficace de la turbidité.

Cette analyse permet d'affirmer que le signal en uranine est bien significatif d'une restitution de la fluorescéine injectée dans les pertes du Verdoube. Il faut noter cependant que les taux de restitution d'uranine calculés sont donnés par excès, puisqu'ils intègrent la part de fluorescence (difficilement quantifiable) induite par la turbidité. Ceci est plus important à Fontestramar qu'à Fontdame.

4. Implications sur la connaissance du système karstique de Fontestramar-Fontdame

4.1. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DE LA RESTITUTION

Le traçage des pertes du Verdoble à la fluorescéine en juillet 2001 a fait apparaître de façon certaine une restitution en traceur dans les sources karstiques de la forteresse de Salses, de Fontdame et de Fontestramar, situées respectivement à environ 17, 20, et 21 km à vol d'oiseau du point d'injection.

Sur les deux sources majeures de Fontdame et Fontestramar, la mesure en continu de la fluorescence par fluorimètre de terrain, associée au suivi conjoint des variations de débit, a permis un suivi détaillé de la restitution dans le temps, dont on peut résumer les caractéristiques principales comme suit :

- les concentrations en traceur sont faibles, les maximales restant généralement inférieures au ppb,
- les concentrations mesurées ne s'inscrivent pas dans une courbe de restitution bien organisée : la restitution se présente sous forme de « bouffées » de traceur associées aux épisodes de crues des exutoires karstiques. L'analyse corrélatrice a montré qu'il ne s'agit pas d'artéfacts dus à la fluorescence induite par la turbidité associée aux épisodes de crues dans les milieux karstiques (lessivage des produits de dissolution du karst, argiles,...),
- les « bouffées » de traceur présentent peu de dispersion : leur durée est directement liée à celle de l'épisode de crue qui les a engendrées,
- il est remarquable que plus d'un an après l'injection, des « bouffées » de traceur soient toujours associées à chaque nouvel épisode de crue,
- pour les trois sources karstiques suivies, la vitesse de transit la plus rapide est du même ordre de grandeur : 16 m/h pour les sources de Salses, 14 m/h pour Fontdame, et 19 m/h pour Fontestramar,
- enfin, les taux de restitution estimés à Fontdame et Fontestramar restent faibles : à fin août 2002, sur les 20 kg de fluorescéine injectés, la masse restituée est de l'ordre de 61 g à Fontdame, et 2,7 kg à Fontestramar, soit une restitution en masse d'environ 14 % cumulée sur les deux sources. L'ordre de grandeur du rapport des taux de restitution des deux sources est proportionnel à celui de leurs débits respectifs.

4.2. CONSEQUENCES SUR LE SYSTEME KARSTIQUE

Les caractéristiques de la restitution énumérées ci-dessus suggèrent plusieurs éléments sur le système karstique de Fontestramar-Fontdame.

Les pertes du Verdoble sont en connexion hydraulique avec les sources de Fontestramar et Fontdame principalement, elles appartiennent au bassin d'alimentation de ce système.

Il apparaît clairement que le traçage ne concerne pas un conduit karstique unique connecté à l'exutoire. Deux arguments fondent cette remarque :

- Les taux de restitution sont assez faibles.

- Les temps de passage sont incompatibles avec les vitesses d'écoulement en conduit : les vitesses classiquement rencontrées dans les conduits karstiques sont supérieures à 50 m/h en étiage, et sont nettement supérieures à 100 m/h en crue. Dans le cas des Corbières, pour des distances de l'ordre de 20 km, et en contexte d'étiage, la première arrivée aurait dû être observée dans les 15 jours après l'injection. Or, elle est enregistrée plus d'un mois et demi après, pour des vitesses de l'ordre de 14 à 19 m/h.

Il est probable que le traçage ait concerné une partie du système dans laquelle le(les) drain(s) principal(aux) n'est (ne sont) pas fonctionnel(s) en permanence, mais seulement sollicité(s) par les pluies. On peut envisager que le traceur soit stocké (« piégé ») dans la zone noyée du système constituée de réservoirs mal connectés hydrauliquement : les crues l'en expulsent petit à petit sans qu'il y ait réellement de dispersion, comme on pourrait en attendre s'il avait concerné un réseau de conduits ramifiés, ayant chacun leur propre vitesse d'écoulement.

De plus, le fait que des bouffées de traceur sont encore enregistrées plus d'un an après l'injection indique que les volumes de stockage sont sans doute importants, sans écoulement pérenne majeur, et qu'ils ne sont sollicités que lors des crues : en effet, on n'enregistre pas de signal de fluorescence résiduel aux exutoires en dehors des épisodes de crue. Ce dernier argument doit tout de même être tempéré par le fait que les concentrations en traceur restent très faibles.

Les travaux actuellement en cours au BRGM (Thomson, 2002) sur le système karstique des Corbières d'Opoul suggèrent que les eaux de la source de Fontestramar pourraient être issues de deux réservoirs principaux :

- Des « eaux profondes », poussées vers l'exutoire par les eaux des pertes des cours d'eau de surface (Agly et Verdoble),
- Des « eaux peu profondes », issues de l'infiltration plus rapide des eaux de pluies au niveau de l'épikarst du système.

Ainsi, il est possible de formuler l'hypothèse que le traceur ait été entraîné partiellement en profondeur par les eaux des pertes du Verdoble, et stocké dans les parties profondes constituées de réservoirs plus ou moins indépendants hydrauliquement.

La relation mise en évidence entre les eaux de surface issues du Verdoble et les sources karstiques met l'accent sur la vulnérabilité potentielle de l'aquifère aux risques de pollution superficielle. Toutefois, les conditions de transport, de restitution et de dilution indiquent que les effets à court terme des pollutions resteraient limités. En revanche, il faudra s'attendre à un effet cumulatif à long terme pour des pollutions chroniques.

La complexité des résultats de cet essai de traçage est le reflet de celle des systèmes karstiques des Corbières, et en particulier celui de Fontestramar/Fontdame. Une interprétation univoque n'en est pas possible. Si certain doute existe sur les résultats de points tels le forage F3 de Rivesaltes, et celui de Cases-de-Pène, on ne peut pas exclure totalement une connexion hydraulique entre les pertes et ces deux points : en effet, le traceur est restitué par « bouffées » courtes, et avec des valeurs de concentrations très faibles, un échantillonnage espacé (comme celui qui a été pratiqué 2 à 3 fois par semaines sur les forages) peut conduire à ne pas détecter le traceur.

5. Bibliographie

- Association de Recherches de Font Estramar (ARFE) correspondant Cyrille Brandt (1997) - Font Estramar : 11 ans de recherche en plongée dans un grand réseau noyé en bord de Méditerranée. *12th International Congress of Speleology, Symposium 4 : Exploration and Speleology*. Vol. IV, pp 71-75, La Chaux-de-Fonds, Suisse.
- Aunay B., Le Strat P., avec la collaboration de Aguilar J.P., Camus H., Clauzon G., Dörfliger N. (2002) - Introduction à la géologie du karst des Corbières. Rap. BRGM/RP-51595-FR, 22 fig., 80 p., 28 photo., 3 tab., 4 pl. h. text.
- Compagnie d'Aménagement de la région du Bas-Rhône et du Languedoc (1970) - Note préliminaire sur les pertes de l'Agly dans la plaine d'Estagel (66).
- Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt 66 (1986) - Barrage de Cassagnes-Caramany - Ansignan, Etude des pertes de l'Agly.
- Dörfliger N., Schoen R., Giroux H., avec la collaboration de Bakalowicz M., Lachassagne P., Ladouche B., et Marchal JP. (2001) - Etat des connaissances hydrogéologiques des Corbières Orientales. Rap. BRGM RP-51103-FR, 89 pages, 12 fig., 2 annexes.
- Duvail C., Le Strat P., Bourguin B. (2001) - Atlas géologique des formations plio-quadernaires de la plaine du Roussillon (Pyrénées Orientales). Rap BRGM/RP-51197-FR.
- Erre H., Verrière H. (1999) - Fort de Salses, Contamination microbiologique de l'alimentation en eau de source, Causes et Solutions. Rap. Hydro.Géo.Consult.
- Käss, W. (1998) - Tracing technique in geohydrology. A.A.Balkema, Rotterdam, 581 p.
- Leibundgut C., Hadi S. (1997) - A contribution to toxicity of fluorescent tracers. Tracer Hydrology 97, A.A.Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410875 4.
- Marsault B. (1997) - Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Thèse BRGM-Université Paris Sud-CNRS. Documents BRGM n°268.
- Petit V., Ladouche B., Dörfliger N. (2002) - Compte-rendu et interprétation du pompage d'essai de puits et nappe (longue durée) à Cases-de-Pène. Rap. BRGM/RP-51394-FR.
- Salvayre H. (1969) - Compte-rendu des travaux du GERS., Spelunca, 3, p. 191.
- Serrat P. (2000) - Genèse et dynamique d'un système fluvial méditerranéen : le bassin de l'Agly (France). Thèse de doctorat en géographie, Université de Perpignan.
- Smart P.L., Laidlaw I.M.S. (1977) - An evaluation of some fluorescent dyes for water tracing. *Water Resources Research*, Vol. 13, N°1, pp.15-33.
- Smart P.L. (1984) - A review of the toxicity of twelve fluorescent dyes used for water tracing. *The NSS Bulletin*. October 1984. Pp 21-33.

Thomson P. (2002) - Analyse hydrogéologique du système karstique d'Opoul et du Synclinal du Bas-Agly (Corbières Orientales) - Modélisation globale (TEMPO) et discrétisée (MARTHE). DESS Hydrogéologie et Environnement, Université d'Avignon.

Unesco (1973), avec suppléments de 1975, 1977, 1983 - Groundwater studies ; An international guide for research and practice.

ANNEXE 1

Planches photographiques



Photo 1 : Jaugeage du Verdoube le 18/07/2002 (profil n°4, cf. Fig. 4).



Photo 2 : Préparation des 20 kg de fluorescéine dilués dans 4 bidons de 40 litres.



Photo 3 : Injection du premier des quatre bidons sur le seuil...



Photo 4 : Panache de fluorescéine à l'arrivée après le méandre (profil 4, cf. Fig. 4).



Photo 5 : Panache de fluorescéine à l'arrivée dans la vasque...



Photo 6 : Vert Verdoble...

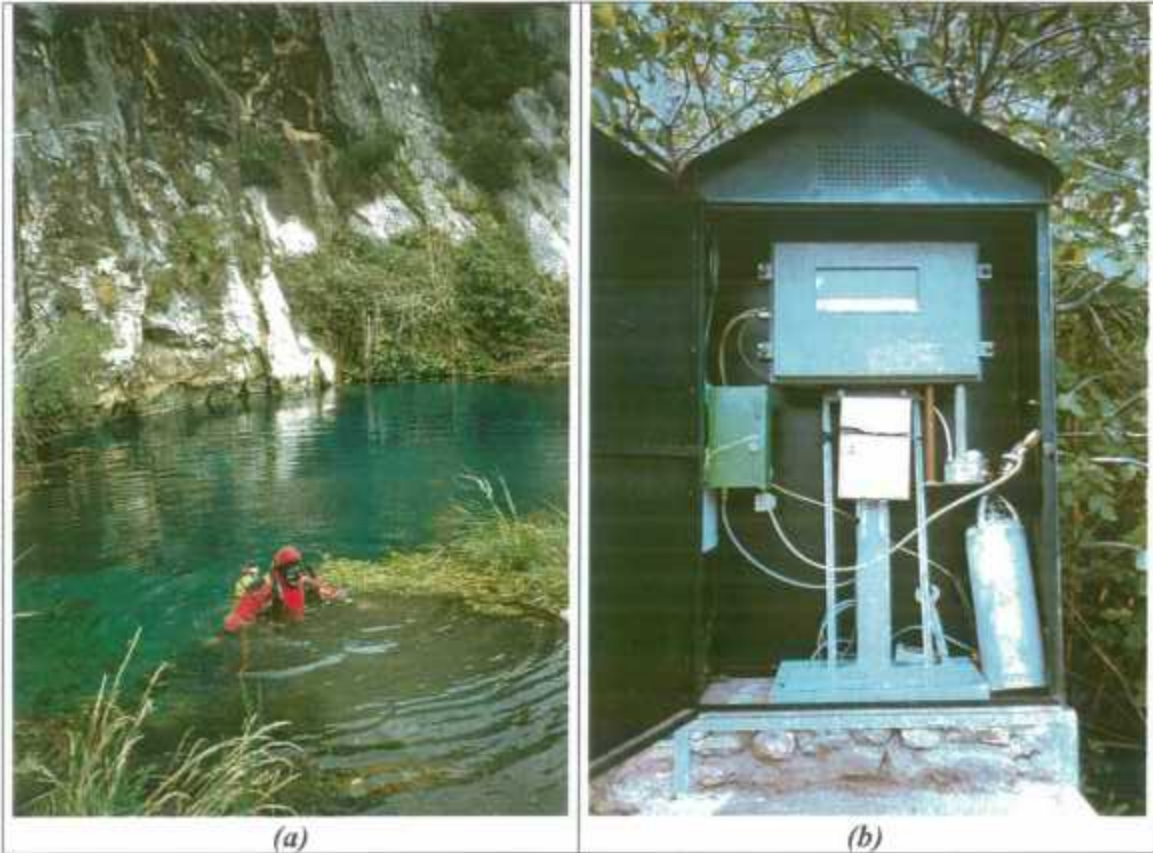


Photo 7 : Fluorimètre à Fontestramar : (a) Plongeur installant la sonde, (b) Boîtier électrique dans la cabane de la DDAF 66.

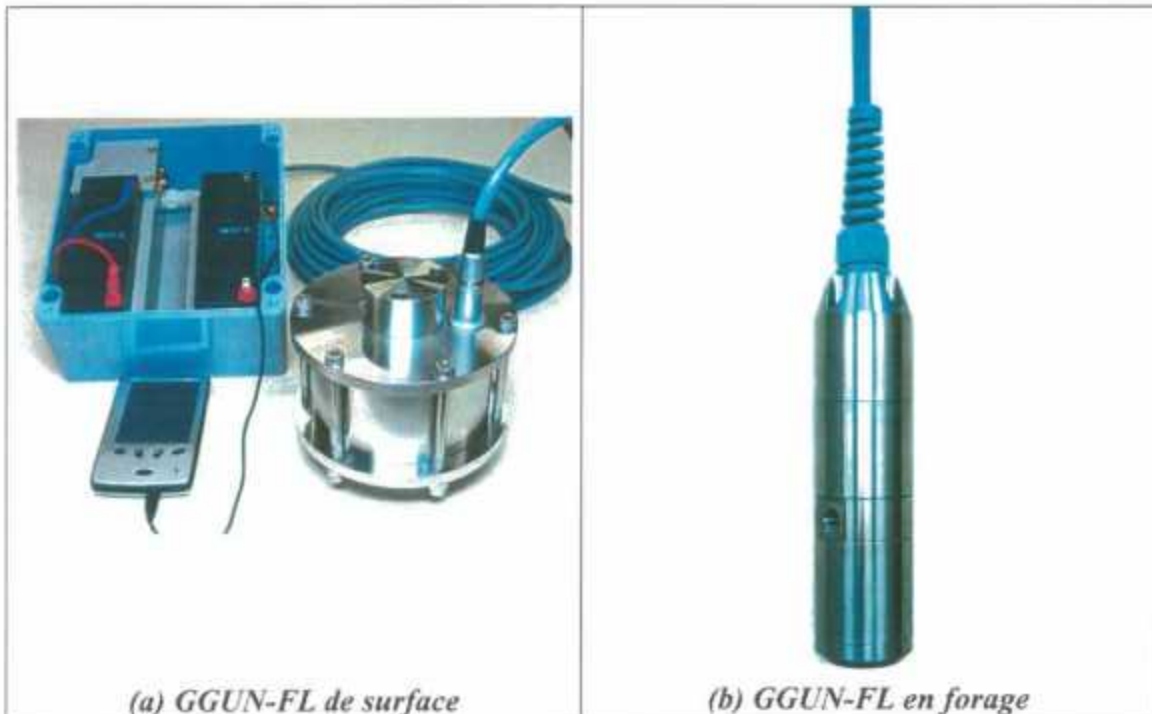


Photo 8 : Fluorimètres de terrain installés (a) à Fontdame, (b) à Fontestramar.

ANNEXE 2

Résultats des analyses d'uranine au laboratoire, par spectrofluorimétrie

Analyses effectuées au fluorimètre, au laboratoire Hydrosciences de l'Université de Montpellier II. Le bruit de fond en uranine est de l'ordre de 0,05-0,07 ppb.

Analyses des sources de la Forteresse de Salses

Point surveillé	Date	Temps depuis l'injection (j)	Concentration en uranine (ppb)
Salses n°1	15/08/2001	23	< bruit de fond
Salses n°1	05/09/2001	44	0,41
Salses n°1	06/09/2001	45	0,39
Salses n°1	10/09/2001	49	0,46
Salses n°1	13/09/2001	52	0,43
Salses n°1	16/09/2001	55	0,5
Salses n°1	19/09/2001	58	0,5
Salses n°1	30/10/2001	99	0,32
Salses n°1	06/11/2001	106	0,37
Salses n°1	08/11/2001	108	0,32
Salses n°1	12/11/2001	112	0,32
Salses n°1	19/11/2001	119	0,32
Salses n°1	25/11/2001	125	0,35
Salses n°1	08/04/2002	259	0,17
Salses n°1	20/04/2002	271	0,18
Salses n°1	22/04/2002	273	0,23
Salses n°2	12/08/2001	20	< bruit de fond
Salses n°2	15/08/2001	23	< bruit de fond
Salses n°2	05/09/2001	44	0,42
Salses n°2	06/09/2001	45	0,32
Salses n°2	10/09/2001	49	0,43
Salses n°2	13/09/2001	52	0,48
Salses n°2	16/09/2001	55	0,48
Salses n°2	19/09/2001	58	0,43
Salses n°2	30/10/2001	99	0,2
Salses n°2	06/11/2001	106	0,25
Salses n°2	08/11/2001	108	0,32
Salses n°2	12/11/2001	112	0,32
Salses n°2	19/11/2001	119	0,32
Salses n°2	25/11/2001	125	0,35
Salses n°2	08/04/2002	259	0,47
Salses n°2	24/08/2002	397	0,15
Salses n°2	26/08/2002	399	0,47
Salses n°2	28/08/2002	401	0,17
Salses n°3	15/08/2001	23	< bruit de fond
Salses n°3	05/09/2001	44	0,3
Salses n°3	06/09/2001	45	< bruit de fond
Salses n°3	10/09/2001	49	0,07
Salses n°3	13/09/2001	52	0,075
Salses n°3	16/09/2001	55	0,46
Salses n°3	19/09/2001	58	0,065
Salses n°3	30/10/2001	99	0,56
Salses n°3	06/11/2001	106	0,32
Salses n°3	08/11/2001	108	0,32
Salses n°3	12/11/2001	112	0,32
Salses n°3	19/11/2001	119	0,35
Salses n°3	25/11/2001	125	0,35
Salses n°3	08/04/2002	259	0,26

Analyses des échantillons de Fontdame

Point surveillé	Date TU	Temps depuis injection (j)	Concentration en uranine (ppb)
Fontdame manuel (FDM)	10/08/2001	17,9	< bruit de fond (0,05 ppb)
Fontdame manuel (FDM)	17/08/2001	24,9	0,065
Fontdame manuel (FDM)	22/08/2001	30,0	0,05
Fontdame manuel (FDM)	24/08/2001	32,0	0,055
Fontdame manuel (FDM)	27/08/2001	35,2	0,055
Fontdame manuel (FDM)	31/08/2001	38,9	0,05
Fontdame manuel (FDM)	07/09/2001	45,9	0,05
Fontdame préleveur	10/08/2001	17,8	0,06
Fontdame préleveur	11/08/2001	18,8	0,06
Fontdame préleveur	12/08/2001	19,8	0,06
Fontdame préleveur	13/08/2001	20,8	0,2
Fontdame préleveur	14/08/2001	21,8	0,06
Fontdame préleveur	15/08/2001	22,8	0,09
Fontdame préleveur	16/08/2001	23,8	0,09
Fontdame préleveur	17/08/2001	24,8	0,06
Fontdame préleveur	18/08/2001	25,8	0,06
Fontdame préleveur	19/08/2001	26,8	0,09
Fontdame préleveur	20/08/2001	27,8	0,06
Fontdame préleveur	21/08/2001	28,8	0,09
Fontdame préleveur	22/08/2001	29,8	0,06
Fontdame préleveur	23/08/2001	30,8	0,06
Fontdame préleveur	24/08/2001	31,8	0,09
Fontdame préleveur	25/08/2001	32,8	0,2
Fontdame préleveur	26/08/2001	33,8	0,09
Fontdame préleveur	27/08/2001	34,8	0,09
Fontdame préleveur	28/08/2001	35,8	0,22
Fontdame préleveur	29/08/2001	36,8	0,2
Fontdame préleveur	30/08/2001	37,8	0,2
Fontdame préleveur	31/08/2001	38,8	0,2
Fontdame préleveur	01/09/2001	39,8	0,17
Fontdame préleveur	02/09/2001	40,8	0,17
Fontdame préleveur	03/09/2001	41,8	0,17
Fontdame préleveur	04/09/2001	42,8	0,17
Fontdame préleveur	05/09/2001	43,8	0,2
Fontdame préleveur	06/09/2001	44,8	0,21
Fontdame préleveur	07/09/2001	45,8	0,18
Fontdame préleveur	08/09/2001	46,8	0,17
Fontdame préleveur	09/09/2001	47,8	0,17
Fontdame préleveur	10/09/2001	48,8	0,17
Fontdame préleveur	11/09/2001	49,8	0,17
Fontdame préleveur	12/09/2001	50,8	0,17
Fontdame préleveur	13/09/2001	51,8	0,16
Fontdame préleveur	14/09/2001	52,8	0,16
Fontdame préleveur	13/10/2001	81,8	0,08
Fontdame préleveur	14/10/2001	82,8	0,09
Fontdame préleveur	15/10/2001	83,8	0,08
Fontdame préleveur	16/10/2001	84,8	0,06
Fontdame préleveur	16/11/2001	115,8	0,06
Fontdame préleveur	17/11/2001	116,8	0,34
Fontdame préleveur	18/11/2001	117,8	0,41
Fontdame préleveur	19/11/2001	118,8	0,34
Fontdame préleveur	20/11/2001	119,8	0,06
Fontdame préleveur	09/05/2002	289,8	0,14
Fontdame préleveur	25/08/2002	397,8	0,51
Fontdame préleveur	26/08/2002	398,8	0,47
Fontdame préleveur	27/08/2002	399,8	0,17

Analyses des échantillons de Fontestramar

Point surveillé	Date TU	Tps depuis l'injection (j)	Concentration en uranine (ppb)
Petite source	27/07/2001	3,9	0,41
Petite source	01/08/2001	9,0	0,46
Petite source	03/08/2001	11,1	0,05
Petite source	06/08/2001	14,1	< bruit de fond
Petite source	08/08/2001	16,2	< bruit de fond
Petite source	22/08/2001	30,0	0,05
Petite source	24/08/2001	32,0	< bruit de fond
Petite source	27/08/2001	35,2	< bruit de fond
Petite source	29/08/2001	36,9	< bruit de fond
Petite source	31/08/2001	39,0	0,05
Petite source	03/09/2001	41,8	< bruit de fond
Petite source	05/09/2001	43,8	< bruit de fond
Petite source	07/09/2001	45,9	< bruit de fond
Petite source	18/09/2001	56,8	0,2
Petite source	21/09/2001	59,8	0,18
Petite source	26/09/2001	64,8	0,11
Petite source	07/08/2002	379,8	0,14
Sortie vasque	27/08/2001	35,2	< bruit de fond
Sortie vasque	31/08/2001	39,0	0,05
Sortie vasque	03/09/2001	41,8	< bruit de fond
Sortie vasque	05/09/2001	43,8	< bruit de fond
Sortie vasque	23/07/2002	364,8	0,14
Cabane DDAF	08/08/2001	16,2	< bruit de fond
Cabane DDAF	10/08/2001	18,0	< bruit de fond
Cabane DDAF	13/08/2001	21,0	< bruit de fond
Cabane DDAF	17/08/2001	24,8	< bruit de fond
Cabane DDAF	24/08/2001	32,0	0,05
Cabane DDAF	29/08/2001	36,9	0,05
Cabane DDAF	31/08/2001	39,0	0,06
Cabane DDAF	03/09/2001	41,8	0,05
Cabane DDAF	05/09/2001	43,8	0,05
Cabane DDAF	07/09/2001	45,9	0,055
Cabane DDAF	11/09/2001	50,0	0,06
Cabane DDAF	18/09/2001	56,8	0,2
Cabane DDAF	21/09/2001	59,8	0,065
Cabane DDAF	26/09/2001	64,8	0,055
Extramer	24/10/2001	92,8	0,28
Extramer	25/10/2001	93,8	0,35
Extramer	06/08/2002	378,8	0,2
Préleveur C	08/09/2001	46,8	0,22
Préleveur C	09/09/2001	47,8	0,15
Préleveur C	10/09/2001	48,8	0,05
Préleveur C	11/09/2001	49,8	0,15
Préleveur C	12/09/2001	50,8	0,19
Préleveur C	13/09/2001	51,8	0,15
Préleveur C	14/09/2001	52,8	< bruit de fond

ANNEXE 3

Interprétation des résultats de Fontdame par épisode de crue

Source de FONTDAME
Calculs par épisode de crue
Temps exprimé en TU

	* Décembre 2001 *	* Janvier 2002 *	* Février 2002 *		* Mars 2002 *
Pluie à Vingrau					
Date de début de l'épisode pluvieux	14/12/2001	03/01/2002	05/02/2002	16/02/2002	23/02/2002
Date de fin de l'épisode pluvieux	14/12/2001	06/01/2002	06/02/2002	17/02/2002	24/02/2002
Nombre de jours de pluie consécutifs	1	4	2	2	2
Pluie cumulée sur l'épisode pluvieux (mm)	4	8	10,5	6,5	4
Pluie mensuelle (mm)	5	10,5	21,5		48
Pluie à Tautavel					
Date de début de l'épisode pluvieux	14/12/2001	14/01/2002	05/02/2002	16/02/2002	23/02/2002
Date de fin de l'épisode pluvieux	14/12/2001	16/01/2002	06/02/2002	18/02/2002	24/02/2002
Nombre de jours de pluie consécutifs	1	3	2	1	2
Pluie cumulée sur l'épisode pluvieux (mm)	1,5	3,5	15,5	2,5	3
Pluie mensuelle (mm)	2	8,5	25,5		84,5
Épisode de crue de la source de Fontdame					
Date de début de l'épisode de crue	pas d'épisode significatif	pas d'épisode significatif	pas d'épisode significatif		1 pic
Date de fin de l'épisode de crue					06/03/2002 11:00
Durée de l'épisode de crue (j)					25/03/2002 16:00
Durée de l'épisode de crue (h)					19,2
Date d'arrivée du max de la crue					461,0
Débit horaire max de l'épisode de crue (l/s)					15/03/2002 23:00
Volume écoulé pendant l'épisode de crue ⁽¹⁾ (m ³)					598
Débit moyen mensuel ⁽²⁾ (l/s)	587	560	559		9,68E+05
					575
Épisode de restitution en uranine					
<i>(L'origine des temps est prise à l'injection)</i>					
Date de début de l'épisode de restitution	pas de données (problème de carte mémoire)	pas de données (problème de carte mémoire)	Bouffée unique		Bouffée unique
Date de fin de l'épisode de restitution			13/02/2002 18:58		28/02/2002 10:53
Durée de l'épisode de restitution (j)			27/02/2002 11:53		30/03/2002 07:06
Durée de l'épisode de restitution (h)			13,7		29,8
Date d'arrivée du maximum de restitution			328,9		716,2
Temps d'arrivée du max depuis l'injection (j)			23/02/2002 12:05		05/03/2002 21:53
Vitesse arrivée du max (m/j)			215		225
Vitesse arrivée du max (m/h)			93		89
Concentration en uranine maximale (ppb)			4		4
Masse d'uranine récupérée par épisode de crue (g)			0,128		0,070
Masse de fluorescéine ⁽³⁾ récupérée par épisode de crue (g)			0,69		0,25
Masse de fluorescéine récupérée cumulée sur les épisodes (g)			0,93		0,34
% de restitution de fluorescéine par épisode de crue			15,09		15,42
% de restitution de fluorescéine cumulée en fin de mois ⁽⁴⁾ (g)	0,005%		0,002%		
% de restitution de fluorescéine cumulée en fin de chaque mois	0,075%		0,077%		
Remarques			Succession de petits pics très courts Restitution faible. Très étalée		

Source de FONTDAME
Calculs par épisode de crue
Temps exprimé en TU

	* Avril 2002 *		* Mai 2002 *		* Juin 2002 *		* Juillet 2002 *	* Août 2002 *
Pluie à Vingrau								
Date de début de l'épisode pluvieux	02/04/2002	10/04/2002	01/05/2002	06/05/2002	03/06/2002	07/06/2002	données non disponibles	données non disponibles
Date de fin de l'épisode pluvieux	03/04/2002	12/04/2002	02/05/2002	10/05/2002	05/06/2002	09/06/2002		
Nombre de jours de pluie consécutifs	2	3	2	5	3	3		
Pluie cumulée sur l'épisode pluvieux (mm)	115	259	20	92,5	17	11,5		
Pluie mensuelle (mm)	386		124		32,5			
Pluie à Tautavel								
Date de début de l'épisode pluvieux	02/04/2002	10/04/2002	01/05/2002	06/05/2002	03/06/2002	07/06/2002	données non disponibles	données non disponibles
Date de fin de l'épisode pluvieux	03/04/2002	12/04/2002	02/05/2002	08/05/2002	05/06/2002	08/06/2002		
Nombre de jours de pluie consécutifs	2	3	2	3	3	2		
Pluie cumulée sur l'épisode pluvieux (mm)	123	229	23	95,5	18,5	10		
Pluie mensuelle (mm)	358,5		129,5		33,5			
Episode de crue de la source de Fontdame								
	1 ^{er} pic		2 ^{ème} pic		1 pic		pas d'épisode significatif	pas d'épisode significatif
Date de début de l'épisode de crue	03/04/2002 16:00	11/04/2002 04:00	08/05/2002 23:00					
Date de fin de l'épisode de crue	11/04/2002 04:00	30/04/2002 23:00	20/05/2002 23:00					
Durée de l'épisode de crue (j)	7,5	19,8	12,0					
Durée de l'épisode de crue (h)	180,0	475,0	288,0					
Date d'arrivée du max de la crue	05/04/2002 20:00	14/04/2002 05:00	10/05/2002 23:00					
Débit horaire max de l'épisode de crue (l/s)	1002	1588	1128					
Volume écoulé pendant l'épisode de crue ⁽¹⁾ (m ³)	5,44E+05	1,69E+06	9,23E+05					
Débit moyen mensuel ⁽²⁾ (l/s)	914		801		745	740		
Episode de restitution en uranine								
	1 ^{ère} bouffée		2 ^{ème} bouffée				non significatif	25/08/2002 05:00
(L'origine des temps est prise à l'injection)								> 28/08/2002 13:00
Date de début de l'épisode de restitution	03/04/2002 12:06	11/04/2002 00:06	07/05/2002 04:05		06/06/2002 10:52			
Date de fin de l'épisode de restitution	04/04/2002 01:06	20/04/2002 15:41	17/05/2002 00:17		18/06/2002 11:52			
Durée de l'épisode de restitution (j)	0,5	9,6	9,9		12,0			
Durée de l'épisode de restitution (h)	13,0	231,6	236,2		289,0			
Date d'arrivée du maximum de restitution	03/04/2002 19:06	13/04/2002 01:41	08/05/2002 21:05		10/06/2002 00:52			
Temps d'arrivée du max depuis l'injection (j)	254	264	289		322			
Vitesse arrivée du max (m/j)	79	76	69		62			
Vitesse arrivée du max (m/h)	3	3	3		3			
Concentration en uranine maximale (ppb)	0,250	0,233	0,033		0,068			
Masse d'uranine récupérée par épisode de crue (g)	2,17	31,54	non significatif		0,16			
Masse de fluorescéine ⁽³⁾ récupérée par épisode de crue (g)	2,90	42,06	non significatif		0,22			
Masse de fluorescéine récupérée cumulée sur les épisodes (g)	18,32	60,38	60,38		60,59			
% de restitution de fluorescéine par épisode de crue	0,014%	0,210%	-		0,001%			
% de restitution de fluorescéine cumulée sur les épisodes de crue	0,092%	0,302%	0,302%		0,303%			
Masse de fluorescéine récupérée cumulée en fin de mois ⁽⁴⁾ (g)	60,92		60,98		61,20			
% de restitution de fluorescéine cumulée en fin de chaque mois	0,305%		0,305%		0,306%			
Remarques			Pas de valeur au-dessus du bruit de fond Restitution faible. Irès étalée				Fluorimètre démonté le 28/08/2002	

Source de FONTDAME
Calculs par épisode de crue
Temps exprimé en TU

Hypothèses de calcul		
Quantité injectée	20	kg (fluorescéine)
Fluorescéine à :	75%	d'urarine
Bruit de fond urarine	50-70	ppl
Distance	20	km

Notes
(1) : intègre le débit de Fontdame sur la durée de l'épisode de crue
(2) : moyenne effectuée sur les débits horaires
(3) : tient compte de la teneur en urarine dans la fluorescéine
(4) : intègre le débit de Fontdame sur le mois

	Août 2001	*Septembre 2001*	*Octobre 2001*	*Novembre 2001*			
Pluie à Vingrau							
Date de début de l'épisode pluvieux		22/09/2001	17/10/2001	11/11/2001			
Date de fin de l'épisode pluvieux		23/09/2001	19/10/2001	13/11/2001			
Nombre de jours de pluie consécutifs		2	3	3			
Pluie cumulée sur l'épisode pluvieux (mm)		52	9,5	6,5			
Pluie mensuelle (mm)	4,5	69	16,5	91			
Pluie à Tautavel							
Date de début de l'épisode pluvieux		22/09/2001	17/10/2001	11/11/2001			
Date de fin de l'épisode pluvieux		23/09/2001	19/10/2001	11/11/2001			
Nombre de jours de pluie consécutifs		2	3	1			
Pluie cumulée sur l'épisode pluvieux (mm)		35,5	9,5	11			
Pluie mensuelle (mm)	1,5	51,5	13,5	99			
Episode de crue de la source de Fontdame							
Date de début de l'épisode de crue	pas d'épisode significatif	pas d'épisode significatif	1 pic	1 pic			
Date de fin de l'épisode de crue			20/10/2001 05:00	16/11/2001 20:00			
Durée de l'épisode de crue (j)			23/10/2001 18:00	24/12/2001 21:30			
Durée de l'épisode de crue (h)			3,5	38,1			
Date d'arrivée du max de la crue			85,0	913,5			
Débit horaire max de l'épisode de crue (l/s)			20/10/2001 10:30	18/11/2001 15:00			
Volume écoulé pendant l'épisode de crue ⁽¹⁾ (m ³)			649	705			
Débit moyen mensuel ⁽²⁾ (l/s)	1,95E+05	2,00E+06	607				
Episode de restitution en urarine							
(L'origine des temps est prise à l'injection)							
Date de début de l'épisode de restitution		1 ^{ère} bouffée 22/09/2001 22:17	2 ^{ème} bouffée 23/09/2001 17:17	Bouffée unique 20/10/2001 03:55	1 ^{ère} bouffée 16/11/2001 13:13	2 ^{ème} bouffée 17/11/2001 00:13	3 ^{ème} bouffée 17/11/2001 18:13
Date de fin de l'épisode de restitution		23/09/2001 17:17	24/09/2001 04:17	21/10/2001 09:55	16/11/2001 21:13	17/11/2001 18:13	19/11/2001 02:13
Durée de l'épisode de restitution (j)		0,8	0,5	1,3	0,3	0,8	1,3
Durée de l'épisode de restitution (h)		19,0	11,0	30,0	8,0	18,0	32,0
Date d'arrivée du maximum de restitution		23/09/2001 01:17	24/09/2001 16:17	20/10/2001 07:55	16/11/2001 13:13	17/11/2001 08:13	17/11/2001 22:13
Temps d'arrivée du max depuis l'injection (j)		62	62	89	116	117	117
Vitesse arrivée du max (m/j)		325	321	225	172	171	170
Vitesse arrivée du max (m/h)		14	13	9	7	7	7
Concentration en urarine maximale (ppb)		0,109	0,075	0,197	0,534	0,477	0,183
Masse d'urarine récupérée par épisode de crue (g)		0,52	0,12	1,35	1,14	5,41	2,07
Masse de fluorescéine ⁽³⁾ récupérée par épisode de crue (g)		0,70	0,16	1,80	1,52	7,21	2,77
Masse de fluorescéine récupérée cumulée sur les épisodes (g)		0,70	0,86	2,66	4,18	11,39	14,16
% de restitution de fluorescéine par épisode de crue		0,003%	0,001%	0,009%	0,008%	0,036%	0,014%
% de restitution de fluorescéine cumulée sur les épisodes de crue		0,003%	0,004%	0,013%	0,021%	0,057%	0,071%
% de restitution de fluorescéine cumulée en fin de mois ⁽⁴⁾ (g)	0,00	0,86	2,66	4,18	14,16		
% de restitution de fluorescéine cumulée en fin de chaque mois	0,000%	0,004%	0,013%	0,013%	0,071%		
Remarques						Pics successifs bien marqués	

ANNEXE 4

Interprétation des résultats de Fontestramar par épisode de crue

Source de FONTESTRAMAR
Calculs par épisode de crue
Temps exprimé en TU

Hypothèses de calcul		
Quantité injectée	20	kg (fluorescéine)
Fluorescéine à :	75%	d'urarine
Bruit de fond uranine	50-70	ppl
Distance	21	km

Notes
(1) : intègre le débit de Fontestramar sur la durée de l'épisode de crue
(2) : moyenne effectuée sur les débits horaires
(3) : tient compte de la teneur en uranine dans la fluorescéine
(4) : intègre le débit de Fontestramar sur le mois

	* Août 2001 *	* Septembre 2001 *	* Octobre 2001 *	* Novembre 2001 *	* Décembre 2001 *	* Janvier 2002 *
Pluie à Vingrau						
Date de début de l'épisode pluvieux		22/09/2001	17/10/2001	11/11/2001	15/11/2001	14/12/2001
Date de fin de l'épisode pluvieux		23/09/2001	19/10/2001	13/11/2001	17/11/2001	14/12/2001
Nombre de jours de pluie consécutifs		2	3	3	3	1
Pluie cumulée sur l'épisode pluvieux (mm)		52	9,5	6,5	82,5	4
Pluie mensuelle (mm)	4,5	69	16,5	91	5	10,5
Pluie à Tautavel						
Date de début de l'épisode pluvieux		22/09/2001	17/10/2001	11/11/2001	15/11/2001	14/12/2001
Date de fin de l'épisode pluvieux		23/09/2001	19/10/2001	11/11/2001	17/11/2001	16/01/2002
Nombre de jours de pluie consécutifs		2	3	1	3	1
Pluie cumulée sur l'épisode pluvieux (mm)		35,5	9,5	11	79,5	1,5
Pluie mensuelle (mm)	1,5	51,5	13,5	99	2	8,5
Episode de crue de la source de Fontestramar						
Date de début de l'épisode de crue				1 pic 18/11/2002 04:00		
Date de fin de l'épisode de crue				26/11/2002 17:00		
Durée de l'épisode de crue (j)				8,5		
Durée de l'épisode de crue (h)				205		
Date d'arrivée du max de la crue				18/11/2002 20:00		
Débit horaire max de l'épisode de crue (l/s)				4064		
Volume écoulé pendant l'épisode de crue ⁽¹⁾ (m ³)				1,33E+06		
Débit moyen mensuel ⁽²⁾ (l/s)	1290	1124	995	1243	945	891
Episode de restitution en uranine						
(L'origine des temps est prise à l'injection)						
Date de début de l'épisode de restitution						
Date de fin de l'épisode de restitution						
Durée de l'épisode de restitution (j)						
Durée de l'épisode de restitution (h)						
Date d'arrivée du maximum de restitution						
Temps d'arrivée du max depuis l'injection (j)						
Vitesse arrivée du max (m/j)						
Vitesse arrivée du max (m/h)						
Concentration en uranine maximale (ppb)						
Masse d'urarine récupérée par épisode de crue (g)						
Masse de fluorescéine ⁽³⁾ récupérée par épisode de crue (g)						
Masse de fluorescéine récupérée cumulée sur les épisodes (g)						
% de restitution de fluorescéine par épisode de crue						
% de restitution de fluorescéine cumulée sur les épisodes de crue						
Masse de fluorescéine récupérée cumulée en fin de mois ⁽⁴⁾ (g)	206,73	222,55	253,29	253,29		
% de restitution de fluorescéine cumulée en fin de chaque mois	1,03%	1,11%	1,27%	1,27%		

Source de FONTESTRAMAR
Calculs par épisode de crue
Temps exprimé en TU

Pluie à Vingrau	* Février 2002 *			* Mars 2002 *	* Avril 2002 *		* Mai 2002 *			
Date de début de l'épisode pluvieux	05/02/2002	16/02/2002	23/02/2002	04/03/2002	02/04/2002	10/04/2002	01/05/2002	06/05/2002		
Date de fin de l'épisode pluvieux	06/02/2002	17/02/2002	24/02/2002	05/03/2002	03/04/2002	12/04/2002	02/05/2002	10/05/2002		
Nombre de jours de pluie consécutifs	2	2	2	2	2	3	2	5		
Pluie cumulée sur l'épisode pluvieux (mm)	10,5	6,5	4	34	115	259	20	92,5		
Pluie mensuelle (mm)	21,5			48	386		124			
Pluie à Tautavel	* Février 2002 *			* Mars 2002 *	* Avril 2002 *		* Mai 2002 *			
Date de début de l'épisode pluvieux	05/02/2002	16/02/2002	23/02/2002	04/03/2002	02/04/2002	10/04/2002	01/05/2002	06/05/2002		
Date de fin de l'épisode pluvieux	06/02/2002	16/02/2002	24/02/2002	05/03/2002	03/04/2002	12/04/2002	02/05/2002	08/05/2002		
Nombre de jours de pluie consécutifs	2	1	2	2	2	3	2	3		
Pluie cumulée sur l'épisode pluvieux (mm)	15,5	2,5	3	75,5	123	229	23	95,5		
Pluie mensuelle (mm)	25,5			84,5	358,5		129,5			
Episode de crue de la source de Fontestramar	* Février 2002 *			* Mars 2002 *	* Avril 2002 *		* Mai 2002 *			
Date de début de l'épisode de crue	pas d'épisode significatif			1 pic	1 ^{er} pic	2 ^{ème} pic	1 pic			
Date de fin de l'épisode de crue				05/03/2002 15:00	03/04/2002 18:00	11/04/2002 05:00	08/05/2002 17:00			
Durée de l'épisode de crue (j)				12/03/2002 12:00	11/04/2002 05:00	24/04/2002 09:00	20/05/2002 04:00			
Durée de l'épisode de crue (h)				6,9	7,5	13,2	11,5			
Date d'arrivée du max de la crue				165,0	179,0	316,0	275,0			
Débit horaire max de l'épisode de crue (l/s)				06/03/2002 16:00	04/04/2002 09:00	12/04/2002 10:00	09/05/2002 11:00			
Volume écoulé pendant l'épisode de crue ⁽¹⁾ (m ³)				2657	10799	16846	10421			
Débit moyen mensuel ⁽²⁾ (l/s)				9,10E+05	3,66E+06	7,71E+06	4,87E+06			
				850	1070	4942	3182			
Episode de restitution en uranin	* Février 2002 *			* Mars 2002 *	* Avril 2002 *		* Mai 2002 *			
(L'origine des temps est prise à l'injection)	pas de pic marqué faible restitution			pas de pic marqué faible restitution			1 ^{ère} bouffée	2 ^{ème} bouffée	1 bouffée unique	
Date de début de l'épisode de restitution							04/04/2002 09:00	11/04/2002 05:00	10/05/2002 00:00	
Date de fin de l'épisode de restitution							11/04/2002 05:00	10/05/2002 00:00	27/05/2002 00:00	
Durée de l'épisode de restitution (j)							6,8	28,8	17,0	
Durée de l'épisode de restitution (h)							164,0	691,0	408,0	
Date d'arrivée du maximum de restitution							08/04/2002 14:00	13/04/2002 19:00	12/05/2002 18:43	
Temps d'arrivée du max depuis l'injection (j)							259,1	264,3	293,3	
Vitesse arrivée du max (m/j)							81	79	72	
Vitesse arrivée du max (m/h)							3,4	3,3	3,0	
Concentration en uranine maximale (ppb)							0,140	0,250	0,168	
Masse d'uranine récupérée par épisode de crue (g)							113,36	1254,54	364,01	
Masse de fluorescéine ⁽³⁾ récupérée par épisode de crue (g)							151,14	1672,73	485,34	
Masse de fluorescéine récupérée cumulée sur les épisodes (g)							151,14	1823,87	2309,21	
% de restitution de fluorescéine par épisode de crue							0,76%	6,36%	2,43%	
% de restitution de fluorescéine cumulée sur les épisodes de crue	0,76%	9,12%	11,55%							
Masse de fluorescéine récupérée cumulée en fin de mois ⁽⁴⁾ (g)	258,38	272,62	1955,00							
% de restitution de fluorescéine cumulée en fin de chaque mois	1,29%	1,36%	9,77%							
			2591,19							
			12,96%							

Source de FONTESTRAMAR
Calculs par épisode de crue
Temps exprimé en TU

Pluie à Vingrau	* Juin 2002 *	* Juillet 2002 *	* Août 2002 *		
Date de début de l'épisode pluvieux	03/06/2002	07/06/2002			
Date de fin de l'épisode pluvieux	05/06/2002	09/06/2002			
Nombre de jours de pluie consécutifs	3	3	données non disponibles		
Pluie cumulée sur l'épisode pluvieux (mm)	17	11,5	données non disponibles		
Pluie mensuelle (mm)	32,5				
Pluie à Tautavel	* Juin 2002 *	* Juillet 2002 *	* Août 2002 *		
Date de début de l'épisode pluvieux	03/06/2002	07/06/2002			
Date de fin de l'épisode pluvieux	05/06/2002	08/06/2002			
Nombre de jours de pluie consécutifs	3	2	données non disponibles		
Pluie cumulée sur l'épisode pluvieux (mm)	18,5	10	données non disponibles		
Pluie mensuelle (mm)	33,5				
Episode de crue de la source de Fontestramar	* Juin 2002 *	* Juillet 2002 *	* Août 2002 *		
Date de début de l'épisode de crue	pas d'épisode significatif	pas d'épisode significatif	données non disponibles		
Date de fin de l'épisode de crue					
Durée de l'épisode de crue (j)					
Durée de l'épisode de crue (h)					
Date d'arrivée du max de la crue					
Débit horaire max de l'épisode de crue (l/s)					
Volume écoulé pendant l'épisode de crue ⁽¹⁾ (m ³)				2000	
Débit moyen mensuel ⁽²⁾ (l/s)					
Episode de restitution en uranine	* Juin 2002 *	* Juillet 2002 *	* Août 2002 *		
(L'origine des temps est prise à l'injection)	lente décroissance fin des épisodes précédents	pas d'épisode significatif	15/08/2002 09:30		
Date de début de l'épisode de restitution			> 28/08/2002 19h30		
Date de fin de l'épisode de restitution			> 13		
Durée de l'épisode de restitution (j)			> 312		
Durée de l'épisode de restitution (h)			15/08/2002 12:30		
Date d'arrivée du maximum de restitution			388,0		
Temps d'arrivée du max depuis l'injection (j)			54		
Vitesse arrivée du max (m/l)			2,3		
Vitesse arrivée du max (m/h)			1,130		
Concentration en uranine maximale (ppb)			pic douteux le 14/06/2002		
Masse d'uranine récupérée par épisode de crue (g)					
Masse de fluorescéine ⁽³⁾ récupérée par épisode de crue (g)					non calculable
Masse de fluorescéine récupérée cumulée sur les épisodes (g)					
% de restitution de fluorescéine par épisode de crue					
% de restitution de fluorescéine cumulée sur les épisodes de crue					
Masse de fluorescéine récupérée cumulée en fin de mois ⁽⁴⁾ (g)	2700,53	2734,03	Fluorimètre démonté le 28/08/2002		
% de restitution de fluorescéine cumulée en fin de chaque mois	13,50%	13,67%			