

Document public

*Caractérisation du fonctionnement des
systèmes karstiques nord-montpelliérains*

Volume III

Interprétation des données hydrologiques

Juillet 1999
R 40939

Document public

*Caractérisation du fonctionnement des
systèmes karstiques nord-montpelliérains*

Volume III

Interprétation des données hydrologiques

R. Schoen *et al.*

Juillet 1999
R 40939

Mots clés : Hydrogéologie, Systèmes karstiques, Hérault, Fontanilles, Cent-Fonts, Jaugeage, Traçage artificiel, Uranine.

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

R. SCHOEN, M. BAKALOWICZ, B. LADOUCHE et L. AQUILINA – Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains. Rap. BRGM R 40939 volume III, 91 p., 16 fig., 4 annexes.

© BRGM, 1999, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

En partenariat avec les collectivités locales concernées, le Conseil Général de l'Hérault souhaite développer la connaissance des systèmes karstiques de la région nord-montpelliéraine. Cette action s'inscrit dans la perspective de satisfaire les demandes en eau à l'horizon 2010 mais également dans celle d'une gestion patrimoniale représentée par le projet SAGE Hérault.

Le Conseil Général 34 s'est associé pour ce faire au BRGM, qui développe depuis plusieurs années un large programme d'étude et de recherche sur le fonctionnement et la gestion des aquifères karstiques. Le BRGM vient ainsi en appui scientifique à la politique de l'eau du Conseil Général 34 dans le cadre de sa mission de service public et de recherche.

La source des Fontanilles, située dans la vallée de l'Hérault sur la commune de Puéchabon, et celle des Cent-Fonts, située dans la même vallée sur la commune de Causse-de-la-Selle, ont été retenues comme sites d'étude. Sur ces sites ont été mises en œuvre les différentes méthodes d'étude permettant de caractériser les ressources et les réserves en eau des systèmes karstiques, ainsi que leur vulnérabilité et les possibilités d'exploitation et de protection.

L'un des objectifs de l'étude réalisée par le BRGM est de développer les outils nécessaires à une gestion rationnelle des ressources en eau à l'échelle du département, à partir d'une exploitation et d'une gestion optimisée de la ressource en eau des systèmes karstiques. Il s'agit donc d'une démarche de recherche dont l'ampleur va au-delà des deux sites étudiés.

Le programme d'actions s'est déroulé de 1996 à 1999. Il a compris une instrumentation des sites et le suivi hydrologique des sources, ainsi que le suivi hydrochimique de l'ensemble du système. L'ensemble de ces données a fait l'objet de différents traitements dont l'interprétation conduit à un schéma de fonctionnement des systèmes karstiques étudiés.

L'ensemble de ces résultats est présenté à travers une série de cinq rapports :

- Volume I : « Contexte géologique et hydrogéologique »
- Volume II : « Moyens mis en œuvre »
- Volume III : « Interprétation des données hydrologiques »**
- Volume IV : « Interprétation des données hydrochimiques »
- Volume de « Synthèse Générale »

Le présent rapport (Volume III) expose les résultats des traçages artificiels et du suivi hydrologique des sources. Les hydrogrammes obtenus sont interprétés grâce aux méthodes suivantes : bilan hydrique, analyse des débits classés, analyse des courbes de récession, analyses corrélatoire et spectrale. Ces méthodes, associées à l'interprétation des traçages artificiels, permettent de décrire le comportement hydrologique des aquifères karstiques des Fontanilles et des Cent-Fonts et de mieux connaître leur bassin d'alimentation.

Table des Matières

Introduction	9
1. Rappels méthodologiques	11
1.1. traçages artificiels	11
1.2. Bilan hydrologique et surface d'alimentation.....	13
1.3. Analyse des débits classés.....	15
1.4. Analyse des courbes de récession	15
1.5. Analyses corrélatoire et spectrale.....	16
2. Résultats et interprétation des traçages artificiels.....	19
2.1. Pour le système des Fontanilles.....	19
2.1.1. Résultats des traçages réalisés antérieurement dans le secteur d'étude	19
2.1.2. Traçage sur l'exutoire des Fontanilles.....	20
2.1.3. Traçage sur le système des Fontanilles.....	23
2.2. Pour le système des Cent-Fonts.....	24
2.2.1. Résultats des traçages réalisés antérieurement dans le secteur d'étude	24
2.2.2. Traçage sur l'exutoire des Cent-Fonts.....	25
2.2.3. Traçage sur le système des Cent-Fonts.....	29
3. Résultats et analyse du suivi hydrologique.....	33
3.1. Présentation et critique des données	33
3.1.1. Précipitations.....	33
3.1.2. Débits.....	34
3.1.3. Conductivité électrique et température de l'eau.....	40
3.2. Analyse des hydrogrammes de la source des Fontanilles.	41
3.2.1. Bilan hydrique et surface d'alimentation des Fontanilles	41
3.2.2. Analyse des débits classés des Fontanilles.....	43
3.2.3. Analyse des courbes de récession des Fontanilles	44
3.2.4. Analyses corrélatoire et spectrale des Fontanilles	45

3.3. Analyse des hydrogrammes de la source des Cents-Fonts.....	46
3.3.1. Bilan hydrique et surface d'alimentation des Cent-Fonts.....	46
3.3.2. Analyse des débits classés des Cent-Fonts.....	46
3.3.3. Analyse des courbes de récession des Cent-Fonts.....	47
3.3.4. Analyses corrélatoire et spectrale des Cent-Fonts.....	48
3.4. Synthèse des résultats quantitatifs.....	49
4. Conclusion et classification	51
5. Remarques générales.....	53
5.1. Méthodologie.....	53
5.2. Similarité et différences dans de comportement des deux systèmes	53
Annexe 1 : Tableaux de données sur les traçages artificiels.....	57
Annexe 2 : Analyse des courbes de récession	67
Annexe 3 : Analyse corrélatoire et spectrale aux Cent-Fonts	73
Annexe 4 : Analyse corrélatoire et spectrale aux Fontanilles.....	83

Liste des figures

Figure 1 :	Traçage sur l'exutoire des Fontanilles (injection à 7h14 TU) : courbe de restitution du traceur.....	21
Figure 2 :	Traçage sur l'exutoire des Cent-Fonts : courbe de restitution du traceur.	26
Figure 3 :	Traçage sur le système des Cent-Fonts (injection le 6/10/97) : courbe de restitution du traceur et débit de la source.	30
Figure 4 :	Ecarts entre la pluviométrie mensuelle des années 1996, 1997 et 1998 et les valeurs moyennes mensuelles calculées sur la période 1962-1998.	34
Figure 5 :	Débit à l'exutoire des Cent-Fonts et pluie à St-Martin-de-Londres.	38
Figure 6 :	Débit à l'exutoire des Fontanilles et pluie à St-Martin-de-Londres.	38
Figure 7 :	Débit à l'exutoire des Fontanilles et pluie à St-Martin-de-Londres (détail faibles débits).....	39
Figure 8 :	Débit à l'exutoire des Cent-Fonts : reconstitution linéaire des lacunes et récessions étudiées.	39
Figure 9 :	Débit à l'exutoire des Fontanilles : reconstitution linéaire des lacunes et récessions étudiées.	40
Figure 10 :	Conductivité électrique à l'exutoire des Fontanilles.	41
Figure 11 :	Délimitation des zones d'alimentation des systèmes aquifères des Cent-Fonts et des Fontanilles (le fond est la carte géologique au 1 50 000 de la région).	42
Figure 12 :	Débits classés de la source des Fontanilles pour les données du cycle 1998, (débits compris entre 0 et 1 m ³ /s).	43
Figure 13 :	Débits classés de la source des Fontanilles pour les données du cycle 1998, (débits compris entre 1 et 3 m ³ /s).	44
Figure 12 :	Débits classés de la source des Cent-Fonts pour les données du cycle 1998.	47
Figure 15 :	Classification des systèmes aquifères des Cent-Fonts et des Fontanilles dans le référentiel de Mangin (1975).....	52
Figure 16 :	Comparaison des corrélogrammes croisés des Fontanilles et des Cent-Fonts.....	55

Liste des Figures de l'annexe

Figure A2-1 : Courbe de récession de la source des Cent-Fonts (période du 06/06/97 au 29/09/97).....	69
Figure A2-2 : Courbe de récession de la source des Cent-Fonts (période du 01/05/98 au 29/12/97).....	70
Figure A2-3 : Courbe de récession de la source des Fontanilles (période du 20/01/97 au 05/10/97).....	71
Figure A2-4 : Courbe de récession de la source des Fontanilles (période du 31/05/98 au 05/08/98).....	72
Figure A3-1 : Corrélogramme simple sur les débits journaliers de la source des Cent-Fonts (période du 31/05/97 au 30/11/98).....	75
Figure A3-2 : Spectre simple sur les débits journaliers de la source des Cent-Fonts (période du 31/05/97 au 30/11/98).....	76
Figure A3-3 : Corrélogramme croisé entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Cent-Fonts (période du 31/05/97 au 30/11/98).....	77
Figure A3-4 : Spectre croisé entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Cent-Fonts (période du 31/05/97 au 30/11/98).....	78
Figure A3-5 : Fonction de phase entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Cent-Fonts (période du 31/05/97 au 30/11/98).....	79
Figure A3-6 : Cohérence entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Cent-Fonts (période du 31/05/97 au 30/11/98).....	80
Figure A3-7 : Gain entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Cent-Fonts (période du 31/05/97 au 30/11/98).....	81
Figure A4-1 : Corrélogramme simple sur les débits journaliers de la source des Fontanilles (période du 20/11/96 au 02/10/98).....	85
Figure A4-2 : Spectre simple sur les débits journaliers de la source des Fontanilles (période du 20/11/96 au 02/10/98).....	86
Figure A4-3 : Corrélogramme croisé entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Fontanilles (période du 20/11/96 au 02/10/98).....	87
Figure A4-4 : Spectre croisé entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Fontanilles (période du 20/11/96 au 02/10/98).....	88
Figure A4-5 : Fonction de phase entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Fontanilles (période du 20/11/96 au 02/10/98).....	89
Figure A4-6 : Cohérence entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Fontanilles (période du 20/11/96 au 02/10/98).....	90
Figure A4-7 : Gain entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Fontanilles (période du 20/11/96 au 02/10/98).....	91

Introduction

L'étude des propriétés et du fonctionnement des aquifères karstiques ne peut pas être uniquement abordée à partir d'une simple connaissance géologique et tectonique des réservoirs, comme en témoigne l'abondante littérature (Voir notamment Mangin 1975, Mangin 1984, Bakalowicz 1979, Marsaud 1996, Plagnes 1997). L'approche structurale (étude de la géométrie du réservoir) se doit d'être complétée par une approche dite « fonctionnelle » qui vise à la recherche de l'unité des systèmes et à la recherche de l'organisation des écoulements.

Les méthodes d'analyse de l'approche fonctionnelle consistent donc à compléter par des méthodes globales ou locales, l'étude de la géométrie du réservoir. Les méthodes employées sont principalement basées sur l'étude du fonctionnement des aquifères au travers des informations recueillies à l'exutoire et des relations pluie-débit.

Ces méthodes sont :

- les traçages artificiels ;
- l'étude des bilans hydrologiques ;
- l'étude des débits classés ;
- l'étude des courbes de récession ;
- les analyses corrélatoire et spectrale.

Ces différentes méthodes sont décrites succinctement au chapitre 2. Pour les traçages artificiels, les résultats expérimentaux ainsi que l'interprétation qui en a été faite sont présentés dans le chapitre 3. La 4^e partie est consacrée au suivi hydrologique et aux méthodes d'analyse des hydrogrammes obtenus.

Remarque : toutes les références bibliographiques citées dans le présent volume sont reportées dans le « Document de synthèse ».

1. Rappels méthodologiques

1.1. TRAÇAGES ARTIFICIELS

Introduction aux traçages dans les aquifères karstiques

Généralités

En milieu karstique, les traçages constituent l'une des méthodes de base :

- pour définir les limites des bassins d'alimentation de sources, c'est-à-dire pour définir les limites de systèmes karstiques,
- pour caractériser les écoulements souterrains par des paramètres simples,

Selon le but du traçage (définition d'une relation point d'eau - source ou caractérisation des conditions d'écoulement), on peut appliquer une méthode qualitative, dite **méthode du « tout ou rien »**, ou une **méthode quantitative**.

La **méthode du « tout ou rien »** a pour seul but de mettre en évidence le passage du traceur. Le traceur est mis en évidence soit par l'observation directe (visible à l'œil nu), quand la quantité injectée est importante et/ou la dispersion faible, soit par un procédé indirect permettant une reconcentration avant observation. Cette méthode présente des risques d'erreur importants dans le cas des traceurs fluorescents.

La **méthode quantitative** impose de connaître la quantité de traceur injectée, de déterminer la courbe de restitution du traceur, ainsi que la quantité restituée. Cette méthode implique par conséquent des **mesures**, les plus fréquentes possibles, au cours de la restitution des **concentrations en traceur** et du **débit écoulé**. Les mesures de concentration du traceur sont nécessairement associées à une détermination objective de sa **nature** sur des échantillons d'eau ; les risques d'erreur sont alors minimisés. Cette méthode fournit tous les éléments permettant de caractériser les écoulements souterrains ; elle constitue en outre une approche de la simulation de transfert de polluant.

C'est la méthode quantitative qui a été utilisée dans cette étude.

Le traceur

Le traceur le plus couramment utilisé est l'**uranine**, dont le sel sodique industriel est appelé **fluorescéine**. C'est celui qui a été injecté dans les traçages de la présente étude.

Pour les traceurs fluorescents, traditionnellement on utilise un dispositif fixant le traceur : le *fluocapteur*, petit sac de tulle contenant des grains de charbon actif. Le

traceur fluorescent, adsorbé par le charbon, est ensuite élué par lavage dans une solution alcoolique de potasse (Lallemand et Paloc, 1964). Cette méthode, classiquement utilisée par les spéléologues, et toujours proposée (Ford et Williams, 1989) **ne doit pas être utilisée comme unique moyen d'observation**, du fait des inconvénients qu'elle présente : non-fixation du colorant (d'autres substances peuvent s'être fixées avant son arrivée), lessivage du colorant (élution naturelle ou usure des grains), contamination avant ou après mise en place lors des différentes manipulations, confusion avec des substances fluorescentes naturelles (matières organiques) ou polluantes (hydrocarbures). Tous ces problèmes sont connus depuis longtemps grâce aux travaux menés par le Service d'Application des Radioéléments du C.E.N. Grenoble dans les années 1970 (Guizerix *et al.*, 1976 et 1981). Bien que la confusion avec d'autres substances fluorescentes puisse être évitée, par analyse au spectrofluorimètre, les résultats de traçage fournis par cette méthode doivent être systématiquement mis en doute, sauf si une détection visible à l'œil nu les a confirmés. Nombre de ces traçages publiés dans des bulletins d'associations spéléologiques ou même dans des congrès à vocation plus scientifique n'ont pas de réalité hydrogéologique, du fait de ces incertitudes. De toute façon, cette méthode ne fournit aucun élément permettant une quantification.

Les traceurs fluorescents sont analysés par un fluorimètre ou, mieux, par un spectrofluorimètre qui permet de s'assurer, aux faibles teneurs, qu'il s'agit bien du traceur injecté, par l'analyse du spectre. Pour l'uranine, le seuil de détection est de l'ordre de 10^{-5} mg/l (0,01 µg/l) et la concentration limite mesurable de l'ordre de $2 \cdot 10^{-5}$ mg/l (0,02 µg/l).

Les conditions expérimentales

La préparation

La phase de préparation porte sur l'injection, sur la restitution et l'organisation du suivi. Il faut repérer les points d'injection potentiels, ainsi que les conditions d'injection (écoulement naturel, nécessité d'une assistance spéléologique, apports d'eau nécessaires). Tous les points de restitution possibles doivent être inventoriés. Enfin, un plan de suivi et d'échantillonnage doit être établi.

Les débits au point d'injection et au point de sortie le plus probable doivent être mesurés, ou du moins estimés, de manière à évaluer la quantité de traceur à injecter. Un abaque, établi par Mangin (1982), permet d'estimer la quantité d'uranine à injecter en fonction des caractéristiques supposées du système à tracer.

L'injection

L'injection doit être pratiquée, autant que possible, dans un point d'accès privilégié de l'écoulement souterrain : perte totale de rivière, cavité ou fracture de la roche, dépression, écoulement souterrain, forage. Il faut, autant que possible, éviter d'injecter

le traceur en un site où le traceur risque de stagner un certain temps ou d'être adsorbé par le sol ou des formations argileuses.

En outre, le point d'injection doit présenter un écoulement naturel en surface ou en profondeur ; sinon, il faut apporter de l'eau par des citernes ou à partir du réseau pour entraîner le traceur.

Le suivi de la restitution

La restitution doit être suivie par des prélèvements à pas de temps réguliers et suffisamment rapprochés (dans la pratique, selon les cas, toutes les heures à toutes les six heures) pour obtenir une bonne représentation du passage du nuage du traceur. Les prélèvements sont effectués par des échantillonneurs automatiques et par des prélèvements directs lors des visites. Dans le cas de sources difficiles d'accès et hors du sujet de l'étude, des fluocapteurs peuvent être utilisés, parallèlement aux prélèvements manuels. Des mesures de débits doivent être réalisées sur les écoulements à l'injection et sur les points de sortie, d'une part pour établir le bilan des quantités de traceur restituées, d'autre part pour connaître les conditions de passage du traceur (régime permanent ou régime variable), qui définissent les limites de l'interprétation des résultats.

1.2. BILAN HYDROLOGIQUE ET SURFACE D'ALIMENTATION

L'étude des bilans hydrologiques repose sur l'analyse de la cohérence existant entre les flux d'entrée et les flux de sortie à l'exutoire d'un système et permet de caractériser globalement les limites de l'impluvium de ce système. Pratiquement, l'approche consiste à évaluer pour une période donnée, le volume d'eau écoulé à l'exutoire (V) et le volume de pluie qui renouvelle les réserves et entretient l'écoulement dans les systèmes. Elle repose sur la détermination des **précipitations efficaces**. Les pluies efficaces représentent la quantité d'eau fournie par les précipitations qui reste disponible pour le système, après soustraction des pertes par évapotranspiration réelle (ETR). Le calcul des pluies efficaces mensuelles est basé sur la formule suivante :

$$P_{\text{efficace}} = P - \text{ETR} \quad (1)$$

La surface d'alimentation du système est alors déterminée par le rapport suivant :

$$S_{\text{alimentation}} = \frac{V}{P_{\text{efficace}}} \quad (2)$$

L'estimation de l'ETR demeure le problème de base de la méthode en raison des problèmes liés à la détermination des paramètres climatiques sur les zones d'études. En conséquence, la méthode d'estimation fréquemment utilisée consiste à calculer le déficit d'écoulement à partir de la formulation de Turc car elle permet de s'affranchir de la connaissance des paramètres climatiques. Le calcul du déficit d'écoulement par cette méthode empirique est basé sur la formule suivante :

$$D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \text{ avec } L = 300 + 25 T + 0.05 T^3 \quad (3)$$

où P représente les précipitations en mm et T la température moyenne de la source en °C.

La surface d'alimentation du système est alors déterminée par le rapport suivant :

$$S_{\text{alimentation}} = \frac{V}{P - D} \quad (4)$$

où V représente le volume d'eau écoulé à l'exutoire, P la lame de pluie précipitée et D le déficit d'écoulement.

Dans cette étude, l'estimation des surfaces d'alimentation des systèmes a été réalisée à l'aide de ces deux méthodes.

Remarques sur l'influence du ruissellement :

En toute rigueur le bilan hydrologique doit évidemment prendre en compte le ruissellement, qui peut introduire des termes négatifs (ruissellement qui quitte la surface du système) ou positifs (ruissellement de l'extérieur qui alimente le système) dans le bilan. Dans le cas général des systèmes calcaires karstifiés, le ruissellement de surface est rare et la plus grande partie des précipitations s'infilte (ou s'évapore). Lorsque des cours d'eau se forment, ils s'infiltreront fréquemment avant de quitter la zone d'alimentation du système karstique.

Dans le cas des systèmes des Fontailles et des Cent-Fonts, ce ruissellement a été supposé négligeable, sauf pour ce qui concerne les pertes de la Buèges qui alimentent l'aquifère karstique des Cent-Fonts. Hormis cette exception, l'approximation qui est faite introduit une erreur dans le calcul du bilan hydrologique, qui va dans le sens d'une **surestimation des précipitations efficaces**, autrement dit une **sous-estimation de la surface d'alimentation**. En effet, la configuration des systèmes étudiés, présentant globalement une morphologie de causses surélevés, implique que le bilan des ruissellements est négatif (pertes vers les vallées qui entourent les causses, lors des fortes pluies). Cette erreur est non quantifiée, mais supposée faible par rapport aux autres incertitudes.

1.3. ANALYSE DES DÉBITS CLASSÉS

Cette méthode a pour objet de caractériser les différents régimes d'écoulement observables sur un exutoire. Ces variations sont mises en évidence à partir de l'ajustement d'une loi statistique liant les classes de débit à leurs fréquences d'apparition. Les écarts par rapport à la loi de distribution sont interprétés en fonction des observations de terrain. Cette méthode permet de :

- mettre en évidence la présence d'un impluvium fluctuant au travers des fuites ou apports éventuels pouvant se produire entre différents systèmes karstiques ;
- déterminer les conditions de mise en fonctionnement de trop-pleins ;
- vérifier la qualité de la station de jaugeage de l'exutoire.

1.4. ANALYSE DES COURBES DE RÉCESSION

Ce type d'analyse consiste à étudier la partie décroissante de l'hydrogramme de crue d'une source, appelée récession, à partir d'un modèle de type « boîte grise » qui assimile le système karstique à des réservoirs se vidangeant les uns dans les autres.

Deux parties sont distinguées dans les courbes de récession :

- la décrue, durant laquelle l'infiltration influence la vidange du réservoir ;
- le tarissement, qui débute à l'instant où le débit d'infiltration devient nul, la vidange du réservoir principal obéissant alors uniquement à la loi de Maillet.

L'ajustement des paramètres de la loi décrivant la récession conduit à :

- la caractérisation du fonctionnement de la zone d'infiltration ;
- l'estimation du volume d'eau contenu dans le réservoir, responsable de la décroissance des débits observée. Cette approche permet d'apprécier la présence d'une zone noyée et l'importance des réserves qu'elle contient.

Une classification a été établie à partir des résultats de l'analyse des courbes de récession afin de comparer les systèmes karstiques. Elle repose sur le calcul de deux coefficients :

- le **paramètre k** est égal au rapport entre le volume dynamique maximum obtenu sur une grande période et le volume de transit inter-annuel sur la même période. Il traduit l'aptitude de la zone noyée du karst à stocker les précipitations et à les restituer progressivement dans le temps, c'est à dire son pouvoir régulateur. Dans le cas des aquifères karstiques, k est en général inférieur à 0,5. Une valeur proche de zéro indique un pouvoir régulateur peu important.
- le **coefficient i**, compris entre 0 et 1, caractérise les retards à l'infiltration. Il est égal à la valeur de la fonction homographique deux jours après la pointe de crue. Une forte valeur traduit une infiltration lente ou complexe contribuant à une meilleure

régulation de l'écoulement, alors qu'à l'inverse une faible valeur est le signe d'un transit rapide des eaux vers la zone noyée.

1.5. ANALYSES CORRÉLATOIRE ET SPECTRALE

Les analyses corrélatoire et spectrale s'inscrivent dans le cadre de l'approche systémique du karst. L'aquifère karstique est assimilé à un système de type « boîte noire » dont la pluie et le débit à l'exutoire représentent respectivement l'entrée et la sortie.

Deux types d'analyse sont employés pour quantifier l'organisation de la structure de drainage et l'importance des réserves au travers de divers paramètres :

- **L'analyse simple** permet d'identifier les composantes d'une chronique à partir de deux « outils » :
 - le corrélogramme qui traduit la dépendance dans le temps des événements affectant la chronique, selon des intervalles de temps de plus en plus grands. L'effet mémoire, directement calculé à partir du corrélogramme simple, traduit l'inertie de l'aquifère. Il est lié à la présence de réserves et au degré de karstification ;
 - le spectre de densité de variance qui permet l'identification des événements périodiques par la détermination de leur fréquence. Dans le cas d'une chronique de débit, il fournit deux paramètres renseignant sur le fonctionnement du système :
 - la fréquence de coupure est égale à la valeur de fréquence pour laquelle la densité de variance devient nulle ou négligeable. Elle quantifie la régulation introduite par le système (durée minimale que doit avoir une pluie pour influencer sur le système) ;
 - le temps de régulation représente la longueur de la réponse impulsionnelle du système, c'est à dire la durée de l'influence d'événements pluvieux sur le système ;
- **L'analyse croisée** permet l'étude de la relation pluie-débit et fournit une bonne image de la réponse impulsionnelle du système par le corrélogramme croisé. Celui-ci est précisé par quatre fonctions dans le domaine fréquentiel :
 - la fonction d'amplitude croisée fournit la plage de fréquence pour laquelle la relation pluie-débit s'établit ;
 - la fonction de phase indique le déphasage entre l'entrée et la sortie du système ;
 - la fonction de gain montre si le système atténue ou amplifie l'information contenue dans la chronique des pluies ;
 - la fonction de cohérence traduit la linéarité et la stationnarité du système.

Le pic du corrélogramme croisé est d'autant plus marqué que le drainage est important. A l'inverse, la réponse impulsionnelle présente l'allure d'un bossage étalé pour les systèmes mal drainés en raison d'une structure non évoluée ou non fonctionnelle.

Les paramètres calculés à partir des analyses corrélatrice et spectrale (effet mémoire, temps de régulation, fréquence de coupure et réponse impulsionnelle) permettent de caractériser le fonctionnement des systèmes et contribuer ainsi à la connaissance de leur structure. Cette méthode est actuellement largement utilisée : elle a permis d'étudier près d'une centaine de systèmes karstiques à ce jour.

2. Résultats et interprétation des traçages artificiels

2.1. POUR LE SYSTÈME DES FONTANILLES

2.1.1. Résultats des traçages réalisés antérieurement dans le secteur d'étude

Les traçages réalisés avant cette étude sont rares. Ils sont liés à l'exploration spéléologique des réseaux souterrains de cette région. Tous ont été pratiqués selon la méthode du « tout ou rien » et les restitutions ont été suivies soit par observation directe au sources, soit par fluocapteurs. Les conditions d'injection et de suivi de la restitution ne sont pas toujours connues en détail et ne proviennent pas toujours du rapport ou de la publication originale. C'est pourquoi certains de ces résultats doivent être considérés avec précaution. En particulier, les restitutions mises en évidence par fluocapteurs ne sont pas retenues, si elles n'ont pas été confirmées par une observation directe.

Tous les traçages réalisés dans l'ensemble karstique constitué par le sud du Larzac, la montagne de la Séranne et les garrigues de la moyenne vallée de l'Hérault sont répertoriés dans le tableau 1 en annexe 1.

Seuls, les traçages 34 et 36 concernent le système karstique des Fontanilles, soit directement, soit en contribuant à la détermination de ses contours.

Le traçage n° 34 vient d'une injection dans la **perte du ruisseau de St Martin de Londres**. La coloration est apparue visible à l'œil nu à la source des Châtaigniers, dans le ravin des Arcs de la vallée du Lamalou, au bout de 6 jours. La vitesse obtenue, de l'ordre de 29 m/h, traduit, là aussi, un écoulement dans un milieu peu karstique. La coloration paraît avoir aussi été détectée par fluocapteur à la source des Fontanilles au bout de 7 jours (63 m/h) et à celle du Lez après 27 jours (19 m/h) : ces deux cas ne doivent pas être retenus, parce qu'à chaque fois seul un fluocapteur a été positif (ce qui peut résulter d'une pollution). En outre, de telles diffluences (apparition dans 2 sources différentes), à partir d'écoulements naturels, sont peu probables.

Le traçage n° 36 est le résultat d'une injection faite dans l'**aven de Cambous**, sur la cause de Viols-le-Fort. Le colorant a été détecté dans des conditions non précisées, 23 jours plus tard. A nouveau la vitesse lente (16 m/h) traduit un milieu à fonctionnement peu karstique.

Les colorations réalisées avant cette étude montrent donc que :

- **Les pertes du ruisseau de St-Martin et celle du Lamalou ne participent probablement pas à la recharge du système des Fontanilles.**
- **Le causse de Viols-le-Fort constitue probablement l'aire d'alimentation du système des Fontanilles.**
- **Dans tous les cas, ces colorations ne mettent pas en évidence un fonctionnement karstique très poussé.**

2.1.2. Traçage sur l'exutoire des Fontanilles

Données sur le traçage exutoire des Fontanilles (synthèse du tabl. 2 de l'annexe).

Injection Le 29/08/97 10:08	Distance (injection/sortie)	Quantité injectée (Fluorcéine)	Temps première apparition	Temps moyen
Grotte des Fontanilles	200 m	0,102 kg	150 mn	?

Résultats obtenus

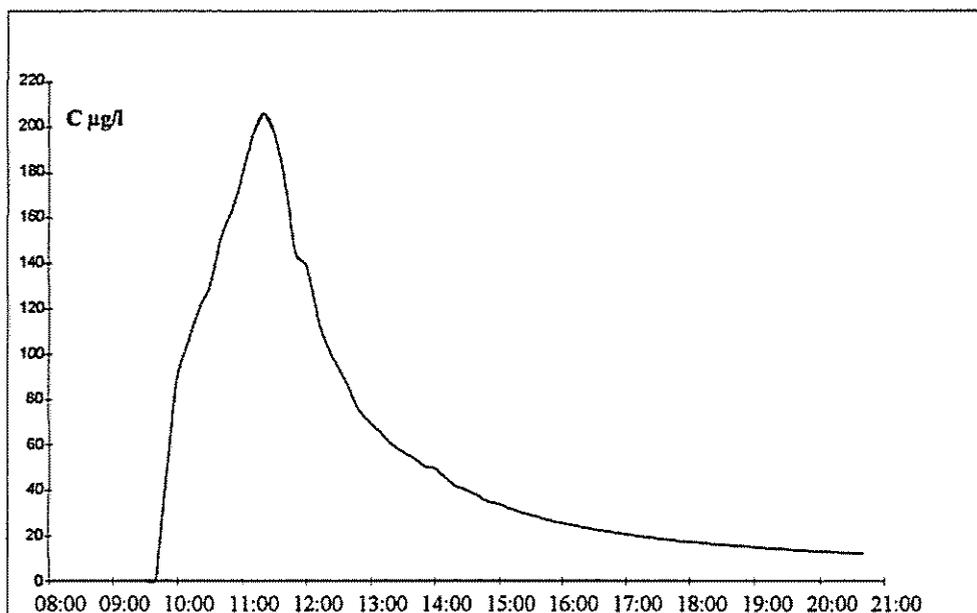
La sortie du traceur est apparue de façon visible un peu avant 10h 00 TU (l'injection ayant été faite à 7h14 TU). Le maximum a été apprécié à l'œil nu vers 11h (cf. tabl. 4 en annexe 1).

Du fait que les conditions d'observation étaient excellentes (forte concentration de traceur, eaux limpides, tranche d'eau importante et soleil), le cours de l'Hérault a pu être examiné dans le but de détecter d'éventuelles venues dans son lit. En dehors de la zone de panache de traceur, localisée en aval immédiat des griffons, aucune émergence n'a été révélée dans le lit de la rivière. En revanche, une sortie a été mise en évidence à 200-250 m en aval, en rive gauche, dans un retrait de la berge, au même niveau que la rivière; son débit était de plusieurs l/s.

La courbe de restitution a pu être construite (fig. 1). Il faut cependant remarquer que les teneurs sont toutes très élevées, au point que des dilutions importantes ont été nécessaires lors de l'analyse (1/100 pour les échantillons du pic, 1/10 pour ceux de la traîne). Ces fortes concentrations, si elles ont permis de bonnes conditions d'observation de terrain, ont introduit deux inconvénients majeurs :

1. des risques de pollution sur le parcours souterrain (adsorption, puis désorption) et de l'équipement de prélèvement,
2. la nécessité de diluer les échantillons pour réaliser les analyses (précision plus basse).

Par ailleurs les fortes concentrations impliquent la possibilité de suivre la restitution plus longtemps (d'où les valeurs non nulles dans la traînée de la courbe fig. 1).



**Fig. 1 : Traçage sur l'exutoire des Fontailles (injection à 7h14 TU) :
courbe de restitution du traceur.**

Interprétation et commentaires

En toute rigueur, le traçage ne peut pas être interprété complètement, puisque la courbe de distribution des temps de séjour (DTS) ne peut pas être établie en l'absence de données sur le débit. En fait, il faut supposer que les conditions suivantes ont été respectées :

1. le régime d'écoulement était permanent pendant toute la durée de l'expérience (débit constant) ;
2. le mélange était homogène (même concentration à tous les griffons au même instant) ;
3. la totalité du traceur est ressortie au cours de l'expérience (bilan de masse respecté).

La première hypothèse est acceptable : aucune variation de hauteur d'eau n'a été observée pendant la surveillance.

La seconde hypothèse pouvait être vérifiée à partir de prélèvements. Les résultats obtenus (tabl. 4 en annexe 1) montrent que cette condition n'est pas vraiment réalisée. Tous les griffons proches les uns des autres (A0 à A4) présentent des concentrations voisines; elles pourraient être considérées comme étant identiques, aux incertitudes d'analyse près. Cependant, les différences observées s'inscrivent dans une distribution spatiale des concentrations :

- les plus élevées dans les deux griffons du centre (A2 et A3),
- d'autant plus faibles que le griffon est éloigné (A0 et A1 vers l'amont, A4 et la source aval).

En effet, la source découverte en aval, de même que le griffon A5, présente une concentration significativement plus faible : les écarts systématiques correspondent à une dilution supérieure de 5,3 à 10,8 %. Ces écarts sont certainement dus à une contribution latérale d'eau ne provenant pas du drain karstique au point d'injection, mais de réserves latérales au drainage.

Dans ces conditions, le débit calculé à partir du bilan de masse de traceur risque d'être sous-estimé.

La troisième hypothèse ne peut pas être vérifiée et doit être admise.

Caractéristiques de la courbe de restitution

La courbe de restitution présente certaines irrégularités, traduisant des conditions de transport assez complexes, malgré la faible distance (200 à 400 m environ) et le temps de parcours court. En outre, le temps de la première apparition est de 2h 26, soit une vitesse maximale de passage de 81 m/h. Le temps modal, correspondant au maximum de la courbe de restitution, est 4h 26, soit une vitesse modale de 45 m/h. Ces vitesses sont relativement lentes pour des écoulements supposés s'effectuer dans un drain, surtout sur une distance aussi courte.

Parallèlement, le taux de dilution au maximum de la courbe est de 2.10^{-6} (contre $0,4.10^{-6}$ aux Cent-Fonts). Il est faible et correspond à une courbe de restitution relativement étalée.

Conséquences

Ces caractéristiques, vitesse faible et courbe étalée avec taux de dilution élevé, dénotent un écoulement plutôt difficile entre le point d'injection et les émergences, dans un milieu qui n'est pas un conduit karstique unique et bien développé. Cela signifie que le drainage karstique est mal organisé ou peu fonctionnel. Ce fonctionnement peu karstique de l'exutoire est confirmé par l'existence de caractères convergents :

- une sortie de l'eau qui n'est pas concentrée en un seul exutoire, mais répartie entre plusieurs griffons, dont l'un situé nettement en aval,
- un trop plein, la grotte, clairement positionnée sur un drainage bien développé, mais nettement supérieur.

Ces caractères traduisent une évolution très récente de la zone d'émergence, sous l'effet d'un abaissement du niveau de base de quelques mètres. Le drainage karstique du système s'était auparavant mis en place sur un niveau de base positionné sur la grotte (cote 90 m NGF). Le niveau de base constitué par l'Hérault s'est abaissé au niveau des griffons supérieurs (cote 80 m), puis à celui de la source de l'aval (cote 75 m).

Cet abaissement du niveau de base est nécessairement très récent (quelques milliers à quelques dizaines de milliers d'années), puisque le temps n'a pas été suffisant pour que les conduits se développent dans cette partie du système karstique. Cette situation laisse présager qu'au cours des crues, la contribution de cet écoulement au débit total est limitée et que l'essentiel s'écoule par le trop plein.

Calcul du débit de la source

Le bilan de masse du traceur s'écrit ainsi :

$$M = \int Q(t).C(t).dt$$

soit :

$$\int Q(t).dt = \int \frac{M}{C(t).dt} = V$$

M représente la masse de traceur injecté, Q le débit instantané, C la concentration en traceur correspondante et V le volume total écoulé pendant la durée de l'expérience.

La durée de restitution prise en considération est 15h. La concentration moyenne pendant l'expérience a été calculée par la méthode des trapèzes, sur le pas de temps d'échantillonnage (10 mn) ; elle est $C = 44,6 \mu\text{g/L}$. Par conséquent,

$$V = 2\,287 \text{ m}^3,$$

soit

$$Q = 42,4 \text{ l/s.}$$

Du fait que les conditions de réalisation laissent supposer une sous-estimation du débit mesuré ainsi, le débit réel devait être d'environ 50 l/s.

2.1.3. Traçage sur le système des Fontanilles

Données sur le traçage « système » des Fontanilles (synthèse du tabl. 3 de l'annexe).

Injection Le 16/04/98 10:30	Distance (injection/source Rastel)	Quantité injectée (Uranine)	Temps première apparition (mn)	Temps moyen
Grotte de Mas de Bouisse	4 485 m	1 kg	336 < t < 600	?

Pas de restitution à la source des Fontanilles

Résultats obtenus

Les échantillons ont, dans l'ensemble, présenté un bruit de fond en fluorescence assez élevé, correspondant à une valeur inférieure à $1 \mu\text{g/l}$ d'uranine, aux deux sources (Fontanilles et Rastel). L'aspect désordonné des variations observées a laissé supposer

qu'il pouvait ne pas s'agir d'uranine, mais d'une fluorescence naturelle associée à une certaine turbidité (présence de matière organique), classique au moment des crues. L'examen du spectre a confirmé qu'il ne s'agissait pas du traceur injecté, sauf pour l'échantillon prélevé à la source de Rastel le 30/4/98 à 10h 20 TU, pour lequel la teneur en uranine était 3,55 µg/l (limite de détection : 0,01 µg/l).

L'examen des fluocapteurs confirme le passage du traceur entre le 30/4 et le 11/5/98 à la source de Rastel (cf. tabl. 3 en annexe 1). En revanche, tous les échantillons provenant de la source de Fontanilles et prélevés jusqu'au 18/5/98 sont négatifs.

Interprétation et commentaires

La perte du Mas de Bouisse ne participe pas à l'alimentation de la source des Fontanilles. Ce traçage paraît s'inscrire dans un schéma général d'écoulements souterrains grossièrement orientés E-W, en direction de la vallée de l'Hérault, comme le sont ceux de la perte de St Martin-de-Londres vers la source des Châtaigniers et de l'aven Vidal vers les Fontanilles.

Aucune interprétation quantitative ne peut être faite, puisqu'on ne dispose ni de la courbe de restitution, ni des débits de la source de Rastel. Le temps de passage du traceur est au moins de 14 jours, soit une vitesse maximale de l'ordre de 13 m/h.

Conséquences

Si ce traçage n'informe pas sur les conditions d'écoulement dans le système des Fontanilles, il fournit une précieuse information sur ses contours. Il est clair qu'aucun écoulement de surface sur les formations imperméables du bassin de St-Martin-de-Londres ne participe à l'alimentation de cette source. Ce résultat signifie que le bassin d'alimentation des Fontanilles est grossièrement constitué par le causse de Viols-le-Fort.

La limite Nord du bassin d'alimentation passerait donc approximativement entre le sommet de l'Ouradon et la montagne de Labau et serait orienté Est-Ouest. Le système karstique des Fontanilles présente donc une forme trapézoïdale d'environ 8 km de long et 3 km au maximum de largeur en bordure de l'Hérault, pour une superficie d'environ 18 km².

2.2. POUR LE SYSTÈME DES CENT-FONTS

2.2.1. Résultats des traçages réalisés antérieurement dans le secteur d'étude

Les traçages réalisés avant cette étude sont rares. Ils sont liés à l'exploration spéléologique des réseaux souterrains de cette région. Tous ont été pratiqués selon la méthode du « tout ou rien » et les restitutions ont été suivies soit par observation directe

au sources, soit par fluocapteurs. Les conditions d'injection et de suivi de la restitution ne sont pas toujours connues en détail et ne proviennent pas toujours du rapport ou de la publication originale. C'est pourquoi certains de ces résultats doivent être considérés avec précautions. En particulier, les restitutions mises en évidence par fluocapteurs ne sont pas retenues, si elles n'ont pas été confirmées par une observation directe.

Tous les traçages réalisés dans l'ensemble karstique constitué par le sud du Larzac, la montagne de la Séranne et les garrigues de la moyenne vallée de l'Hérault sont répertoriés dans le tableau 1 de l'annexe 1.

Seul, le traçage 8 concerne le système karstique des Cent-Fonts, soit directement, soit en contribuant à la détermination de ses contours.

Le traçage n° 8 résulte d'une injection dans les pertes de la Buèges en aval de St-André-de-Buèges. La coloration, visible à l'œil nu, est apparue à la source des Cent-Fonts 10 jours plus tard. La vitesse horaire déterminée (33 m/h) est faible et tend à indiquer un écoulement dans un milieu à fonctionnement peu karstique (*contexte hydrologique de basses eaux : débit de la Buèges = 200 l/s ; débit des Cent-Fonts = 500 l/s, cf. tableau 1 en annexe*).

La coloration réalisée avant cette étude montre donc que :

- Les pertes de la Buèges constituent l'une des modalités de recharge du système des Cent-Fonts.
- Cette coloration ne met pas en évidence un fonctionnement karstique très poussé.

2.2.2. Traçage sur l'exutoire des Cent-Fonts

Résultats obtenus

La sortie du traceur est apparue de façon visible vers 12h 06 TL. Le maximum a été apprécié à l'œil nu vers 13h.

Données sur le traçage exutoire des Cent-Fonts (synthèse du tableau 4 de l'annexe).

Injection	Distance (injection/sortie)	Quantité injectée (Fluorcéine)	Temps première apparition	Temps moyen
Le 29/08/97 10:08				
Forage à l'amont de la Source	200 m	0,05 kg	94 mn	233 mn

La concentration élevée de traceur, les eaux limpides et la tranche d'eau importante ont permis d'examiner le cours de l'Hérault dans le but de détecter d'éventuelles venues dans son lit. En dehors de la zone de panache de traceur, localisée en aval immédiat des griffons, il semble qu'une émergence au moins se soit produit dans le lit de la rivière, à

proximité du griffon principal (n° 4 sur le plan, volume II, fig. 1) situé dans le prolongement du cours d'eau issu de la source temporaire n°1.

La courbe de restitution a été établie pour le griffon équipé d'un préleveur automatique, et pour les autres griffons (fig. 1).

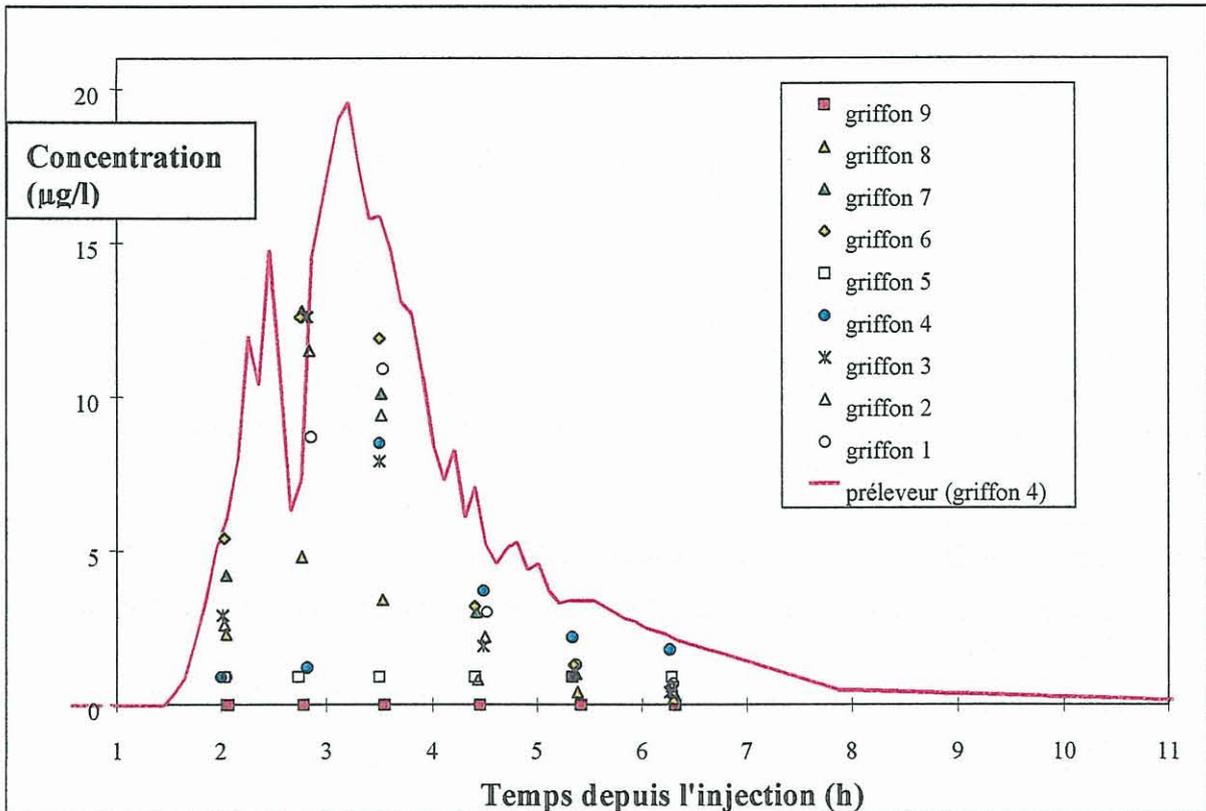


Fig. 2 : Traçage sur l'exutoire des Cent-Fonts : courbe de restitution du traceur.

Interprétation et commentaires

En toute rigueur, le traçage ne peut pas être interprété complètement, puisque la courbe de distribution des temps de séjour (DTS) ne peut pas être établie en l'absence de données sur le débit. Comme pour le traçage « exutoire » des Fontanilles, il faut supposer que les conditions suivantes ont été respectées :

1. le régime d'écoulement était permanent pendant toute la durée de l'expérience (débit constant);
2. le mélange était homogène (même concentration dans tous les griffons au même instant) ;
3. la totalité du traceur est ressortie au cours de l'expérience (bilan de masse respecté).

La première hypothèse est acceptable : aucune variation de hauteur d'eau n'a été observée au cours de l'expérience.

La seconde hypothèse pouvait être vérifiée à partir de prélèvements. Les résultats obtenus (fig. 1 et tabl. 2 en annexe 1) montrent que cette condition n'est pas vraiment réalisée. Il existe une hétérogénéité certaine des concentrations en uranine entre les différents griffons. En outre, il est apparu une nette différence entre les concentrations des prélèvements automatiques et celles des prélèvements manuels, pour le griffon 4 ; cette différence doit être attribuée à un début de dégradation du traceur par la lumière, dans des flacons mal protégés. Il est probable que tous les prélèvements manuels ont été concernés par ce phénomène.

Cependant, cela ne suffit à expliquer l'hétérogénéité observée. En effet, les principaux griffons (1, 2, 3, 4, 6 et 7) présentent des concentrations voisines ; certaines différences peuvent être dues à l'exposition des échantillons à la lumière. Cependant, deux griffons se distinguent clairement des autres :

- le griffon 9, le plus éloigné, vers l'aval, non touché par le nuage de traceur,
- le griffon 5, proche du griffon principal, présentant une concentration faible et constante.

Mis à part ces deux points, qui concernent une très faible part du débit total, les écarts observés correspondent à un accroissement de la dilution inférieur à 5 %. Enfin, il faut noter la bimodalité caractéristique de la restitution, qui dénote des conditions complexes d'écoulement, responsables d'une partition du nuage de traceur en deux. Dans ces conditions, le débit calculé à partir du bilan de masse de traceur risque d'être sous-estimé.

La troisième hypothèse ne peut pas être vérifiée et doit être admise.

Caractéristiques de la courbe de restitution

La courbe de restitution est manifestement bimodale, traduisant des conditions de transport assez complexes, malgré la faible distance (200 m environ) et le temps de parcours court. En outre, le temps de la première apparition est de 1h 34, soit une vitesse maximale de passage de 130 m/h. Le temps modal, correspondant au premier maximum de la courbe de restitution, est 2h 28, soit une vitesse modale de 81 m/h. Ces vitesses traduisent un écoulement s'effectuant dans un conduit.

Le second mode correspond à un écoulement à la fois plus lent et plus dispersif. Au temps modal (3h 13) correspond une vitesse modale de 62 m/h. La restitution, qui se poursuit pendant une dizaine d'heures après le second maximum, est bien dispersée malgré la faible distance parcourue.

Parallèlement, le taux de dilution au maximum de la courbe est de $0,4 \cdot 10^{-6}$. Il est plus faible qu'aux Fontanilles ($2 \cdot 10^{-6}$); ceci correspond à l'un et/ou l'autre des deux phénomènes suivants :

- une dispersion plus grande dans le système tracé
- une dilution plus grande par apports d'eau non tracée.

Conséquences

Ces caractéristiques, courbe bimodale et étalée pour le second mode, avec taux de dilution élevé, dénotent un écoulement complexe : en partie, rapide et peu dispersif, l'autre partie dans un milieu moins ouvert et plus dispersif. Une partie du traceur a manifestement été entraînée rapidement vers l'exutoire, dans un conduit karstique assez bien développé ; c'est ce qu'indique le premier pic étroit de la courbe de restitution. Le second pic, plus étalé correspond à la restitution du traceur après passage dans un milieu plus dispersif, de type fissuré.

Cela signifie que le drainage karstique n'est pas encore bien organisé. Ce fonctionnement présente des caractères convergents avec ceux observés à la source des Fontanilles, et qui traduisent une évolution très récente de la zone d'émergence, liée à un abaissement du niveau de base constitué par l'Hérault. Le drainage karstique du système s'était auparavant mis en place sur un niveau de base positionné sur la grotte (cote de 87,5 m NGF, contre environ 76,5 pour l'Hérault en basses eaux). Cette situation est voisine de celle des Fontanilles ; cependant, l'existence probable d'un conduit connecté au griffon principal conduit à envisager qu'au cours des crues, la contribution de l'écoulement de ces griffons au débit total n'est peut-être pas négligeable.

Calcul du débit de la source

Le bilan de masse du traceur s'écrit ainsi :

$$M = \int Q(t) \cdot C(t) \cdot dt$$

soit :

$$\int Q(t) \cdot dt = \frac{M}{\int C(t) \cdot dt} = V$$

où M représente la masse de traceur injecté, Q le débit instantané, C la concentration en traceur correspondante et V le volume total écoulé pendant la durée de l'expérience.

La durée de restitution prise en considération est 11h 12. La concentration moyenne pendant l'expérience a été calculée par la méthode des trapèzes, sur le pas de temps d'échantillonnage (10 mn) ; elle est $C = 3,6 \mu\text{g/l}$. Par conséquent,

$$V = 13\,900 \text{ m}^3,$$

soit

$$Q = 344 \text{ l/s.}$$

Le débit réel devait être d'environ 350 l/s.

Un jaugeage effectué au moulinet sur l'ensemble des griffons a donné 226 l/s. Mais il n'est pas possible de jauger toutes les sorties d'eau visibles (certaines ont du être estimées, par comparaison avec leurs voisines), et les sorties dans le lit de l'Hérault ne peuvent pas être prises en compte.

2.2.3. Traçage sur le système des Cent-Fonts

Données sur le traçage « système » des Cent-Fonts (synthèse du tabl. 5 de l'annexe).

Injection Le 06/10/97 16:40	Distance (injection/sortie)	Quantité injectée (Uranine)	Temps première apparition	Temps moyen
Pertes de la Buèges	8 200 m	1,046 kg	33 900 mn	?

Résultats obtenus

La disparition du traceur s'est étalée sur deux jours environ au site d'injection. Il faut donc admettre que :

1. une partie du traceur injecté a été dégradée par la lumière dans le bassin, et donc que le bilan ne peut pas être équilibré,
2. la forme de la restitution est influencée par cette entrée continue (étalement accru de la courbe de restitution) ; toutefois, la durée de 2 jours est faible en regard des 24 jours nécessaires au transfert, et cet effet est par conséquent très faible.

Les échantillons précédant le début de la restitution ont présenté un très bas bruit de fond en fluorescence naturelle, due à la présence de matière organique probablement. La crue du 6/11/97 a fait émerger des eaux à fluorescence naturelle forte, aussi bien aux Cent-Fonts qu'aux sources des Minchous et du Moulin de Bertrand. Cette perturbation a contraint à contrôler par spectrofluorimétrie la présence ou l'absence d'uranine sur tous les échantillons à partir du 5/11/97.

Le traceur est apparu uniquement à la source des Cent-Fonts, dès le 30/10/97, soit 24 jours après l'injection (cf. fig. 2 et tabl. 5 en annexe 1). Sa concentration a augmenté de façon continue jusqu'au début de la crue, pour s'abaisser au niveau du bruit de fond (durée de la restitution observée : 6 jours). Certains échantillons se sont par la suite révélés positifs, mais les variations du débit correspondant sont trop grandes pour quantifier les flux de traceur.

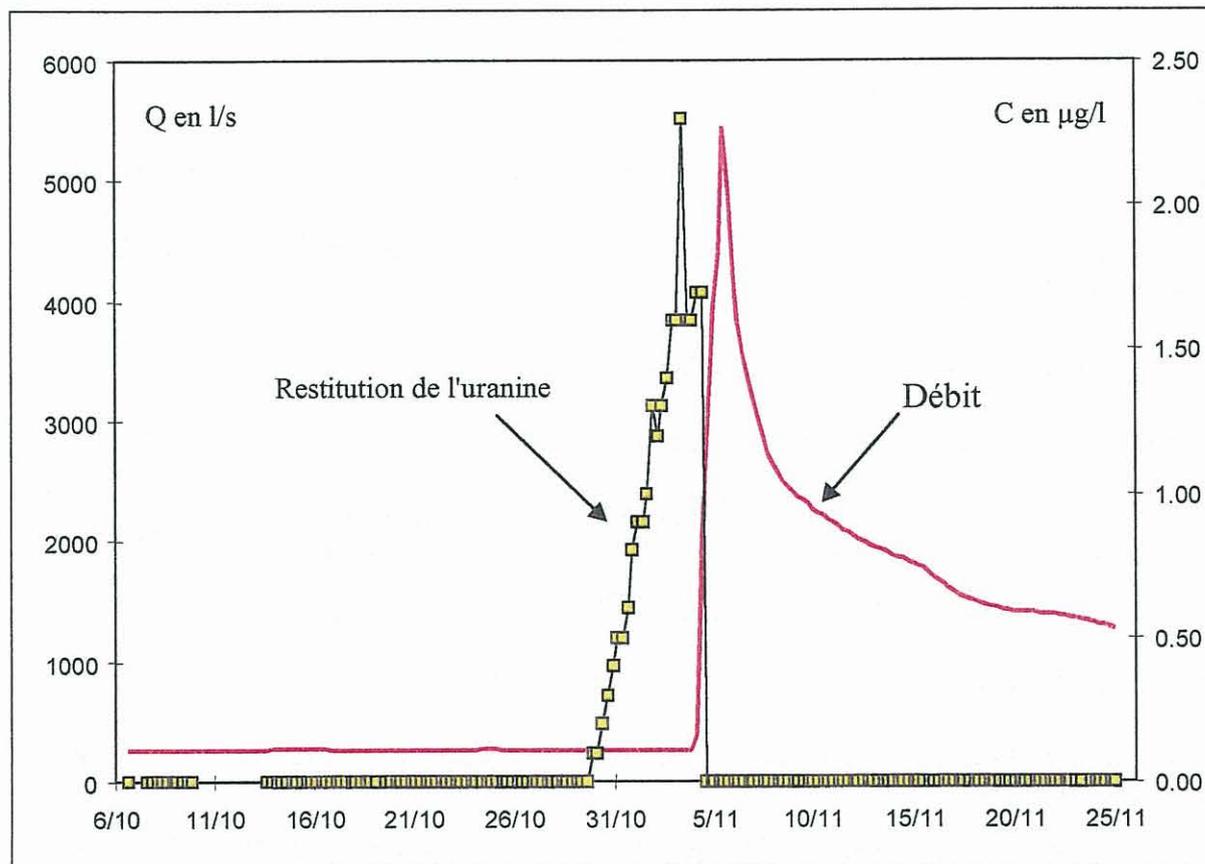


Fig. 3 : Traçage sur le système des Cent-Fonts (injection le 6/10/97) : courbe de restitution du traceur et débit de la source.

Interprétation et commentaires

Ce traçage confirme le fait que les pertes de la Buèges participent à l'alimentation de la source des Cent-Fonts. Au temps de première apparition (30/10/97 à 6h 00, soit 565,33 h) correspond une vitesse maximale de 14,5 m/h. Le temps modal, estimé à 686 h, donne une vitesse modale de 12 m/h. Ces valeurs sont cependant dépendantes des conditions d'entrée, puisque l'eau et le traceur doivent s'écouler au travers de la masse de travertin poreux qui colmate le lit du ruisseau et, de ce fait, retarde l'entrée du traceur et contribue à sa dispersion. Au mode, la dilution est très forte (environ $2 \cdot 10^{-9}$). La restitution du traceur n'a pu être suivie jusqu'à son terme en raison de l'arrivée d'une crue peu après le mode de la courbe, empêchant un suivi régulier par la suite. Jusqu'à l'arrivée de la crue le taux de restitution est de 15 %.

Ces caractères ne traduisent pas un écoulement en conduit ; ils définissent un milieu ne présentant pas une karstification fonctionnelle développée entre les pertes et la source. La vitesse de passage de cette expérience est nettement plus faible que celle observée (33 m/h) lors de la coloration n° 8 (tabl. 1 en annexe 1), sans que l'on puisse affirmer si ce sont les conditions hydrologiques (étiage) ou le lieu d'injection (un peu plus en aval) qui soient la cause de cette différence.

Bien que la restitution ait été tronquée par la crue du 4/11, on peut tenter une évaluation du volume tracé (volume du « nuage » de traceur), avant l'arrivée de la crue, donc en régime permanent. Ce volume, de l'ordre de 123 000 m³, est très important ; il rend compte de la dispersion du nuage de traceur dans un volume d'eau considérable.

Conséquences

Ce traçage informe à la fois sur les conditions d'écoulement dans le système des Cent-Fonts et sur ses contours. L'écoulement de surface de la Buèges ne participe que partiellement à l'alimentation de cette source. Cette participation est notable en basses eaux (à 45 l/s pour un débit total de 270 l/s, soit 16 %), mais en hautes eaux elle est impossible à évaluer sans jaugeages différentiels sur la Buèges. Cette alimentation par les pertes de la Buèges doit être gardée à l'esprit lors de l'interprétation des courbes de tarissement des Cent-Fonts, qui devraient être analysées en « régime non influencé » comme l'impose la méthode. L'interprétation sera par conséquent effectuée avec précaution.

Enfin, le système karstique des Cent-Fonts ne présente pas un degré de karstification fonctionnelle très poussé, tout du moins entre les pertes de la Buèges et la source et au voisinage de la source pour l'écoulement permanent. Mais il n'est pas possible de dire si c'est la conséquence d'un stade de développement initial, ou bien si c'est à cause du colmatage des conduits issus des pertes par des dépôts épais de travertin.

3. Résultats et analyse du suivi hydrologique

3.1. PRÉSENTATION ET CRITIQUE DES DONNÉES

Remarque sur les données théoriquement nécessaires

Les traitements employés imposent en théorie plusieurs contraintes sur la nature des données :

- les traitements étant de nature statistique, il est préférable de traiter des données acquises sur une longue période (plusieurs cycles hydrologiques) afin de réduire l'influence des coïncidences statistiques et de réduire les « bruits d'analyses » ;
- les méthodes nécessitent d'utiliser des chroniques continues et sans lacunes ;
- les analyses doivent être réalisées préférentiellement selon des cycles hydrologiques complets et non selon des années civiles, afin de donner le même poids statistique aux hautes et basses eaux.
- le pas de temps des données est régulier

Les chroniques utilisées dans la présente étude sont les valeurs journalières de débits moyens et de totaux de pluie.

En pratique, lors des études hydrogéologiques communes, de telles données sont rarement disponibles pour les sources karstiques et une acquisition spécifique est alors nécessaire. Elle est toutefois délicate en raison des difficultés d'accès, des contraintes fréquentes à l'aval (captages, piscicultures) et des conséquences du caractère souvent montagneux et/ou méditerranéen de ce type d'aquifère (orage).

Par ailleurs, le suivi sur un à deux cycles hydrologiques, imposé pour des raisons à la fois économiques et de durée de l'étude, constitue le minimum envisageable.

Il en résulte que les méthodes sont applicables avec comme précaution la prise en compte des biais possibles.

Données utilisées dans la présente étude

3.1.1. Précipitations

La chronique de pluie utilisée est celle de la station Météo France de St Martin de Londres bien représentative du système des Fontanilles. Pour les système des Cent-Fonts, il n'existe pas de station Météo France sur le bassin d'alimentation. Aussi, la pluviométrie sur le bassin d'alimentation des Cent-Fonts a été assimilée à celle de la station de St-Martin-de-Londres.

Pour la période 1962-1998, la pluviométrie moyenne annuelle mesurée à la station de St Martin de Londres est importante, soit 1 187 mm. Pour les années 1996, 1997 et 1998 la hauteur de pluie mesurée est respectivement de 2 008 mm (+ 822 mm/moyenne), 1357 mm (+ 170 mm/moyenne) et de 680 mm (-507 mm/moyenne). Les années 1996 et 1997 sont donc fortement excédentaires tandis que l'année 1998 présente un fort déficit pluviométrique par rapport à la moyenne. La variabilité intra-annuelle est relativement importante, l'essentiel des précipitations étant apporté au cours des mois d'octobre à janvier (cf. fig. 4).

Les chroniques journalières de pluviométrie sont reportées sur les figures 5, 6, 7 et 8 avec les débits aux exutoires.

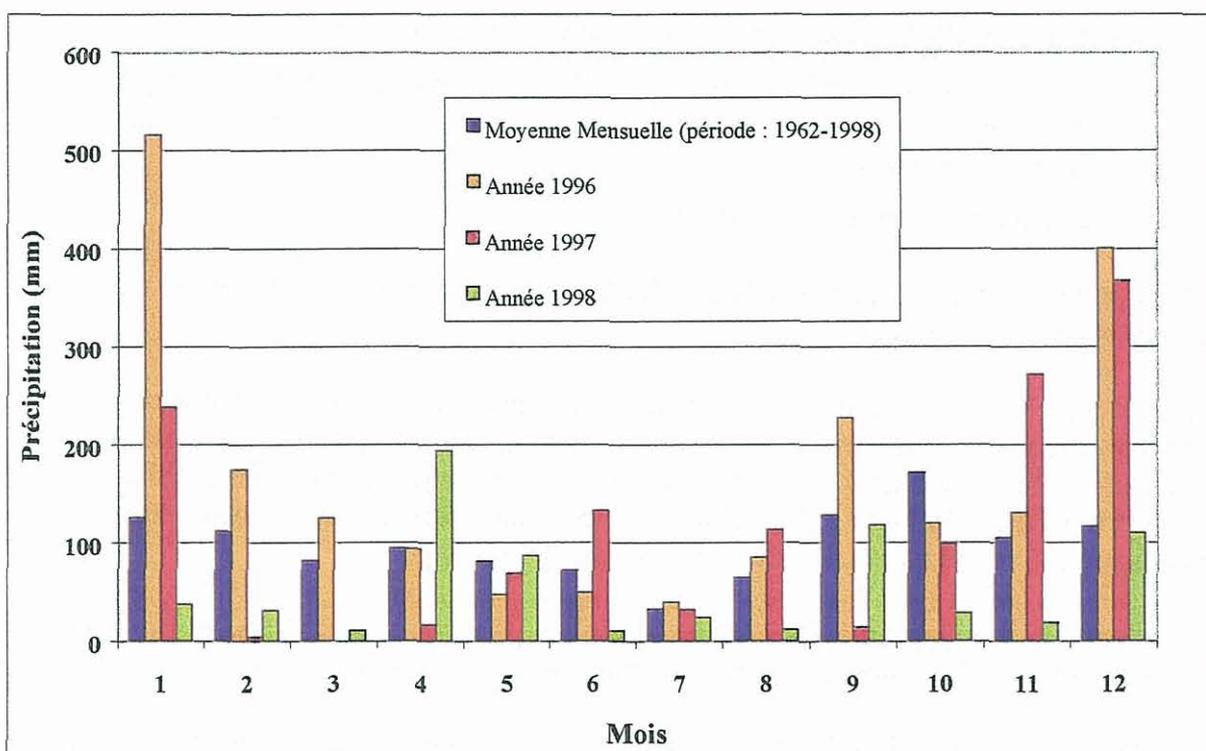


Fig. 4 : Écarts entre la pluviométrie mensuelle des années 1996, 1997 et 1998 et les valeurs moyennes mensuelles calculées sur la période 1962-1998.

3.1.2. Débits

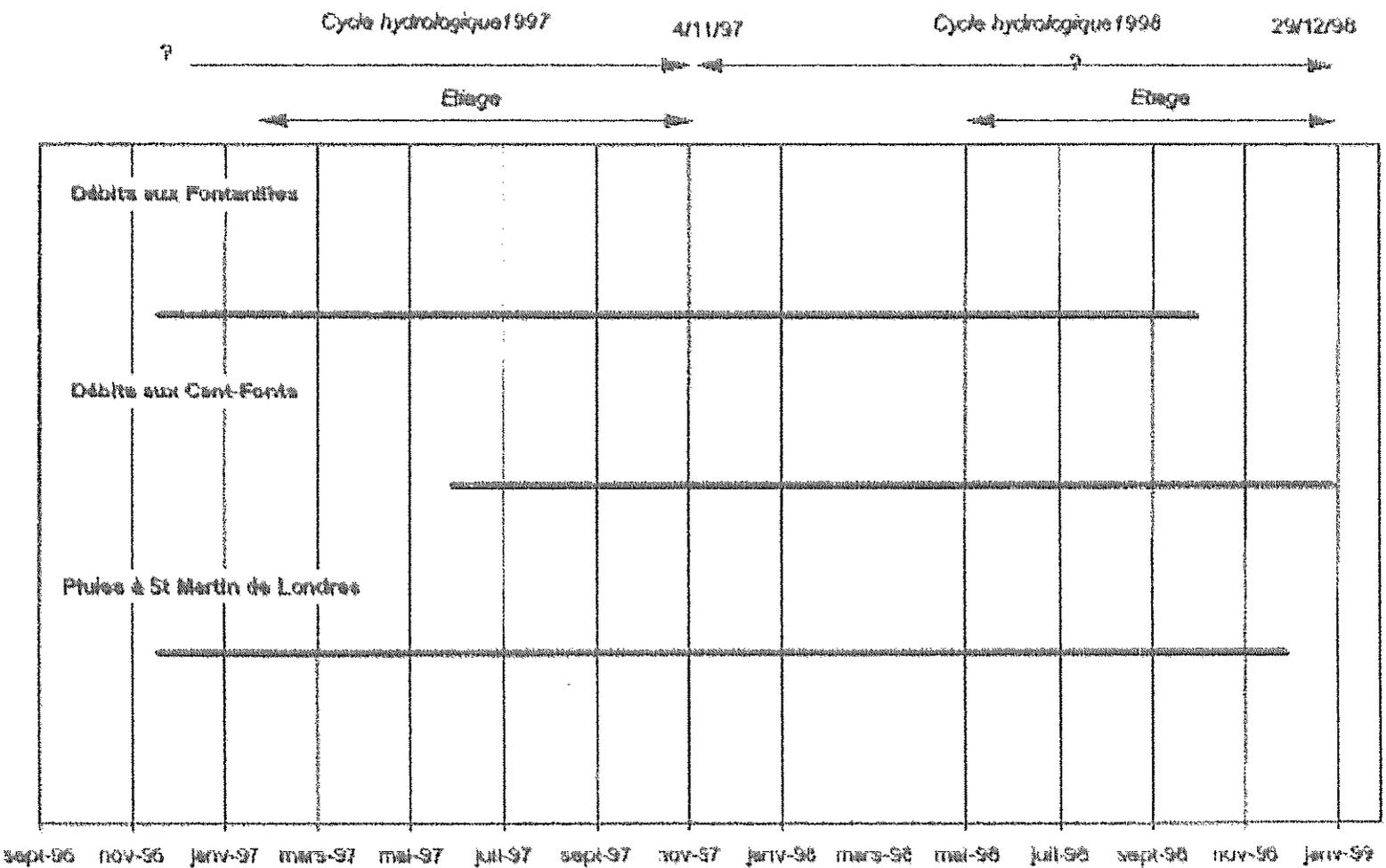
Les périodes couvertes par les données de débits utilisées dans cette étude sont présentées au tableau 1. Celui-ci donne une indication sur la période couverte par le suivi, les lacunes et la position par rapport au cycle hydrologique.

Les chroniques de débit obtenues sont reportées sur la figure 5 pour les Cent-Fonts, sur la figure 6 pour les Fontanilles et sur la figure 7 pour les Fontanilles ne détail pour les débits faibles.

Le tableau 2 récapitule pour chaque chronique l'étendue des périodes de lacune, ainsi que la longueur de la chronique retenue pour les traitements en complétant les lacunes par des interpolations linéaires. Les courbes reconstituées sont présentées sur les graphes des figures 8 et 9.

Le tableau 2 et les graphes des figures 5 à 9 amènent les commentaires suivants :

- d'une manière générale, les lacunes sont soit de courte durée, soit principalement situées en étiage. Leur reconstitution linéaire n'entraîne qu'un biais faible, et donc acceptable ;
- seule la lacune de décembre - janvier 1998 aux Fontanilles est étendue (45 jours) et en dehors des périodes d'étiage. Sa reconstitution pourra entraîner une déformation des traitements (surestimation de l'inertie dans les analyse corrélatoires et spectrales principalement).



Tabl. 1 : Répartition temporelle des données hydrométriques utilisées dans cette étude.

Nom	Données disponibles				Données utilisées		
	Date début	Date fin	Lacunes (dates)	Lacunes (jours)	Date début	Date fin	Nombre de valeurs
Débits aux Fontanilles	30/5/97 16h 00	01/01/99 12h 00	du 07/12/96 au 16/12/96 du 23/12/96 au 24/12/96 du 10/02/97 au 14/02/97 du 22/02/97 au 24/02/97 du 09/03/97 au 13/03/97 du 26/03/97 au 27/03/97 du 08/04/97 au 15/04/97 du 24/04/97 au 29/04/97 du 04/05/97 au 16/05/97 du 02/06/97 au 02/06/97 du 07/07/97 au 11/07/97 du 04/08/97 au 30/08/97 du 09/09/97 au 22/09/97 du 04/11/97 au 06/11/97 du 02/12/97 au 05/12/97 du 18/12/97 au 31/01/98 du 20/03/98 au 24/03/98 du 04/06/98 au 06/06/98 du 19/07/98 au 22/07/98	10 2 5 3 5 2 8 6 13 1 5 27 14 3 4 45 5 3 4	31/05/97	30/11/98	549
Débits aux Cent-Fonts	19/11/96 10h 00	3/10/98 00h 00	du 09/06/97 au 12/06/97 du 11/07/97 au 13/07/97 du 06/08/97 au 01/09/97 du 09/09/97 au 11/09/97 du 16/09/97 au 18/09/97 du 06/10/97 au 10/10/97 du 21/11/97 au 21/11/97 du 02/01/98 au 05/01/98 du 21/01/98 au 26/01/98 du 12/10/98 au 13/10/98	4 3 27 3 3 5 1 4 6 2	20/11/96	02/10/98	682
Pluie à St-Martin-de-Londres	01/01/96	30/11/98			20/11/96	30/11/98	741

Tabl. 2 : Données utilisées pour l'analyse des hydrogrammes des sources.

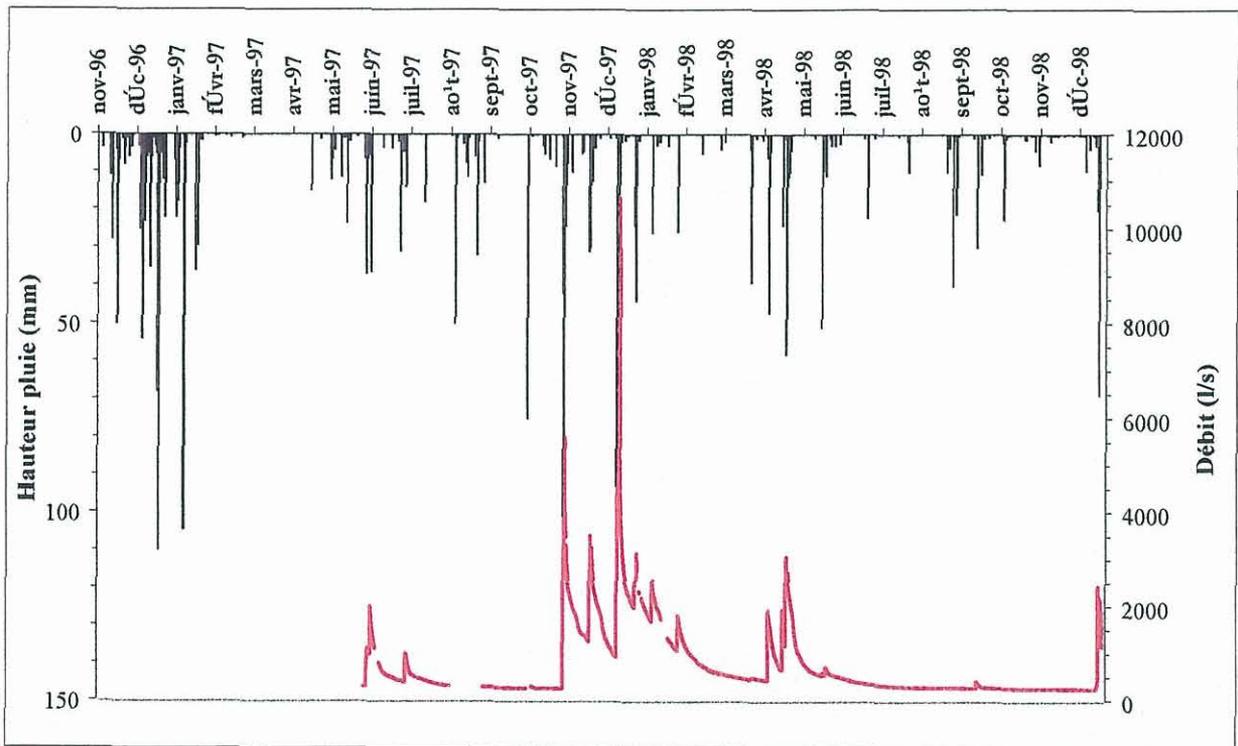


Fig. 5 : Débit à l'exutoire des Cent-Fonts et pluie à St-Martin-de-Londres.

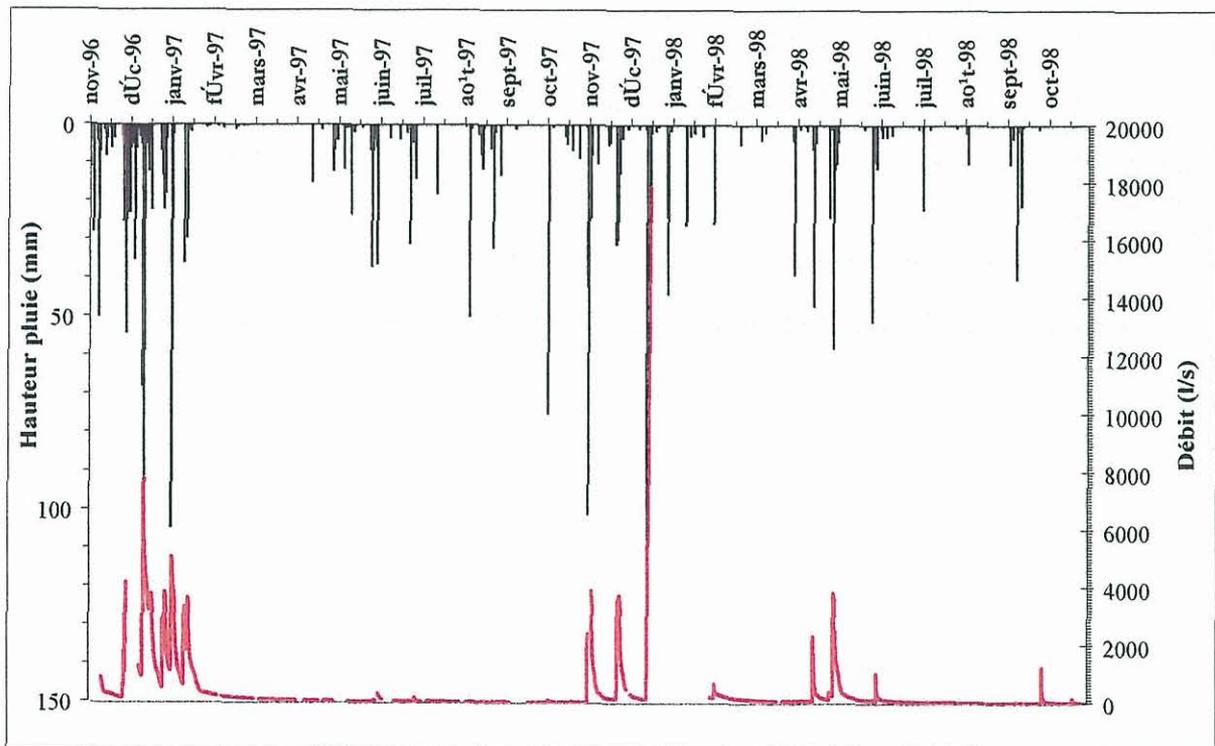


Fig. 6 : Débit à l'exutoire des Fontanilles et pluie à St-Martin-de-Londres.

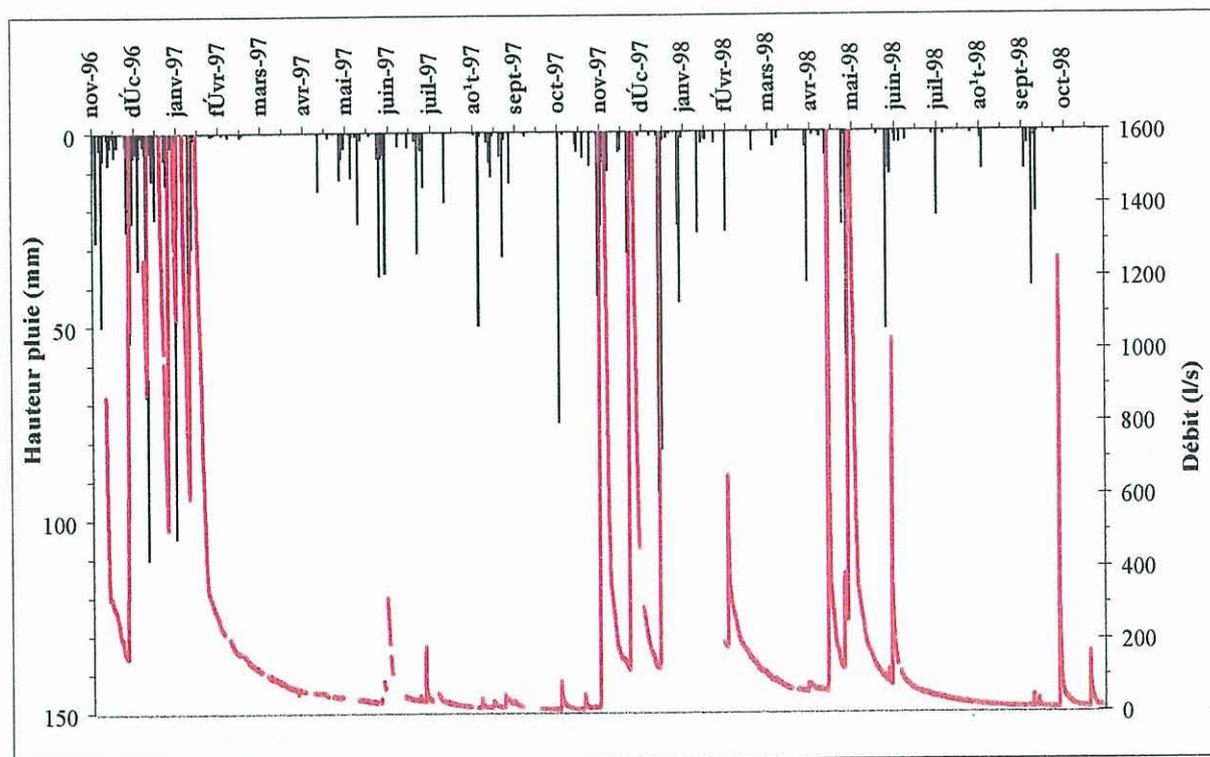


Fig. 7 : Débit à l'exutoire des Fontanilles et pluie à St-Martin-de-Londres (détail faibles débits).

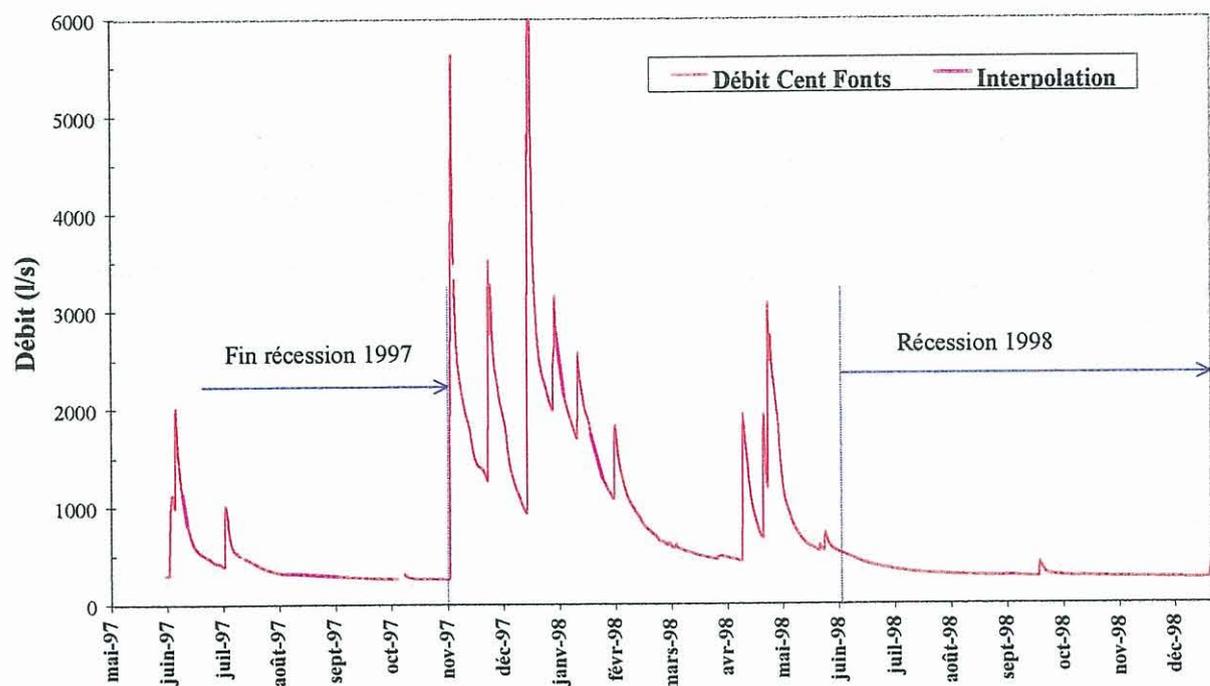


Fig. 8 : Débit à l'exutoire des Cent-Fonts : reconstitution linéaire des lacunes et récessions étudiées.

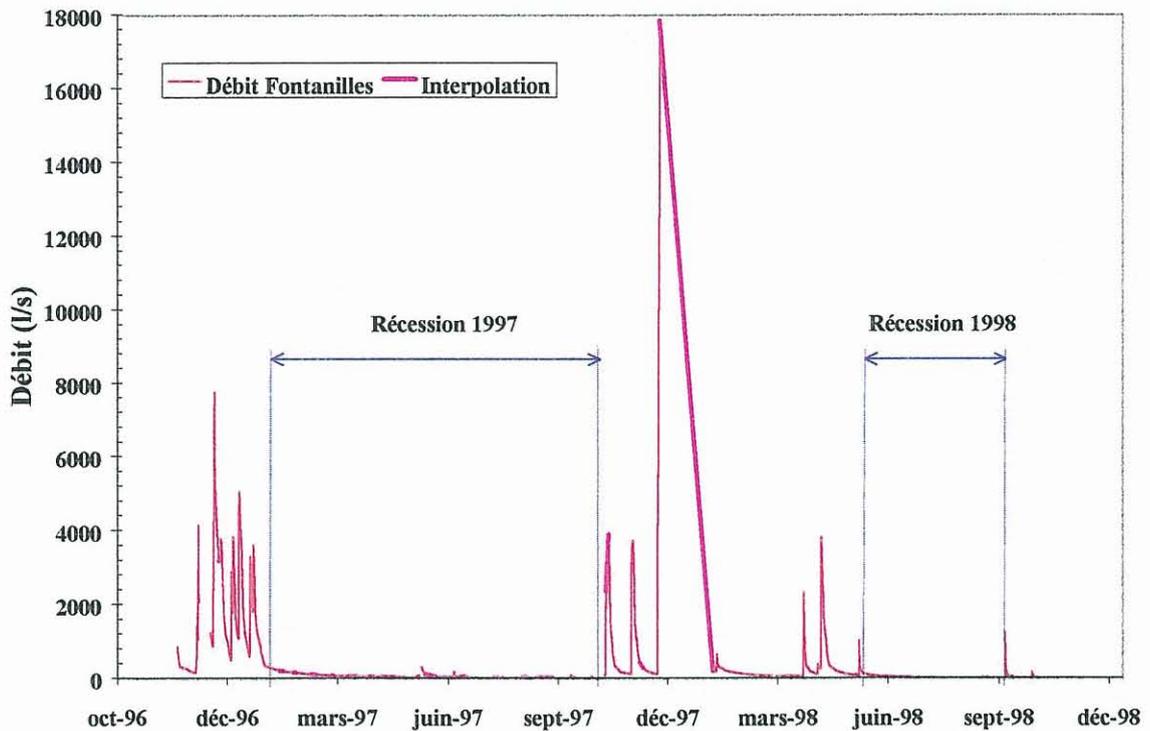


Fig. 9 : Débit à l'exutoire des Fontanilles : reconstitution linéaire des lacunes et récessions étudiées.

3.1.3. Conductivité électrique et température de l'eau

Aux Cent-Fonts, en raison des contraintes décrites dans le volume II (§ 3.1), l'acquisition en continu de la conductivité électrique de l'eau n'a pas été possible.

Aux Fontanilles, l'acquisition a fonctionné, mais le signal est très bruité. Les résultats sont présentés sur la figure 10.

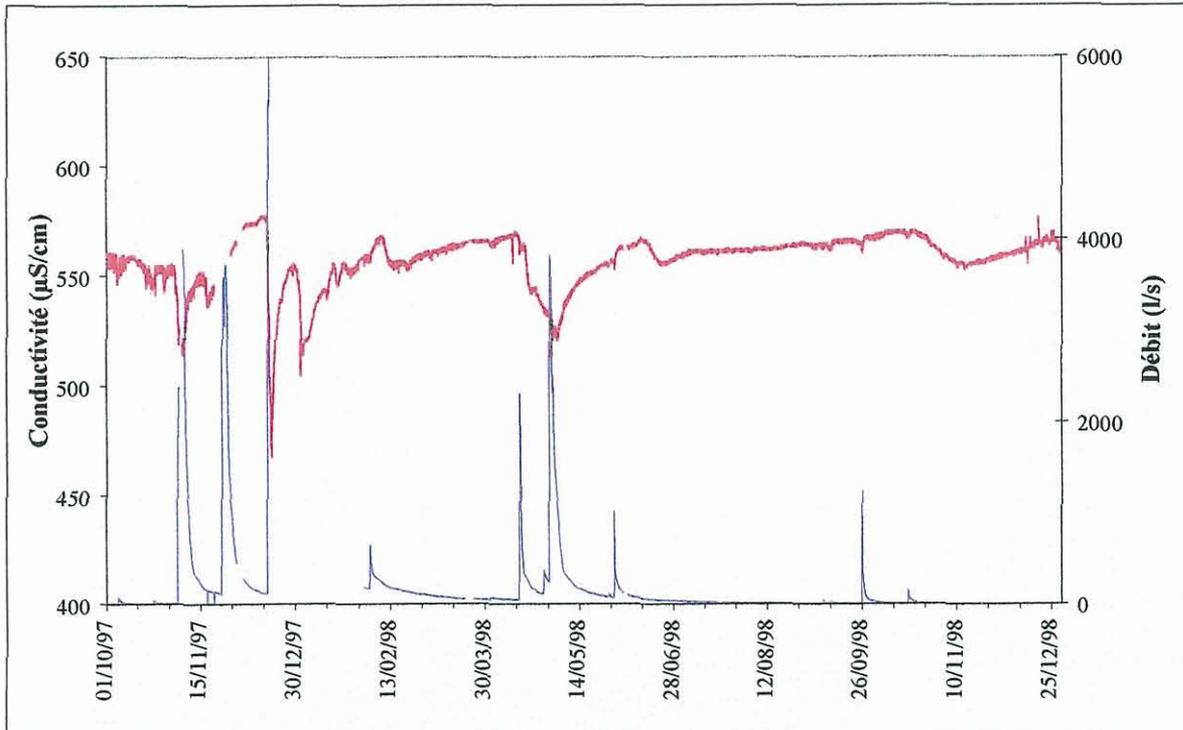


Fig. 10 : Conductivité électrique à l'exutoire des Fontanilles.

3.2. ANALYSE DES HYDROGRAMMES DE LA SOURCE DES FONTANILLES

3.2.1. Bilan hydrique et surface d'alimentation des Fontanilles

Les calculs des bilans hydrologiques ont été réalisés pour la période allant du 01/10/97 au 31/12/98, période que l'on assimile à un cycle hydrologique complet. Les volumes écoulés au cours des lacunes ont été estimés par interpolation linéaire (cf. fig. 9). Le volume écoulé à l'exutoire au cours de cette période est estimé à 11,9 millions de m³ (V), dont 3,7 millions de m³ ont été estimés.

La lame d'eau précipitée à la station de St-Martin-de-Londres entre le 01/10/97 et le 31/12/98 est de 1 417 mm (P).

Sur cette période, le total des pluies efficaces calculé à l'aide des données d'évapotranspiration réelle (ETR) de la station Météo de Fréjorgues est estimé à **811 mm** (équation 1), tandis que le déficit d'écoulement calculé par l'équation 3 est de 634 mm (cf. § 1.2), ce qui représente une lame d'eau infiltrée de **732 mm**. Selon ces données, la superficie du bassin d'alimentation calculée par les deux méthodes décrites précédemment (équation 2 et 4) serait respectivement de **14,6 km²** et **16,2 km²**.

La superficie du bassin d'alimentation du système des Fontanilles est de l'ordre de 15 km². Cette valeur est entachée d'une grande incertitude (+/- 5 km²) en raison des lacunes dans la chronique des débits. Le bassin d'alimentation du système des Fontanilles est reporté sur la figure 11.

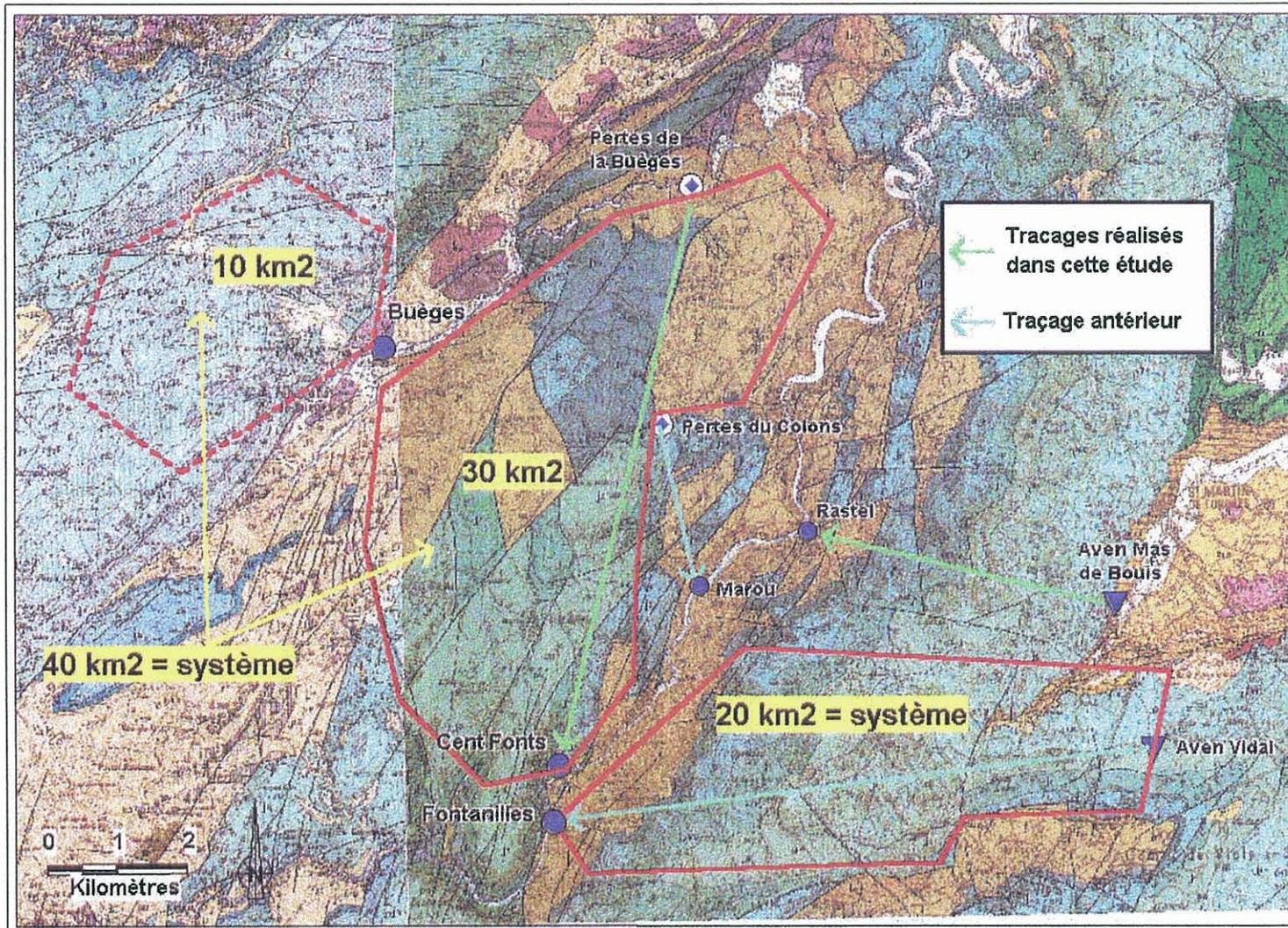


Fig. 11 : Délimitation des zones d'alimentation des systèmes aquifères des Cent-Fonts et des Fontanilles (le fond est la carte géologique au 1/50 000 de la région).

3.2.2. Analyse des débits classés des Fontanilles

Les ajustements réalisés sont présentés sur la figure 12 pour les débits inférieurs à $1 \text{ m}^3/\text{s}$, et sur la figure 13 pour les débits supérieurs à $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Seules les données enregistrées au cours du cycle hydrologique 1997-1998 ont été utilisées pour l'analyse des débits classés de la source des Fontanilles.

L'ajustement réalisé aux Fontanilles est de **type logarithmique**. Le traitement a été séparé en deux parties (0 à $1 \text{ m}^3/\text{s}$ et 1 à $3 \text{ m}^3/\text{s}$) afin de couvrir l'ensemble de la distribution avec un nombre de classes acceptable.

Les résultats obtenus sont les suivants : entre 0 et $1 \text{ m}^3/\text{s}$; on observe en basses eaux une première rupture de pente à 120 l/s , peu marquée. Ce type de rupture correspond généralement au piégeage d'une réserve lors de la décrue. Dans le cas présent, elle est peu marquée et donc peu significative.

Par la suite, on observe la présence de plusieurs ruptures de pentes successives ($0,87 \text{ m}^3/\text{s}$ sur le graphique 0 à $1 \text{ m}^3/\text{s}$ et $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ sur le graphique 1 à $3 \text{ m}^3/\text{s}$). Là encore, ces ruptures avec diminution de la vitesse de croissance des débits correspondent à la mise en fonction de trop-pleins dont les écoulements échappent à la station de jaugeage.

On retiendra comme point principal de cette analyse la présence de trop pleins de débordement, actifs en période de crue.

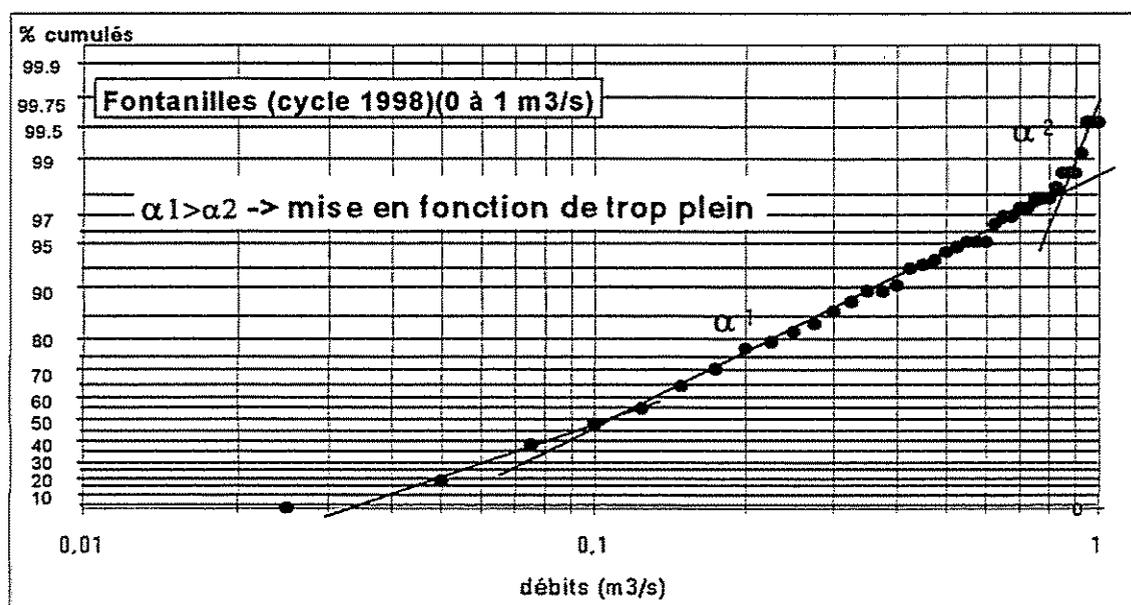


Fig. 12 : Débits classés de la source des Fontanilles pour les données du cycle 1998, (débits compris entre 0 et $1 \text{ m}^3/\text{s}$).

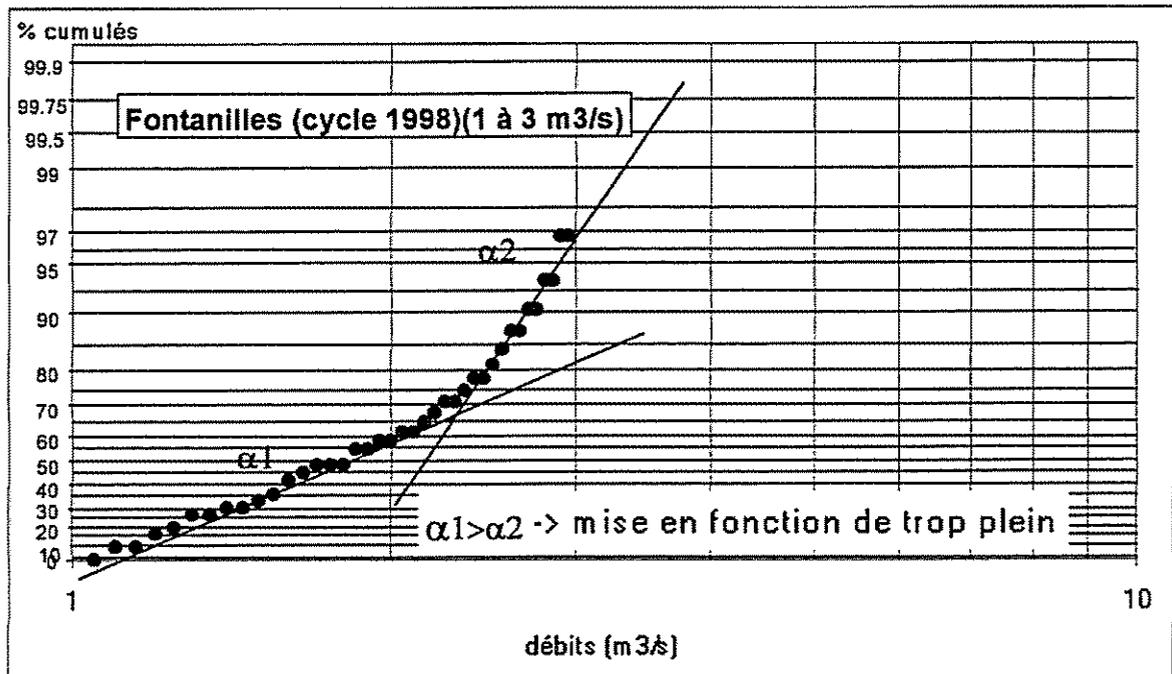


Fig. 13 : Débits classés de la source des Fontanilles pour les données du cycle 1998, (débits compris entre 1 et 3 m³/s).

3.2.3. Analyse des courbes de récession des Fontanilles

L'analyse a porté sur les récessions des cycles 1996/1997 et 1997/1998. Les récessions étudiées sont représentées sur les graphiques des chroniques de débit (fig. 9). Les ajustements obtenus sont reportés en annexe 2, figures 3 et 4. Les principaux résultats sont récapitulés dans le tableau 4.

Nom	Coefficient de tarissement α	Vitesse d'infiltration η	Hétérogénéité d'infiltration ε	Durée de l'infiltration $Ti (j)$	Volume dynamique $Vd (Mm^3)$
Fontanilles 1997	0,0147	0,0147	0,965	68	0,42
Fontanilles 1998	0,0243	0,0435	1,65	23	0,17

Tabl. 4 : Paramètres de la récession aux Fontanilles.

Interprétation

En premier lieu, il faut signaler que les ajustements réalisés sur les courbes de décrue sont d'assez mauvaise qualité en raison de l'écrêtement des débits de crues par les trop-pleins mis en évidence à partir de l'analyse des débits classés. Toutefois, la tendance générale de chaque courbe est relativement bien perçue.

Concernant les modalités d'infiltration des eaux, on montre que la vitesse d'infiltration du système des Fontanilles est un peu plus élevée que celle des Cent-Fonts, mais c'est surtout l'hétérogénéité de l'écoulement plus élevée qui signale une part plus importante de l'infiltration rapide.

Concernant les tarissements, on montre que les coefficients de tarissement sont faibles, caractéristiques de systèmes mal drainés. Ce mauvais drainage ne profite pas à l'accumulation de réserves puisque les volumes dynamiques sont peu importants (< à 0,5 millions de m³). L'ensemble de ces éléments caractérise un système mal drainé et possédant une zone noyée peu importante.

3.2.4. Analyses corrélatrice et spectrale des Fontanilles

Les figures se rapportant à ce paragraphe sont en annexe 4.

Analyse simple des chroniques de débit

Le système des Fontanilles présente une fréquence de coupure moyennement haute ($0,16 \text{ j}^{-1}$) ce qui indique que les événements pluvieux de courte durée (< 3 jours) n'ont pas une influence significative sur les débits à l'exutoire. L'influence d'un événement pluvieux donné sur le débit à l'exutoire se fait sentir pendant 32 jours (effet mémoire), ce qui indique que le système possède une inertie importante. Le temps de régulation du système est d'environ 31 jours.

Analyse croisée pluie-débit

La réponse aux événements pluvieux est de deux types : tout d'abord une réponse rapide et marquée sur une période de 2-3 jours puis une réponse amortie et plus lente qui s'étale sur 30-40 jours environ. Le déphasage entre l'entrée (pluie) et la sortie (débit) pour la fréquence de coupure de ($0,16 \text{ j}^{-1}$) est de 1,2 jours.

La fonction de cohérence présente des valeurs moyennes élevées (de l'ordre de 0,8-0,9), relativement stables pour les fréquences inférieures à la fréquence de coupure ($f_c = 0,16 \text{ j}^{-1}$) ce qui indique (1) que le système est bien drainé ; (2) que le système réagit globalement de la même façon à chaque impulsion de pluie.

La fonction de gain montre une forte amplification (> 1) pour les très basses fréquences ($f < 0,025 \text{ j}^{-1}$) et une atténuation significative (0,3-0,4) à moyen terme (fréquence comprise entre 0,1 et la fréquence de coupure $f_c = 0,16 \text{ j}^{-1}$) ce qui indique (1) que la variabilité intra-annuelle des précipitations est amplifiée par le système en période d'étiage et en période de crue, (2) que les événements de courte durée influent peu sur les débits du système.

3.3. ANALYSE DES HYDROGRAMMES DE LA SOURCE DES CENTS-FONTS

3.3.1. Bilan hydrique et surface d'alimentation des Cent-Fonts

Les calculs des bilans hydrologiques ont été réalisés pour la période allant du 01/10/97 au 31/12/98, période que l'on assimile à un cycle hydrologique complet. Les volumes écoulés au cours des lacunes ont été estimés par interpolation linéaire. Le volume (V) écoulé à l'exutoire au cours de cette période est évalué à 31,8 millions de m³, dont 1,5 millions de m³ ont été estimés.

La lame d'eau précipitée à la station de Saint-Martin-de-Londres entre le 01/10/97 et le 31/12/98 est de 1 417 mm (P).

Sur cette période, le total des pluies efficaces calculé à l'aide des données d'évapotranspiration réelle (ETR) de la station Météo de Fréjorgues est estimé à 811 mm (équation 1 du § 1.2.), tandis que le déficit d'écoulement calculé par l'équation 3 est de 634 mm, ce qui représente une lame d'eau infiltrée de 783 mm. Selon ces données, la superficie du bassin d'alimentation calculée par ces deux méthodes (équation 2 et 4) est respectivement de 39,2 km² et 40,6 km².

La superficie du bassin d'alimentation du système des Cent-Fonts est de l'ordre de 40 km² (cf. fig. 11). Compte tenu d'une part du contexte hydrogéologique, et d'autre part des résultats d'anciens essais de traçage, on montre que le bassin d'alimentation sur le Causse de la Selle est probablement de l'ordre de 30 km². Pour expliquer les 40 km² estimés à partir du calcul du bilan hydrologique, il faut donc faire intervenir une surface supplémentaire de l'ordre de 10 km². Ce volume d'eau supplémentaire pris en compte dans le calcul est à attribuer aux pertes de la Buèges.

3.3.2. Analyse des débits classés des Cent-Fonts

L'ajustement réalisé est présenté sur la figure 9. Seules les données enregistrées au cours du cycle hydrologique 1997-1998 ont été utilisées pour l'analyse des débits classés de la source des Fontanilles (cf. § 3.3.2.). L'ajustement réalisé aux Cent-Fonts est de type arithmétique.

L'ajustement obtenu est de bonne qualité. On observe deux ruptures de pentes successives en hautes eaux (1,85 et 2,3 m³/s) avec une augmentation de la pente traduisant une diminution de la vitesse de croissance des débits. Ceci traduit la mise en fonction de trop-plein échappant à la station de jaugeage. En basses eaux, on remarque une nette rupture de pente (< 0,65 m³/s) qui correspond à un soutien du débit. Ce débit de soutien est à mettre en relation avec les pertes pérennes de la Buèges qui continuent à alimenter le système en étiage.

On retiendra comme points principaux de cette analyse :

- la présence de trop pleins de débordement sur le système.
- Le soutien en étiage du système des Cent-Fonts par les pertes de la Buèges.

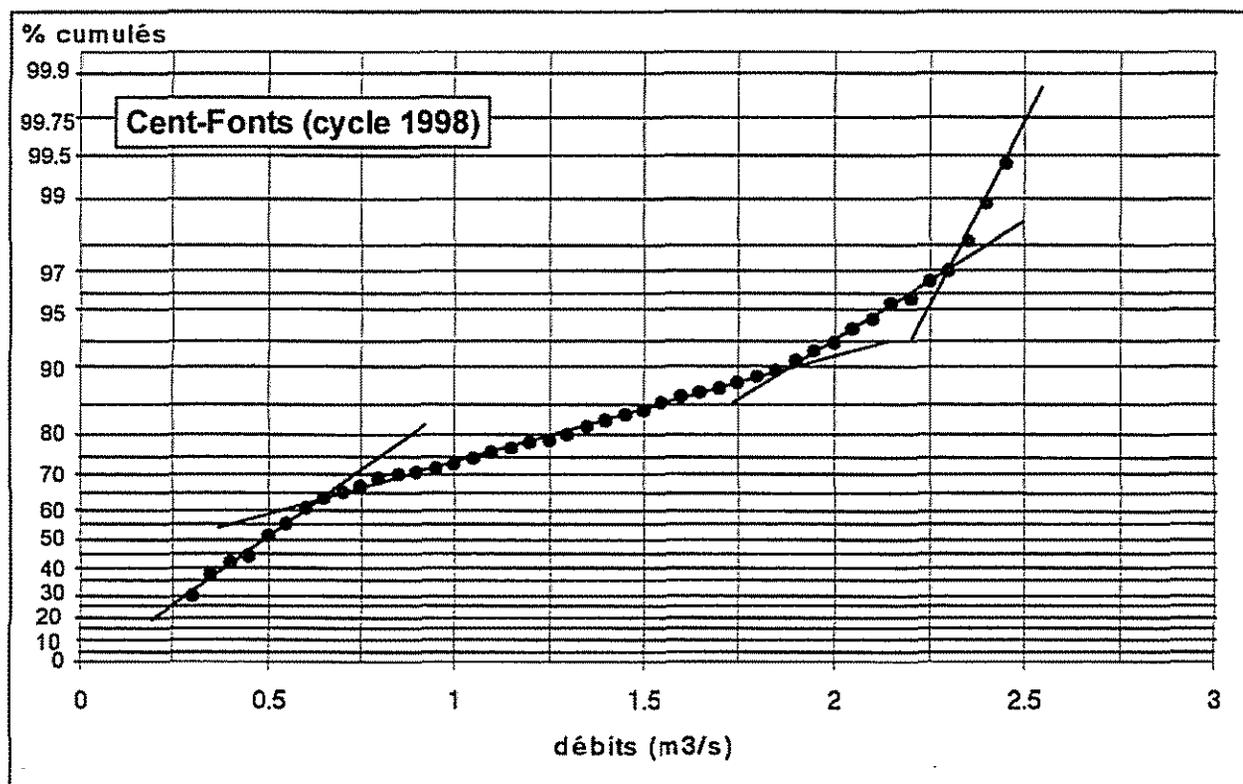


Fig. 12 : Débits classés de la source des Cent-Fonts pour les données du cycle 1998

3.3.3. Analyse des courbes de récession des Cent-Fonts

L'analyse a porté sur les récessions des cycles 1996/1997 et 1997/1998. Les récessions étudiées sont représentées sur le graphique de chronique de débit (fig. 9). Les ajustements obtenus sont reportés en annexe 2, figures 1 et 2. Les principaux résultats sont récapitulés dans le tableau 3.

Nom	Coefficient de tarissement α	Vitesse d'infiltration η	Hétérogénéité d'infiltration ε	Durée de l'infiltration T_i (j)	Volume dynamique V_d (Mm³)
Cent-Fonts 1997	0,0035	0,0175	0,624	57	8,1
Cent-Fonts 1998	0,0009	0,0084	0,263	119	28,2

Tabl. 3 : Paramètres de la récession aux Cent-Fonts.

Interprétation

En premier lieu il faut signaler que les ajustements réalisés sur les courbes de décrue sont d'assez mauvaise qualité, ce qui est dû en grande partie à l'écrêtement des débits de crues par les trop-pleins identifiés par les débits classés. Toutefois, la tendance générale de chaque courbe est relativement bien perçue.

- Concernant les modalités d'infiltration des eaux, on montre que la vitesse de l'infiltration est lente pour les deux cycles, avec une faible hétérogénéité d'écoulement, l'infiltration lente primant sur l'infiltration rapide. Ceci est confirmé par la durée de l'infiltration qui est très importante (57 à 119 j). Deux caractéristiques de fonctionnement du système expliquent cette dominance de l'infiltration lente :
 - l'effet de l'alimentation du système par les pertes de la Buèges qui soutient la phase de décrue ;
 - l'existence probable d'une **zone épikarstique importante**, qui diffère l'infiltration dans le temps.
- Concernant les tarissements, les principaux résultats sont : les coefficients de tarissement sont très faibles et les volumes dynamiques sont importants (compris entre 8 et 28 millions de m³). Là encore, il faut tenir compte de l'influence des pertes de la Buèges (soutien des débits à l'étiage) qui induit une surestimation du volume dynamique. Ainsi, la valeur de 28 millions de m³ est aberrante comme le montre la comparaison avec le volume moyen ayant circulé dans le système en 1998 et qui était de 31,1 millions de m³. La valeur de 8 millions de m³ paraît plus réaliste et fournit a priori un ordre de grandeur du volume des réserves.

3.3.4 Analyses corrélatoire et spectrale des Cent-Fonts

Les figures se rapportant à ce paragraphe sont en annexe 3.

Analyse simple de la chronique des débits.

De manière similaire au système des Fontanilles, le système des Cent-Fonts présente une fréquence de coupure moyennement haute ($0,155 \text{ j}^{-1}$) ce qui indique que les événements pluvieux de courte durée ($< 3 \text{ j}$) n'ont pas une influence significative sur les débits à l'exutoire. L'influence d'un événement pluvieux donné sur le débit à l'exutoire se fait sentir pendant 50 jours (effet mémoire), ce qui indique que le système des Cent-Fonts présente une inertie plus importante que celui des Fontanilles (32 jours). Le temps de régulation du système est d'environ 44 jours contre 32 jours pour les Fontanilles. L'importance du temps de régulation et de l'effet mémoire du système par rapport au Fontanilles est probablement à attribuer à la présence des pertes de la Buèges en amont du système, qui soutient le régime d'écoulement de la source des Cent-Fonts.

Analyse croisée (pluie - débit)

Le corrélogramme croisé montre une réponse de type composite, avec une réponse rapide marquée sur 2 à 3 jours, puis un amortissement de la réponse sur 30 à 40 jours. L'amortissement est assez rapide si l'on compare les résultats avec ceux des Fontanilles. Le déphasage entre l'entrée (pluie) et la sortie (débit) pour la fréquence de coupure de ($0,155 \text{ j}^{-1}$) est de 1,3 jours.

De manière similaire au Fontanilles, la fonction de cohérence du système des Cent-Fonts présente des valeurs moyennes élevées (0,8-0,9), globalement stables pour les fréquences inférieurs à la fréquence de coupure ($f_c = 0,155 \text{ j}^{-1}$), ce qui indique également que le système est dans son ensemble bien drainé, et qu'il réagit sensiblement de la même manière aux précipitations quelle que soit leur importance.

La fonction de gain montre une forte amplification (>1) pour les très basses fréquences ($f < 0,0175 \text{ j}^{-1}$) et une atténuation significative (0,5 – 0,6) à moyen terme (fréquence comprise entre 0,1 et la fréquence de coupure $f_c = 0,16 \text{ j}^{-1}$) ce qui indique (1) que la variabilité intra annuelle des précipitations est amplifiée par le système en période d'étiage et en période de crue, (2) que l'atténuation du signal à moyen terme peut s'interpréter comme une mise en réserve des événements pluvieux de courte durée et leur restitution lors du cycle annuel.

3.4. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS QUANTITATIFS

Les principaux résultats quantitatifs obtenus sont récapitulés dans le tableau 5.

Nom	Effet mémoire	Temps de régulation	Fréquence de coupure
Cent-Fonts	50,3	43,7	0,155
Fontanilles	32,4	30,9	0,16

Tabl. 5 : Principaux paramètres des analyses corrélatrice et spectrale.

L'analyse simple met en évidence une dualité de comportement des deux systèmes étudiés, avec d'une part une forte inertie (effet mémoire), et d'autre part la présence de réponses à des événements pluvieux de courte durée (fréquence de coupure moyenne).

L'analyse croisée confirme cette caractéristique. Pour les deux systèmes, la réponse à une pluie s'effectue d'abord par un pic bien marqué sur le corrélogramme croisé traduisant l'existence d'un comportement transmissif. Par la suite, la seconde partie de la réponse traduit un comportement inertiel du karst noyé avec lente décroissance du corrélogramme croisé sur 30 jours (Fontanilles) à 40 jours (Cent-Fonts).

4. Conclusion et classification

L'ensemble des traitements effectués met en évidence un double comportement des systèmes étudiés, avec une réponse transmissive suivie d'une réponse traduisant plus un système capacitif.

Ce double comportement est à mettre en relation avec la genèse de ces systèmes : celle-ci est liée à l'enfoncement récent de l'Hérault qui en constitue le niveau de base commun aux deux systèmes. Il existe dans la partie supérieure du karst noyé un bon développement de la karstification (fonction transmissive) qui se traduit par la présence de niveaux d'émergences supérieurs (trop-pleins). Après l'enfoncement du niveau de base, ces niveaux ont été en partie délaissés et la zone noyée s'est développée plus en profondeur sous ces niveaux. La karstification de cette partie est plus récente et donc moins développée, ce qui explique l'aspect capacitif que donne cette partie du karst noyé à la réponse du système. Cette structure explique la difficulté des émergences actuelles à évacuer les débits de crue.

On observe en outre sur la courbe des débits classés des Fontanilles, une faible rupture de pente qui peut être attribuée à un piégeage de réserves en basses eaux. Ceci est cohérent avec la structure présumée du système. Lors de la décrue, il est probable qu'une partie des réseaux supérieurs de la zone noyée piègent une certaine masse d'eau sous la forme de réservoirs perchés. L'ampleur de ce phénomène paraît cependant peu importante.

A ce double comportement, commun aux deux systèmes qui ont le même niveau de base, s'ajoute des différences significatives :

1. Le système des Fontanilles possède de faibles réserves, alimentées de manière homogène sur tout le bassin d'alimentation par une zone d'infiltration où domine l'infiltration rapide. Il s'agit d'un système unaire pour lequel il n'y a pas de concentration d'écoulement de surface en des points privilégiés.
2. En revanche, le système des Cent-Fonts possède des réserves significatives, de l'ordre de plusieurs millions de m³. Ce chiffre ne peut être précisé, car l'alimentation du système par les pertes de la Buèges induit une surestimation de l'évaluation des réserves. Il se caractérise également par une infiltration plus lente des eaux de pluie (action de l'aquifère épikarstique qui diffère l'infiltration dans le temps ?).

Ces éléments expliquent le positionnement des deux systèmes dans la classification issue de l'analyse des courbes de récession (fig. 15). Le système des Fontanilles possède un faible pouvoir régulateur (peu d'accumulation de réserves). En revanche, le système des Cent-Fonts possède un pouvoir régulateur notable (la position du système est soulignée par des flèches pour figurer l'incertitude existant sur la détermination du volume des réserves et de la fonction d'infiltration en raison de l'alimentation par les pertes de la Buèges) et avec des retards à l'infiltration dus en partie au soutien de la décrue par la Buèges.

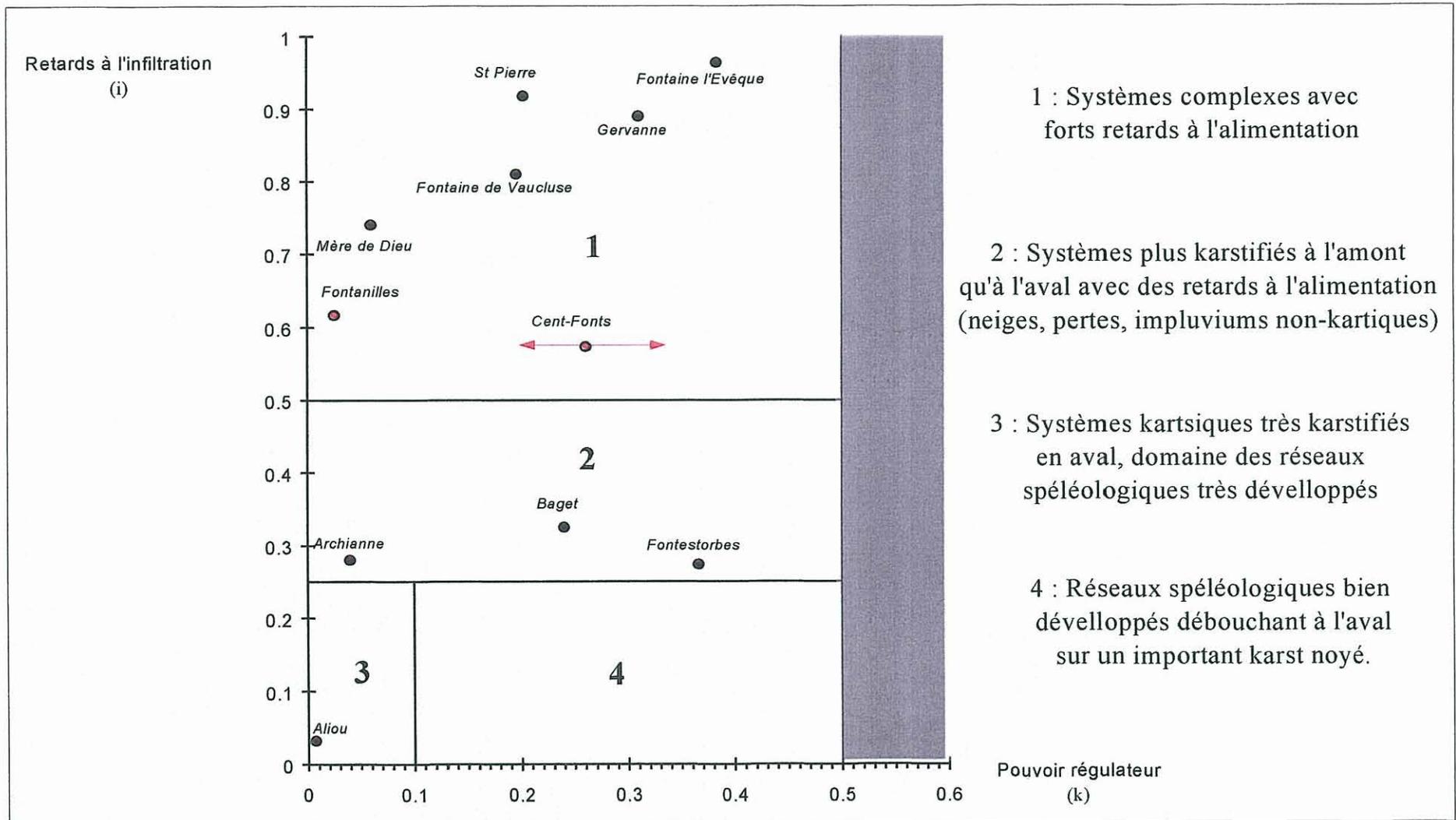


Fig. 15 : Classification des systèmes aquifères des Cent-Fonts et des Fontanilles dans le référentiel de Mangin (1975).

5. Remarques générales

5.1. MÉTHODOLOGIE

En premier lieu, il faut souligner que malgré le nombre important de lacunes de mesures sur les débits, liées aux difficultés d'équipement de tels exutoires (milieu naturel sans possibilité d'alimentation électrique, nombreux griffons et exutoires, crues violentes empêchant la maintenance en période de hautes eaux), les traitements sont peu perturbés et les données analysées débouchent sur une caractérisation suffisamment fiable du comportement de ces systèmes.

Ainsi, les traitements employés confirment les points suivants, cohérents avec la connaissance de la géométrie des deux systèmes : le système des Fontanilles, de plus faible extension apparaît comme possédant peu de réserves alors que celui des Cent-Fonts apparaît potentiellement plus intéressant.

Il demeure toutefois un problème méthodologique sur le système des Cent-Fonts compte tenu des apports par les pertes de la Buèges. En effet, le fonctionnement pérenne de ces pertes lors des phases de décrue et de tarissement induit un comportement influencé de la zone noyée du karst que les méthodes de traitement actuelles ne permettent pas de prendre en compte. Il apparaît que les méthodes ne sont pas capables de faire la part, dans l'analyse des courbes de récession, de l'influence de ces pertes tant sur l'allure de la fonction d'infiltration que sur le calcul du volume dynamique. Il en résulte une incertitude sur l'importance des réserves de ce système et sur le rôle de l'infiltration.

5.2. SIMILARITÉ ET DIFFÉRENCES DANS LE COMPORTEMENT DES DEUX SYSTÈMES

L'un des principaux résultats obtenus concerne la similarité générale de comportement de ces deux systèmes (hydrogramme unitaire similaire). En première analyse, la simple comparaison des débits d'étiage aurait pu laisser supposer que les deux systèmes possédaient des comportements différents.

Ceci est lié principalement à la mise en place de la karstification sur ces deux systèmes. La karstification d'un massif calcaire est en effet conditionnée par l'existence de plusieurs paramètres (dont l'existence et l'importance définissent le potentiel de karstification). L'une des principales est la position du niveau de base.

Dans le cas présent, les deux systèmes partagent un niveau de base commun représenté par l'Hérault. Il en résulte que lors d'une modification du potentiel de karstification due dans le cas présent à l'enfoncement du niveau de base, les deux systèmes ont subi sensiblement les mêmes modifications :

- abandon partiel des niveaux supérieurs karstifiés de la zone noyée,
- développement à l'aval d'une zone noyée peu karstifiée, drainée par de nombreux petits exutoires en bordure de l'Hérault.

Concernant les points différenciant ces deux systèmes, ils sont à mettre en relation avec le type de système :

- le système des Fontanilles est un **système unaire**, alimenté uniquement par les précipitations sur son impluvium, avec une infiltration relativement rapide,
- le système des Cents Fonts est un **système binaire**, alimenté en partie par les pertes de la Buèges, avec une infiltration relativement lente.

Cette différence peut expliquer que l'infiltration apparaisse plus rapide sur les Fontanilles que sur les Cent-Fonts. En effet, pour les Cent-Fonts, l'existence d'une perte concentrant les apports en un point a probablement conduit la karstification à privilégier le développement du réseau lié à cette perte, alors que pour les Fontanilles le potentiel de karstification a plutôt été consacré au développement de l'infiltration en zone non saturée.

L'existence d'une perte pérenne peut expliquer l'importance des réserves observées sur les Cent-Fonts. Outre le problème méthodologique et le volume d'eau apporté par la perte, l'existence d'une perte conduit généralement à un développement plus important du karst noyé. Dans le cas présent, ceci est faiblement perceptible. La figure 16 présente la comparaison des deux corrélogrammes croisés. On constate que celui des Cent-Fonts est légèrement plus marqué et accusé, ce qui montre une fonction transmissive, assimilable à la partie bien karstifiés du karst noyé, plus développée.

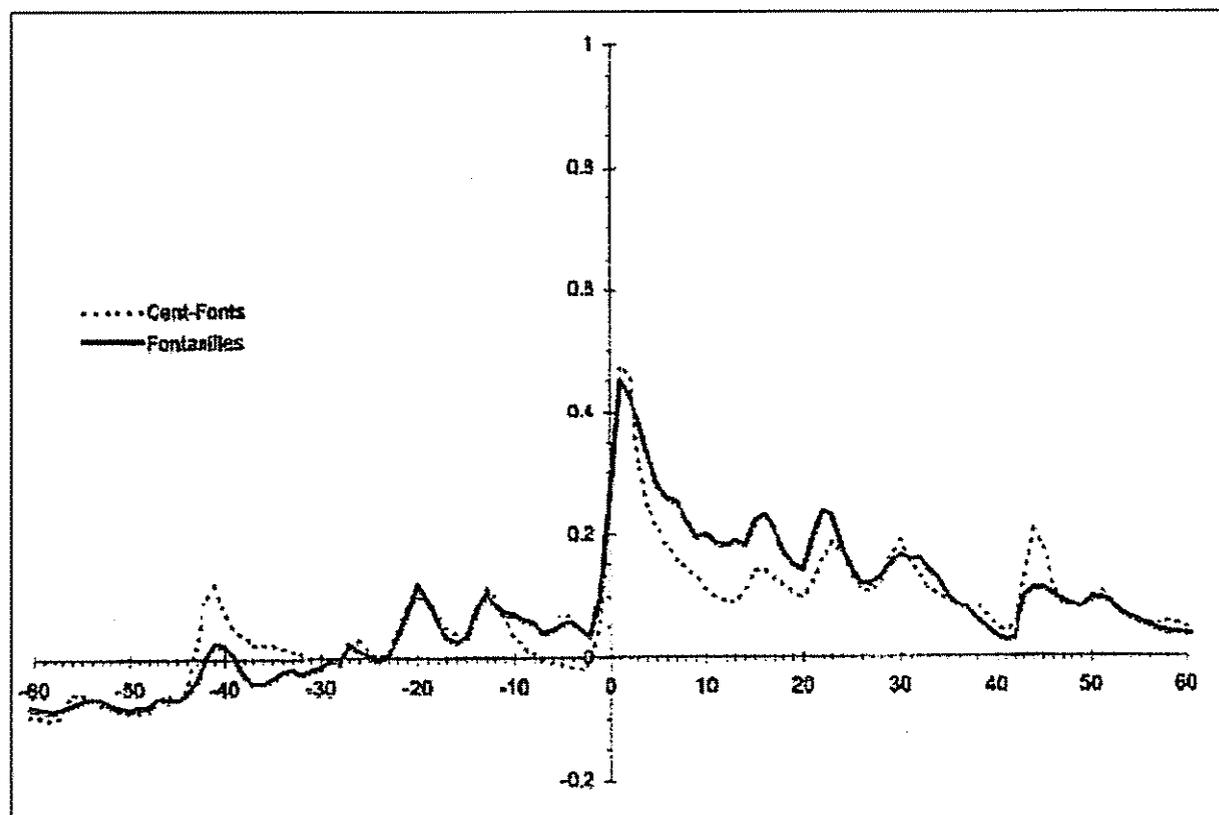


Fig. 16 : Comparaison des corrélogrammes croisés des Fontanilles et des Cent-Fonts.

Il en résulte qu'avec la variation récente du niveau de base et le développement d'une zone moins bien karstifiée à l'exutoire, le volume d'eau accumulé dans le karst noyé plus en amont est supérieur, de part la présence de vides de taille globalement plus importante, et de part une alimentation continue par les pertes.

Annexe 1

Tableaux de données sur les traçages artificiels

Tableau A1-1 : Inventaire des traçages antérieurs à l'étude, réalisés sur l'ensemble karstique constitué par le Sud du Larzac, la montagne de la Séranne et la moyenne vallée de l'Hérault.

TRAC AGES	SITES D'INJECTION						SITES DE RESTITUTION								DONNEES TECHNIQUES						
	N° d'inventaire	Date	Dénomination	Commune	Coordonnées		Z (m)	Débit		Date	Dénomination	Commune	Coordonnées		Z (m)	Débit (l/s)	Trace ur (kg)	Mode de détection	Distance rectiligne (m)	Temps (h)	Vitesse (m/h)
					X	Y		(l/s)	(l/s)				X	Y							
1	04/09/19 49	Grotte de Clamouse	St-Jean-de-Fos	698.0 3	157.3 6	75	50	05/09/19 49	Source de Clamouse	St-Jean-de-Fos	698.0 3	157.3 6	63	50	1	Directe	700	17	41		
2	26/10/19 49	Trou du Drac	Montpeyroux	695.5 8	155.9	110		31/10/19 49	Source du Cabrier	St-Jean-de-Fos	698.0 3	157.3 6	63	50	6	Directe	2850	120	24		
3	24/06/19 50	Grotte du Sergent	St-Guilhem- le-Désert	698.2 2	162.0 8	190		27/06/19 50	Source du Roulet	St-Guilhem-le- Désert	698.6 2	161.1 2	60		5	Directe	3100	72	43		
						160		28/06/19 50	Source du Cabrier	St-Guilhem-le- Désert	698.6 5	161.2 4	75			Directe	3000	96	31		
								28/06/19 50	Source du barrage	St-Guilhem-le- Désert	698.7 2	161.1 6	65			Directe					
4	1952	Perte du Verdus	St-Guilhem-le- Désert	697.4 4	160.3 9	110	10	1952	Foux de St Guilhem	St-Guilhem-le- Désert	697.6 5	160.0 5	100	10	2	Directe	400	96	4		
5	25/05/19 52	Perte du Rieutord	Sumène	710.7 4	187.2 8	185	500	25/05/19 52	Trou de l'Olivier	Moulès-et-Baucels	712.1 3	184.4 8	136	1000	25	Directe	2500	5	500		
6	25/05/19 52	Trou de l'Olivier	Moulès-et-Baucels	712.1 3	184.4 8	266	1000	30/05/19 52	Les Sourcettes	Laroque	712.1 7	180.5 5	131	1000	15	Directe	3500	120	29		
						136		07/06/19 52	Source du Châtaigniers	Agonès	712.3 5	179.8 1	127			Directe	4300	312	14		
7	29/08/19 54	Trou de l'Olivier	Moulès-et-Baucels	712.1 3	184.4 8	266	50	20/09/19 54	Les Sourcettes	Laroque	712.1 7	180.5 5	131	100	7	Directe	3500	528	7		
						136															
8	26/06/19 55	Perte de la Buèges	St-André-de- Buèges	705.9 2	171.2	125	200	30/06/19 55	Cent-Fonts	Causse-de-la- Celle	703.7 2	163	77	500	12	Directe	8200	245	33		
9	06/01/19 63	Aven sud Vaquerie	La Vacquerie	690.6	165.7 1	644	0.03	10/01/19 63	Source de Clamouse	St-Jean-de-Fos	698.0 3	157.3 6	63	2000	6	Directe	11600	96	120		
10	27/01/19 64	Grotte de Clamouse	St-Jean-de-Fos	698.0 3	157.3 6	75	0.03	27/01/19 64	Source de Clamouse	St-Jean-de-Fos	698.0 3	157.3 6	63	1000	0.2	FCPT	225	7.5	30		
11	12/06/19 64	Perte d'Aigues Vives	MontPeyroux	695.5 1	155.9 4	110	3	14/06/19 64	Source de Clamouse	St-Jean-de-Fos	698.0 3	157.3 6	63	1000	1	Directe + FCPT	2850	56	51		
12	31/01/19 65	Perte Mas de Tourreau	St-Guilhem-le- Désert	695.7 1	162.4 2	415			Source du Verdus	St-Guilhem-le- Désert	696.3 5	160.5 7	140		3	Directe					
13	27/06/19 65	Perte de l'Hérault	Laroque	712.5 3	180.2 3	130	30	06/07/19 65	Source du Châtaigniers	Agonès	712.3 5	179.8 1	127			Directe	480	216	2		
14	11/11/19 65	Aven Mas d'Agre	St-Guilhem-le- Désert	699.0 8	165.9 2	450	5		Source du Cabrier	St-Guilhem-le- Désert	698.6 5	161.2 4	80	50			4600	432	11		

Tableau A1-1 (suite) : Inventaire des traçages antérieurs à l'étude, réalisés sur l'ensemble karstique constitué par le Sud du Larzac, la montagne de la Séranne et la moyenne vallée de l'Hérault.

TRACAGES		SITES D'INJECTION						SITES DE RESTITUTION						DONNEES TECHNIQUES					
N°				Coordonnées		Z	Débit				Coordonnées		Z	Débit	Traceur	Mode de	Distance	Temps	Vitesse
d'inventaire	Date	Dénomination	Commune	X	Y	(m)	(l/s)	Date	Dénomination	Commune	X	Y	(m)	(l/s)	(kg)	détection	rectiligne (m)	(h)	(m/h)
15	14/04/1966	Perte du Colons	Causse-de-la-Celle	704.83	167.75	300	2		Source de Marrou	Causse-de-la-Celle	705.53	165.7	95				2100	480	4
16	12/11/1968	Aven de Vitalis	La Vacquerie	689.48	165.11	750	3		Source du Cabrier	St-Guilhem-le-Désert	698.03	157.36	63	500			12500	360	27
17	16/03/1969	Aven 1 de Besses	St-Maurice-de-Navacelles	691.07	171.98	665	2	23/03/1969	Source du Goumeyras	St-Maurice-de-Navacelles	695.62	173.95	245		10	FCPT	4950	160	31
18	01/05/1969	Grotte de l'Ours	St-Jean-de-Buèges	702.22	171.39		0.1		Foux de St-Jean (Garel)	St-Jean-de-Buèges	702.93	171.27	170	300	0.3		700	80	9
19	02/11/1969	Aven Combe du Buis	Causse-de-la-Celle	700.45	163.08	210		14/11/1969	Tunnel sous la route	Causse-de-la-Celle	701.24	161.92	75	800	5		1400	288	5
						82			Source du Serpent	St-Guilhem-le-Désert	700	161.85	70				1350	288	5
20	13/02/1972	Aven de la valise	La Vacquerie	691.91	163.86	660	5	20/02/1972	Source de Clamouse	St-Jean-de-Fos	698.03	157.36	63	1000	5	Directe	7000	168	42
21	02/07/1972	Aven du Fonctionnaire	La Vacquerie	691.05	167.92	606	1	10/07/1972	Source de Clamouse	St-Jean-de-Fos	698.03	157.36	63	1000	5	FCPT	13000	168	75
22	04/03/1973	Aven du Pioch	St-Maurice-de-Navacelles	697	168.95	589	0.03	21/03/1973	Source de la Buèges	Pegairolles-de-Buèges	700.9	168.92	170	250	5	Directe	4200	415	10
23	10/03/1974	Aven de Fouillac	St-Jean-de-Buèges	700.18	171.08	600		21/03/1974	Foux de St-Jean (Garel)	St-Jean-de-Buèges	702.93	171.27	170		2		2900	336	9
24	1975	Aven du Couchant	La Vacquerie	695.43	166.74	605			Source de la Buèges	Pegairolles-de-Buèges	700.9	168.92	170			Directe	5900	456	13
25	1975	Aven Mas de Gay	St-Maurice-de-Navacelles	696.21	169.88	555			Source de la Buèges	Pegairolles-de-Buèges	700.9	168.92	170		3		4700	55	85
26	26/12/1975	Trou de l'Olivier	Moulès-et-Baucels	712.13	184.48	266		30/12/1975	Les Sourcettes	Laroque	712.17	180.55	131		15	Directe	3500	96	36
						136													

Tableau AI-1 (suite) : Inventaire des traçages antérieurs à l'étude, réalisés sur l'ensemble karstique constitué par le Sud du Larzac, la montagne de la Séranne et la moyenne vallée de l'Hérault.

TRACAGES		SITES D'INJECTION					SITES DE RESTITUTION							DONNEES TECHNIQUES						
N°				Coordonnées		Z	Débit					Coordonnées		Z	Débit	Traceur	Mode de	Distance	Temps	Vitesse
d'inventaire	Date	Dénomination	Commune	X	Y	(m)	(l/s)	Date	Dénomination	Commune	X	Y	(m)	(l/s)	(kg)	détection	rectiligne (m)	(h)	(m/h)	
27	1976	Grotte du Grenouillet	Gornies	700.7	173.91	330			Foux de Brissac	Brissac	709.57	176.43	135				9000	816	11	
						244														
28	07/10/1977	Aven du Grelot	Pegairolles-de-Buèges	699.73	168.48	440			Source de la Buèges	Pegairolles-de-Buèges	700.9	168.92	170				1300	96	14	
						330														
29	10/10/1980	Trou du Drac	Montpeyroux	695.58	155.9	110		14/10/1980	Source de Clamouse	St-Jean-de-Fos	698.03	157.36	63			Directe	2850	108	26	
30	02/04/1981	Aven des Huttes	St-Maurice-de-Navacelles	693.41	169.51	680		04/04/1981	Source de Goumeyrou	St-Maurice-de-Navacelles	695.6	173.87	243			Directe	4850	53	92	
						430														
31	1983	Aven de Laicasse	St-Maurice-de-Navacelles	698.37	169.46	610		1983	Source de la Buèges	Pegairolles-de-Buèges	700.9	168.92	170		3	FCPT	2600	576	5	
						390														
32	22/02/1986	Aven Barnabé	La Vacquerie	692.2	165.09	642		06/03/1986	Source de Clamouse	St-Jean-de-Fos	698.03	157.36	63		2	FCPT				
						552														
33	16/03/1988	Perte de l'Hérault	Puéchabon	701.89	161.62	80	10	18/03/1988	Source de la Ramassèdes	St-Guilhem-le-Désert	700.46	161.57	65		7	Directe	1500	44	34	
						68														
34	08/11/1984	Perte de St Martin	St-Martin-de-Londres	712.93	167.3	180	5	14/11/1984	Source du Châtaigniers	St-Martin-de-Londres	710.4	170.35	105	10	20	Directe	4000	140	29	
								15/11/1984	Source des Fontanilles	Argeliers	703.6	162.25	77	1000		FCPT	10600	168	63	
								05/12/1984	Source du Lez (?)	St-Clément	721.48	158.7	64			FCPT	12000	648	19	
35	26/01/1989	Perte du Triadou	St-Bauzille-de-Putois	715.51	180.12	145	30	03/02/1989	Event 1 du Chemin	St-Bauzille-de-Putois	713.99	178.6	140	20	10	Directe	2450	190	13	
								03/02/1989	Source Mas de Banal	St-Bauzille-de-Putois	713.64	178.16	135	30		Directe	2700	190	24	
								25/02/1989	Source des Baoutes	Brissac	711.6	176.42	125	200		Directe	5250	740	7	
								25/02/1989	Source du Cayla	Brissac	711.36	175.07	120	400		Directe	6500	740	9	

Tableau A1-1 (suite) : Inventaire des traçages antérieurs à l'étude, réalisés sur l'ensemble karstique constitué par le Sud du Larzac, la montagne de la Séranne et la moyenne vallée de l'Hérault.

TRACAGES		SITES D'INJECTION					SITES DE RESTITUTION							DONNEES TECHNIQUES						
N°				Coordonnées		Z	Débit					Coordonnées		Z	Débit	Traceur	Mode de	Distance	Temps	Vitesse
d'inventaire	Date	Dénomination	Commune	X	Y	(m)	(l/s)	Date	Dénomination	Commune	X	Y	(m)	(l/s)	(kg)	détection	rectiligne (m)	(h)	(m/h)	
								25/02/19 69	Source de la Vernède	Brissac	710.4 1	173.1 2	110	1500		Directe	8650	740	12	
36	23/03/19 69	Aven de Cambous	Viols-en-Laval	712.3 9	163.4 5	245	0.5	15/04/19 69	Source des Fontanilles	Argeliers	703.6	162.2 5	77	1000			8850	550	16	
37	03/04/19 71	Perte de Montguilhem	Montoulieu	716.8 8	178.4 2	275	1.5	04/04/19 71	Source Mas de Banal	St-Bauzille-de-Putois	713.6 4	178.1 6	135		2	Directe	3300	21	157	
		(Les Claparèdes)		716.3 8	177.6 7	260		05/04/19 71	Source de la Vernède	Brissac	721.4 8	173.1 2	110			FCPT	8400	46	183	

Tableau A1-2 : Données sur le traçage exutoire des Fontanilles.

Fichier	TRA-FO01-34
INJECTION	
Lieu d'injection	grotte des Fontanilles
Coordonnées (x, y, z en m)	
Système karstique	Fontanilles
Code BSS	
Code Système aquifère	
Nature (6)	rivière souterraine
Auteur(s)	Durand, Schoen, Cubizolles, Bakalowicz
Organisme(s)	ANTEA LRO, BRGM/DR, CNRS
Nature du traceur (7)	uranine
Multitraçage (Oui, Non)	N
Quantité en kg	0.102
Date d'injection (jj/mm/an hh:mn)	09/10/96 09:14
Injection instantanée (Oui, Non)	O
Écoulement : Naturel, Provoqué	N
Débit à l'injection (L/s)	< 50
Temps de disparition du traceur (mn)	2
Conditions climatiques (8)	saison sèche
Conditions hydrologiques (4)	étiage
RESTITUTION	
Point d'eau	source des Fontanilles
Numéro de la restitution ; Nombre total	1 ; 1
Nature (1)	source
Code BSS	
RESULTATS	
Longueur apparente en m [longueur du segment entre injection et sortie]	200
Dénivellation en m [z(injection)-z(sortie)]	20
Pente en % [dénivellation*100/longueur apparente]	10
Masse restituée en g	102
Taux de restitution en %	100
D.T.S. (Distribution des Temps de Séjour)	
Volume tracé en m ³	2287
Moment d'inertie de 1er ordre	?
Temps moyen en mn	?
Temps modal en mn	245
Temps 1ère apparition en mn	150
Vitesse moyenne apparente en m/h	?
Vitesse modale apparente en m/h	49
Vitesse maximale apparente en m/h	80

**Tableau A1-3 : données sur le traçage système des Fontanilles
à partir de la grotte du Mas de Bouisse.**

Fichier	TRA-BOUI01-34
INJECTION	
Lieu d'injection	Grotte de Mas de Bouisse
Coordonnées (x, y, z en m)	
Système karstique	Rastel
Code BSS	
Code Système aquifère	
Nature (6)	perte
Auteur(s)	V.Durand, R. Schoen
Organisme(s)	ANTEA LRO, BRGM
Nature du traceur (7)	Uranine
Multitraçage (Oui, Non)	N
Quantité en kg	1
Date d'injection (jj/mm/an hh:mn)	16/04/98 10:30
Injection instantanée (Oui, Non)	O
Écoulement : Naturel, Provoqué	N
Débit à l'injection (L/s)	1
Temps de disparition du traceur (mn)	5
Conditions climatiques (8)	saison pluvieuse
Conditions hydrologiques (4)	décrue
RESTITUTION	
Point d'eau	source de Rastel
Nature (1)	source
Code BSS	
RESULTATS	
Longueur apparente en m [longueur du segment entre injection et sortie]	4485
Dénivellation en m [z(injection)-z(sortie)]	105
Pente en % [dénivellation*100/longueur apparente]	2.34
Masse restituée en g	??
Taux de restitution en %	??
D.T.S. (Distribution des Temps de Séjour)	??
Volume tracé en m ³	??
Moment d'inertie de 1er ordre	??
Temps moyen en mn	??
Temps modal en mn	??
Temps 1ère apparition en mn	336 < t < 600
Vitesse moyenne apparente en m/h	??
Vitesse modale apparente en m/h	??
Vitesse maximale apparente en m/h	??

Tableau A1-4 : données sur le traçage exutoire des Cent-Fonts.

Fichier	TRA-CF01-34
INJECTION	
Lieu d'injection	forage à l'amont de la source
Coordonnées (x, y, z en m)	
Système karstique	Cent-Fonts
Code BSS	
Code Système aquifère	
Nature (6)	forage recoupant le conduit noyé
Auteur(s)	Durand, Schoen, Cubizolles, Bakalowicz
Organisme(s)	ANTEA LRO, BRGM/DR, CNRS
Nature du traceur (7)	Uranine
Multitraçage (Oui, Non)	N
Quantité en kg	0.05
Date d'injection (jj/mm/an hh:mn)	29/08/97 10:08
Injection instantanée (Oui, Non)	O
Écoulement : Naturel, Provoqué	N
Débit à l'injection (L/s)	
Temps de disparition du traceur (mn)	1
Conditions climatiques (8)	saison sèche
Conditions hydrologiques (4)	étiage
RESTITUTION	
Point d'eau	source des Cent-Fonts
Nature (1)	source des Cent-Fonts
Numéro de la restitution ; Nombre total	1 ; 1
Code BSS	
RESULTATS	
Longueur apparente en m [longueur du segment entre injection et sortie]	200
Dénivellation en m [z(injection)-z(sortie)]	10
Pente en % [dénivellation*100/longueur apparente]	5
Masse restituée en g	50
Taux de restitution en %	100
D.T.S. (Distribution des Temps de Séjour)	
Volume tracé en m ³	1300
Temps moyen en mn	233
Temps modal en mn	148
Temps 1ère apparition en mn	94
Vitesse moyenne apparente en m/h	
Vitesse modale apparente en m/h	81
Vitesse maximale apparente en m/h	130

**Tableau A1-5 : données sur le traçage « système » des Cent-Fonts
à partir des pertes de la Buèges.**

Fichier	TRA-BUEG01-34
INJECTION	
Lieu d'injection	Pertes de la Buèges
Coordonnées (x, y, z en m)	
Système karstique	Cent-Fonts
Code BSS	
Code Système aquifère	
Nature (6)	perte
Auteur(s)	Schoen ; Cubizolles, Bakalowicz
Organisme(s)	BRGM/DR, CNRS
Nature du traceur (7)	Uranine
Multitraçage (Oui, Non)	N
Quantité en kg	1,046
Date d'injection (jj/mm/an hh:mm)	06/10/97 16:40
Injection instantanée (Oui, Non)	N
Écoulement : Naturel, Provoqué	N
Débit à l'injection (L/s)	45
Temps de disparition du traceur (mn)	3000
Conditions climatiques (8)	saison sèche
Conditions hydrologiques (4)	étiage
RESTITUTION	
Point d'eau	source des Cent-Fonts
Nature (1)	source
Numéro de la restitution ; Nombre total	1 ; 1
Code BSS	
RESULTATS	
Longueur apparente en m [longueur du segment entre injection et sortie]	8200
Dénivellation en m [z(injection)-z(sortie)]	
Pente en % [dénivellation*100/longueur apparente]	
Masse restituée en g	156.5
D.T.S. (Distribution des Temps de Séjour)	
Volume tracé en m ³	> 123000
Temps moyen en mn	?
Temps modal en mn	41200
Temps 1ère apparition en mn	33900
Vitesse moyenne apparente en m/h	?
Vitesse modale apparente en m/h	12.5
Vitesse maximale apparente en m/h	14.5

Annexe 2

Analyse des courbes de récession

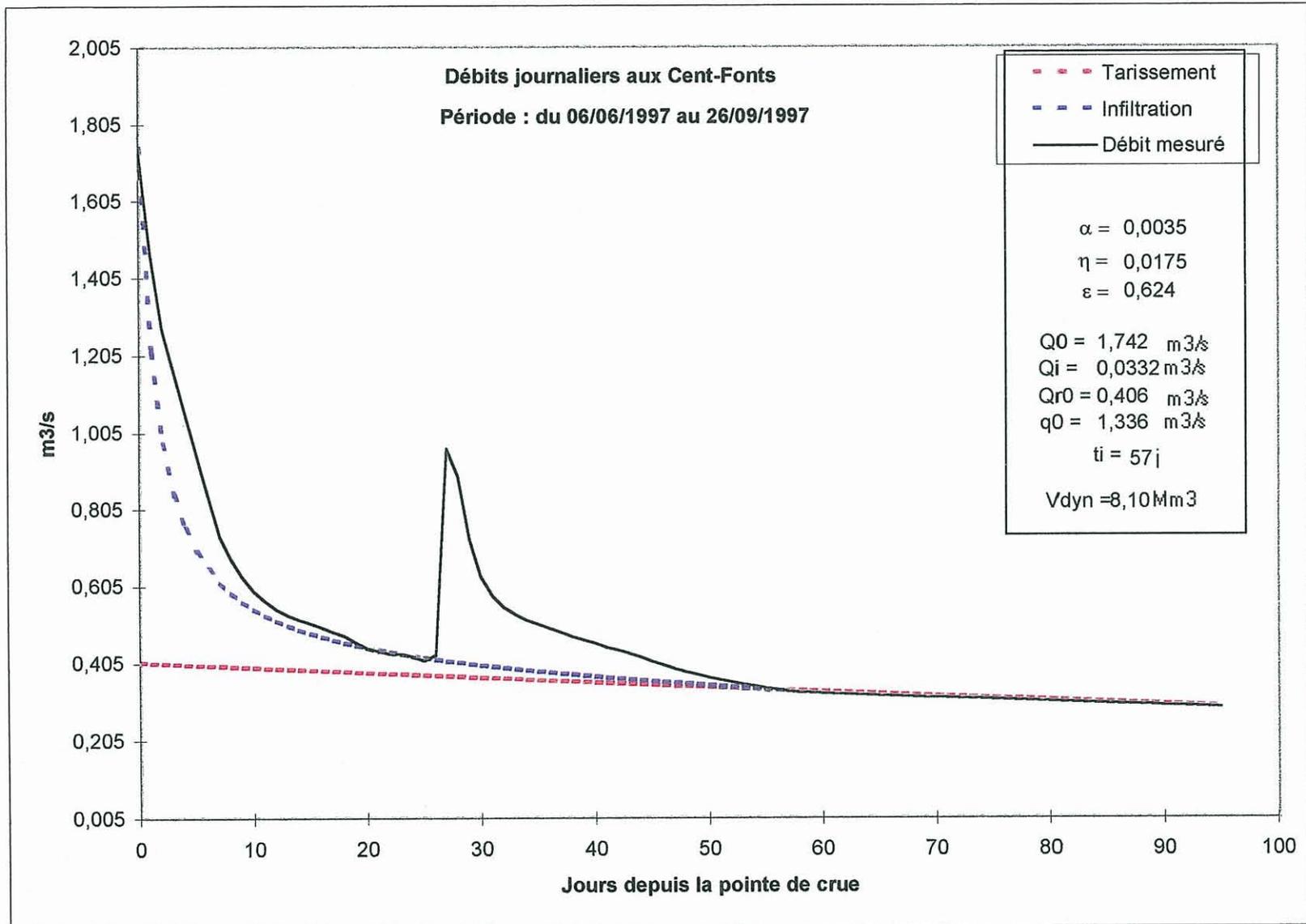


Fig. A2-1 : Courbe de récession de la source des Cent-Fonts (période du 06/06/97 au 29/09/97).

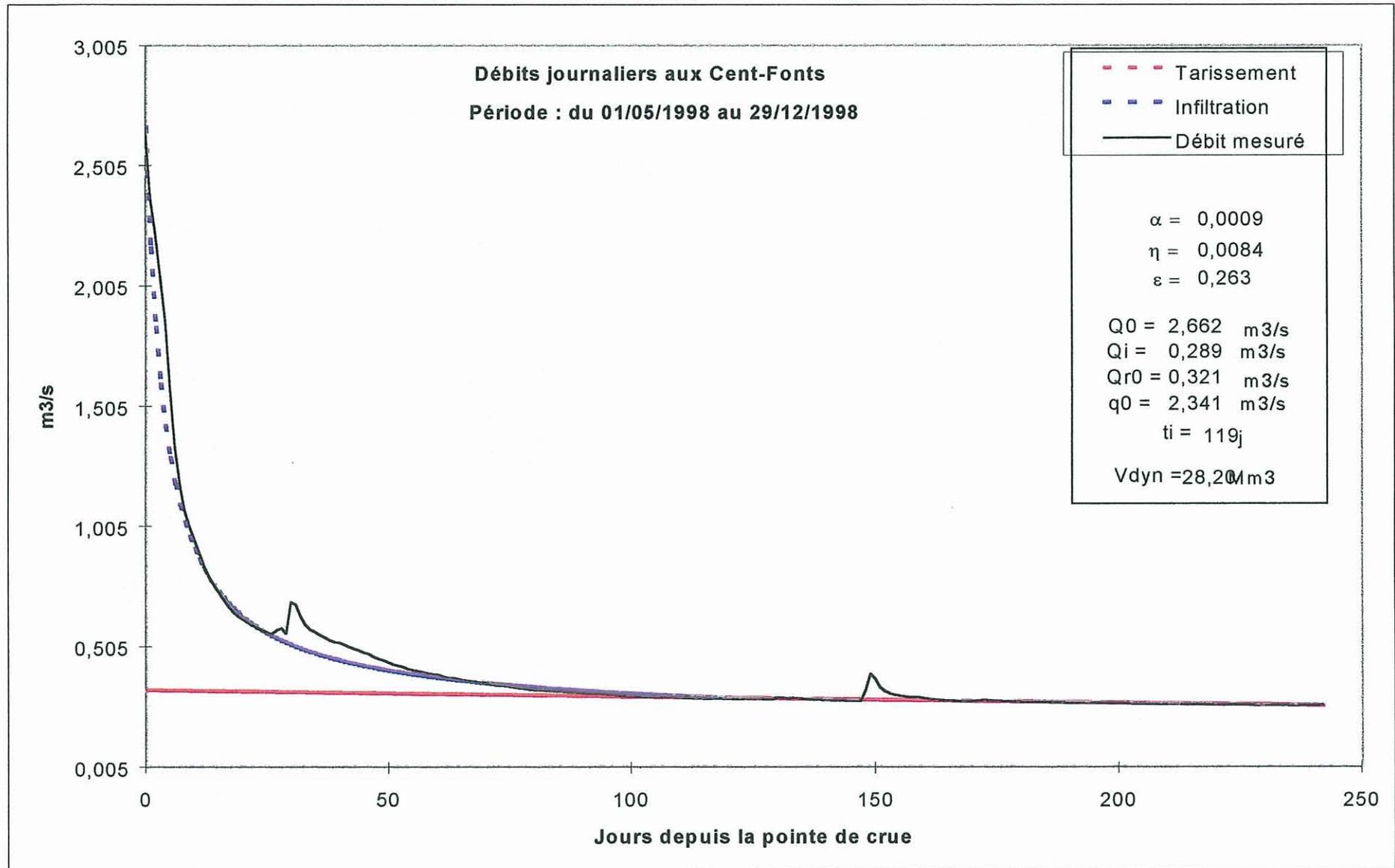


Fig. A2-2 : Courbe de récession de la source des Cent-Fonts (période du 01/05/98 au 29/12/97).

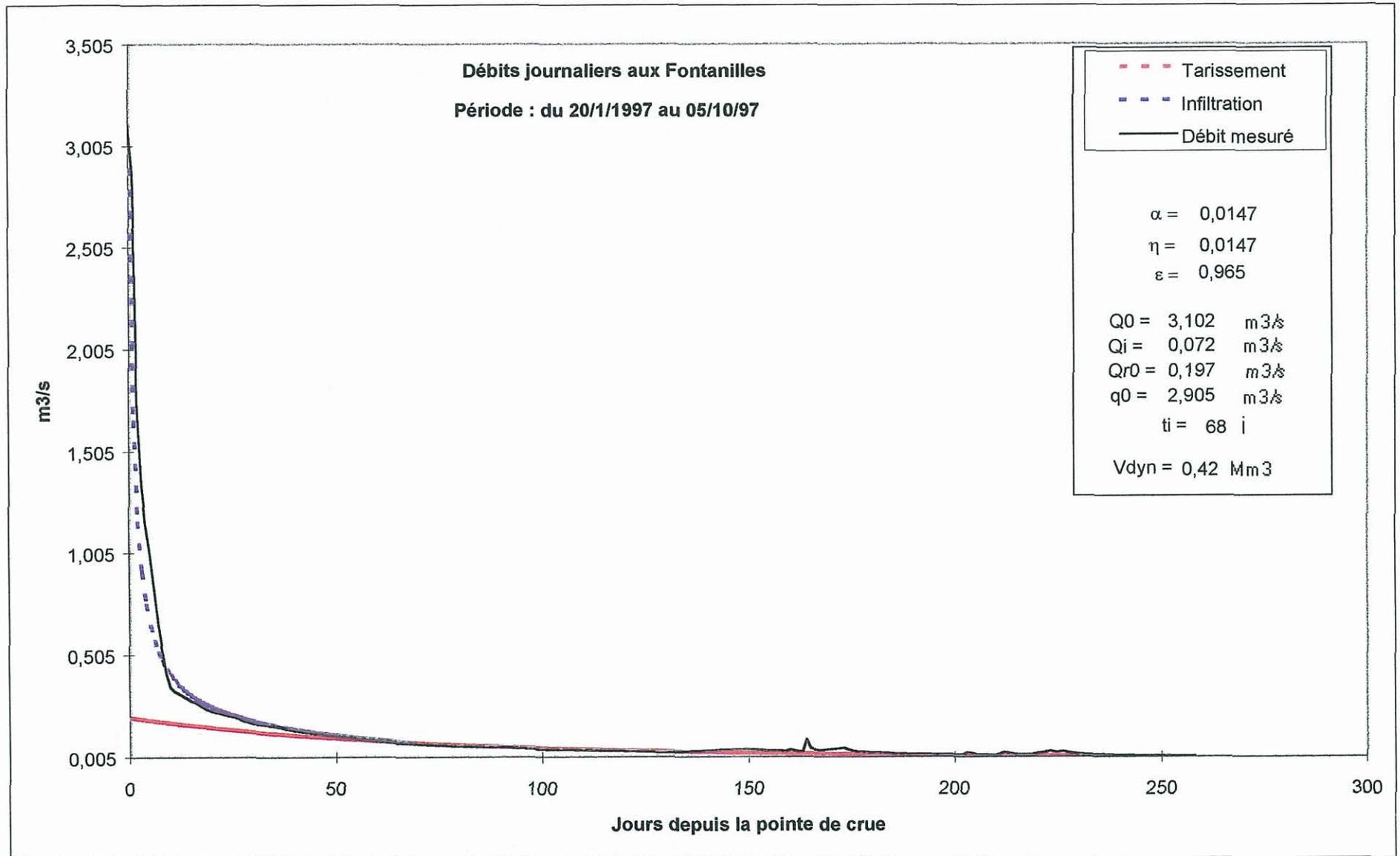


Fig. A2-3 : Courbe de récession de la source des Fontanilles (période du 20/01/97 au 05/10/97).

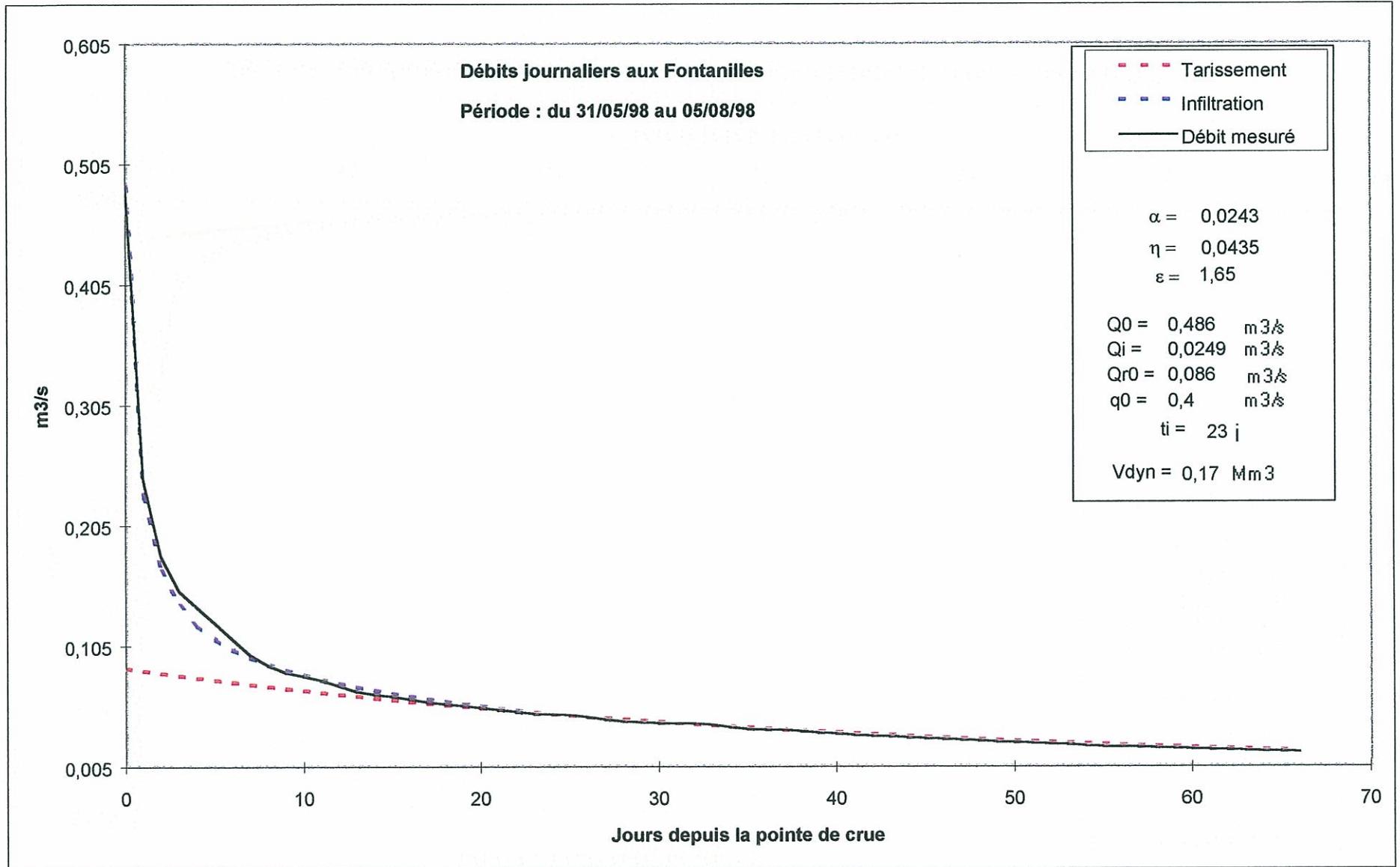


Fig. A2-4 : Courbe de récession de la source des Fontanilles (période du 31/05/98 au 05/08/98).

Annexe 3

Analyse corrélatrice et spectrale aux Cent-Fonts

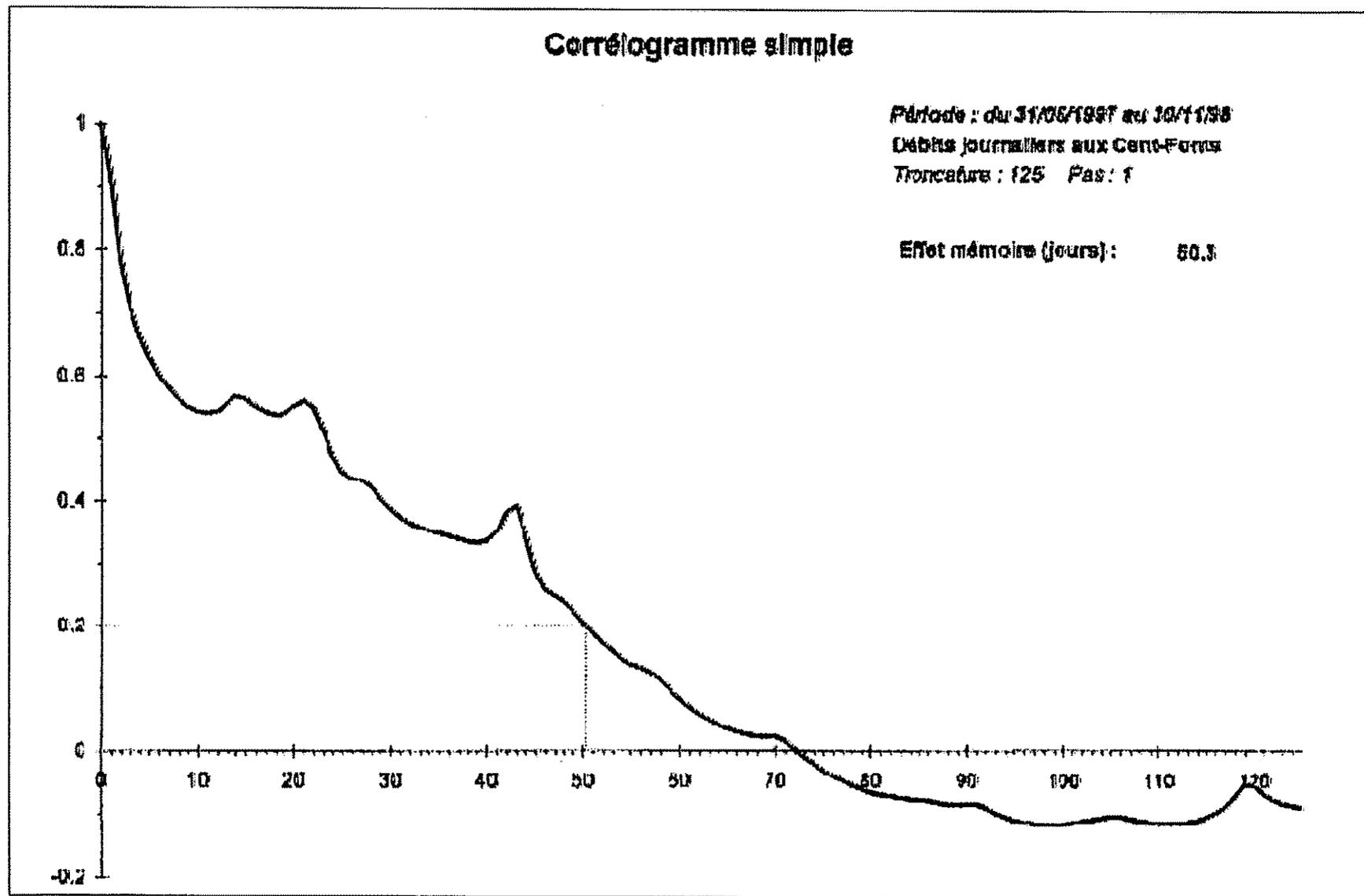


Fig. A3-1 : Corrélogramme simple sur les débits journaliers de la source des Cent-Fonts (période du 31/05/97 au 30/11/98).

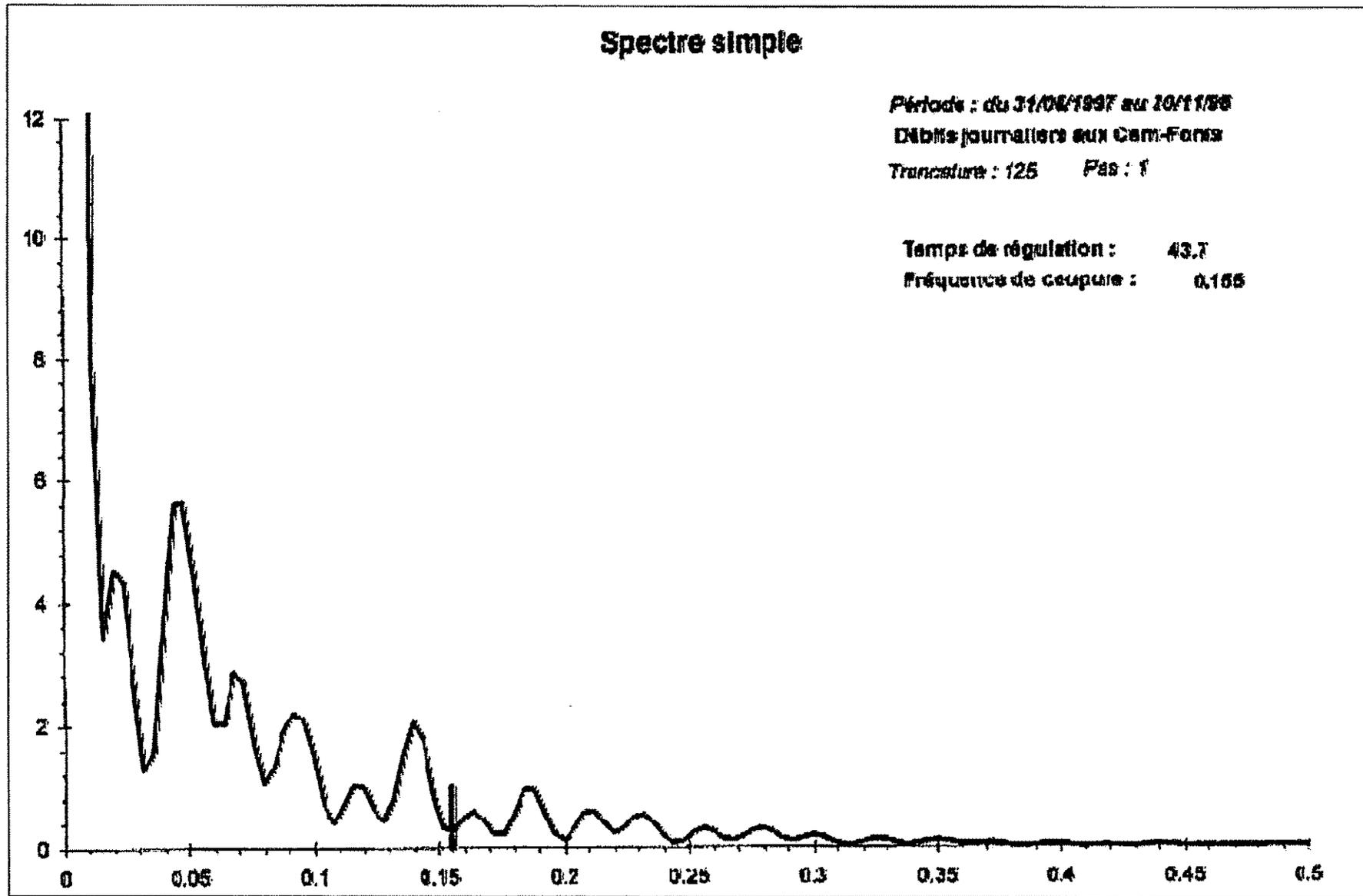


Fig. A3-2 : Spectre simple sur les débits journaliers de la source des Cent-Fonts (période du 31/05/97 au 30/11/98).

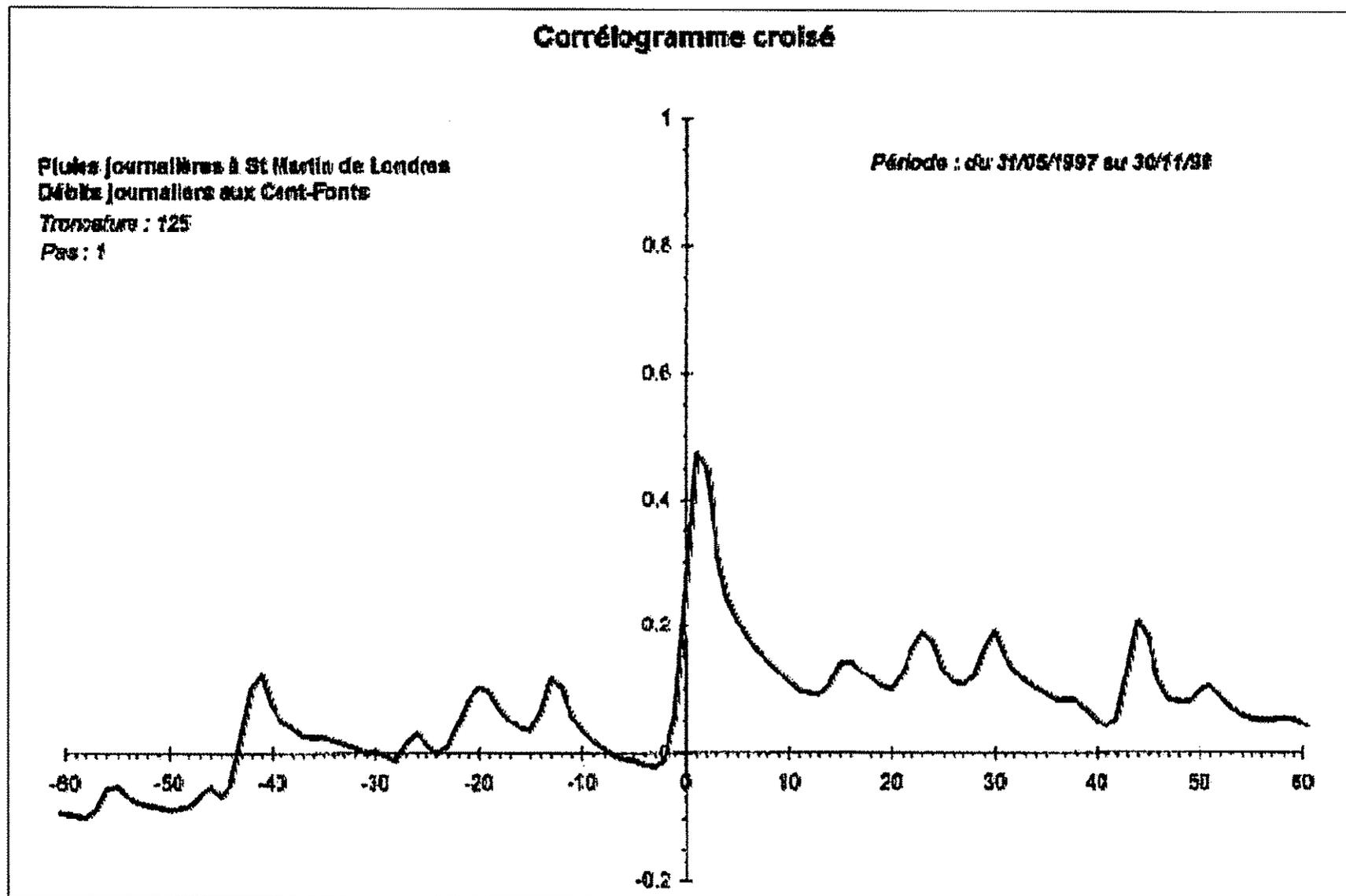


Fig. A3-3 : Corrélogramme croisé entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Cent-Fonts (période du 31/05/97 au 30/11/98).

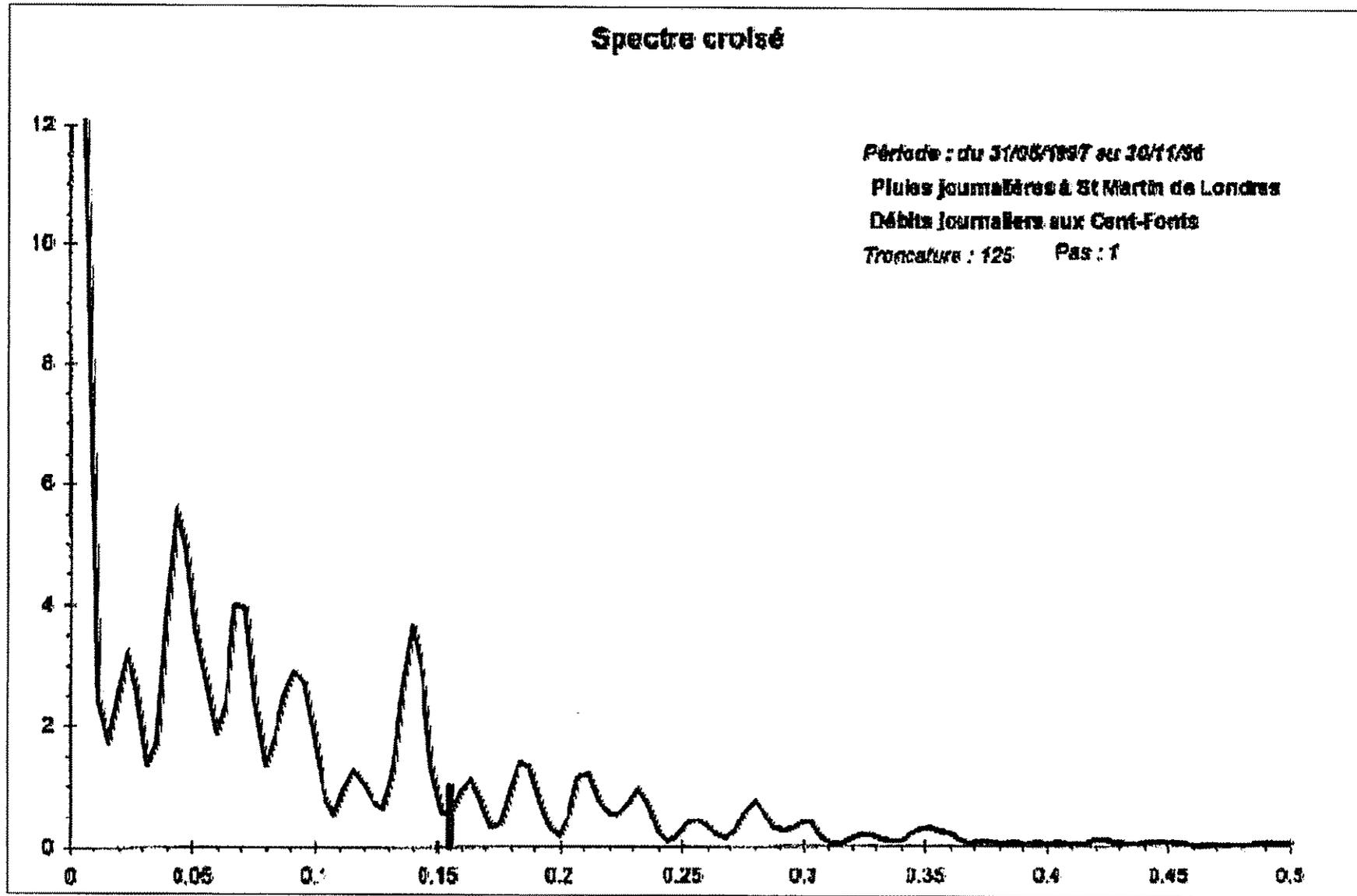


Fig. A3-4 : Spectre croisé entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Cent-Fonts (période du 31/05/97 au 30/11/98).

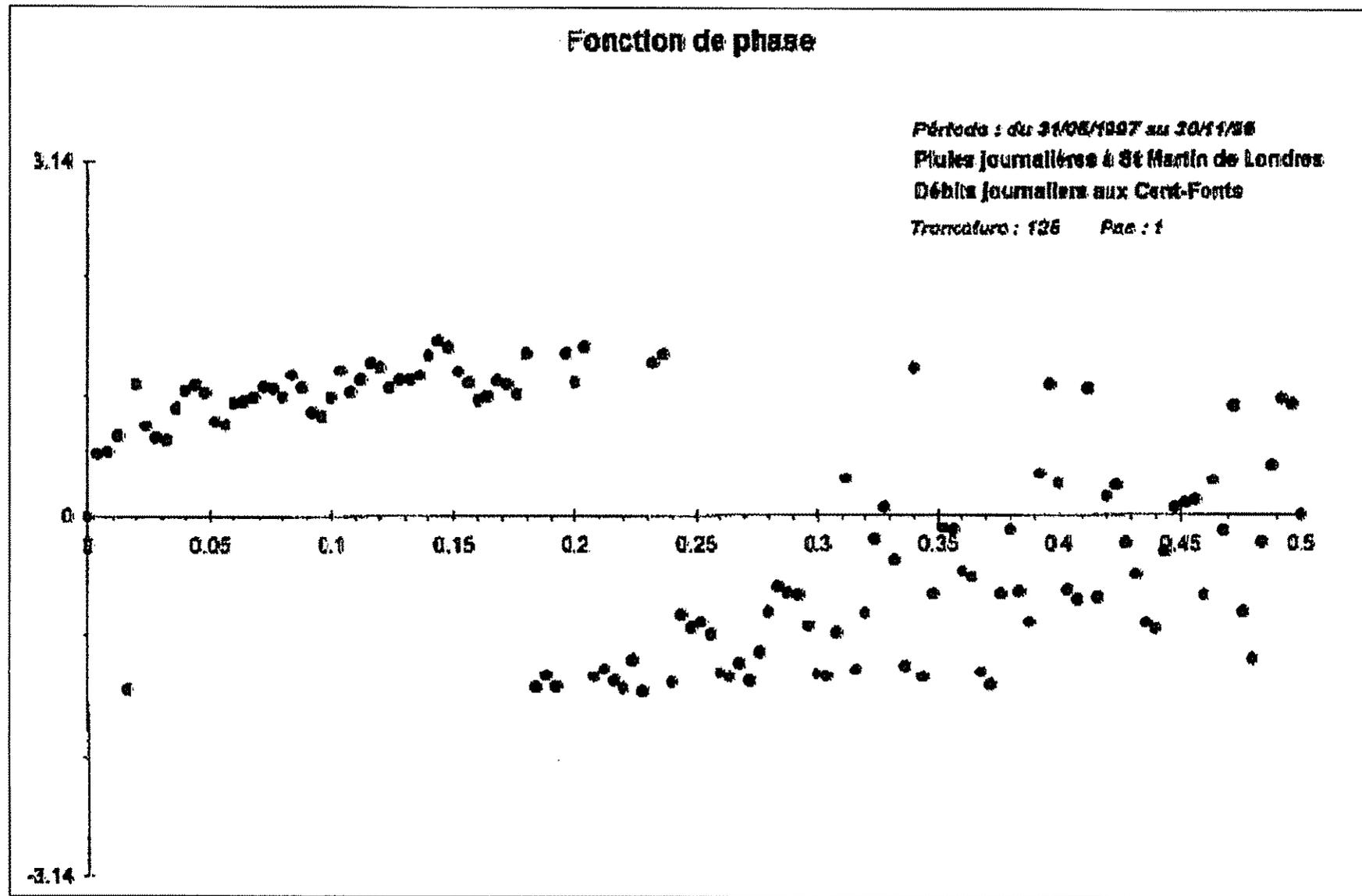


Fig. A3-5 : Fonction de phase entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Cent-Fonts (période du 31/05/97 au 30/11/98).

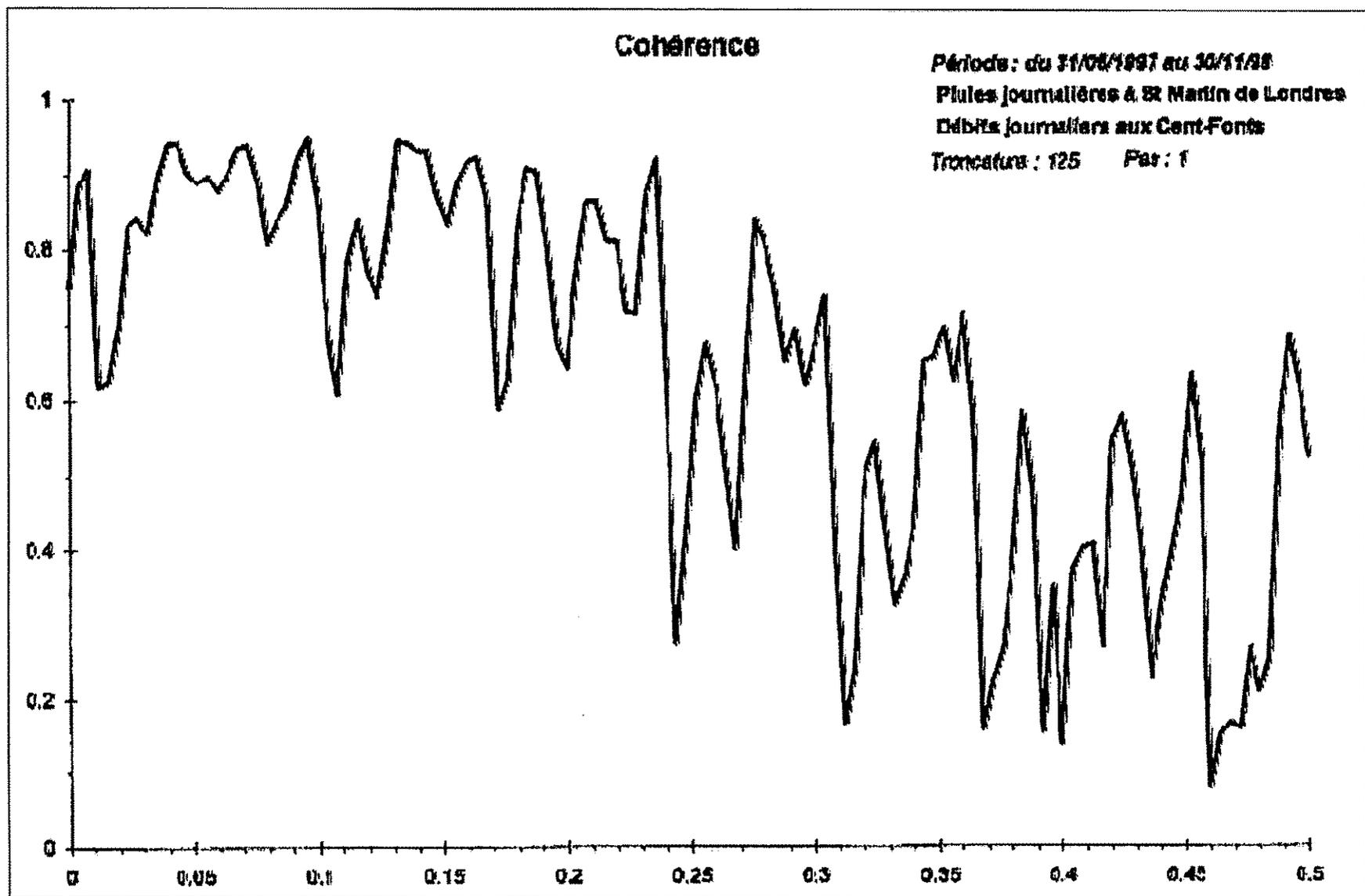


Fig. A3-6 : Cohérence entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Cent-Fonts (période du 31/05/97 au 30/11/98).

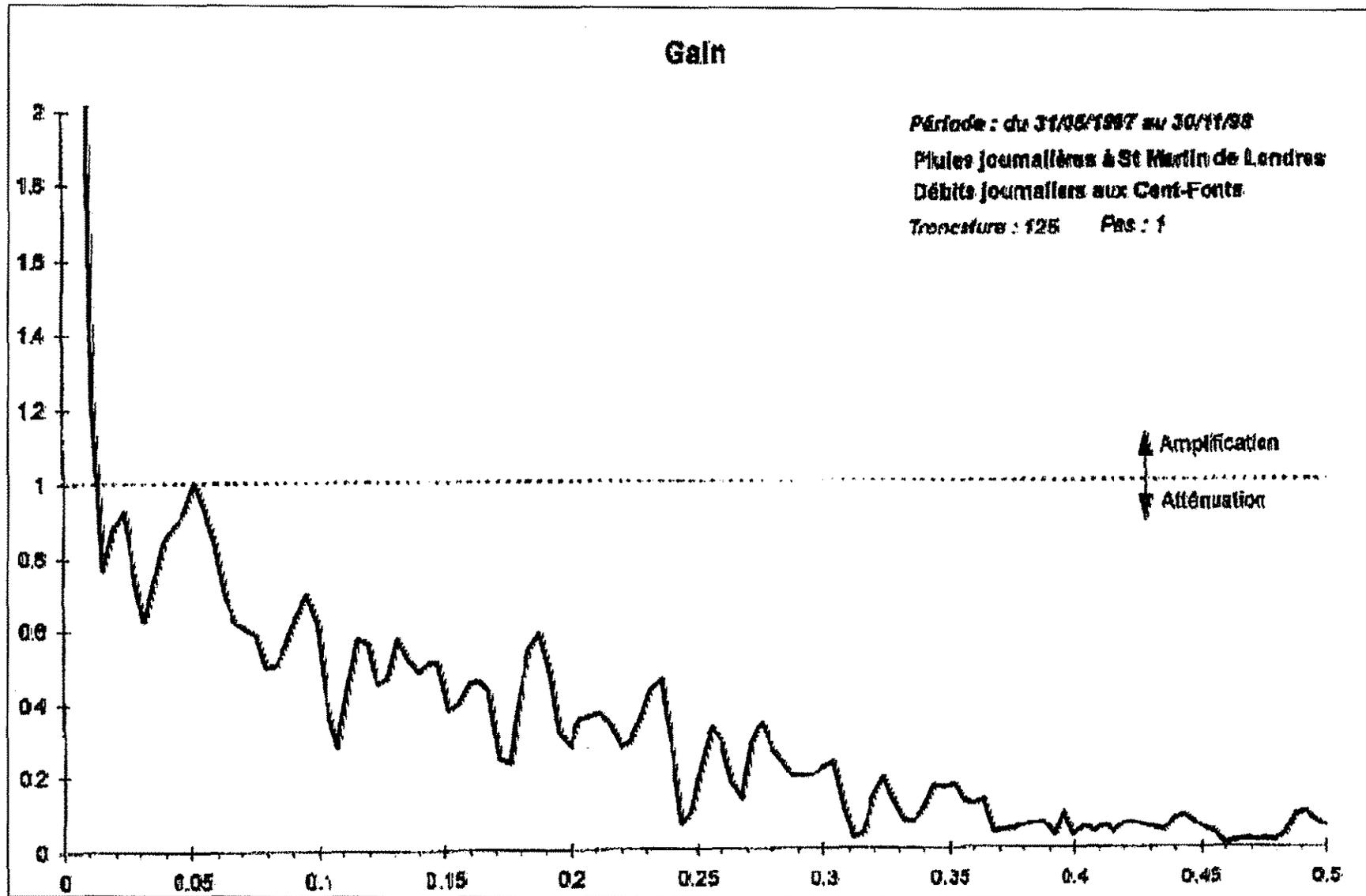


Fig. A3-7 : Gain entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Cent-Fonts (période du 31/05/97 au 30/11/98).

Annexe 4

Analyse corrélatrice et spectrale aux Fontanilles

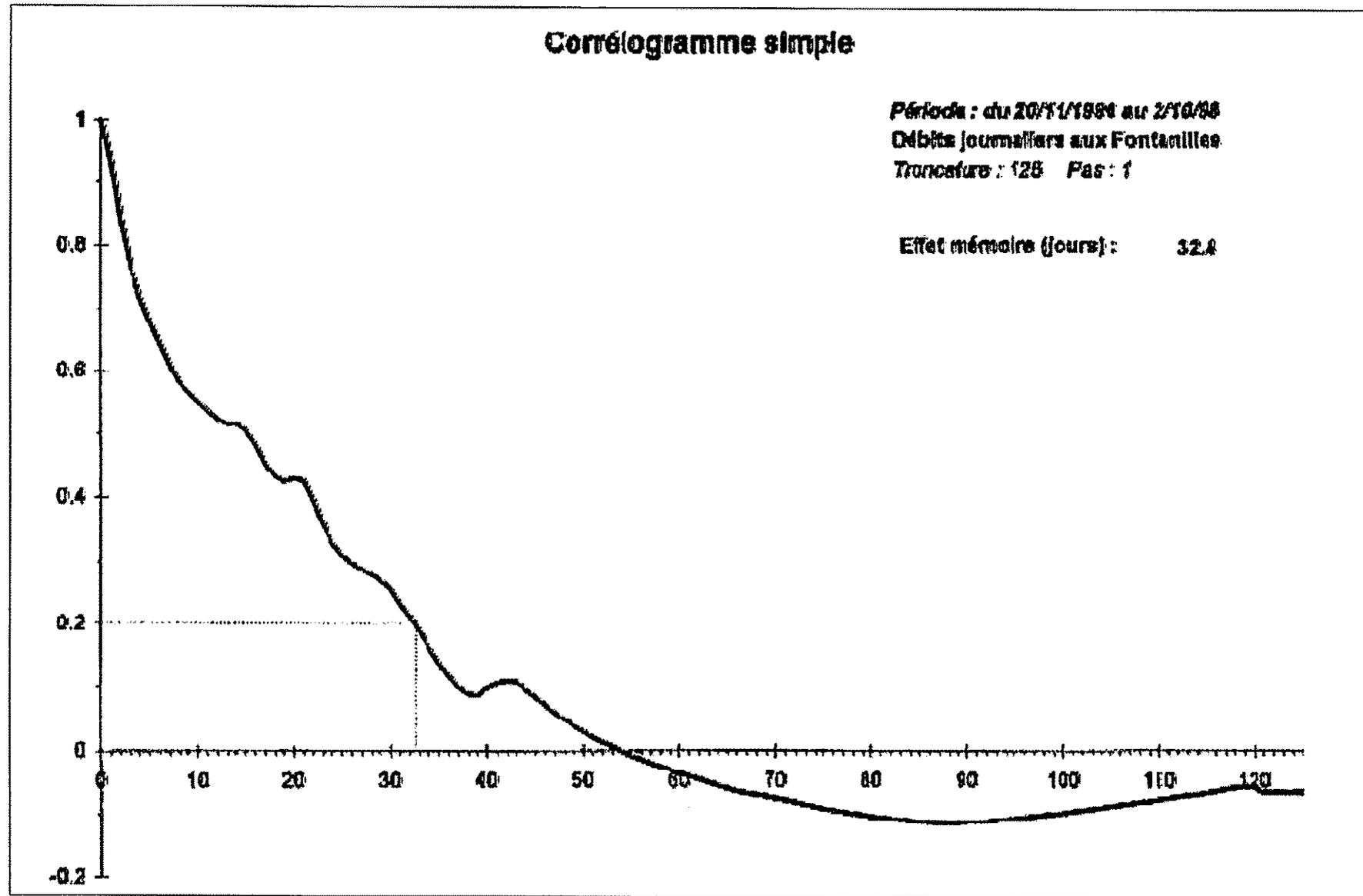


Fig. A4-1 : Corélogramme simple sur les débits journaliers de la source des Fontanilles (période du 20/11/96 au 02/10/98).

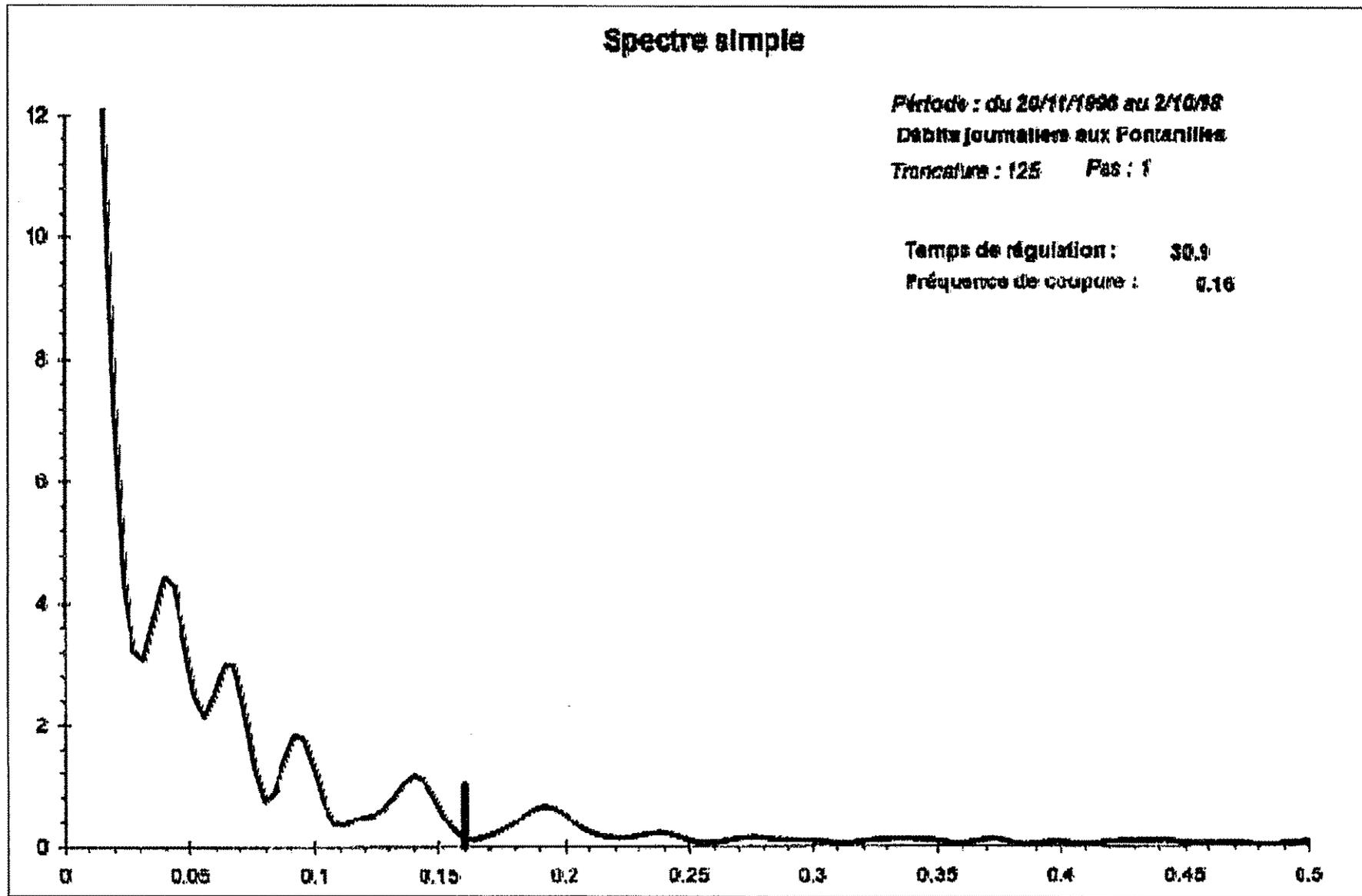


Fig. A4-2 : spectre simple sur les débits journaliers de la source des Fontanilles (période du 20/11/96 au 02/10/98).

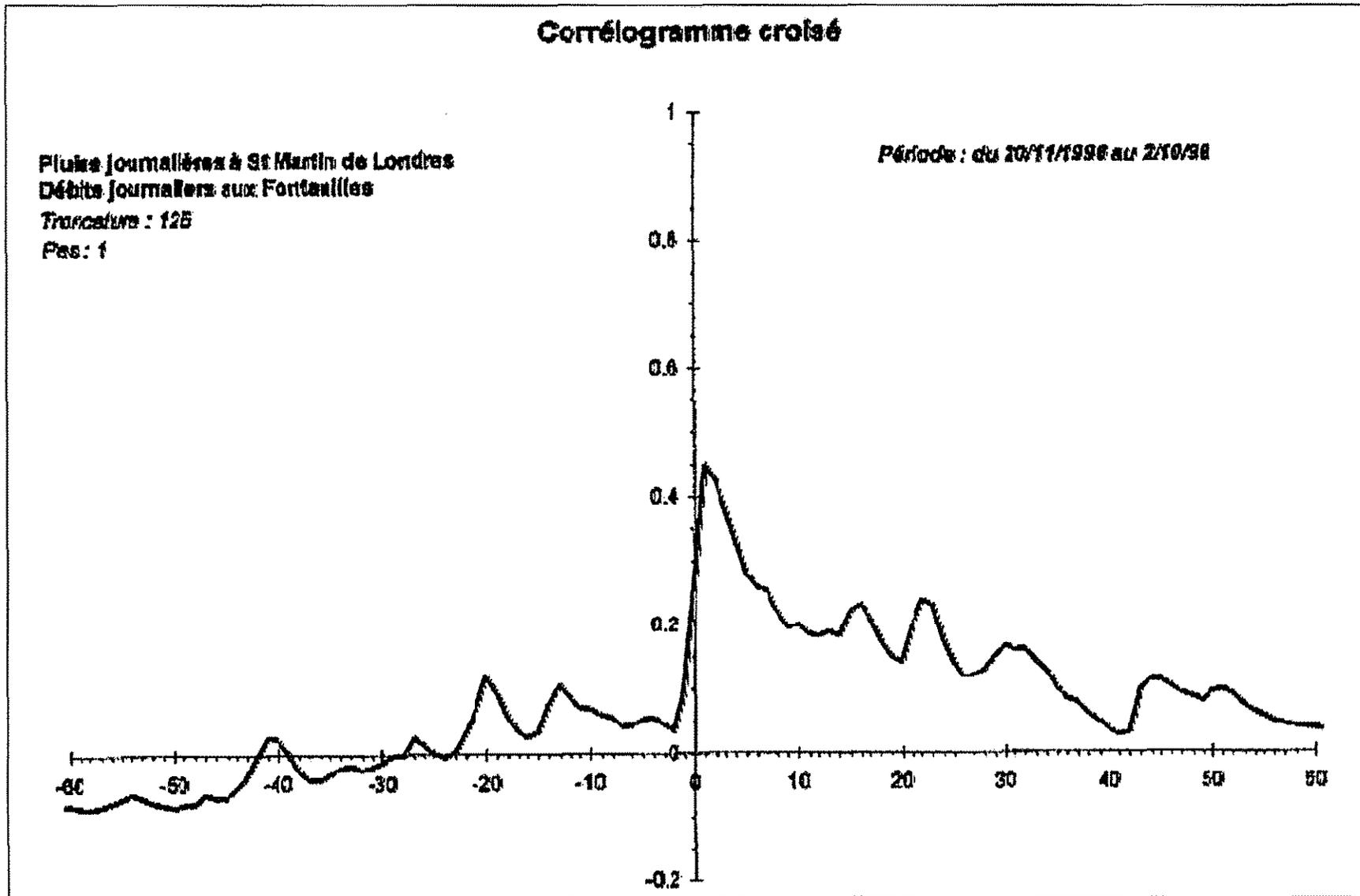


Fig. A4-3 : Corrélogramme croisé entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Fontailles (période du 20/11/96 au 02/10/98).

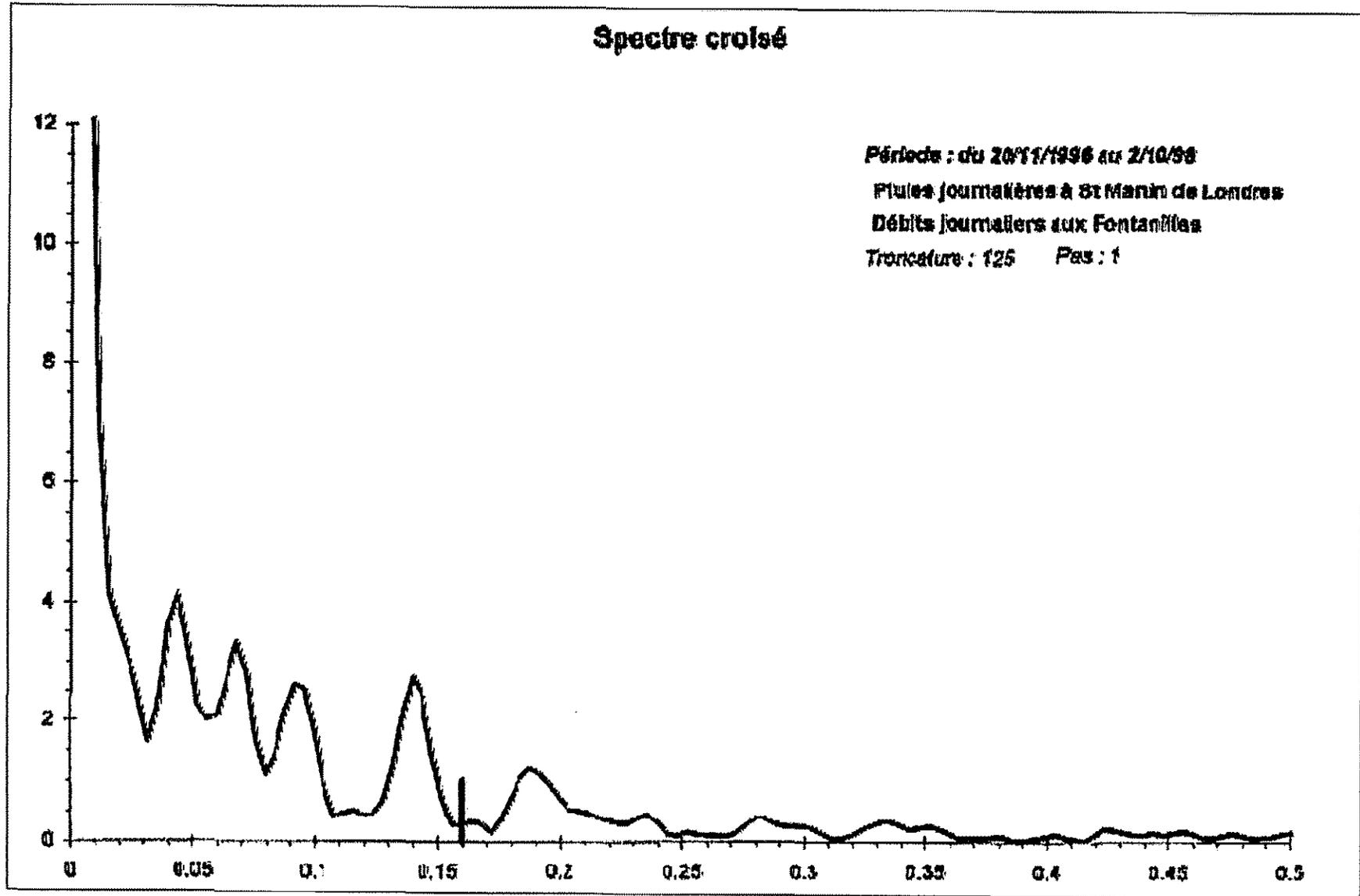


Fig. A4-4 : Spectre croisé entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Fontanilles (période du 20/11/96 au 02/10/98).

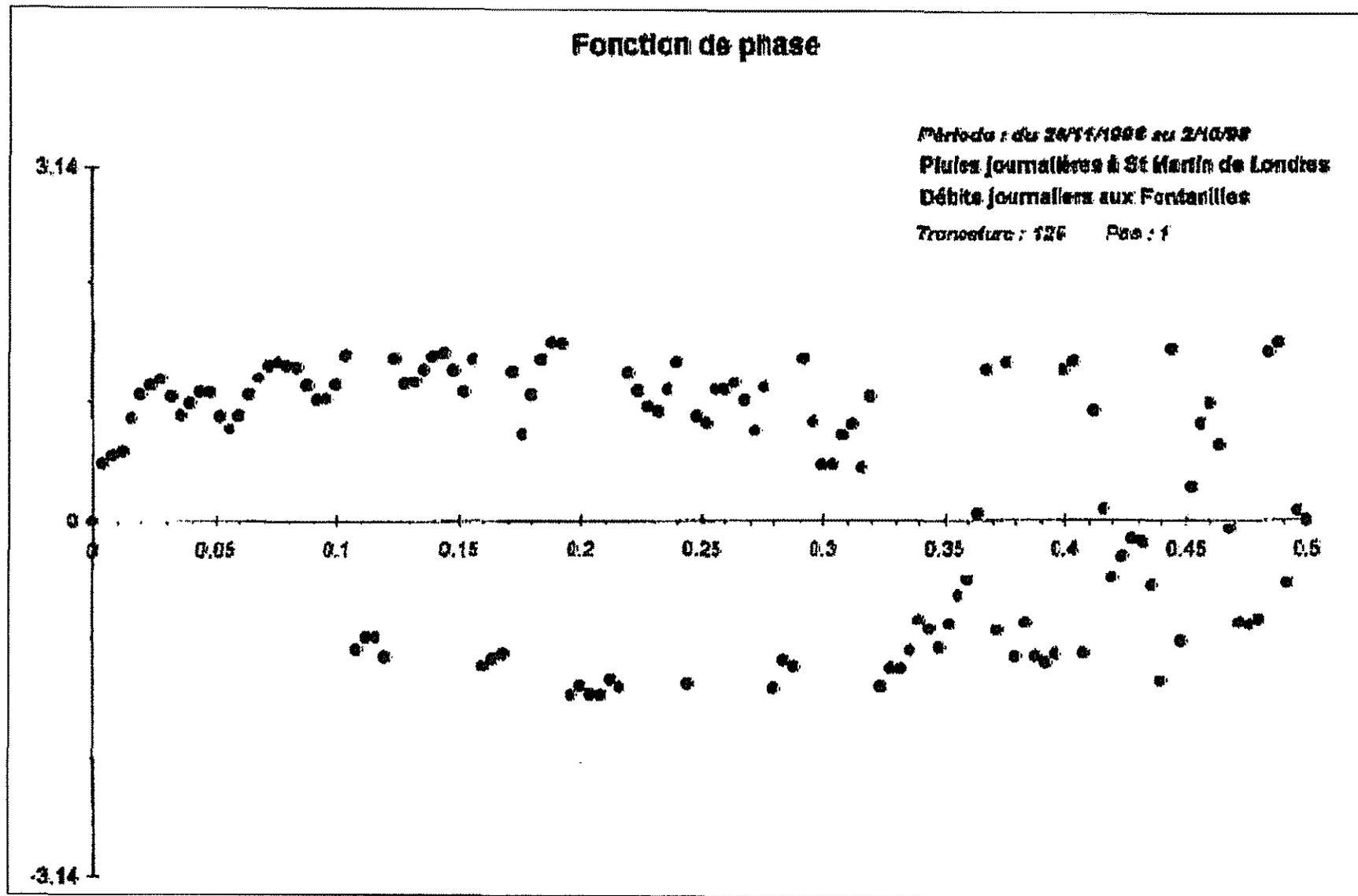


Fig. A4-5 : Fonction de phase entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Fontanilles (période du 20/11/96 au 02/10/98).

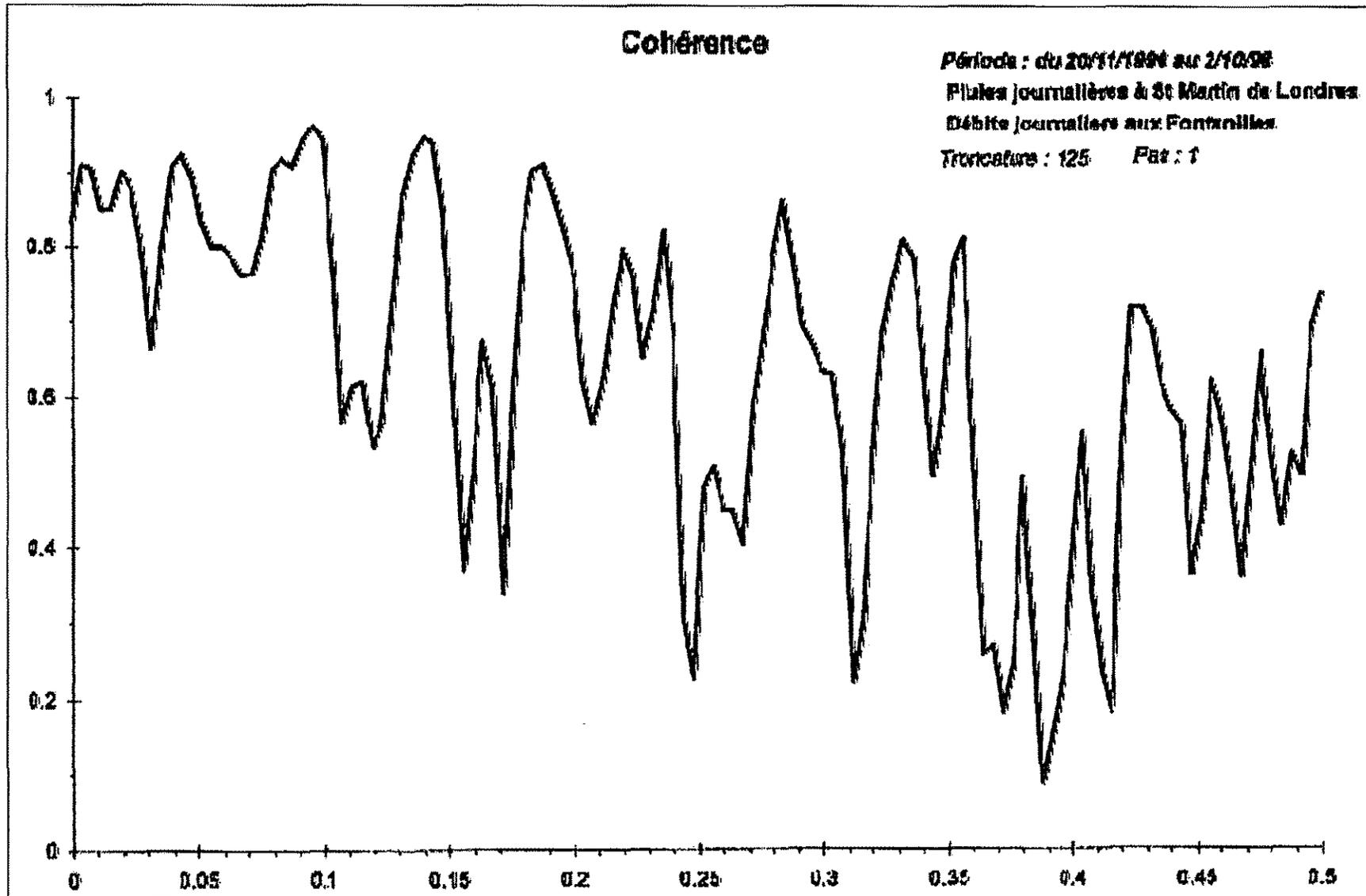


Fig. A4-6 : Cohérence entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Fontanilles (période du 20/11/96 au 02/10/98).

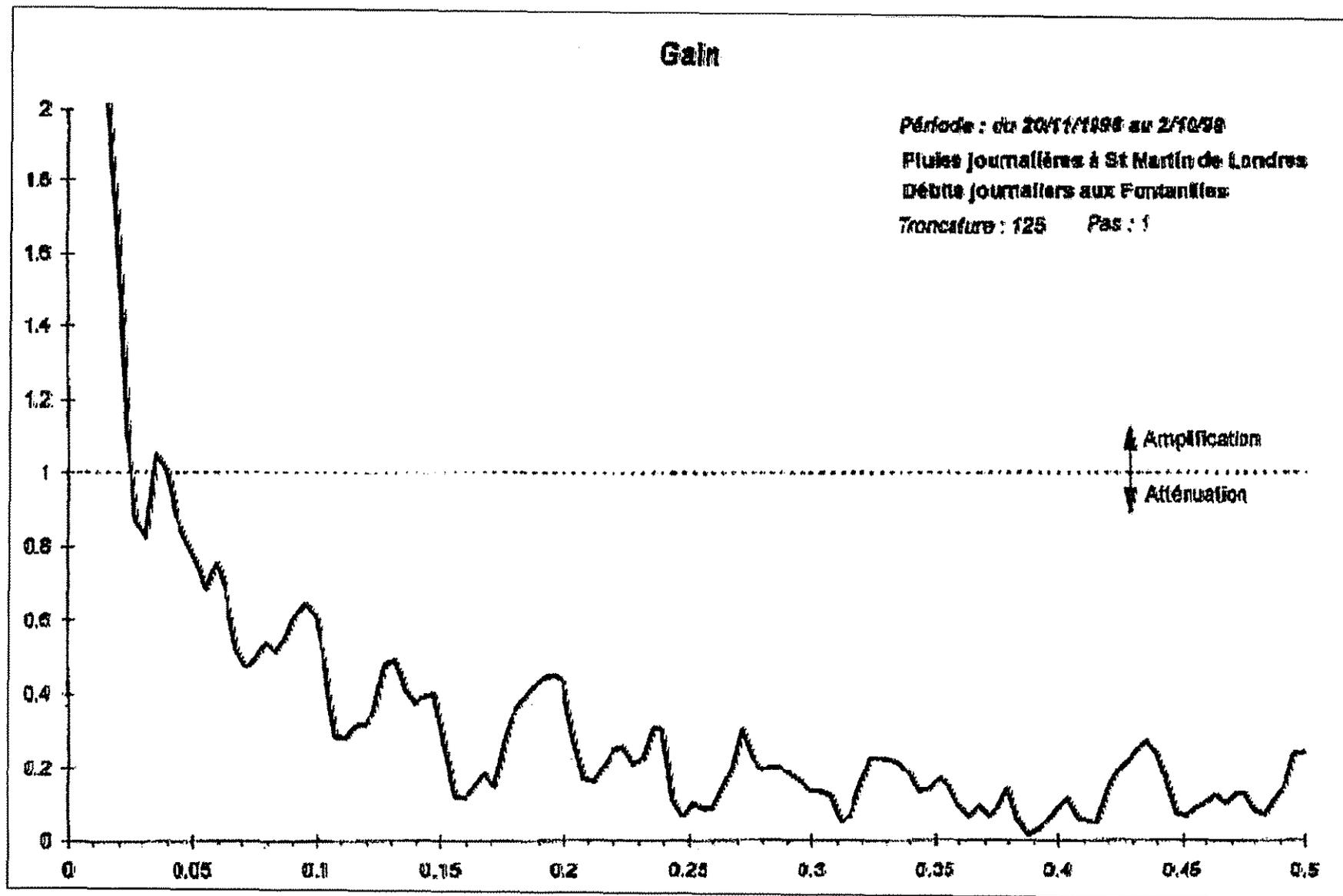


Fig. A4-7 : Gain entre les pluies journalières à St-Martin-de-Londres et les débits journaliers de la source des Fontanilles (période du 20/11/96 au 02/10/98).