

**Etude hydrogéologique du Causse de
Sauveterre et de ses avant-causses –
secteur EST
Lots N° 2 et 3 : Hydrologie,
Hydrométrie et Hydrochimie
Rapport « final »**

BRGM/RP-55529-FR
Mai 2007

Étude réalisée dans le cadre du marché N° 05-019 et 020
notifiés le 23/02/2005

N. Dörfliger, P. Fleury, B. Ladouche
Avec la collaboration de
J. Cubizolles, J-L. Izac et V. Lerch

Vérificateur :

Nom : Marion Blaise

Date : 17/05/2007



Approbateur :

Nom : Marc Audibert

Date : 21/05/2007

Original signé par M. Audibert

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : Karst, Hydrogéologie, Hydrochimie, Analyse des courbes de récession, Analyse des débits classés, Analyse corrélatoire et spectrale, Décomposition d'hydrogrammes, Causse de Sauveterre, Lozère

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

Dörfliger N., Fleury P., Ladouche B. avec la collaboration Cubizolles J., Izac J-L., Lerch V. (2007) : Etude hydrogéologique du Causse de Sauveterre et de ses avant-causses (secteur Est), Lot N°2 et Lot N° 3 : Hydrologie et Hydrochimie, BRGM/RP-55529-FR, 236 p, 72 ill., 30 tabl., 6 ann.

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Depuis plusieurs années, les Causses font l'objet d'études hydrogéologiques inscrites dans une démarche globale de connaissance et d'évaluation des ressources en eaux souterraines en vue notamment de les protéger.

Le Conseil Général de la Lozère, assisté techniquement par le Parc Naturel Régional des Grands Causses, est à l'initiative de cette étude hydrogéologique du Causse de Sauveterre et de ses avant-causses (secteur Est).

L'étude hydrogéologique du Causse de Sauveterre est subdivisée en 5 lots, dont le lot N°2 et N°3 concernant le suivi hydrométrique et l'interprétation hydrologique-hydrogéologique et hydrochimique des systèmes karstiques en termes de réserves, de degré de karstification et de dynamique de fonctionnement.

Le présent rapport concerne la présentation des objectifs, de la méthodologie et des résultats. Pour mener à bien cette étude, le BRGM s'est associé à GAEA Ingénierie, pour la partie hydrométrique : jaugeages des sources en périodes hydrologiques contrastées, instrumentation de 4 sources et d'une station météorologique.

Du point de vue hydrogéologique et caractérisation du degré de karstification, l'étude des sources de catégorie I (instrumentées par un suivi en continu du niveau d'eau) permet de mettre en évidence que de manière générale, les systèmes ne sont pas caractérisés par des développements karstiques importants. Seules deux sources, à savoir la source de Burle (côté Tarn) et la source d'Urugne (côté Lot) sont des sources de systèmes karstiques bien karstifiés. En dehors de la source de Bernade, caractéristique d'une source de milieu fissuré (et captif) et la source Famounet caractérisée par un degré de karstification limité, les autres sources sont caractérisées par des inerties importantes, traduisant d'une part des zones d'infiltration importante et hétérogène et d'autre part une karstification modérée de la zone noyée.

Les volumes dynamiques, estimation par défaut des réserves, estimés à partir de l'analyse des courbes de récession, sont faibles à moyens pour la plupart des sources de catégorie I. Concernant Burle et St-Frézal, ces deux systèmes sont caractérisés par des réserves importantes : 5.62 Mm^3 , respectivement plus de 10 Mm^3 pour St-Frézal.

L'étude hydrologique des sources de catégorie I a permis de calculer des superficies de bassin d'alimentation, et d'en déduire pour des conditions de pluies efficaces moyennes annuelles similaires les superficies des bassins d'alimentation des sources des catégories II et III. Au vu des incertitudes du calcul du bilan hydrologique des sources de catégorie II et III, ce seraient plus de 200 km^2 qui participeraient à des écoulements alimentant le Lot et plus particulièrement le Tarn, directement au niveau du cours d'eau.

Du point de vue de la qualité de l'eau des différentes sources, mis à part les analyses microbiologiques qui traduisent la vulnérabilité des sources vis-à-vis des pollutions d'origine anthropique (agricoles et par assainissement individuel), les eaux des sources sont de bonne qualité. Les analyses hydrochimiques ont permis d'apporter de manière limitée des informations concernant le fonctionnement et la structure des systèmes karstiques étudiés, pour des problèmes d'échantillonnage et de manque de précision de certaines analyses : confirmation de l'altitude de la zone de recharge d'eaux, eaux récentes participant aux écoulements souterrains en grande partie à surface libre, confirmation de la circulation des eaux sur des formations riches en minéraux magnésiens, sans pouvoir expliquer de manière détaillée la dynamique de l'infiltration.

Un suivi hydrochimique détaillé à l'échelle de crues couplé à un suivi en continu de la conductivité pour les sources les plus importantes en termes de volumes dynamiques ou de degré de karstification, à savoir Burle, Urugne et St-Frézal, permettrait d'obtenir des informations complémentaires sur la dynamique de transfert entre zone d'infiltration, importance de l'épikarst et la zone noyée. Ces informations pourraient être utiles en termes de caractérisation additionnelle vis-à-vis de la vulnérabilité des systèmes karstiques.

Sur la base des bilans hydrologiques et des résultats des essais de traçage, les bassins d'alimentation des principales sources de catégorie I et groupes de sources de catégorie II et III seront proposées dans le cadre du Lot N°5 (synthèse).

Sommaire

1. Introduction	15
1.1. CONTEXTE	15
1.2. GEOGRAPHIE.....	16
1.3. GEOLOGIE ET GEOMORPHOLOGIE	17
1.4. HYDROGRAPHIE.....	18
1.5. OBJECTIFS DES LOTS N° 2 – HYDROMETRIE ET HYDROLOGIE ET N°3 – HYDROCHIMIE	18
1.6. CONTENU DU RAPPORT.....	19
2. Rappels méthodologiques	21
2.1. HYDROMETRIE	21
2.1.1.Principes des jaugeages (GAEA)	21
2.1.2.Traitement des jaugeages à l'aide du logiciel « Barème© »	23
2.1.3.Interprétation des données hydrologiques en contexte karstique	24
2.1.4.Caractérisation du fonctionnement hydrogéologique à l'aide des outils géochimiques	37
3. Données hydrologiques et météorologiques	45
3.1. ACQUISITION DES DONNEES HYDROLOGIQUES ET METEOROLOGIQUES.....	45
3.1.1.Installation des 4 stations de catégorie I (GAEA)	45
3.1.2.Position géologique des sources de catégorie I	50
3.1.3.Installation de la station météorologique	51
3.1.4.Données des stations hydrologiques de catégorie I	55
3.2. JAUGEAGES DES SOURCES DE CATEGORIE II ET III	72
4. Données hydrochimiques	79
4.1. DONNEES DISPONIBLES	79
4.1.1.Suivi hydrochimique	79
4.1.2.Suivi isotopique	80
4.2. ACQUISITION DES DONNEES COMPLEMENTAIRES PAR LE BRGM.....	80

5. Interprétation hydrologique et hydrochimique	81
5.1. INTERPRETATION HYDROLOGIQUE DES SOURCES DE CATEGORIE I ...	81
5.2. INTERPRETATION HYDROLOGIQUE DES SOURCES DE CATEGORIE I COTE TARN.....	83
5.2.1. Source de Burle	83
5.2.2. Source d'Angle.....	100
5.2.3. Source de Famounet.....	100
5.2.4. Source de Saint-Chély	100
5.2.5. Source de Cénarète	101
5.3. INTERPRETATION HYDROLOGIQUE DES SOURCES DE CATEGORIE I COTE LOT	101
5.3.1. Source des Fonts.....	101
5.3.2. Source Bernade	102
5.3.3. Source de Saint-Frézal	102
5.3.4. Source d'Urugne	103
5.4. INTERPRETATION HYDROLOGIQUE DES SOURCES DE CATEGORIE I COTE TARN.....	103
5.4.1. Source d'Angle.....	103
5.4.2. Source de Famounet.....	104
5.4.3. Source de Saint-Chély-du-Tarn	104
5.4.4. Source de Cénarète	104
5.5. SURFACES DES BASSINS D'ALIMENTATION	105
5.6. CONCLUSION SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE CES SYSTEMES ET INTERPRETATION HYDROGEOLOGIQUE.....	106
5.7. ANALYSE DES DEBITS DES SOURCES DE CATEGORIE II ET III.....	107
5.7.1. Commentaires généraux sur les variations de débits	107
5.8. INTERPRETATION HYDROCHIMIQUE DES SOURCES DU CAUSSE DE SAUVETERRE – SECTEUR EST	107
5.8.1. Typologie et faciès hydrochimiques	107
5.8.2. Qualité de l'eau et paramètres physico-chimiques de terrain	114
5.8.3. Suivis temporels : Informations sur le fonctionnement hydrologique des sources.....	121
5.8.4. Informations sur les conditions d'écoulements au sein des systèmes karstiques à partir des suivis bimestriels.....	128
5.8.5. Informations apportées par les isotopes de l'eau.....	133

5.8.6. Informations apportées par les isotopes du strontium couplé aux informations chimiques	135
5.8.7. Comparaison avec hydrochimie des sources du Causse de Sauveterre – secteur Ouest	139
6. Conclusions et perspectives	141
6.1. CONCLUSIONS.....	141
6.2. PERSPECTIVES	143
7. Bibliographie.....	145

Liste des illustrations

Illustration 1 - Localisation géographique du Causse de Sauveterre (CHARCOSSET, 1998).	16
Illustration 2 - Localisation des différents Causses les uns par rapport aux autres (CHARCOSSET, 1998).	17
Illustration 3 - Vue d'avion de la vallée du Tarn et du Causse de Sauveterre (photo Garden M.)	18
Illustration 4 - Vélocimètre Hydreka à moulinet BFM002.....	22
Illustration 5 - Exemple d'un profil d'une section mouillée	23
Illustration 6 - Jaugeage au micromoulinet de la source du Sabot.	24
Illustration 7 - Différents cas de rupture de pente de la droite représentative des débits classés (Marsaud, 1996).	27
Illustration 8 - Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (1970).	29
Illustration 9 - Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession (Mangin, 1975) – (i) paramètre d'infiltration et (k) pouvoir régulateur.	30
Illustration 10 - Seuil et station de mesure.....	46
Illustration 11 - Source Golf à l'amont de la station de mesure	47
Illustration 12 - Ecoulement vers le canal de mesure	47
Illustration 13 - Source Golf.....	47
Illustration 14 - Canal et instrument de mesure de la source Golf.....	47
Illustration 15 - Ouvrage de la source d'Angle	48
Illustration 16 - station de mesure d'Angle.....	48
Illustration 17 - Aménagement du site de Famounet	49

Illustration 18 - Source de Famounet instrumentée	49
Illustration 19 - Distance de la source Famounet au Tarn.....	49
Illustration 20 - Position des sources de catégorie I sur le log géologique du Causse de Sauveterre – secteur Es.	50
Illustration 21 - Localisation de la station météorologique, au SE du Serre de la Gacholo, sur la commune de Ste-Enimie	51
Illustration 22 - Station météorologique clôturée avec un portail d'accès	51
Illustration 23 - Evolution de la température de l'air à la station météorologique du Causse de Sauveterre (Commune de Ste-Enimie)	52
Illustration 24 - Evolution temporelle de la pluviométrie à la station météorologique sur le Causse de Sauveterre entre octobre 2005 et août 2006.....	53
Illustration 25 - Evolution temporelle de la pression atmosphérique à la station météorologique sur le Causse de Sauveterre entre octobre 2005 et août 2006	54
Illustration 26 - Canal de Burle et station de mesure.	57
Illustration 27 - Hauteur d'eau mesurée dans le canal de Burle (données au pas de temps horaire).....	58
Illustration 28 - Hauteur d'eau à Burle lors de la crue du 19-20/10/2006 (pas de temps horaire).	59
Illustration 29 - Débit à la source de Burle (pas de temps journalier).	60
Illustration 30 - Débit à la source d'Angle (pas de temps journalier).....	61
Illustration 31 - Débit à la source de Famounet (pas de temps journalier).....	62
Illustration 32 - Débit à la source de Saint-Chély (pas de temps journalier).	63
Illustration 33 - Débit à la source de Cénarète (pas de temps journalier).	64
Illustration 34 - Débit à la source des Fonts (pas de temps journalier).	65
Illustration 35 - Débit à la source de Bernade (pas de temps journalier).	66
Illustration 36 - Débit à la source de Saint Frézal (pas de temps journalier).....	67
Illustration 37 - Déversement des eaux pluviale chargées en sédiments à l'aval direct du seuil de jaugeage.....	68
Illustration 38 - Débit à la source de Golf (pas de temps journalier).	68
Illustration 39 - Débit à la source d'Urugne (pas de temps journalier).	69
Illustration 40 - Schéma récapitulatif des jaugeages et de leur résultat à l'aval de la station de mesures de l'Urgune	70
Illustration 41- Localisation des points 1 à 4 de jaugeages à l'aval de la station de mesure de l'Urugne au niveau du Camping	70
Illustration 42 - Localisation des points 5 à 8 de jaugeages à l'aval de la station de mesure de l'Urugne	71
Illustration 43 - Débits classés de la source de Burle sur l'ensemble des données de la période novembre 2003-janvier 2007 (classe de débit de 0,01 m ³ /s).....	84

Illustration 44 - Décomposition de la récession 2004 de la source de Burle selon la méthode de Mangin (1970).	85
Illustration 45 - Décomposition de la récession 2005 de la source de Burle selon la méthode modifiée de Mangin (Ladouche et al., 2006).	87
Illustration 46 - Corrélogramme simple de la chronique de débit de Burle.	89
Illustration 47 - Corrélogramme croisé de la chronique de débit de Burle et des pluies de la station MétéoFrance de Sainte Enemie.	90
Illustration 48 - Schéma de principe du modèle de transfert	91
Illustration 49 - Corrélogramme croisé pluie-débit de Burle obtenu à partir de la combinaison linéaire des pluies (option pondération des chroniques de pluie de TEMPO).	92
Illustration 50 - Evolution temporelle de la pluviométrie, de l'ETP et des débits mesurés du système karstique de Burle.....	93
Illustration 51 - Corrélogramme croisé pluie-débit de Burle obtenu à partir de la combinaison linéaire des pluies (option pondération des chroniques de pluie de TEMPO).	94
Illustration 52 - Evolution temporelle de la pluviométrie, de l'ETP et des débits mesurés du système karstique de Burle.....	95
Illustration 53 - Calcul des hydrogrammes unitaires normalisés du système karstique de Burle (R. I. : réponse impulsionnelle).	96
Illustration 54 - Évolution du seuil de pluie efficace Oméga et de la pluviométrie.....	97
Illustration 55 - Comparaison du débit simulé au débit mesuré du système karstique de Burle. : 91.7 % de la variance totale expliquée.....	97
Illustration 56 - Positionnement des principales sources du Causse de Sauveterre dans les Diagramme de Piper.....	108
Illustration 57- Diagramme de distribution de la conductivité électrique des eaux du Causse de Sauveterre	111
Illustration 58 - Diagrammes de distribution des teneurs en hydrogénocarbonate et en calcium des eaux du Causse de Sauveterre	112
Illustration 59 - Diagramme de distribution des teneurs en magnésium des eaux du Causse de Sauveterre	113
Illustration 60 - Diagramme de distribution des teneurs en sulfate des eaux du Causse de Sauveterre.....	113
Illustration 61 - Diagrammes de distribution des teneurs en nitrate des eaux du Causse de Sauveterre.....	114
Illustration 62 - Evolution du pH des sources du Causse de Sauveterre – partie Est	119
Illustration 63 - Evolution de la température du Causse de Sauveterre – partie Est.....	120
Illustration 64 - Evolution des concentrations en nitrate du Causse de Sauveterre – partie Est	120
Illustration 65 - Evolution temporelle du débit et des concentrations (éléments majeurs) des eaux de la source patrimoniale de Burle depuis septembre 2003.....	122

Illustration 66 - Evolution temporelle du débit et des concentrations (éléments majeurs) des eaux de la source de Bernade depuis septembre 2003	126
Illustration 67- Evolution des indices de saturation de la calcite et de la dolomite des eaux du causse de Sauveterre (côté Lot graphique supérieur et côté Tarn graphique inférieur).....	130
Illustration 68 - Evolution de l'indice de saturation de la calcite et de la pCO ₂ des sources côté Tarn du Causse de Sauveterre	131
Illustration 69 - Evolution de l'indice de saturation de la calcite et de la pCO ₂ des sources côté Lot du Causse de Sauveterre	132
Illustration 70 - Evolution des teneurs en deutérium en fonction des teneurs en oxygène 18 des eaux des sources de St-Frézal et Urugne (côté Lot) et des sources de Moline et Famonet (côté Tarn).....	134
Illustration 71 - Evolution des teneurs en oxygène 18 des eaux des sources et des altitudes d'émergence. L'estimation de l'altitude moyenne de recharge des sources est également reportée.....	135
Illustration 72- Rapports isotopiques du strontium des eaux en fonction des rapports chimiques HCO ₃ /Sr et SO ₄ /Sr	137

Liste des tableaux

Tableau 1 - Interprétation des ruptures de pente de la droite représentative des débits classés.....	26
Tableau 2 - Origine et nature des informations apportées par les principaux éléments contenus dans les eaux des systèmes karstiques.....	41
Tableau 3 - Nature des informations obtenues sur le système calco-carbonique.....	42
Tableau 4 - Informations obtenues par les outils isotopiques « classiques »	42
Tableau 5 - Coordonnées des 4 stations de catégorie I instrumentées par GAEA ingénierie	45
Tableau 6 - Températures moyennes de l'air à la station météorologique pour la période observée.....	53
Tableau 7 - Pluviométrie totale mensuelle et maximale journalière par mois à la station météorologique	54
Tableau 8 - Récapitulatif des données acquises et transformation des hauteurs d'eau en débit.....	56
Tableau 9 - Données de débit et des paramètres physico-chimiques des sources de catégorie 2 –côté Tarn –(GAEA Ingénierie)	73
Tableau 10 - Données de débit et des paramètres physico-chimiques des sources de catégorie 2 –côté Tarn (suite) –(GAEA Ingénierie)	74
Tableau 11 - Données de débit et des paramètres physico-chimiques des sources de catégorie 2 –côté Lot –(GAEA Ingénierie).....	75

Tableau 12 - Données de débit et des paramètres physico-chimiques des sources de catégorie 3 –côté Tarn –(GAEA Ingénierie).....	76
Tableau 13 - Données de débit et des paramètres physico-chimiques des sources de catégorie 3 –côté Tarn (suite) –(GAEA Ingénierie).....	77
Tableau 14 - Données de débit et des paramètres physico-chimiques des sources de catégorie 3 –côté Lot –(GAEA Ingénierie).....	78
Tableau 15 - Tableau récapitulatif des différents paramètres de l'étude hydrologique (+ : système peu karstifié, ++ : système moyennement karstifié, +++ : système très karstifié).....	82
Tableau 16 - Caractéristiques des stations MétéoFrance utilisées.....	92
Tableau 17 - Cumul des précipitations du bassin d'alimentation de Burle déduit par l'option de pondération des précipitations du logiciel Tempo.....	92
Tableau 18 - Caractéristiques des stations MétéoFrance utilisées.....	94
Tableau 19 - Cumul des précipitations du bassin d'alimentation de Burle déduit par l'option de pondération des précipitations du logiciel Tempo.....	95
Tableau 20 - Paramètres du bilan hydrologique.....	99
Tableau 21- Superficie des bassins d'alimentation des principales sources karstiques.....	105
Tableau 22 - Eléments de statistiques descriptives des eaux du Causse de Sauveterre et différenciation selon la position géographique.....	110
<i>Tableau 23 - Résultats des analyses microbiologiques des 5 sources de catégorie I, utilisées pour l'alimentation en eau potable.....</i>	<i>117</i>
Tableau 24 - Résultats des analyses des substances indésirables pour cinq sources de catégories I utilisées pour l'alimentation en eau potable.....	118
Tableau 25 - Synthèse de l'évolution de différents couples d'ions pour les sources côté Tarn.....	124
Tableau 26 - Synthèse de l'évolution de différents couples d'ions pour les sources côté Lot.....	127
Tableau 27 - Compositions isotopiques de l'eau des sources de St-Frézal et Urugne (côté Lot) et des sources de Moline et Famonet (côté Tarn).....	133
Tableau 28 - Contexte géologique des émergences des sources déduit à partir des cartes géologiques au 50000 ^{ème}	136
Tableau 29 - Résultats des analyses isotopiques (⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) et chimique (Ca, Sr,SO ₄ , HCO ₃ et Mg) de la campagne de prélèvement de l'été 2006 réalisé dans le cadre de l'étude (en cours) de la ressource thermo-minérale de Quézac.....	136
Tableau 30 - Contexte géologique des zones noyées des sources déduit à partir des informations isotopiques du Strontium.....	139

Liste des annexes

Annexe 1.....	147
Annexe 2.....	151
Annexe 3.....	163
Annexe 4.....	171
Annexe 5.....	191
Annexe 6.....	207

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Depuis plusieurs années, les Causses font l'objet d'études inscrites dans une démarche globale de connaissance du fonctionnement hydrogéologique des systèmes karstiques associés. Le Parc Régional Naturel des Grands Causses (PRNGC) a mené des études sur le Causse du Larzac septentrional, sur le Causse Rouge et sur la partie occidentale du Causse de Sauveterre.

L'étude hydrogéologique du Causse de Sauveterre et de ses avant-causses, secteur oriental, dont le maître d'ouvrage est le Conseil Général de la Lozère, a pour objectifs :

- la détermination des bassins d'alimentation des sources, avec l'identification des différents systèmes karstiques ;
- la connaissance de la structure et du fonctionnement de ces systèmes ;
- l'évaluation de la ressource en eau ;
- l'évaluation de la vulnérabilité de cette ressource et de l'impact des activités humaines sur la qualité de l'eau, et son évolution ;
- l'élaboration d'un document d'aide à la décision pour la protection de la ressource en eau.

L'étude comporte 5 lots dont les lots N°2 et 3 concernant l'hydrologie et l'hydrométrie, respectivement l'hydrochimie.

La zone d'étude, couvrant une surface de quelques 460 km², concerne ainsi le Causse de Sauveterre, dans sa partie orientale. Elle est limitée au Nord par la vallée du Lot, à l'Est par le Bramont, la dépression du Valdonnez et les affleurements du socle, au Sud par les gorges du Tarn et à l'Ouest par une limite arbitraire reliant le Cirque des Baumes à la vallée de Rocaysou. Cette zone comprend 19 communes dont 7 font partie du SAGE Tarn amont et 8 du SAGE Lot amont (Annexe 1).

Communes du SAGE Tarn amont	Communes du SAGE Lot amont	
Ispagnac	Chanac	La Canourgue
Laval-du-Tarn	St-Bauzille	Les Salelles
La Malène	Balsièges	La Tieule
Montbrun	Banassac	St-Etienne-du-Valdonnez
St-Georges-de-Lévejac	Barjac	St-Saturnin
Ste-Enimie	Esclanèdes	
Quézac	Cultures	

Le secteur est rural, à faible densité d'habitat. La principale activité est de type agropastoral, à laquelle il faut ajouter aussi des activités industrielles s'y rapportant telles que la laiterie du Massegros et la porcherie de la Nojarède. Le Causse de Sauveterre, secteur Est comprend également des carrières et des piscicultures. Le secteur d'étude est de plus, le siège d'une intense activité touristique, principalement au niveau des gorges du Tarn.

1.2. GEOGRAPHIE

Le Causse de Sauveterre se situe dans le département de la Lozère (48), dans la partie méridionale du Massif Central (Illustration 1). Il s'étend sur une surface d'environ 460 km² ; il est bordé :

- au Nord par le Lot, qui s'écoule d'Est en Ouest ;
- au Sud par le Tarn, qui s'écoule de même que le Lot d'Est en Ouest, et qui le sépare du Causse Méjean ;
- à l'Est par les terrains cristallins et cristallophylliens du mont Lozère ;
- à l'Ouest par une ligne droite fictive suivant le ruisseau de St-Saturnin (qui rejoint le Lot à Banassac) jusqu'à sa source, puis vers le Cirque des Baumes qui borde le Tarn. Cette ligne arbitraire constitue la limite avec « l'Etude hydrogéologique de la partie ouest du Causse de Sauveterre et de ses Avants Causses » (Parc naturel régional des Grands Causses, mars 2006).

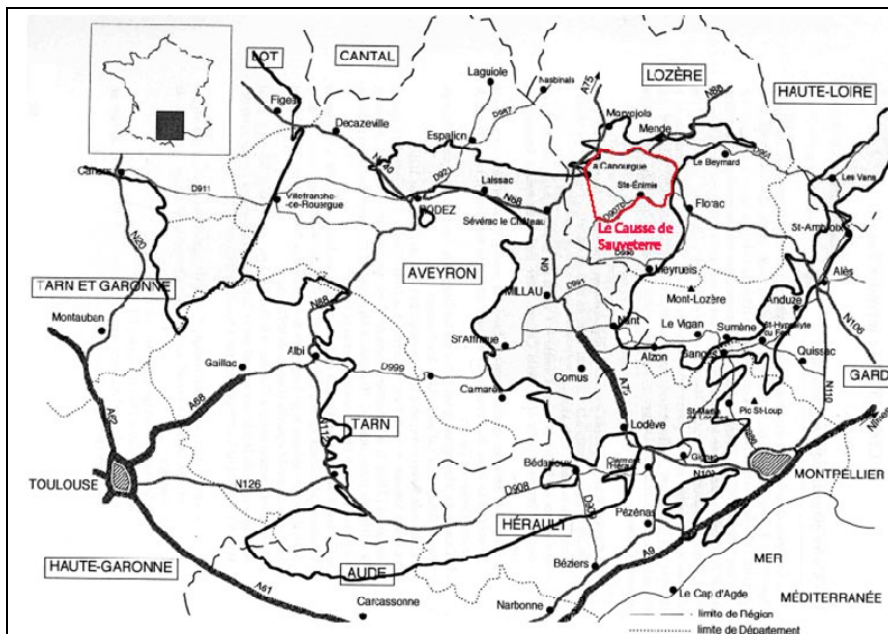


Illustration 1 - Localisation géographique du Causse de Sauveterre (CHARCOSSET, 1998).

La région des Causses se trouve au Sud du Massif Central, au Nord de la plaine languedocienne. Le Tarn, la Jonte et la Dourbie y ont creusé d'étroites vallées accidentées pour séparer du Nord au Sud, quatre grands Causses : Sauveterre, le Méjean, le Causse Noir et le Larzac (Illustration 2).

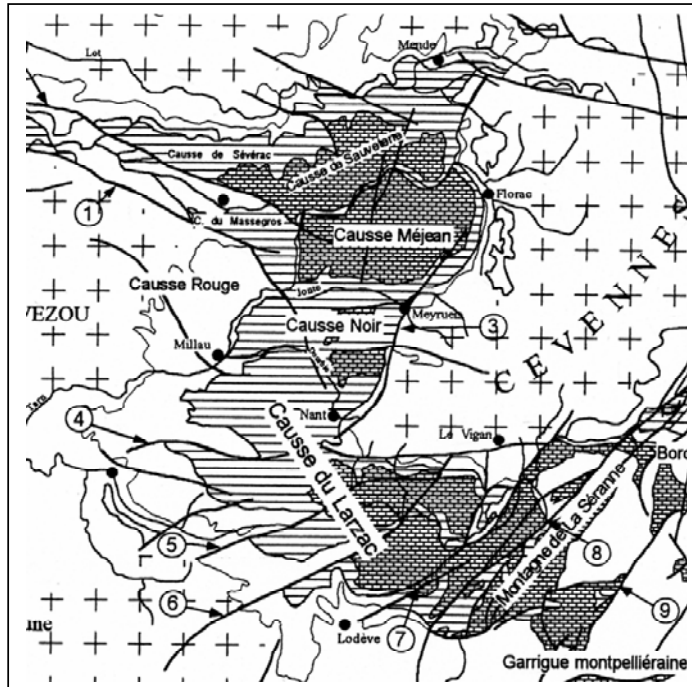


Illustration 2 - Localisation des différents Causses les uns par rapport aux autres (CHARCOSSET, 1998).

1.3. GEOLOGIE ET GEOMORPHOLOGIE

Les formations que l'on trouve sur l'ensemble du Causse sont d'âge jurassique ; leur nature lithologique (calcaires, dolomies, marnes et formations superficielles) marque le paysage. Plusieurs ensembles géomorphologiques se distinguent dans le paysage, notamment au niveau des bordures du Causse (Illustration 3) : les vires marneuses et les barres carbonatées dans les vallées et de vastes plateaux arides, associés à des dépressions fermées, comprenant de nombreux avens et grottes.

L'altimétrie du secteur varie entre 1100 m au Mont-Chabrié et 450 m à l'aval de la vallée du Tarn. Les deux vallées sont encaissées, le reste du Causse présente une morphologie plane à bosselée, les formations dessinant des vagues de grande longueur d'onde. Pour plus de détails, le lecteur est invité à se rapporter à la lecture du rapport concernant le Lot N°1 relatif à la Géologie, tectonique et géomorphologie (Rapport BRGM RP-54967-FR, octobre 2005).

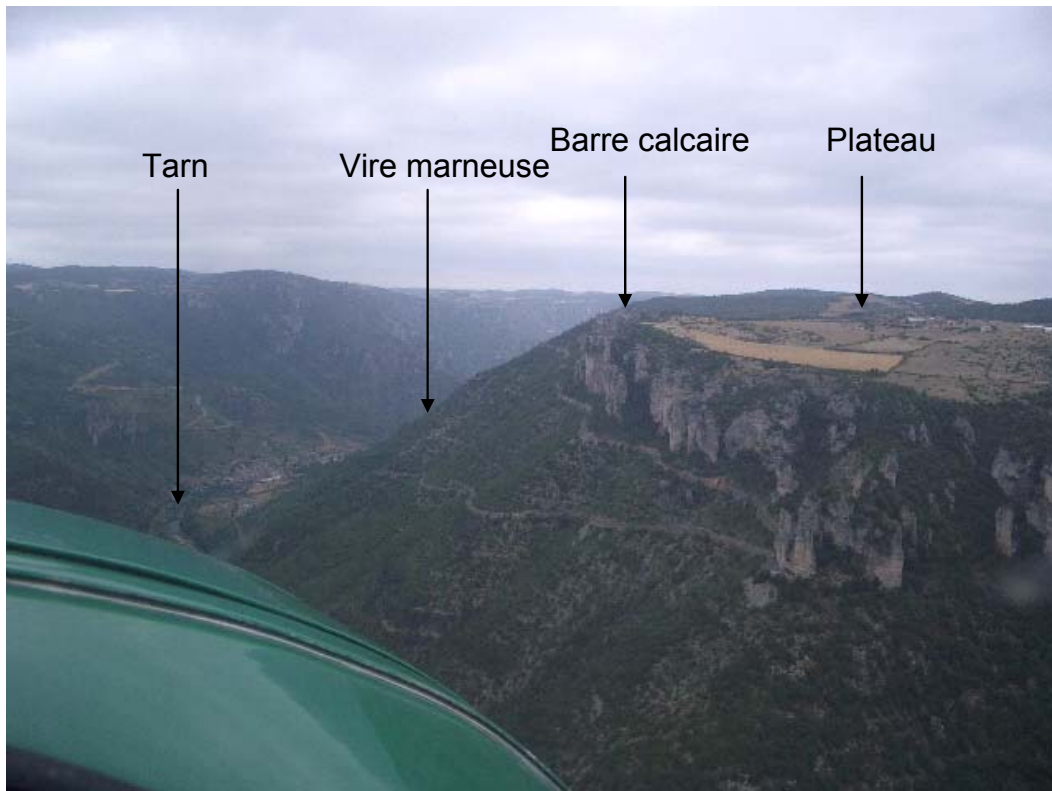


Illustration 3 - Vue d'avion de la vallée du Tarn et du Causse de Sauveterre (photo Garden M.)

1.4. HYDROGRAPHIE

Le Causse de Sauveterre est encadré par deux rivières qui coulent d'Est en Ouest, le Lot et le Tarn. Il n'y a pas de drainage à la surface du karst : les écoulements se produisent au sein du massif carbonaté suite à l'infiltration des eaux de pluie au niveau de réseaux de fissures ou de conduits karstiques. La géologie des formations du Jurassique permet la présence d'aquifères, grâce à l'alternance de niveaux perméables et imperméables.

1.5. OBJECTIFS DES LOTS N° 2 – HYDROMETRIE ET HYDROLOGIE ET N°3 – HYDROCHIMIE

Les objectifs du Lot N°2 concernant l'hydrométrie et l'hydrologie sont les suivants :

- (i) déterminer le fonctionnement hydraulique des systèmes karstiques,
- (ii) déterminer l'importance des réserves et évaluer la ressource des systèmes karstiques,

- (iii) valider la délimitation des bassins d'alimentation des systèmes karstiques et
- (iv) réaliser des bilans hydrologiques pour chaque système karstique.

Le bureau d'étude GAEA Ingénierie en qualité de sous-traitant du BRGM a assuré l'équipement des 4 stations de catégorie I (sources majeures) prévues dans le cahier des charges des clauses techniques et particulières, le suivi du débit (seuil, échelle limnimétrique, Thalimèdes de la société OTT), l'établissement des courbes de tarage de ces stations, l'installation du poste météorologique et le suivi hydrologique et météorologique au cours du projet, ainsi que le jaugeage des sources de catégories II et III (considérées comme ayant un bassin d'alimentation significatif au niveau du Causse de Sauveterre) en période d'étiage et de moyennes eaux pour la catégorie II et en période des basses eaux pour la catégorie III. Hervé Planeilles en qualité d'hydrogéologue et de directeur de GAEA ingénierie a participé à cette étude, ainsi que Jean Bonnie Gimie en qualité de technicien.



Les objectifs du Lot N°3 concernant l'hydrochimie sont les suivants :

- (i) déterminer le faciès hydrochimiques des différentes sources
- (ii) caractériser la qualité de l'eau des sources, du point de vue hydrochimique et bactériologique
- (iii) acquérir des données isotopiques (isotopes de l'eau) pour confirmer la zone de recharge des sources
- (iv) apporter des informations complémentaires à l'hydrologie, concernant la structure et le fonctionnement des principaux systèmes karstiques.

1.6. CONTENU DU RAPPORT

Le rapport est organisé en six chapitres. Après une introduction, des rappels méthodologiques concernant l'hydrométrie, l'interprétation hydrologique en contexte karstique et la caractérisation du fonctionnement hydrogéologique à l'aide des outils géochimiques sont donnés au chapitre 2. Les données hydrologiques et météorologiques acquises au cours de la présente étude sont présentées au chapitre 3. Le chapitre 4 concerne les données hydrochimiques, données disponibles, données acquises au cours de l'étude conformément au cahier des clauses techniques et particulières, ainsi que des données complémentaires acquises par le brgm. L'interprétation hydrologique et hydrochimique concernant les différentes catégories de sources étudiées (catégories I, II et III) côté Lot et côté Tarn est détaillée au cours du chapitre 5. Les résultats de l'analyse des débits classés et des courbes de récession des sources de catégorie I sont discutés. Du point de vue hydrochimique, la qualité de l'eau des sources échantillonnées ainsi que les types de faciès sont présentés ; une comparaison avec les résultats de l'étude du Causse de Sauveterre, secteur ouest est

de plus, effectuée. Les informations en termes de fonctionnement des systèmes karstiques à partir des données de suivi bimestriel sont détaillées. Les variations de débit des sources de catégories II et III pour différentes conditions hydrologiques (hautes et basses eaux) sont également discutées. Une synthèse hydrologique comprenant un bilan hydrologique des principales sources est finalement effectuée au terme du chapitre 5. Une synthèse des principaux résultats, ainsi que des perspectives et recommandations sont données au chapitre 6.

2. Rappels méthodologiques

2.1. HYDROMETRIE

2.1.1. Principes des jaugeages (GAEA)

Selon la configuration du site et du débit lors des campagnes de mesures, plusieurs méthodes de jaugeage ont été utilisées :

- *Jaugeage au vélocimètre :*

Ces jaugeages ont été réalisés lorsque la source présentait une section assez bien définie sur un certain linéaire. Lorsque cela a été possible, un aménagement préalable et sommaire du cours d'eau a été effectué, afin d'uniformiser la section de mesures et de stabiliser au maximum les variations de courant.

Ces jaugeages ont été réalisés pour l'établissement des courbes de tarage des sources de catégorie 1, et pour certaines sources de catégories II et III. Les mesures brutes de terrain ont été ensuite dépouillées par le logiciel « Barême© ».

Le jaugeage consiste à mesurer la vitesse du courant. Cette vitesse varie latéralement d'une berge à l'autre et verticalement de la surface de l'eau au fond du canal.

Le calcul de la vitesse moyenne du courant lors des jaugeages nécessite plusieurs mesures en différents points de la section mouillée.

Ces mesures ont été effectuées par l'utilisation du vélocimètre suivant :

✧ Marque : Hydreka Modèle moulinet : BFM002

✧ Spécifications techniques :

- Vitesse : 4,6 cm/s à 5 m/s

- Précision : 2,5 % ou 1 cm/s

- Pas : 10 cm

Cet appareil est composé d'une hélice, montée sur une perche, qui détecte la vitesse du courant et transmet les indications à un compteur d'impulsions. Connaissant les caractéristiques de l'hélice, le vélocimètre calcule alors la vitesse du courant.

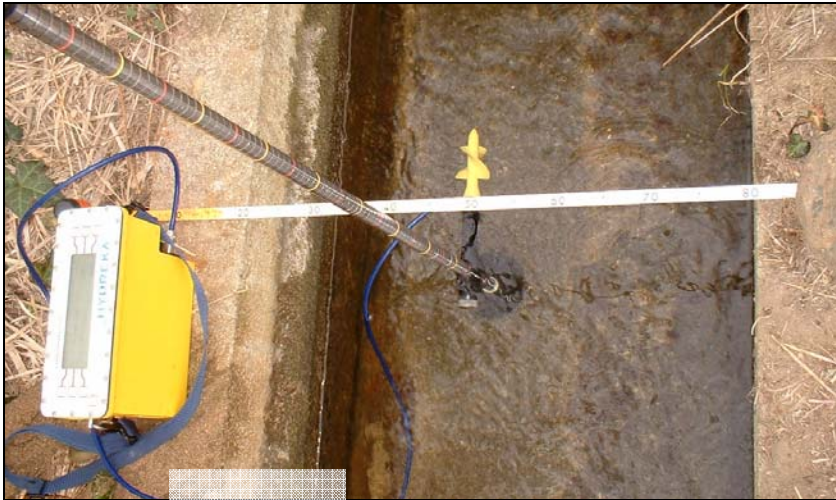


Illustration 4 - Vélocimètre Hydreka à moulinet BFM002

Au niveau de la section mouillée, les mesures de vitesse de courant sont réalisées pendant 30 secondes sur plusieurs verticales (distance par rapport à la rive), à trois profondeurs différentes lorsque c'est possible : le plus proche du fond, à mi-profondeur d'eau, et le plus proche de la surface.

Lorsque le jaugeage d'une section mouillée est terminé, on se trouve avec un certain nombre de données concernant la position des points de mesure (profondeur et distance de la berge) et les vitesses correspondantes.

Afin de déduire le débit correspondant à la hauteur d'eau au moment du jaugeage, les données récoltées sont traitées par le logiciel « Barème© ».

- *Jaugeage au seau :*

Ces jaugeages ont été réalisés sur des sources de catégories 2 et 3, lorsque la configuration du site le permettait (aménagement existant de fontaines, etc.).

- *Jaugeage par estimation :*

Lorsque les deux méthodes précédentes n'ont pu être appliquées (section mouillée trop peu profonde, débit beaucoup trop important, sources multiples et diffuses), des estimations du débit ont été effectuées de la manière suivante :

- définition des sections mouillées : mesures de la largeur du profil et profondeur des verticales ;
- estimation visuelle de la vitesse du courant en surface : concerne les sections mouillées à faible profondeur (< 3 cm) ;

- mesure de la vitesse du courant au vélocimètre uniquement sur quelques points : concerne les sources à débit trop important.

Ces mesures ont été ensuite dépouillées par le logiciel « Barème© ».

2.1.2. Traitement des jaugeages à l'aide du logiciel « Barème© »

Ce logiciel a été conçu et réalisé par Pierre-Marie BECHON (DIREN Rhône Alpes). L'utilisation de ce logiciel pour cette étude nous a été accordée par la DIREN Rhône Alpes.

Ce logiciel permet de calculer le débit à l'aide des données récoltées lors des jaugeages, soit :

- les mesures des sections mouillées,
- le nombre de verticales,
- la profondeur du moulinet et le nombre de tours effectués,
- éventuellement la hauteur d'eau lue sur le limnimètre lors du jaugeage.

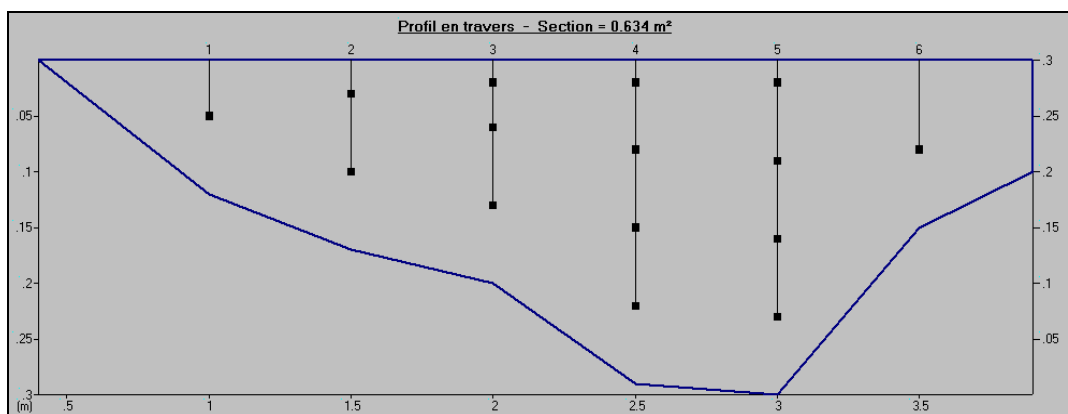


Illustration 5 - Exemple d'un profil d'une section mouillée

La courbe des vitesses en fonction de la profondeur (dite parabole des vitesses) est calculée pour chaque verticale. La planimétrie de la surface obtenue donne le débit par unité de largeur au niveau de la verticale considérée. On l'appelle débit unitaire (q_u) et il est exprimé en m^2/s .

La courbe de variation de ces débits unitaires suivant la largeur de la section est ensuite calculée. La planimétrie de l'aire délimitée par cette courbe donne le débit en m^3/s .

L'obtention de la valeur du débit en fonction de la hauteur d'eau mesurée sur le limnimètre lors du jaugeage permet de tracer la courbe de tarage des stations de mesures.



Illustration 6 - Jaugeage au micromoulinet de la source du Sabot.

2.1.3. Interprétation des données hydrologiques en contexte karstique

a) Bilan hydrologique et surface d'alimentation

L'étude des bilans hydrologiques repose sur l'analyse de la cohérence qui existe entre les flux d'entrée et les flux de sortie à l'exutoire d'un système ; elle permet de caractériser globalement les limites de l'impluvium du système. La méthode consiste à évaluer pour une période donnée, le volume d'eau écoulé à l'exutoire (V) et le volume des pluies qui renouvelle les réserves et entretient l'écoulement dans le système. Elle repose ainsi 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). La partie des précipitations qui ruisselle ne contribue pas à l'écoulement de l'exutoire du système, telle est l'hypothèse faite pour les systèmes karstiques. Les pluies efficaces sont déterminées généralement au pas de temps mensuel selon la formule suivante :

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

La surface du bassin d'alimentation du système est déterminée à l'aide du rapport suivant :

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

L'estimation de l'ETR est le problème de base de la méthode, la détermination des paramètres climatiques sur les zones d'études n'étant pas aisée. Ainsi, la méthode d'estimation de l'ETR fréquemment utilisée consiste à calculer le déficit d'écoulement à partir de la formule de Turc, qui permet de s'affranchir des paramètres climatiques. Le calcul du déficit d'écoulement D 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 (mm) et T la température (°C) moyenne de la source. La surface d'alimentation du système est alors déterminée en appliquant 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 d'eau précipitée et D le déficit d'écoulement.

Par ailleurs, la surface du bassin d'alimentation est également déterminée par modélisation, lors de la décomposition de l'hydrogramme à l'aide de modélisation inverse (Tempo).

b) Analyse des débits classés

La méthode d'analyse des débits classés a pour objectif de caractériser les différents régimes d'écoulement observables sur un exutoire. Il s'agit d'identifier des événements particuliers de type mise en fonctionnement d'un trop plein, fuites vers un autre système à partir d'une analyse des modifications qu'ils induisent sur les hydrogrammes (Marsaud, 1996).

La méthode proposée par Mangin (1971) consiste à classer les débits par groupes afin de mettre en évidence des valeurs de débits critiques : valeurs anormalement élevées ou faibles. Une loi statistique est ajustée liant les classes de débit à leurs fréquences d'apparition.

L'interprétation des graphes de débits classés repose sur l'identification d'anomalies affectant la droite représentative ; ces anomalies se marquent par des modifications de la pente de la droite (Tableau 1 et Illustration 7).

Cette méthode permet de :

- mettre en évidence la présence d'un impluvium fluctuant au travers des fuites ou d'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.

Cas	Pentes des droites	Position de la rupture	Interprétation
A	$\alpha_2 > \alpha_1$	Forts pourcentages	- Mise en fonctionnement de trop-plein - Fuites vers un autre système - Stockage momentané - Fuites ou débordement de la station de jaugeage lors des hautes eaux
B	$\alpha_2 < \alpha_1$		- Apports en provenance d'un autre système - La station de jaugeage prend en compte lors des crues des écoulements n'appartenant pas au système
C	$\alpha_2 < \alpha_1$	Faibles pourcentages	- Apports d'une réserve issue d'un cycle antérieur
D	$\alpha_2 > \alpha_1$		- Constitution d'une réserve
E	$\alpha_2 > \alpha_1$ $\alpha_3 < \alpha_2$	Double rupture	- Piégeage d'une réserve lors de la décrue et restitution au cours du tarissement

Tableau 1 - Interprétation des ruptures de pente de la droite représentative des débits classés.

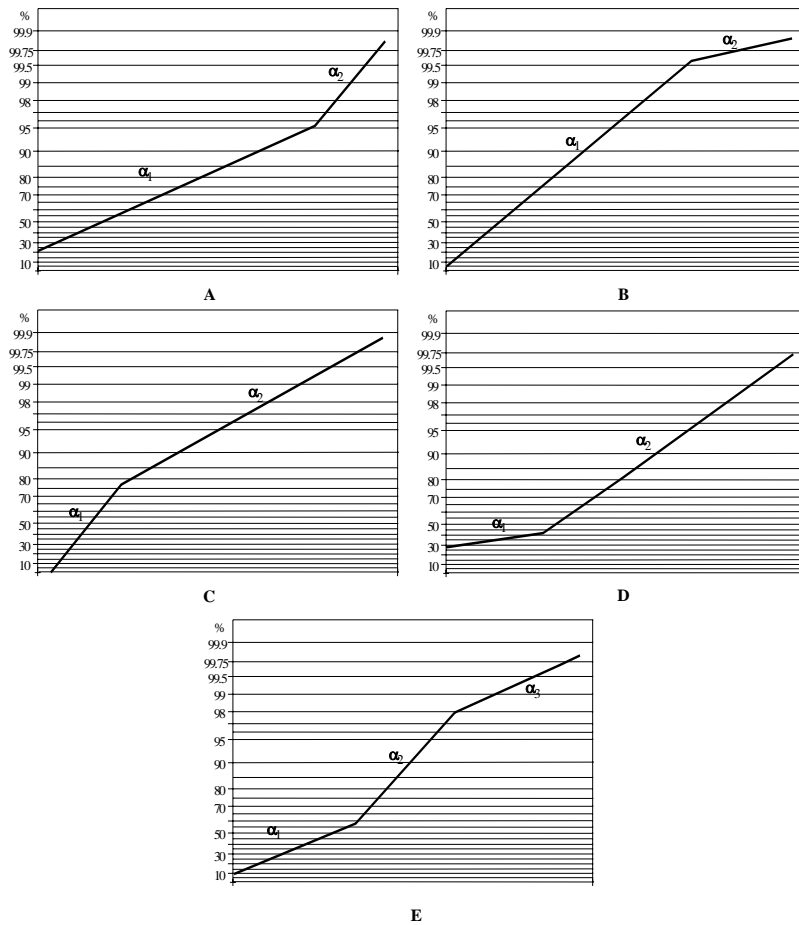


Illustration 7 - Différents cas de rupture de pente de la droite représentative des débits classés (Marsaud, 1996).

c) Analyse des courbes de récession

L'analyse des courbes de récession consiste à étudier la partie décroissante de l'hydrogramme de crue d'une source, appelée récession, à partir d'un modèle de type global ou "boîte noire" qui assimile le système karstique à des réservoirs se vidangeant les uns dans les autres.

La méthode de l'analyse des courbes de récession des hydrogrammes des sources karstiques a été développée en 1970 par Mangin; elle repose sur la décomposition de l'hydrogramme résultant de la vidange d'un système conceptualisé par un modèle constitué de deux réservoirs indépendants représentant la zone noyée et la zone d'infiltration. Il est parfois plus judicieux de prendre en compte de manière différenciée les dynamiques d'écoulements au sein de la zone d'infiltration (infiltration rapide et infiltration lente) afin de mieux reproduire les évolutions observées lors des récessions particulièrement longue (> 100 jours, Ladouche et al, 2005).

Deux parties peuvent être distinguées sur les courbes de récession :

- la décrue, durant laquelle l'infiltration par les pluies efficaces influence la vidange du réservoir de la zone noyée,
- le tarissement non influencé, qui débute à l'instant où les débits d'infiltration deviennent nuls, qui correspond à la vidange du réservoir de la zone noyée (réservoir principal) et qui n'obéit qu'à la loi de Maillet.

Le modèle initialement proposé par Mangin possède donc deux réservoirs, un pour la zone d'infiltration qui se vidange avec un débit q , et un autre qui correspond à la zone noyée et qui se vidange avec un débit Q (Marsaud, 1996).

La description analytique du modèle se fait à l'aide de la formule suivante :

$$Q(t) = \varphi(t) + \psi(t) \quad (5)$$

Où $\varphi(t)$ décrit la vidange de la zone noyée et $\psi(t)$ se rapporte au fonctionnement de la zone d'infiltration.

Le modèle pour décrire la vidange de la zone noyée est le modèle de Maillet, décrit à l'aide de la formule suivante :

$$\varphi(t) = Q_{R0} * e^{-\alpha t} \quad (6)$$

avec α coefficient de tarissement. Le débit Q_{R0} ne possède aucune réalité physique, il correspond à l'extrapolation de la courbe de tarissement à l'instant de la pointe de crue.

Le modèle utilisé pour décrire la fonction d'infiltration a été établi de manière empirique à partir de l'analyse de nombreuses décrues et de l'infiltration dans une grotte (Mangin, 1970).

C'est une fonction homographique :

$$\psi(t) = q_0 \frac{1 - \eta t}{1 - \varepsilon t} \quad (7)$$

avec q_0 : débit d'infiltration à l'instant t_0 marquant la pointe de crue,

ε : coefficient d'hétérogénéité d'écoulement,

η : coefficient de vitesse d'infiltration, est égal à l'inverse du temps d'infiltration (t_i).

La formulation proposée par Ladouche et al. (2005) pour décrire le fonctionnement de la fonction d'infiltration lorsque les récessions sont particulièrement longues (> 100 jours) est la suivante. Deux fonctions homographiques distinctes $\psi_{1}(t)$ et $\psi_{2}(t)$ sont utilisées pour décrire l'infiltration rapide et l'infiltration lente ou retardée :

Infiltration rapide : $\psi_1(t) = q_{o1} \frac{1 - \eta_1 t}{1 - \varepsilon_1 t}$

Infiltration lente (ou retardée) : $\psi_2(t) = q_{o2} \frac{1 - \eta_2 t}{1 - \varepsilon_2 t}$

La vidange de la zone noyée de l'aquifère est toujours décrite à l'aide du modèle de Maillet.

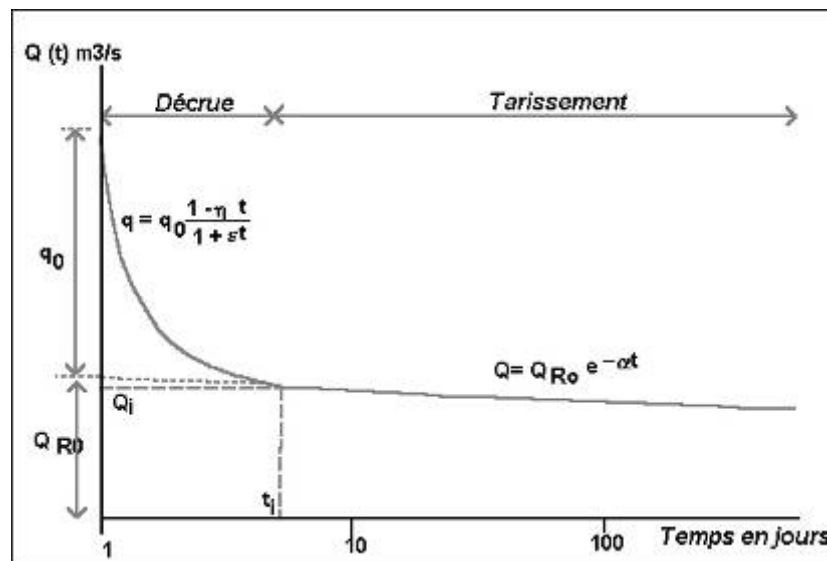


Illustration 8 - Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (1970).

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 observée des débits.

Une classification a été établie par Mangin (1975) à partir des résultats de l'analyse des courbes de récession dans le but de comparer les systèmes karstiques entre eux.

Cette classification repose sur le calcul de deux coefficients :

- le **paramètre k** qui est égal au rapport entre la plus grande valeur de volume dynamique observée sur une grande période et le volume de transit inter-annuel calculé sur la même période. Il traduit l'aptitude du système à stocker les précipitations et à les restituer progressivement au cours du 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 la 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 (Marsaud, 1996).

Le report des valeurs de k et de i sur un diagramme permet d'établir une comparaison avec des systèmes de référence. Les données obtenues sur différents systèmes ont ainsi conduit Mangin à définir quatre domaines (Illustration 9) :

- le domaine des systèmes complexes, généralement des systèmes de grande taille et dont la structure est faite de nombreux sous-systèmes,
- le domaine des systèmes karstiques plus karstifiés à l'amont qu'à l'aval, et avec des retards dans l'alimentation dus soit à la présence de terrains non karstiques, soit à une couverture neigeuse importante,
- le domaine des systèmes possédant un réseau de drainage très développé, avec une zone noyée peu importante;
- le domaine des systèmes possédant un réseau spéléologique bien développé et débouchant à l'aval sur un important karst noyé.

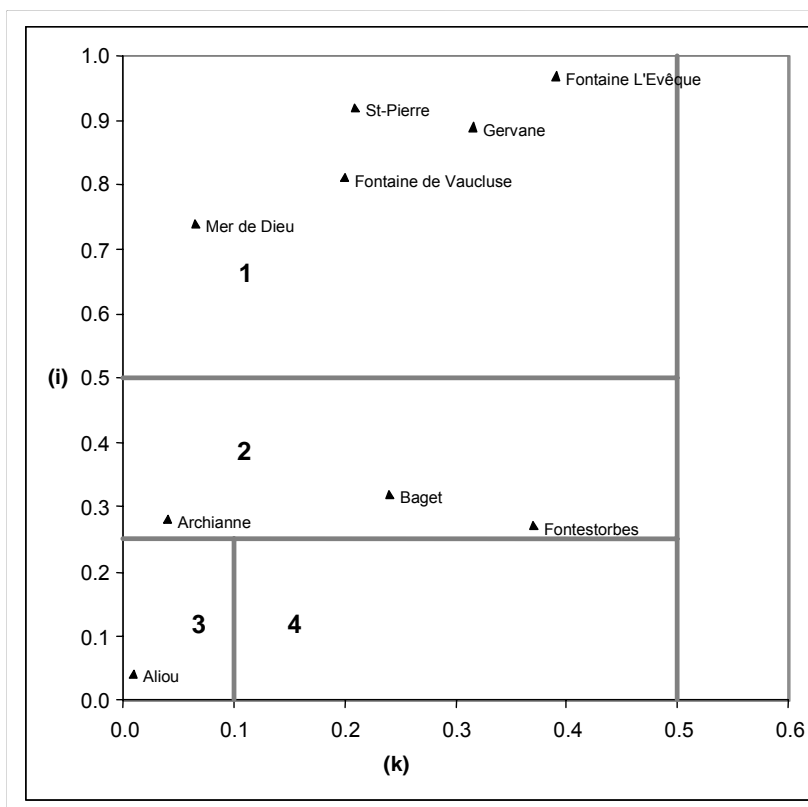


Illustration 9 - Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession (Mangin, 1975) – (i) paramètre d'infiltration et (k) pouvoir régulateur.

d) Analyse corrélatoire et spectrale

Les analyses corrélatoire et spectrale s'inscrivent dans le cadre de l'approche dite fonctionnelle de l'étude des systèmes karstiques et se basent sur les techniques de l'analyse statistique des séries chronologiques (Jenkins and Watts, 1968 ; Box and Jenkins, 1976 ; Mangin 1981).

Le principe de base de ces méthodes est d'assimiler le système karstique à un filtre qui laisse plus ou moins passer l'information contenue dans un signal d'entrée (l'état du système ne dépend que des entrées les plus récentes). Dans cette approche, l'aquifère est assimilé à une « boîte noire » dont la pluie et le débit à l'exutoire représentent respectivement l'entrée et la sortie. La méthode consiste donc à analyser et comparer les signaux d'entrée (précipitation) et de sortie (débit). Les chroniques des signaux d'entrée et de sortie peuvent être traitées séparément dans le domaine temporel (analyse corrélatoire simple), ou dans le domaine fréquentiel (analyse spectrale simple) ou bien l'un par rapport à l'autre (analyses corrélatoires et spectrales croisées).

L'analyse corrélatoire simple qui traduit la dépendance dans le temps des événements affectant la chronique, selon des intervalles de temps de plus en plus grand, permet de tester le caractère répétitif des séries temporelles et leurs éventuelles natures cycliques. Le degré de ressemblance d'une série avec la même série décalée dans le temps est déterminé à l'aide de la fonction d'autocorrélation définie comme la valeur de la corrélation linéaire entre les valeurs des deux séries. Sur les chroniques de débit, cette analyse permet de caractériser « l'effet mémoire » de l'aquifère qui traduit la dépendance dans le temps des valeurs de débit en présentant une décroissance plus ou moins rapide de la corrélation. En d'autre terme, « l'effet mémoire » est directement lié à l'inertie du système ; « l'effet mémoire » étant d'autant plus grand que le filtrage introduit par le système est important. *L'effet mémoire est défini comme le nombre de jours nécessaire pour que la fonction d'autocorrélation (r_k) atteigne la valeur de 0.2 (Mangin 1981).* Ce paramètre peut être utilisé pour décrire les réserves dynamiques (qui s'écoulent) de l'aquifère et pour classer les aquifères karstiques (Mangin, 1982, 1984 ; Marsaud 1996 ; Grasso 1998).

L'analyse spectrale simple (densité spectrale de puissance DSP) permet d'identifier les différentes composantes de la variance totale en fonction de la fréquence. En d'autres termes, la densité spectrale de puissance permet de renseigner (1) sur la tendance du système à long terme, (2) sur les phénomènes périodiques saisonniers et (3) sur les phénomènes purement aléatoires assimilables au bruit de fond. D'un point de vue mathématique, la densité spectrale de puissance est déterminée par la transformée de Fourier du corrélogramme simple.

A l'aide de la fonction de densité spectrale de puissance du débit, Mangin (1984) a défini deux paramètres qui permettent d'accéder au fonctionnement des systèmes karstiques :

- « Le Temps de régulation ». Ce paramètre renseigne sur la durée d'influence engendrée par une impulsion unitaire (pluie) sur le système et donne des informations sur l'organisation du transfert des impulsions (pluie). Il est égal à

l'ordonnée maximale de la DSP divisée par 2. Plus le temps de régulation est grand, plus le système possède un comportement inertiel, plus le volume des réserves est important et moins le système est karstifié.

- « La *Fréquence de coupure* (f_c) ». Elle correspond à la fréquence pour laquelle la densité de puissance devient négligeable. Au-delà de cette fréquence, le signal est nul ou assimilable au bruit de fond. Un système possédant un comportement inertiel filtre l'information à court terme (jour, semaine), l'information portée par les pluies sera essentiellement transformée dans les basses fréquences (cycle annuel).

L'analyse croisée (corrélatoire et spectrale) permet l'étude de la relation Pluie-Débit et fournit une image approchée de la réponse impulsionnelle du système par le corrélogramme croisé. Celui ci est complété par quatre fonctions dans le domaine fréquentiel :

- La « *fonction d'amplitude* » fournit une décomposition de la covariance totale entre « entrée » et « sortie » en fonction de la fréquence et indique comment la fonction d'entrée est transformée par le système. Elle permet en outre d'affiner le choix de la fréquence de coupure, car la covariance doit être négligeable à partir de la fréquence de coupure déterminée sur la densité spectrale de puissance (DSP).
- La « *fonction de phase* » permet d'estimer le déphasage (ϕ) entre les signaux d'entrée et de sortie. Selon Padilla et Pudido-Bosch (1995), le retard moyen sur la gamme des fréquences considérées ($< f_c$) peut être estimé à partir de la pente de la droite de régression (A) à l'aide de la formule :

$$d = (A/380^\circ) \quad (8)$$

- La « *fonction de cohérence* ». Elle renseigne sur la manière dont varie la corrélation entre les signaux d'entrée et de sortie du système en fonction de la fréquence. Cette fonction permet de caractériser la linéarité et la stationnarité des systèmes.

La linéarité est à mettre principalement en relation avec le drainage de l'aquifère. Si le système est bien drainé, les eaux sont rapidement évacuées vers l'exutoire, et à une forte pluie correspond une forte crue. La fonction de cohérence présente dans ce cas des valeurs importantes (en moyenne 0.8 à 0.9). Pour un système mal drainé, les eaux de pluie infiltrées contribuent d'avantage à la reconstitution des réserves, ce qui se traduit par une faible cohérence (environ 0.5).

La stationnarité s'exprime sur la fonction de cohérence par des variations en fonction des fréquences. Mangin (1981) montre que la stationnarité s'exprime sous forme de seuils d'autant plus marqués que le système est bien drainé. En effet, dans le cas d'un système bien drainé la régulation est faible et la présence et l'importance des réserves au sein du système sont fortement conditionnées par la répartition dans le temps des précipitations. Si les précipitations sont réparties de façon homogène dans le temps, le système aquifère présentera toujours à peu près le même volume de réserve et son état varie peu, tout comme sa réponse impulsionnelle. A l'inverse, si les pluies sont réparties de manière très hétérogène dans le temps, les phases de stockage et déstockage vont engendrer des variations de l'état du système et donc de sa réponse aux précipitations. La fonction de cohérence présentera alors de grande variation.

- La « fonction de gain ». Elle renseigne sur la manière dont le signal d'entrée est amplifié ou atténué par le système. Selon Mangin (1981), la fonction de gain met en évidence le rôle joué par les réserves du système. D'un point de vue qualitatif, la recharge des réserves tend à provoquer une atténuation du signal d'entrée (pluie) pour les hautes fréquences au profit d'une amplification (gain > 1) pour les basses fréquences.

d) Décomposition des hydrogrammes – modélisation inverse des systèmes karstiques

La modélisation inverse fait appel à des techniques numériques complexes s'appuyant sur différentes méthodes de régularisation. Le problème inverse a généralement plusieurs solutions (parfois une infinité de solutions) et il convient, pour le résoudre, d'ajouter des informations pertinentes permettant de préciser la réalité physique des phénomènes, assurant ainsi l'unicité de la solution. Ce type de modélisation est effectué à l'aide du logiciel développé par le brgm (Pinault, 2001), logiciel de traitement et de modélisation de séries temporelles en hydrogéologie et hydrogéochimie. Ce logiciel est également utilisé pour procéder aux analyses corrélatoires et spectrales, simples ou croisées.

D'une manière générale, la modélisation des écoulements consiste à calculer la réponse impulsionnelle lente Γ_l et rapide Γ_r , associée aux différents types d'écoulement. Le transfert rapide peut être dû au ruissellement de surface ou à l'effet de chasse résultant du comportement de la zone non saturée. Le transfert lent met en jeu les différents processus d'infiltration, induisant un retard plus ou moins important entre la pluie et le débit (ou la variation d'un niveau piézométrique) observés en sortie: infiltration lente et rapide, ruissellement différé,...

L'utilisation de deux réponses impulsionnelles est résolue à l'aide d'un processus itératif. L'équation du transport s'écrit:

$$S(t) = Surface.(\Gamma_r * P_r + \Gamma_l * P_l) + a.t + b \text{ (débit)}$$

où * représente le produit de convolution discret $(f * g)(k) = \sum_{i=0,1} f(i).g(k-i)$, t le temps, $S(t)$ la sortie de l'hydrosystème (débit, niveau piézométrique), le terme $a.t + b$ la tendance, *Surface* la surface du bassin d'alimentation, P_r et P_l les composantes de la pluie induisant le transfert rapide et lent, respectivement. Les réponses impulsionnelles Γ_l et Γ_r sont normalisées (aire unité) et sont donc sans dimension.

Le système peut être constitué de une ou deux connexions hydrauliques en entrée. La fonction de transfert linéaire comprend autant de composantes qu'il y a d'entrées.

Lorsque deux entrées sont fortement corrélées entre elles, leur séparation peut néanmoins être réalisée dans de bonnes conditions lorsque leur temps de régulation diffère de manière significative (leur temps de réponse après un épisode de pluie). Il y

a alors lieu de choisir la réponse impulsionnelle linéaire la plus courte possible (modèle général) ou bien un modèle analytique.

La somme $P_{eff} = P_r + P_l$ représente la pluie efficace P_{eff} .

• **Pluie efficace et transfert non-linéaire**

C'est la hauteur de pluie minimale permettant d'engendrer un débit à l'exutoire d'un bassin versant ou encore l'augmentation d'un niveau piézométrique. Le modèle inverse peut calculer la pluie efficace à partir d'une séquence de pluie, moyennant la connaissance de l'ETP (ou de la température journalière).

Elle est calculée à partir d'un seuil $\Omega(t)$ représentant la réserve utile des sols de telle sorte que :

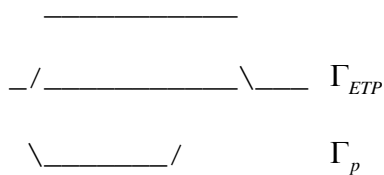
$$P_{eff} = Pluie - \Omega(t) \quad \text{si } Pluie > \Omega(t)$$

$$P_{eff} = 0 \quad \text{si } Pluie \leq \Omega(t)$$

Le seuil $\Omega(t)$ est lui-même calculé à partir de la pluie et de l'ETP (ou température journalière) passées de sorte que :

$$\Omega(t) = \Gamma_p * Pluie + \Gamma_{ETP} * ETP + Cste$$

Les réponses impulsionnelles Γ_p et Γ_{ETP} sont représentées par des trapèzes (modèle à 2×4 degrés de liberté et la constante $Cste$, soit 9 degrés de liberté) :



de sorte que $\Gamma_{ETP} > 0$ et $\Gamma_p < 0$: l'ETP augmente le seuil $\Omega(t)$ alors que la pluie le fait diminuer.

Le produit de convolution de l'ETP par la partie positive de la R.I. donne la contribution de l'ETP au seuil de pluie efficace (l'ETP ou T ont une contribution positive sur le seuil car l'une et l'autre de ces grandeurs caractérise la perte en eau des sols et de la végétation). Le produit de convolution de la pluie par la partie négative de la R.I. donne la contribution de la pluie au seuil $\Omega(t)$: la pluie a une contribution négative sur le seuil, suite à la recharge des sols.

La part relative $\alpha(t) = P_r / (P_r + P_l)$ de la pluie impliquée dans le transfert rapide est donnée par la fonction $\alpha(t)$ qui, elle-même, dépend de la pluie efficace passée :

$$\alpha(t) = \Gamma_{P_{eff}} * P_{eff} = \Gamma_{P_{eff}} * (P_r + P_l)$$

La réponse impulsionnelle $\Gamma_{P_{eff}}$ est, là encore, représentée par un trapèze (modèle à 4 degrés de liberté) :

Le front de montée caractérise la durée du processus conduisant à la modification de l'état du bassin : en effet, le transfert rapide résulte généralement de phénomènes transitoires induits par un régime pluviométrique de forte intensité ou de longue durée. Ces processus comprennent la saturation en eau des sols, l'extension de zones humides dans les bas-fonds ou l'accroissement de la charge hydraulique dans un aquifère karstique.

La longueur de la plus petite base du trapèze régit l'amplitude des phénomènes de transfert rapide. En particulier, la fonction $\alpha(t)$ peut prendre d'importantes valeurs lorsque la longueur de cette base est supérieure à la durée moyenne séparant 2 événements de pluie efficace consécutifs, en raison du phénomène d'empilement observé lors du produit de convolution de la pluie efficace par ce trapèze (un événement de pluie efficace fait monter la fonction $\alpha(t)$ alors que celle-ci n'était pas encore redescendue à 0, suite à l'événement 'Pluie' précédent).

Les solutions du modèle inverse sont les réponses impulsionnelles Γ_l et Γ_r , $\Omega(t)$ ($\Gamma_p, \Gamma_{ETP}, Cste$) et $\alpha(t)$ ($\Gamma_{P_{eff}}$).

• **Calcul du seuil de pluie efficace $\Omega(t)$ ou réserve utile des sols**

La prise en compte de la loi de conservation :

$$\sum P_{eff} \times Surface = \sum S(t)$$

applicable également aux flux ainsi qu'aux niveaux piézométriques, suppose le calcul de la pluie efficace à partir de la réserve utile des sols $\Omega(t)$. Cette fonction du temps a la même dimension que la pluie (hauteur d'eau par unité de temps) : c'est, à un instant donné, la capacité en eau des sols.

Lorsque la sortie représente un niveau piézométrique, le seuil $\Omega(t)$ inclut également le ruissellement de surface, à moins que celui-ci ne soit représenté par l'une des variables d'entrée (dite 'connexion hydraulique').

A un temps t donné, la hauteur de pluie efficace est :

- la différence entre la hauteur de pluie et ce seuil si la hauteur de pluie est supérieure ou égale au seuil,
- zéro si la hauteur de pluie est inférieure au seuil.

Cette approche visant à estimer la pluie efficace à partir d'un modèle inverse présente l'avantage de ne faire aucune hypothèse sur le temps de régulation des processus de transfert dans les sols, contrairement aux modèles à réservoirs. Ces modèles assimilent en effet le sol à un réservoir, la pluie n'étant efficace que lorsque le réservoir déborde. Le niveau d'eau dans le réservoir, proportionnel à la hauteur de pluie moins l'évapotranspiration, est remis à jour au pas journalier. Or les temps de régulation des sols étant généralement supérieurs à la journée en raison des transferts entre les macropores et les micropores, ces modèles doivent surestimer la recharge utile des sols pour exprimer une pluie efficace en accord avec les observations.

• Contribution de la pluie au transfert rapide $\alpha(t)$

Les processus de transfert intervenant à l'échelle de bassins font généralement intervenir plusieurs réponses impulsionnelles (ou fonctions de transfert). Deux réponses impulsionnelles peuvent être utilisées simultanément :

- une courte réponse impulsionnelle dite rapide, destinée à caractériser le ruissellement de surface d'un bassin versant ou la vidange gravitaire d'une nappe par 'effet de chasse', c'est-à-dire après qu'une continuité hydraulique entre la zone non saturée et la zone saturée se soit établie,
- une réponse impulsionnelle lente, nécessairement plus longue que la précédente, décrivant à la fois les processus de transfert rapides (s'ils sont linéaires) et différés : infiltration,...

Pour cela, la pluie efficace est décomposée en une **composante rapide** P_r et une **composante lente** P_l , chacune de ces composantes étant transférée à l'exutoire ou dans la nappe au moyen de la réponse impulsionnelle correspondante. La contribution de la pluie efficace au transfert rapide est décrite au moyen de la fonction $\alpha(t)$ dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1. Cette fonction donne, au temps t , la contribution de la pluie efficace impliquée dans le transfert rapide.

• Coefficient d'ajustement de Nash

La qualité de l'ajustement d'une série observée $S(t)$ à l'aide d'un modèle $M(t)$ peut également être mesurée à partir du coefficient d'ajustement de Nash. C'est un paramètre sans dimension : $Nash=1-Z$, où Z est égal au rapport de la somme des carrés du résidu sur la variance de la série observée (moment centré d'ordre 2) :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{n=1,N} [S(n) - M(n)]^2}{\sum_{n=1,N} [S(n) - \bar{S}]^2}$$

où \bar{S} représente la moyenne de la série observée $S(n)$, N est la taille de l'échantillon (longueur des séries en l'occurrence).

Le coefficient de Nash caractérise donc la distance entre la série observée et le modèle, notion incluant à la fois les erreurs systématiques (biais) et aléatoires (bruit). Il est très utilisé par les hydrologues ainsi que les hydrogéologues.

2.1.4. Caractérisation du fonctionnement hydrogéologique à l'aide des outils géochimiques

a) *Apport de l'approche hydrochimique et isotopique*

L'hydrogéochimie, un outil pour l'hydrogéologue, est définie comme étant « la connaissance des caractéristiques chimiques des eaux souterraines, des processus de leur acquisition et des lois qui régissent les échanges entre l'eau, le sol et le sous-sol » (Castagny et Margat, 1977). La réponse « chimique » d'un système karstique à une pluie constitue un moyen d'identification et de reconnaissance de l'organisation et du fonctionnement du système (Plagnes, 1997).

Quelques définitions et hypothèses de travail sont présentées ici afin de donner les clefs de l'interprétation dans les approches hydrogéochimiques utilisées dans la caractérisation du fonctionnement et de la structure des différents systèmes karstiques étudiés et dont les résultats sont présentés essentiellement dans les volumes 2, 4 et de synthèse.

L'identification des signatures géochimiques des différents compartiments d'un système karstique est basée sur l'interprétation des variations des signatures géochimiques en fonction des conditions hydrologiques et de plus repose sur un certain nombre d'hypothèses concernant la structure d'un aquifère karstique. Les variations du chimisme aux exutoires apportent ainsi des informations sur la structure et sur le fonctionnement du système. Les traceurs caractérisant les diverses parties du système karstique (épikarst, zone d'infiltration, zone noyée, drain principal, ...) informent sur la structure de l'aquifère. Ces différents traceurs permettent de vérifier le rôle de la lithologie de l'encaissant ou d'estimer les contaminations du système. Les traceurs qui caractérisent les écoulements (vitesse, conditions de circulations, mélanges d'eaux d'origine différente, ...) renseignent sur le fonctionnement du système karstique.

En **période d'étiage avancé**, on suppose que l'écoulement à l'exutoire est uniquement assuré par la vidange des systèmes annexes aux drains karstiques (milieu fissuré ou grands vides mal connectés). Les teneurs en éléments chimiques des échantillons prélevés lors de cette période caractérisent la signature géochimique de l'eau qui circule au sein de la partie capacitive de la **zone noyée** du système karstique.

En **période de crue**, les débits mesurés aux exutoires des systèmes karstiques peuvent être expliqués comme résultant de la superposition de différents écoulements distincts tels que par exemple :

- un **écoulement de base** assuré par le drainage des systèmes annexes au drainage de la zone noyée

- un **écoulement épikarstique** assuré par le drainage plus ou moins rapide de l'eau du réservoir épikarstique
- un **écoulement « rapide »** assuré par une partie de la pluie efficace qui est collectée par les conduits plus ou moins verticaux directement connectés au réseau de conduits karstiques de la zone noyée (le réservoir épikarstique est ainsi court-circuité).

b) Utilisation des « traceurs » géochimiques

Quelles informations peut on obtenir à partir des espèces majeures ?

• Les chlorures (Cl⁻)

La charge électrique négative des ions chlorures n'est pas propice aux phénomènes d'adsorption. Les ions chlorures sont généralement considérés comme conservatifs et peuvent, à ce titre, être utilisés pour caractériser les phénomènes de mélange d'eaux de qualités différentes. Les chlorures sont globalement peu présents dans les eaux d'origine karstique ; ils sont associés à la présence de minéraux évaporitiques (NaCl, KCl, MgCl, ...) qui requièrent d'importantes saturations avant précipitation. Les concentrations en chlorures inférieures à 10 mg/l dans les eaux des milieux karstiques sont généralement expliquées par le processus d'évapotranspiration qui conduit à une augmentation des concentrations en chlorures des eaux de pluie. A l'exception de ce phénomène, les concentrations élevées (>10 mg/l) dans les aquifères peuvent être attribuées :

- à des apports d'eaux usées (pollution anthropique),
- à des intrusions d'eau marine,
- ou au lessivage de formation évaporitique.

• Le sodium (Na⁺)

Dans les milieux karstiques, étant donné les basses températures (<20°C), les temps d'interaction rapides et les faibles pourcentages en minéraux silicatés (feldspath, plagioclases) contenus dans les carbonates, la production de sodium par dissolution est un phénomène de faible importance. De manière similaire aux chlorures, le sodium est généralement peu présent dans les eaux d'origine karstique, il provient essentiellement d'apports météoriques ; il peut aussi être fourni par des échanges de cations avec les minéraux argileux présents dans la formation. A l'inverse des chlorures, les phénomènes d'évapotranspiration provoquent une diminution des teneurs en sodium, prélevé par les systèmes racinaires des plantes. Les variations de concentration dans les eaux karstiques peuvent donc être attribuées à des interactions avec la matrice argileuse (échange de cations), et les concentrations élevées peuvent être attribuées aux apports météoriques par effet de chasse d'eau des eaux de pluies.

• Le potassium (K⁺)

Le potassium peut être apporté par les engrais, et est également présent dans les eaux des STEP. Il constitue donc un indicateur de pollution anthropique. Le potassium est généralement peu présent dans les eaux d'origine karstique (concentration voisine de 1 mg/l, voire inférieure). Les concentrations élevées en potassium dans les eaux peuvent être également attribuées à des intrusions d'eau marine.

• Le Bore (B⁻)

Dans les milieux karstiques, les concentrations en bore sont généralement faibles (quelques µg/l). La présence de bore à des concentrations élevées dans les eaux karstiques peut être attribuée :

- à des pollutions anthropiques (le bore est présent dans les agents de blanchiment des lessives),
- à des intrusions d'eau marine,
- ou au lessivage de formation évaporitique.

• Les sulfates (SO₄²⁻)

La source principale de sulfate dans le milieu naturel provient des minéraux évaporitiques de type gypse ou anhydrite. Ces minéraux sont communs dans les formations triasiques. Une source secondaire peut être recherchée à travers les formations argileuses. Une fois dans la phase liquide, le sulfate peut être considéré, en première approche, comme un élément conservatif, au même titre que l'anion Cl⁻. Les concentrations élevées en sulfates dans les eaux peuvent être également attribuées à des intrusions d'eau marine.

• Les Nitrates (NO₃⁻) et l'ammonium (NH₄⁺)

Les concentrations en nitrates élevées dans les eaux souterraines sont essentiellement liées à des apports anthropiques (pollution d'origine agricole -utilisation d'engrais azotés pour la fertilisation des sols- et/ou apports d'eaux usées).

• La Silice(SiO₂)

La silice provient essentiellement des minéraux silicatés (feldspath, plagioclases, argiles,...). La silice est peu soluble sous nos climats plutôt froids et sa mise en solution se fait avec un temps de séjour élevé, ce qui constitue un traceur d'acquisition lente dans le réservoir. Dans les aquifères carbonatés, la rareté des minéraux silicatés fait que les concentrations en silice des eaux souterraines restent faibles (quelques mg/l).

• Les espèces du système calco-carbonique

Dans les milieux karstiques (non influencé par une intrusion marine), les teneurs en calcium, magnésium et bicarbonate des eaux sont quasi exclusivement liées au

système carbonaté. Les interactions avec les autres minéraux sont en effet négligeables face aux dissolutions de minéraux carbonatés. De par la nature des pluies (généralement acide) d'une part et surtout du fait de la présence de CO_2 d'origine biogénique dans les sols, l'eau entrant dans le système karstique possède un fort pouvoir de dissolution vis-à-vis des carbonates. C'est cette propriété qui conduit à la karstification.

Dans les formations carbonatées où on est en présence de dolomies, le système carbonaté est à même de fournir non seulement du calcium (Ca^{2+}) et du bicarbonate (HCO_3^-) mais également du magnésium (Mg^{2+}). Cependant les cinétiques de dissolution sont très différentes pour ces deux minéraux et l'acquisition du magnésium est un phénomène lent qui signe des temps d'interaction importants.

Dans les milieux karstiques, des teneurs en calcium et magnésium très élevées peuvent être également attribuées à des intrusions d'eau marine.

Le Tableau 2 ci-après rassemble de manière synthétique l'origine et le type de renseignement apporté par les espèces majeures et traces présentes dans les eaux des systèmes karstiques. Le Tableau 3 résume le type d'information que l'on peut obtenir sur le système calco-carbonique à partir des mesures de terrain et des teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- et pCO_2 des eaux.

Traceur	Origine	Applications – types d'informations obtenues
Cl	Externe (en absence d'évaporites) Interne (en présence d'évaporites)	<ul style="list-style-type: none"> - N'interagit pas avec le milieu et est à ce titre souvent considéré comme conservatif (permet l'identification et la quantification des mélanges d'eau) - Exclusivement apporté par les précipitations en absence d'activité anthropique et d'origine interne. - Bon marqueur des horizons de surface (re-concentration par évapotranspiration).
Na, K	Externe	- Marqueur de contamination marine
	Interne	<ul style="list-style-type: none"> - Peuvent provenir de l'altération des minéraux silicatés, d'échange de cations avec les minéraux argileux, de substances organiques. L'intensité des échanges cationiques peut être évaluée avec l'I.E.C. (indice d'échange cationique) - Bons marqueurs des horizons de surface.
Br, B	Externe	<ul style="list-style-type: none"> - N'interagit pas avec le milieu et est à ce titre souvent considéré comme conservatif (permet l'identification et la quantification des mélanges d'eau) - Exclusivement apporté par les précipitations en absence d'activité anthropique et d'origine interne. - Marqueur de contamination marine
	Interne (en présence d'évaporites)	- Marqueur des interactions avec la matrice (lessivage)
SO ₄	Externe : apport météorique (pluie) et anthropique (origine agricole). Intrusion marine	<ul style="list-style-type: none"> - Relativement abondant dans les eaux d'origine karstique. - Bon marqueur des pollutions agricoles - Marqueur de contamination marine
	Interne : dissolution pyrite Biologique (dégradation M.O) Lessivages gypse, formations argileuses	- Marqueur des interactions avec les matrices minérales, des processus biogénétiques
NO ₃	Externe	- Marqueur de pollution, permet d'obtenir des informations sur les modalités d'infiltration dans les hydrosystèmes karstiques.
SiO ₂ (H ₄ SiO ₄)	Interne	<ul style="list-style-type: none"> - Peu soluble. - Marqueur des temps de séjour

Tableau 2 - Origine et nature des informations apportées par les principaux éléments contenus dans les eaux des systèmes karstiques.

Paramètres	Origine	Applications – types d'informations obtenues
pCO ₂ , CMTD, HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ et dpH	Interne	<ul style="list-style-type: none"> - Renseigne sur les conditions d'écoulement dans le système (en charge ou à surface libre) - Indication sur la vitesse de circulation des eaux (dpH<0 = temps de séjour bref) - Renseigne sur l'ouverture du système chimique (système carbonate) vis-à-vis d'une phase gazeuse (système fermé ou ouvert vis-à-vis de l'atmosphère) - Le suivi des évolutions temporelles des teneurs (Ca, Mg, HCO₃) apporte des informations précieuses sur le fonctionnement hydrologique des aquifères karstiques
Ca, Mg	Externe	- Concentration élevée : marqueur d'une contamination marine

Tableau 3 - Nature des informations obtenues sur le système calco-carbonique.

Quelles informations peut-on obtenir à partir des traceurs isotopiques ?

Dans les paragraphes suivants, nous présentons de manière plus détaillée les caractéristiques de certains des isotopes présentés de manière synthétique au Tableau 4. Ces isotopes sont fréquemment utilisés dans les études hydrogéologiques ; de plus, nous exposons les apports des « nouveaux isotopes » (rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, rapport ¹¹B/¹⁰B) à l'étude des systèmes hydrologiques complexes, où l'origine de la salinité des eaux peut être multiple.

Outil	Applications
Oxygène 18 (δ ¹⁸O) et deutérium (δ ²H)	Nature et origine de l'eau Température des réservoirs Altitudes d'aire de recharge Quantification de la recharge Mise en évidence de mélange Mise en évidence des phénomènes d'évaporation Circuit Hydrodynamique
Tritium(3H)	Radiochronologie Indicateur de temps de transit (³ H>0.1 UT signifie un apport post 1952 dans le système)

Tableau 4 - Informations obtenues par les outils isotopiques « classiques »

• Les isotopes stables de la molécule d'eau (18O et 2H) et radioactif (Tritium)

L'utilisation des isotopes stables de l'eau (¹⁸O et ²H) permet de tracer très fidèlement les flux hydriques qui s'écoulent dans les systèmes dans la mesure où ils sont intimement liés à l'eau. L'utilisation de ces traceurs permet également de mettre en

évidence les processus d'évaporation. Enfin, la nature conservative de ces traceurs permet d'identifier les phénomènes de mélange d'eaux d'origines différentes.

La signature isotopique des précipitations est extrêmement variable dans le temps et dans l'espace, et peut constituer à ce titre, un bon marqueur des eaux infiltrées dans les systèmes, dès lors que la signature isotopique de l'eau préexistante dans le système est différente de celles des précipitations. L'utilisation des isotopes stables de l'eau apporte des informations quant à la nature des processus mis en jeu lors des crues.

Contrairement à l'oxygène 18 et au deutérium, l'isotope tritium de la molécule d'eau est instable dans le temps et est fréquemment utilisé comme chronomètre pour dater les eaux. (^3H , période courte, 12,26 ans)

• Les isotopes radiogéniques du Strontium (rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)

Le Strontium (Sr) est un élément chimique de type alcalino-terreux dont les propriétés physico-chimiques sont proches de celles du calcium. Cette similarité permet au Sr de se substituer au Ca dans les réseaux cristallins.

L'élément strontium peut être utilisé comme traceur dans les études environnementales puisqu'il est naturellement présent dans le milieu. Il possède 4 isotopes (éléments de même numéro atomique qui présentent des propriétés identiques mais qui diffèrent les uns des autres par la masse atomique). Ces 4 isotopes : ^{88}Sr , ^{87}Sr , ^{86}Sr et ^{84}Sr sont stables, seul le strontium 87 (^{87}Sr) est radiogénique c'est à dire qu'il est issu de la désintégration radioactive d'un isotope père, en l'occurrence le rubidium 87 (^{87}Rb) par désintégration β^-

L'abondance des isotopes ^{88}Sr , ^{86}Sr et ^{84}Sr reste constante au cours du temps alors que l'abondance de l'isotope ^{87}Sr va augmenter dans le temps suite à la production via la désintégration du ^{87}Rb . En Sciences de la Terre et dans les études environnementales on utilise le rapport de l'isotope radiogénique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ que l'on exprime en fonction de teneurs en strontium et rubidium ($1/\text{Sr}$, Rb/Sr).

D'une manière générale, les eaux qui drainent les roches acquièrent la composition isotopique en Sr (rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) des minéraux de cette roche les plus sensibles à la dissolution. Ainsi, les eaux qui drainent des roches silicatées (granite par exemple) présentent des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ relativement élevés, celles qui drainent des roches carbonatées ont des signatures plus faibles (moins radiogéniques). Ces variations isotopiques peuvent être utilisées pour mettre en évidence et quantifier des mélanges d'eaux de diverses origines.

En domaine karstique, le strontium peut être utilisé comme traceur des circulations souterraines car il peut remplacer le calcium au sein du réseau cristallin des minéraux carbonatés. Les teneurs moyennes rencontrées en milieu carbonaté sont de quelques $\mu\text{g/l}$ à quelques centaines de $\mu\text{g/l}$. Les valeurs remarquables de strontium témoignent d'une circulation des eaux dans des formations évaporitiques de type célestite (SrSO_4), minéral toujours associé au gypse.

3. Données hydrologiques et météorologiques

3.1. ACQUISITION DES DONNEES HYDROLOGIQUES ET METEOROLOGIQUES

3.1.1. Installation des 4 stations de catégorie I (GAEA)

Les 4 stations de catégorie I ont été instrumentées conformément au cahier des clauses techniques et particulières de l'étude, par GAEA ingénierie, sous-traitant du BRGM, afin d'assurer le suivi du débit. Un seuil a été construit pour chacune des sources, des échelles limnigraphiques posées permettant le contrôle visuel des hauteurs d'eau lors des visites de contrôle ainsi que des limnigraphes « Thalimèdes » à balancier et enregistrement digital, de la société OTT.

Les enregistreurs limnigraphiques à flotteur «Codeur enregistreur THALIMEDES, de la société OTT hydrométrie » avec une résolution de 1 mm, sans dérive, à mémoire cyclique de grande capacité (130000 mesures) et avec communication par interface optique IrDA (infrarouge) ont été installés ; ces enregistreurs sont alimentés par des piles 1.5 V. Ce matériel est identique à celui des autres stations de mesures des sources de catégorie I, installées auparavant par le Parc National des Grands Causses et actuellement suivis soit par le PNGC, soit par le BRGM dans le cadre du réseau de surveillance mis en place dans la cadre de la directive cadre eau (DCE), sous maîtrise d'ouvrage MEDD-brgm.

7 jaugeages par station ont effectués à des périodes de l'année hydrologique différentes par GAEA ingénierie sur les 4 sources instrumentées dans le cadre de cette étude et leur suivi s'est étalée sur une période de plus de 14 mois à raison d'1 relevé par mois. Le logiciel d'analyse des jaugeages utilisé pour interpréter les données de jaugeage au micromoulinet est le logiciel OTT dénommé « JAUGEALC ».

Les coordonnées des 4 stations concernées sont les suivantes :

Nom de la source	Coord X (m) L III	Coord Y (m) L III	Débit (L/s)	Commune
Angle ou Faount d'Adrien	676900	3223325	25<Q<50	La Malène
Famounet ou Font Mounet	673850	3223225	25<Q<50	St-Georges de Lévéjac
Urugne ou Malpas	672600	3234600	25<Q<50	La Canourgue
Golf (ou Urugne 3)	671200	3235600	50<Q<100	La Canourgue

Tableau 5 - Coordonnées des 4 stations de catégorie I instrumentées par GAEA ingénierie

A l'exception de la source Urugne, les sources ne sont pas utilisées pour l'alimentation en eau potable. Le captage de la source Urugne est situé à l'amont du seuil de jaugeage installé, au niveau du camping à la Canourgue.

Station de la source d'Urugne

La sortie s'effectue de façon diffuse en inter-bancs. Elle est captée à l'aval direct de son émergence pour l'alimentation en eau potable de la commune de la Canourgue. L'eau s'écoule ensuite dans un petit ruisseau. Un seuil a été construit dans le lit du ruisseau. Il mesure 3 m de large pour une hauteur de 60 cm.



Illustration 10 - Seuil et station de mesure.

Station de la source du Golf

La source de Golf s'écoule de façon diffuse au fond d'une vaste mare accolée à un ancien moulin. En plus des eaux de la source il y a une arrivée d'eau provenant d'une dérivation d'une partie des eaux du ruisseau de l'Urugne. Le débit provenant de l'Urugne n'est pas mesuré. Il existe une première retenue au niveau du moulin. Les eaux sont ensuite évacuées par un canal de 225 cm de large. La station de mesure est située sur ce canal.



Illustration 11 - Source Golf à l'amont de la station de mesure



Illustration 12 - Ecoulement vers le canal de mesure



Illustration 13 - Source Golf



Illustration 14 - Canal et instrument de mesure de la source Golf

Station de la source Angle

L'exutoire est situé à flanc de falaise, puis l'eau s'écoule à l'intérieur d'un ouvrage maçonné constitué d'une salle voutée mesurant environ 1,7 m de hauteur. La station de mesure des hauteurs d'eau est placée à la sortie de la salle. A cet endroit la largeur est 1 m. Angle est située à une dizaine mètres du Tarn.



Illustration 15 - Ouvrage de la source d'Angle



Illustration 16 - station de mesure d'Angle.

Station de la source de Famounet

L'exutoire est situé à flanc de talus. Il est de faible dimension d'environ 50 cm de haut et 50 cm de large. La station de mesure est accolée au talus. La source de Famounet est à une dizaine de mètres du Tarn, à une côte supérieure d'environ 2 m. En période de forte crue une partie du flux est évacuée par des petits griffons situés au sommet du talus, qui jouent le rôle de trop plein.



Illustration 17 - Aménagement du site de Famounet

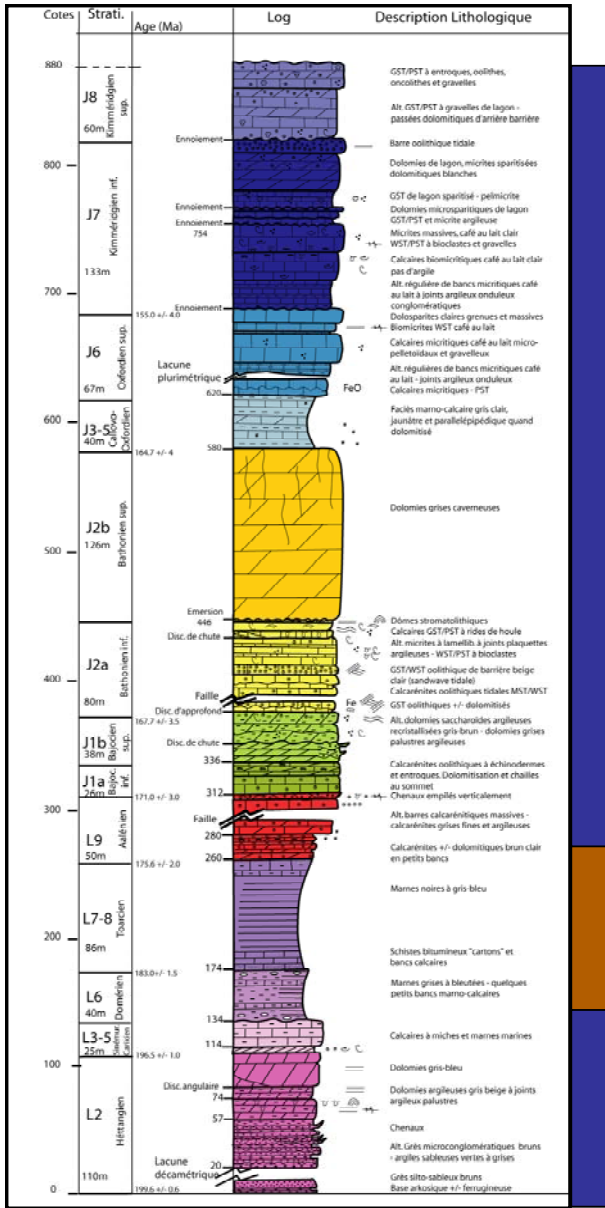


Illustration 18 - Source de Famounet instrumentée



Illustration 19 - Distance de la source Famounet au Tarn

3.1.2. Position géologique des sources de catégorie I



Aquifère supérieur

Sources de Famounet et Angle

Sources Burle et Coussac

Source d'Urugne

Sources du Golf et des Fonts

Source Bernade

Aquifère inférieur

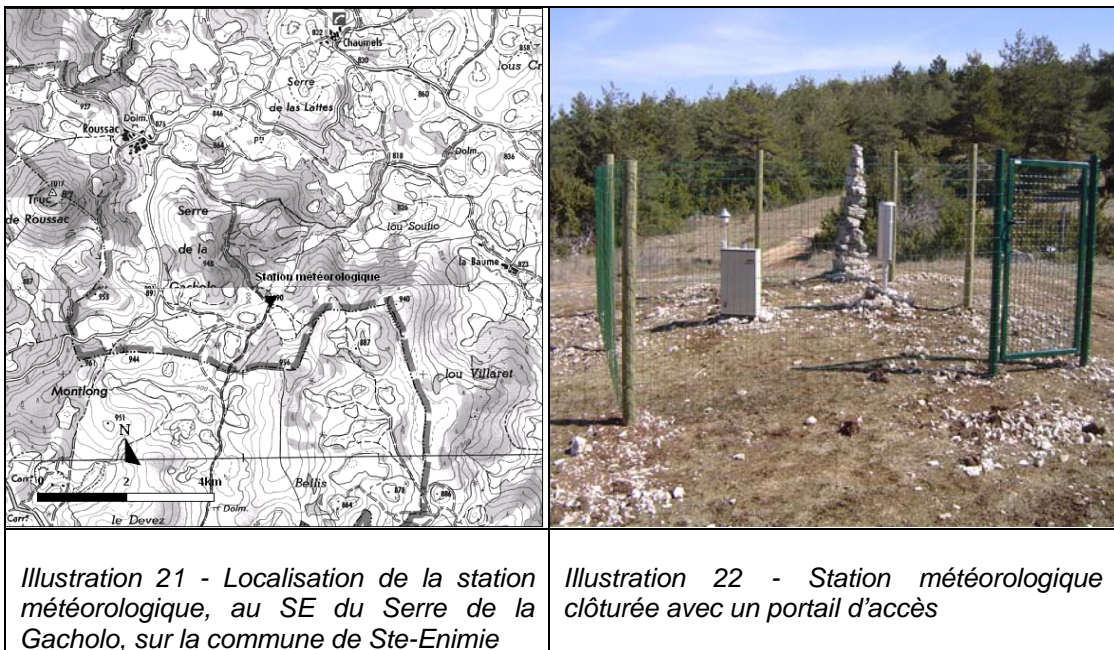
Source St-Frézal

Illustration 20 - Position des sources de catégorie I sur le log géologique de la Cause de Sauveterre – secteur Es.

L'ensemble des planches photographiques des sources de catégorie I est présenté à l'annexe 2, ainsi qu'une carte de localisation.

3.1.3. Installation de la station météorologique

Une station météorologique a été implantée à l'intersection de chemins, à l'altitude 890m, sur la commune de Ste-Enimie aux coordonnées suivantes (Lambert II étendu) : 682 220/ 1 931 300 par GAEA Ingénierie.



La station est protégée par une clôture grillagée comme pour les prés (piquets bois et grillage galvanisé à maille carrée) avec un portail fermé à clef.

Le suivi de la station a été assuré par GAEA ingénierie, à une fréquence mensuelle, pendant la durée de l'étude.

Equipement du poste météorologique

Le poste météorologique comprend un pluviomètre « PLUVIO, de la société OTT hydrométrie » fonctionnant selon le principe de la pesée, avec une bague réceptrice de 200 cm² équipé d'un système de chauffage régulé ; la capacité de mesure est de 1000 mm de pluie relié à un enregistreur intégré à 4 voies d'entrée de mesure. Le pluviomètre est alimenté par batterie.

Ce type de pluviomètre est idéal pour la mesure de toutes les intensités de pluies (jusqu'à 50 mm/min) avec une haute résolution (0.01mm).

Une mesure de la pression atmosphérique et de la température sous abri (selon norme OMM) est également effectuée sur le site, et reliée à l'enregistreur à cartes analogiques.

Les données acquises à la station météorologique sont les suivantes :

- Température,
- pression atmosphérique,
- intensités des précipitations.

La température moyenne de l'air est comprise entre -2°C et 20°C , pour la période d'observation (octobre 2005 à août 2006) (Illustration 23 et Tableau 6).

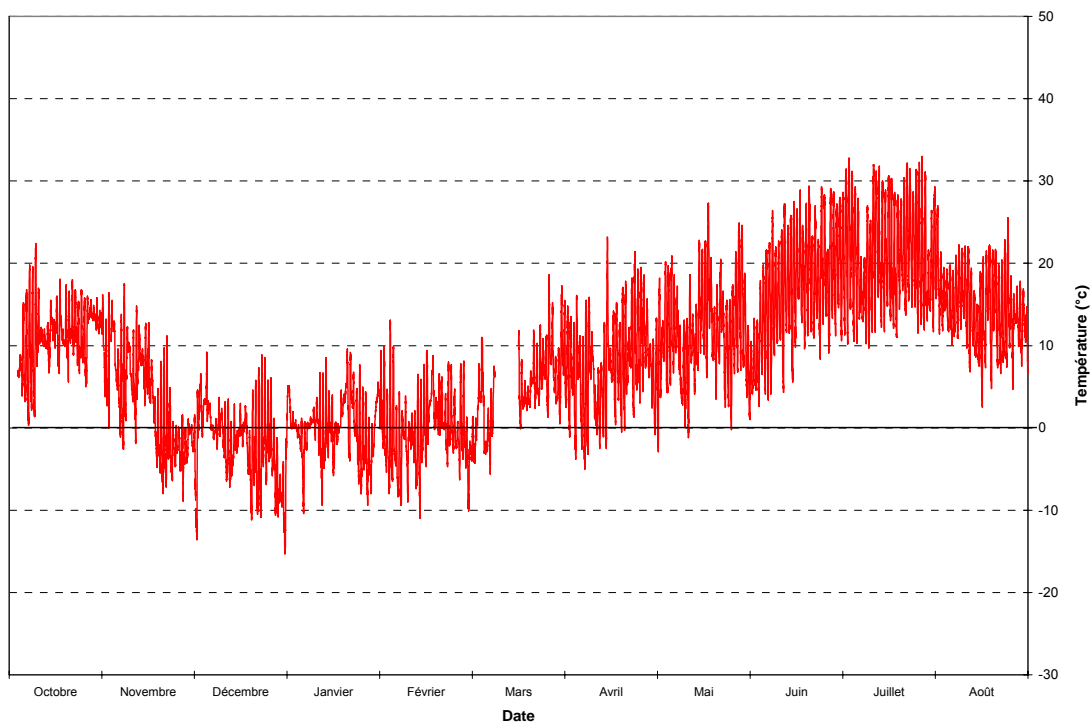


Illustration 23 - Evolution de la température de l'air à la station météorologique du Causse de Sauveterre (Commune de Ste-Enimie)

	Oct-05	Nov-05	Déc-05	Janv-à6	Févr-06	Mars-06	Avr-06	Mai-06	Juin-06	Juil-06	Août-06
Temp. Moyenne (°C)	11.3	3.4	-1.7	0.1	-0.4	4.6	7.7	11.5	17.0	20.7	14.2
Temp. Max (°C)	22.4	17.5	9.2	10.0	13.1	18.6	23.2	27.3	29.4	33.0	25.5
Temp. Min. (°C)	0.3	-10.0	-15.3	-10.4	-11.0	-5.6	-5.0	-2.9	2.6	9.7	2.5

Tableau 6 - Températures moyennes de l'air à la station météorologique pour la période observée.

Les précipitations totales sur onze mois s'élèvent à 749 mm. L'intensité journalière maximale est enregistrée pour les mois de janvier, octobre puis août (de façon décroissante) (Tableau 7).

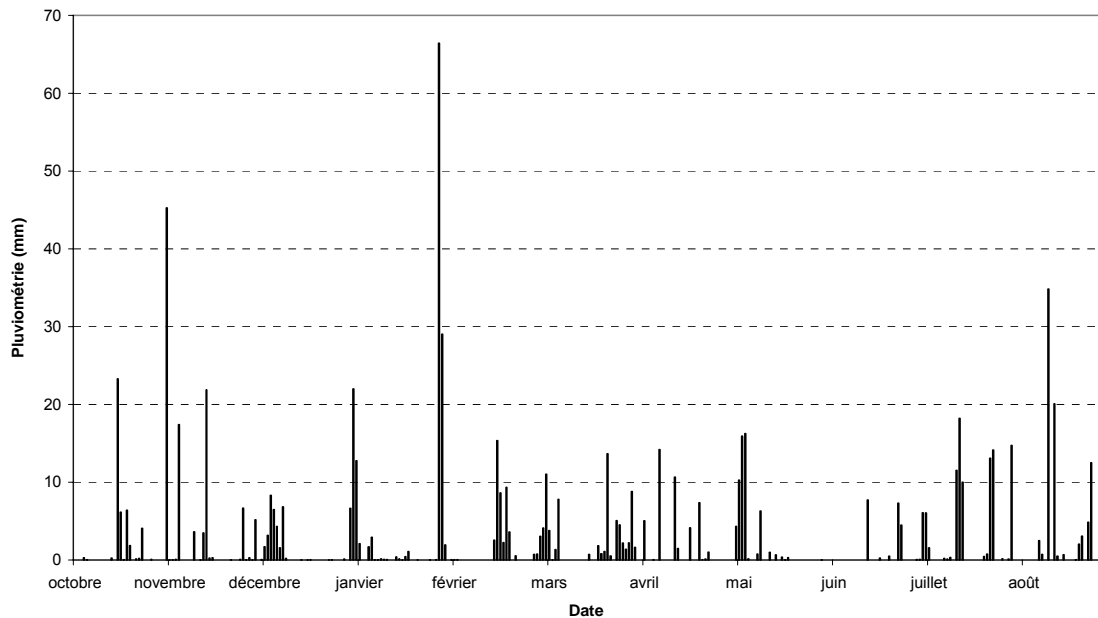


Illustration 24 - Evolution temporelle de la pluviométrie à la station météorologique sur le Causse de Sauveterre entre octobre 2005 et août 2006

	Oct-05	Nov-05	Déc-05	Janv-06	Févr-06	Mars-06	Avr-06	Mai-06	Juin-06	Juil-06	Août-06
Pluviométrie totale (mm)	88.21	59.5	61.7	119.55	43.21	65.97	54.64	56.43	20.3	82.94	96.76
Pluviométrie maximale (mm/jour)	45.21	21.89	22.01	66.42	15.36	13.65	14.20	16.27	7.73	18.2	34.83

Tableau 7 - Pluviométrie totale mensuelle et maximale journalière par mois à la station météorologique

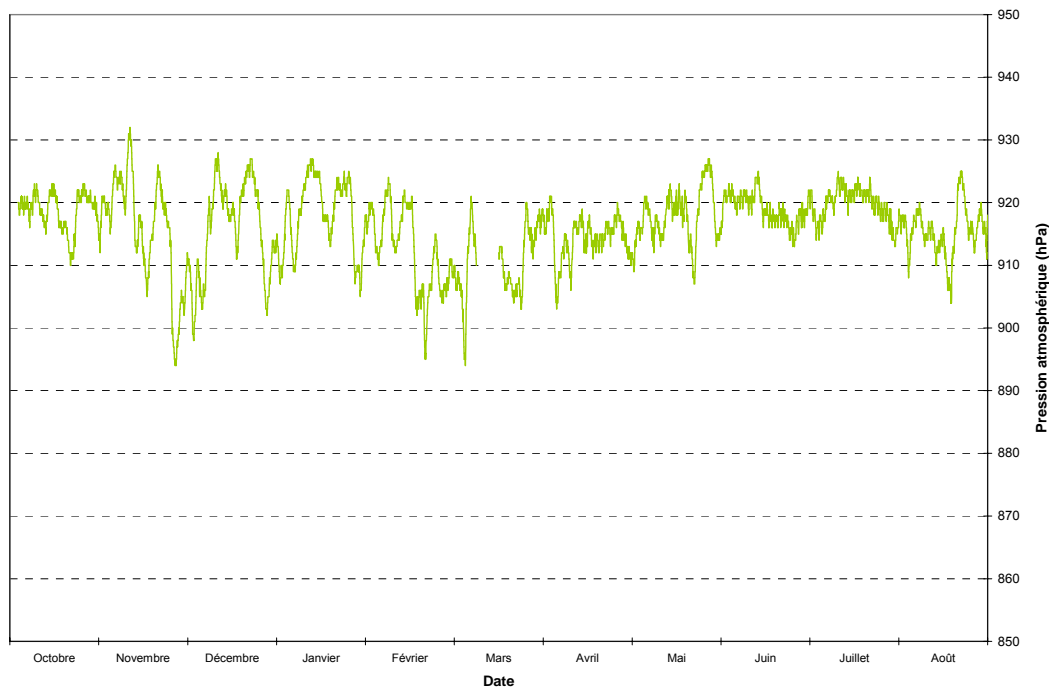


Illustration 25 - Evolution temporelle de la pression atmosphérique à la station météorologique sur la Causse de Sauveterre entre octobre 2005 et août 2006

Les problèmes techniques rencontrés à la station météorologique se rapportent à une interruption d'enregistrement des paramètres en mars 2006, pour cause de défaillance des batteries. L'absence de données se marque sur les graphiques d'évolution temporelle de la température et de la pression atmosphérique (Illustration 25).

3.1.4. Données des stations hydrologiques de catégorie I

Dans un premier temps les exutoires des différents systèmes étudiés ainsi que les sites d'enregistrement sont présentés. Les chroniques de hauteur mesurée au pas de temps semi horaire sont ensuite exposées. Au préalable à leur utilisation, une analyse critique des données est menée. Cette analyse a pour objectif soit de valider les chroniques, soit de les corriger. Les courbes de tarage, réalisées à partir de 5 à 8 mesures selon les sources, sont ensuite examinées. L'étude est détaillée pour la source de Burle. Les autres systèmes sont décrits de façon plus succincte. Enfin, l'hydrogramme de chaque source est présenté. Les principaux résultats de cette analyse des données sont regroupés dans le Tableau 8 et l'annexe 3.

	Source	Début chronique	Fin chronique	Mesure jaugeage (cm)	H _{min} cm	H _{max} cm	Equation reliant Q (l/s) et H (m), R ²	Applica-tion	Tronca-ture	Rôle végéta-tion	Remarques
Causse Sauveterre Coté Tarn	Burle	05/11/03	16/01/07	25-50	19	407	$Q=7061,44 \cdot H^{2,536}$, R ² = 0,990 $Q=10980 \cdot H - 3918,7$	Q<1m Q>1m	Crue 19/10/06		Influence du Tarn en crue
	Angle	03/09/05	09/11/06	19-27	19	290	$Q=10629,16 \cdot H^{3,58}$, R ² = 0,986 $Q=2757,1 \cdot H - 687,14$	Q<0,3m Q>0,3m	Crue 19/10/06		Inondation lors des crues du Tarn
	Famounet	03/09/05	09/11/06	16-19	16	195	$Q=3990,65 \cdot H^{2,657}$, R ² = 0,907		H>0,5 m		
Causse Méjan	St Chély	10/02/05	16/01/07	8-29	8	29	$Q=70188,61 \cdot H^{3,16}$, R ² = 0,996			<1cm	
	Cénarète	01/03/05	16/01/07	25-35	25	59	$Q=159713,71 \cdot H^{6,767}$, R ² = 0,985				Utilisation d'une planche en été
Causse Sauveterre Coté Lot	Les Fonts G	10/02/05	16/01/07	10-43	12	43	$Q=4235,89 \cdot H^{3,12}$, R ² = 0,909			1 à 2 cm	
	Les Fonts D	10/02/05	16/01/07	24-45	22	61	$Q=14963,32 \cdot H^{5,56}$, R ² = 0,996			1 à 2 cm	
	Bernade	10/04/03	16/01/07	31-46	31	45	$Q=0,8114 \cdot e^{9,7309 \cdot H}$, R ² = 0,970				Pb mesure début chronique
	St Frézal H	27/09/05	16/01/07	20-32	21	31	$Q=3364,48 \cdot H^{2,09}$, R ² = 0,986			1 à 2 cm	
	St Frézal B	27/09/05	16/01/07	25-61	23	62	$Q=4246,75 \cdot H^{4,24}$, R ² = 0,996			1 à 4 cm	Effondrement du seuil + travaux
	Golf	03/09/05	09/11/06	27-35	25	46	$Q=1776,82 \cdot H^{2,107}$, R ² = 0,848				Rôle végétation → inexploitable
	Urugne	03/09/05	09/11/06	16-34	0	52	$Q=73740,57 \cdot H^{5,09}$, R ² = 0,965				Pompage basses eaux

Tableau 8 - Récapitulatif des données acquises et transformation des hauteurs d'eau en débit.

a) Burle

La source s'écoule de façon diffuse au niveau d'une grande vasque. Les écoulements sont ensuite évacués par un canal large de 4,4 m qui rejoint le Tarn situé en contrebas à une centaine de mètres. La mesure des hauteurs d'eau s'effectue dans le canal (Illustration 26).



Illustration 26 - Canal de Burle et station de mesure.

• Analyse de la chronique de hauteur d'eau

Les données ont été acquises du 05/11/2003 au 16/01/2007 (Illustration 27).

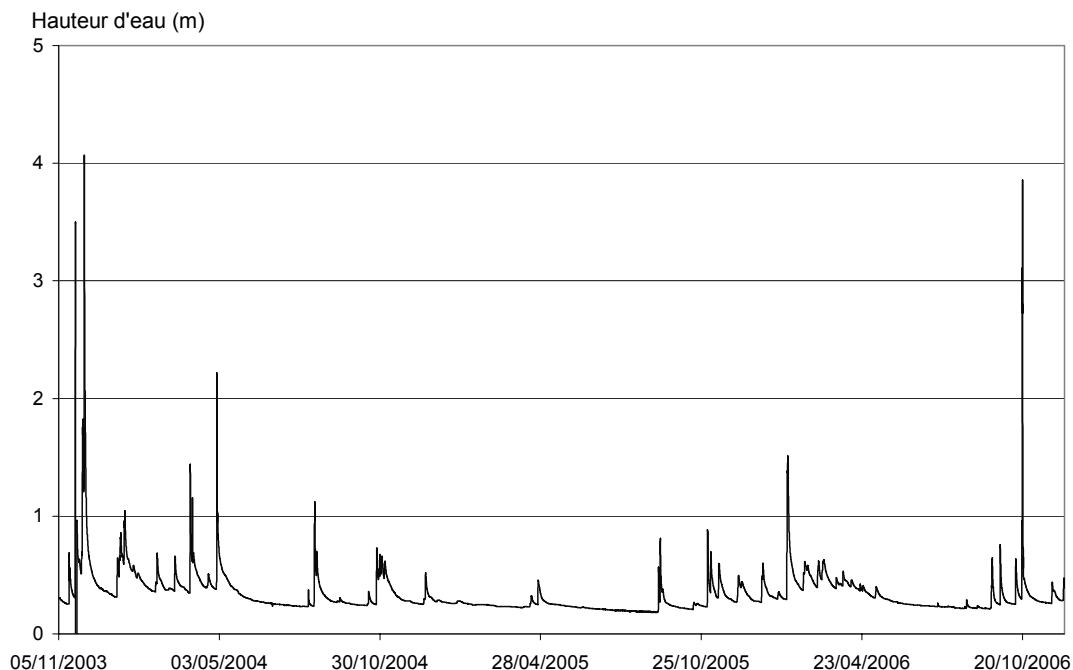


Illustration 27 - Hauteur d'eau mesurée dans le canal de Burle (données au pas de temps horaire).

Sur cette période, la chronique est caractérisée par d'importantes fluctuations. Les hauteurs sont comprises entre 20 cm, lors de l'étiage prolongé de l'été 2005, et environ 4 m au moment des fortes crues (23/11/2003, 03/12/2003 et 20/10/2006).

Les deux premières crues (automne 2003) sont associées à des précipitations supérieures à 100 mm sur le Causse de Sauveterre. Par contre moins de 20 mm de précipitation ont été mesurés les 19 et 20/10/2006. L'absence de fortes précipitations implique que les hauteurs d'eau de près de 4 m mesurées en octobre 2006, ne sont pas associées à une crue importante de la source de Burle. Par ailleurs, les débits mesurés sur le Tarn (station de Bedoues) étaient à cette date, supérieurs à 120 m³/s (annexe 3). La forte augmentation des hauteurs d'eau le 19/10/2006 est ainsi à mettre en relation avec la crue du Tarn. L'augmentation des débits et donc des hauteurs d'eau dans le Tarn a généré un frein à l'écoulement des eaux du canal, ce qui a produit une remontée artificielle du niveau dans le canal.

En examinant les hauteurs d'eau lors de cette crue à une échelle fine (Illustration 28), on observe dans un premier temps une augmentation de la hauteur qui se stabilise à 1 m, puis une très forte augmentation jusqu'à 4 m. La première est probablement liée à une crue de la source. La seconde augmentation est à mettre en relation avec la crue du Tarn. Il est donc possible de faire la part entre la contribution de la source de Burle et le Tarn. En l'absence de l'influence du Tarn la hauteur serait donc de l'ordre du mètre. Nous avons adopté cette nouvelle valeur pour la suite de l'étude.

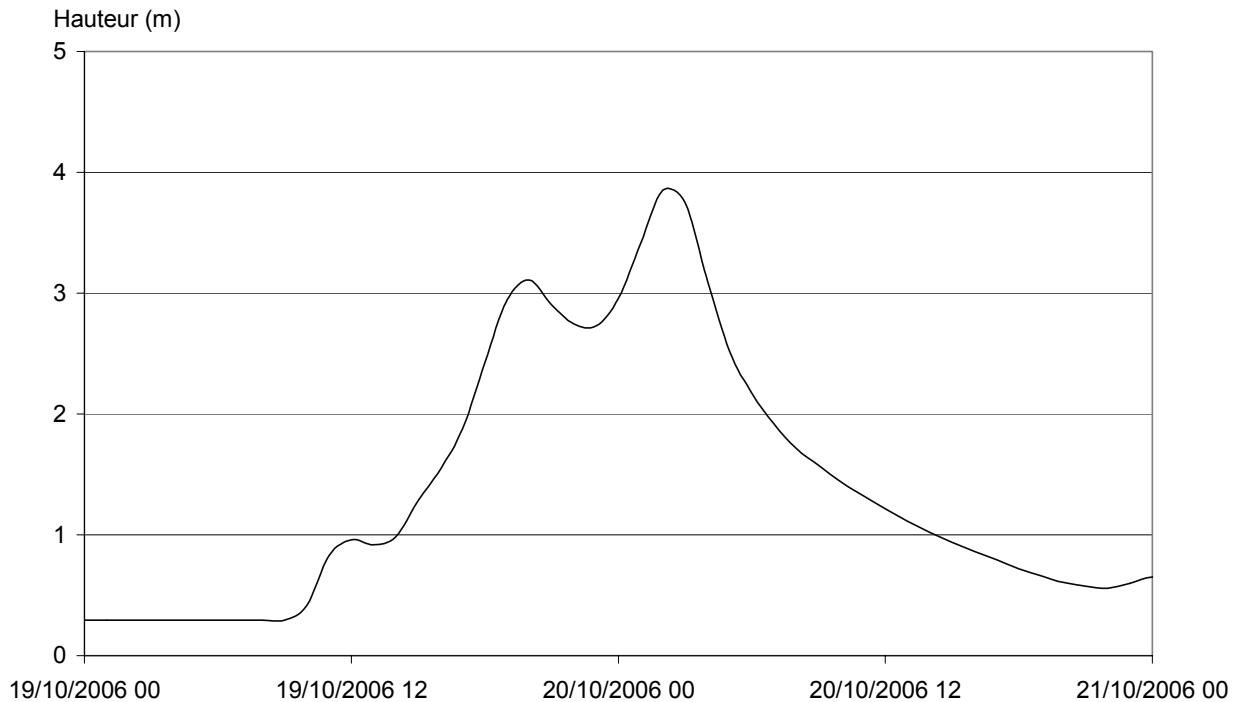


Illustration 28 - Hauteur d'eau à Burle lors de la crue du 19-20/10/2006 (pas de temps horaire).

• Courbe de tarage et chroniques de débits

La courbe de tarage est réalisée pour des hauteurs comprises entre 25 et 50 cm. Les débits associés varient entre 178 et 1241 l/s. L'équation de la courbe de tarage est :

$$\text{Débit (l/s)} = 7061,44 * \text{hauteur (m)}^{2,54}$$

Le coefficient R^2 associé est égal à 0,990.

Réalisée pour de faibles hauteurs d'eau cette courbe de tarage n'est pas adaptée aux très forts débits. Par exemple pour une hauteur de 4 m, le débit associé est 240 m³/s. Cette valeur est beaucoup trop élevée, au vu de la configuration du site. En effet, le débit en hautes eaux peut être estimé à partir des vitesses de l'eau en crue dans le canal, de l'ordre de 2 m/s. La largeur du canal étant environ 5 m, pour une hauteur d'eau de 4 m (soit une surface de 20 m²), le débit devrait être de l'ordre de 40 m³/s pour les très fortes crues. Cette valeur est six fois inférieure à celle calculée à partir de la courbe de tarage.

Pour une hauteur de 1 m le débit calculé par la seconde méthode est 10 m³/s, la courbe de tarage donne 7,06 m³/s. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur. On choisit ainsi de valider la courbe de tarage pour les hauteurs inférieures à 1 m. Au delà de cette valeur on utilise une nouvelle équation issue de l'interpolation linéaire entre les

deux couples de points suivants : (1 m, 7 060 l/s) et (4 m, 40 000 l/s). L'équation s'écrit :

$$\text{Débit (l/s)} = 10980 * \text{hauteur (m)} - 3918,7$$

Les débits obtenus sont ainsi présentés dans l'illustration 29.

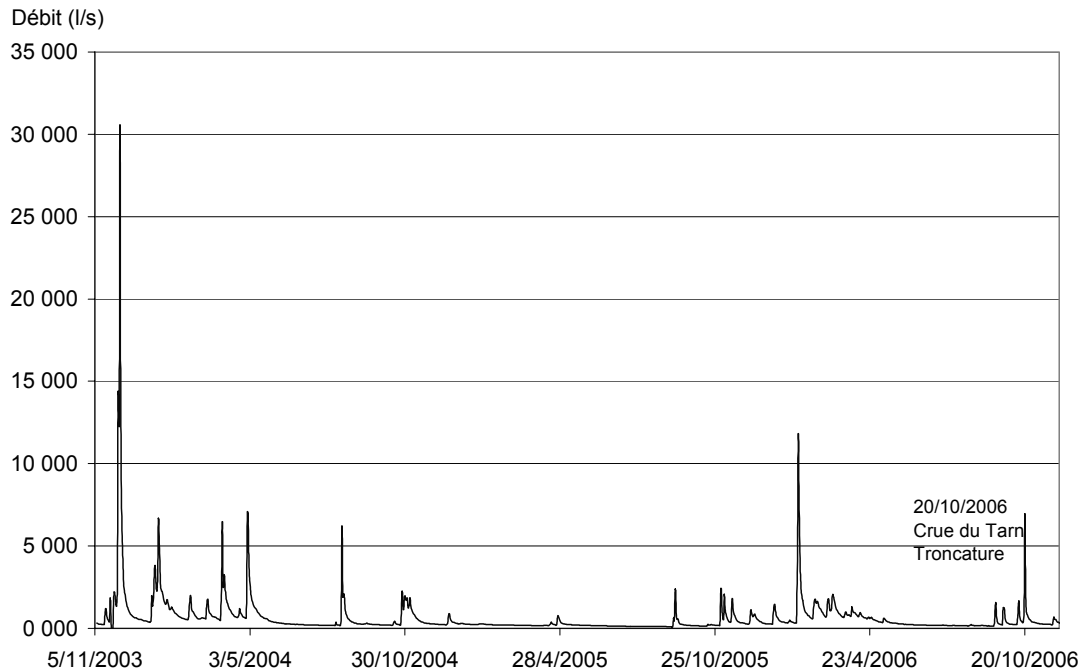


Illustration 29 - Débit à la source de Burle (pas de temps journalier).

b) Angle

Tout comme la source de Burle, la source Angle est influencée par les crues du Tarn. Du fait de la configuration du site (annexe 3), la hauteur maximale ne peut pas dépasser 1,7 m. Or la hauteur enregistrée les 19-20/10/2006 est de 3 m. A cette date l'ensemble de l'ouvrage était donc submergé par les eaux du Tarn. Après étude des chroniques à échelle fine, la part de la crue de la source a été évaluée à 1,3 m. Le pic de crue du 19-20/10/2006 a été tronqué et la nouvelle valeur attribuée est 1,3 m. La chronique de hauteur d'eau mesurée est présentée en annexe 3.

Tout comme la source de Burle, la courbe de tarage n'est pas représentative des hautes eaux. L'équation est validée jusqu'à 30 cm, le débit associé étant de 140 l/s. Puis au dessus de 30 cm une seconde équation est déterminée de la même façon que pour la source de Burle. Le débit maximal est estimé à environ 4000 l/s. Les couples de points utilisés sont (0,3 m ; 140 l/s) et (1,7 m ; 4000 l/s). La chronique de débit obtenue est présentée ci-dessous (Illustration 30).

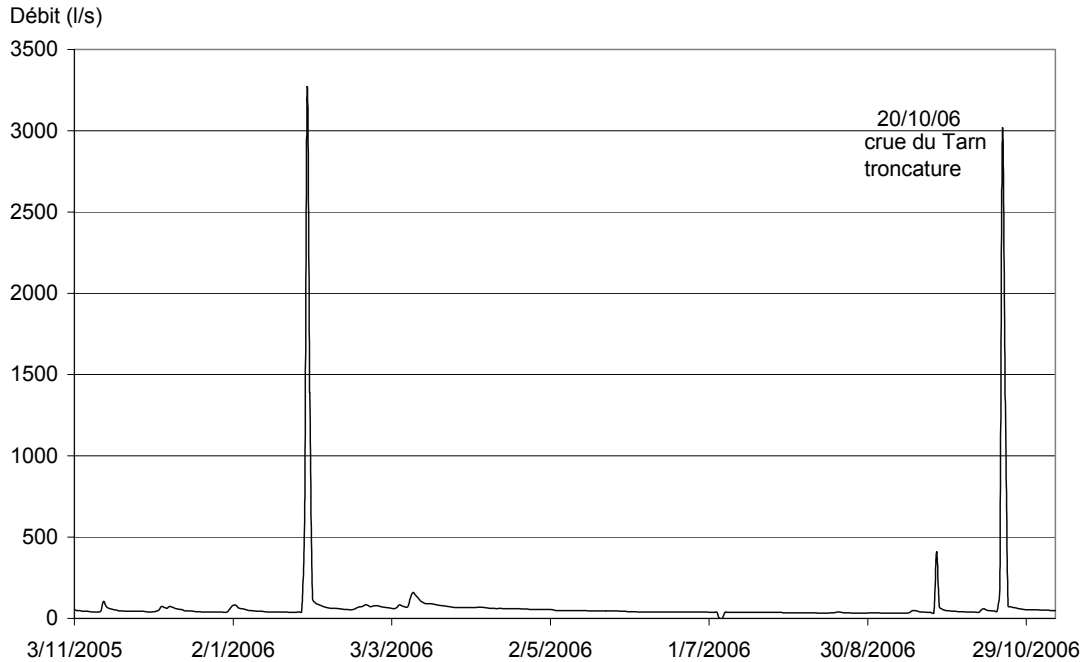


Illustration 30 - Débit à la source d'Angle (pas de temps journalier).

c) Famounet

A l'exutoire, le flux ne peut pas dépasser une hauteur d'eau de 50 cm. Or, lors des crues du 30/01/2006, 25/09/2006 et 19/10/2006, les hauteurs mesurées étaient respectivement de 1,6 m, 0,9 m et 2 m. On observe également des dépôts sédimentaires sur le bouchon du tube d'instrumentation, attestant de l'importance des crues du Tarn (Illustration 19). Tout comme la source d'Angle, la source Famounet est submergée lors des crues du Tarn. Afin de corriger les données, une troncature des hauteurs au dessus de 0,5 m est effectuée.

Pour une hauteur de 0,5 m la courbe de tarage donne un débit de 630 l/s. Cette valeur est cohérente avec la géométrie de l'exutoire et la présence de trop plein. La courbe de tarage est conservée pour l'ensemble de la gamme de variation des hauteurs d'eau. La chronique de débit est présentée ci-dessous (Illustration 31).

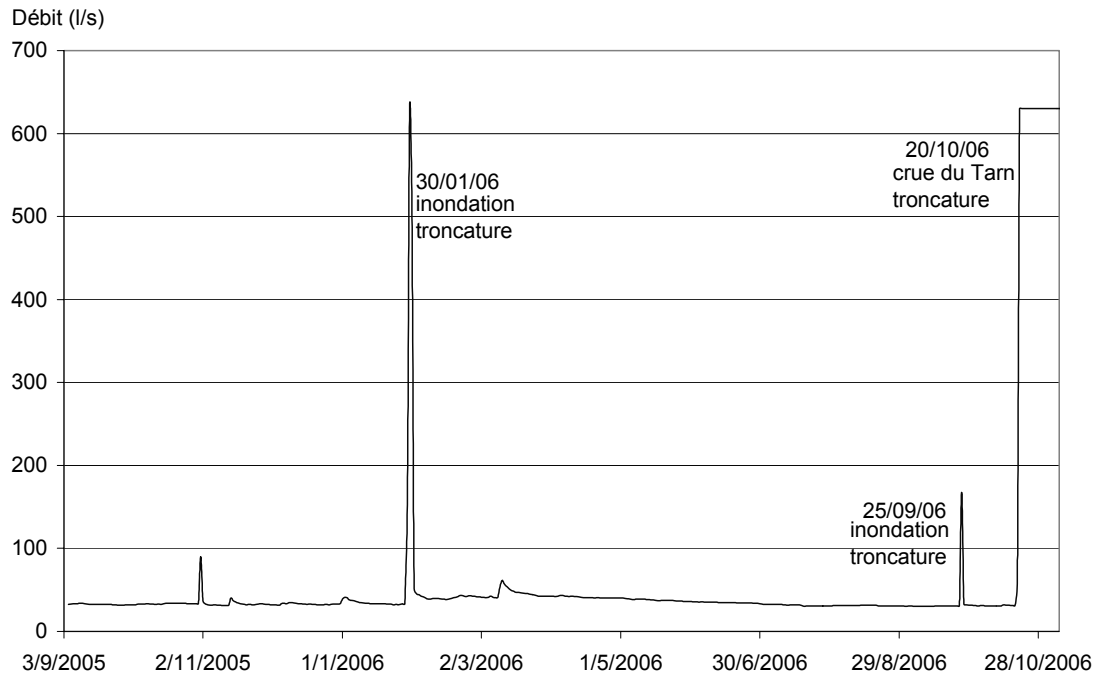


Illustration 31 - Débit à la source de Famounet (pas de temps journalier).

d) **Saint-Chély du Tarn**

Cette source est située en rive gauche du Tarn, elle appartient au Causse Méjean. Elle s'écoule au travers d'un canal de 3,5 m de large. A quelques centaines de mètres de la station de mesure les eaux se déversent dans le Tarn sous forme de cascade. Le dénivelé est de plusieurs dizaines de mètres.

On remarque également des petites chutes de hauteur, inférieures au centimètre, dans la chronique. Ces ruptures correspondent au nettoyage de la végétation dans le canal. En effet la végétation en se développant constitue un frein à l'écoulement, responsable d'une remontée artificielle du niveau d'eau. Après avoir enlevé cette végétation, l'écoulement est facilité et la hauteur redevient caractéristique des débits de la source. Ce décalage de moins de 1 cm correspond à une surestimation des débits d'une dizaine de l/s en étiage à quelques dizaines de l/s en crue.

La courbe de tarage de cette source, réalisée à partir de données de jaugeage de très hautes et de très basses eaux, permet une bonne reconstitution des débits (Illustration 32).

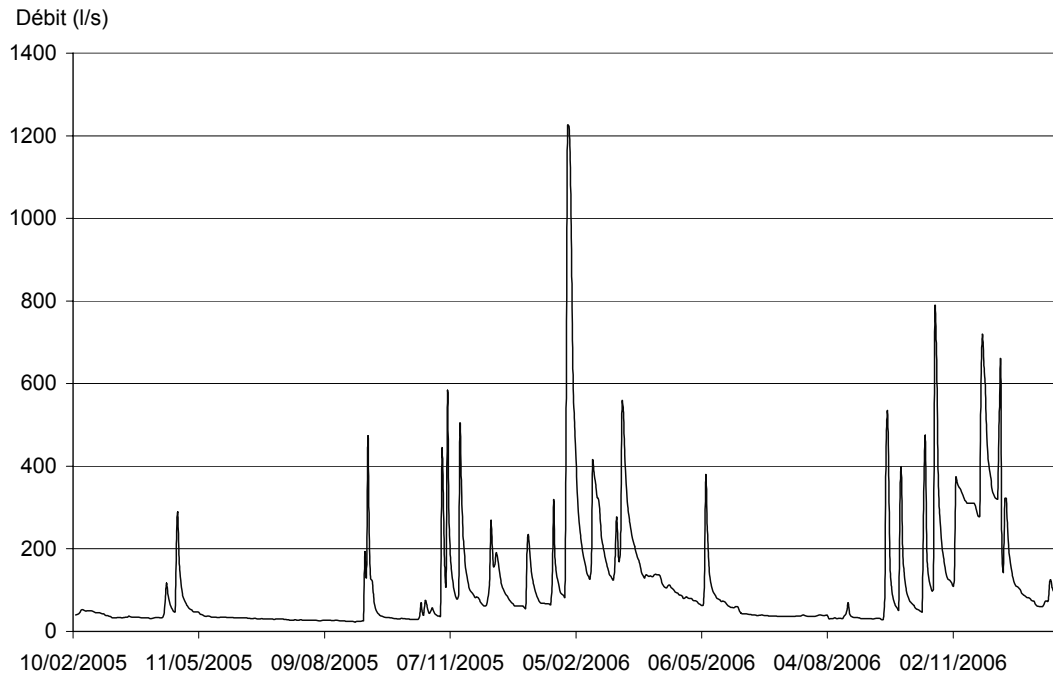


Illustration 32 - Débit à la source de Saint-Chély (pas de temps journalier).

e) Cénarète

Cette source appartient également au Causse Méjean. Elle est située à quelques centaines de mètres du canal de Saint-Chély. L'exutoire se situe entre deux bancs calcaires dans le jardin d'une habitation. L'eau est ensuite évacuée au travers d'un petit chenal d'un mètre de large. Les occupants du site utilisent l'eau du canal (arrosage), notamment en période de basses eaux. Ils disposent alors une planche dans le chenal, fixée entre deux cornières qui constitue un barrage. Cet ouvrage est responsable de la remontée du niveau d'eau dans le canal en amont. Or la mesure de la hauteur d'eau s'effectue en amont de la retenue. Les hauteurs mesurées se retrouvent totalement influencées (annexe 3). Sur cette partie de la chronique les données sont inexploitable. Signalons également qu'en période de très hautes eaux le jardin est submergé. L'eau part ensuite vers le Tarn et comme Saint-Chély forme une cascade de plusieurs dizaines de mètres de haut.

Concernant la courbe de tarage, elle permet une bonne reconstitution du débit à l'exception des périodes influencées (Illustration 33).

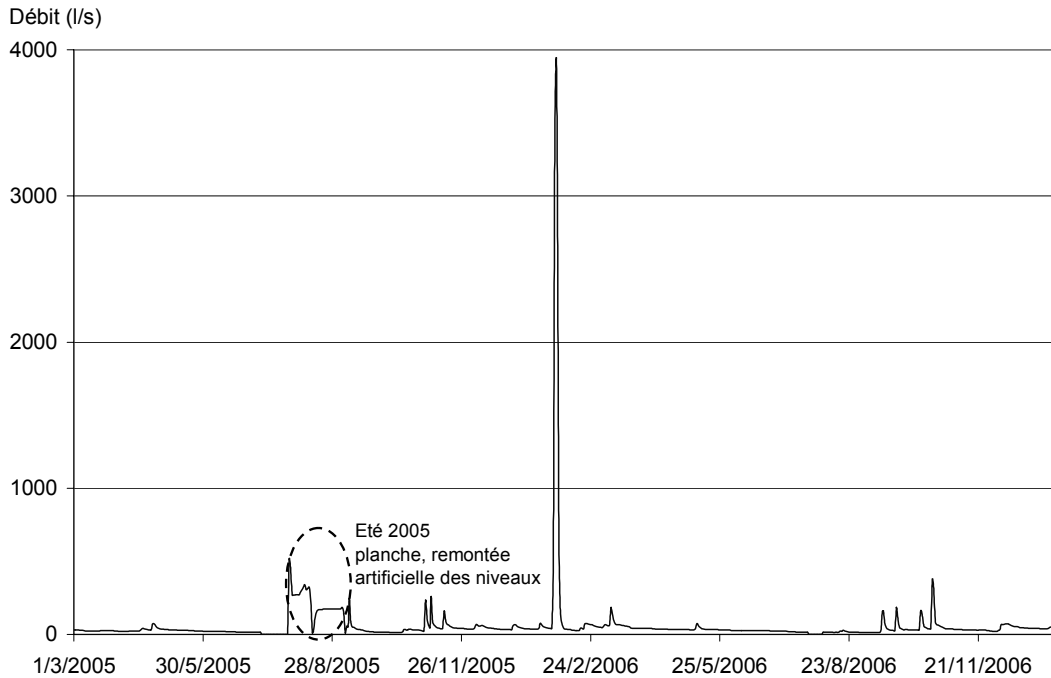


Illustration 33 - Débit à la source de Cénarète (pas de temps journalier).

f) Les Fonts

Cette source est située au nord du Causse Sauveterre, sur les rives du Lot. L'exutoire est constitué d'une source unique qui s'écoule au travers d'un ouvrage maçonné. Les écoulements sont ensuite séparés et évacués au travers de deux canaux. Celui de gauche (nommé les Fonts Gauche) mesure 1 m et celui de droite (les Fonts Droite) 1,8 m de large. La mesure est effectuée dans chacun des canaux. Les débits de la source sont calculés en additionnant les débits de chaque canal. Les débits calculés au niveau des seuils sont représentatifs de la gamme d'évolution des débits. Les deux courbes de tarages sont ainsi de bonne qualité.

Ces canaux sont également marqués par des développements importants de végétation. On observe ainsi après curage des chutes de niveau pouvant atteindre 4 mm. Les débits sont surestimés sur certaines périodes de plusieurs dizaines de l/s. Le débit total de la source est présenté dans l'illustration suivante (Illustration 34).

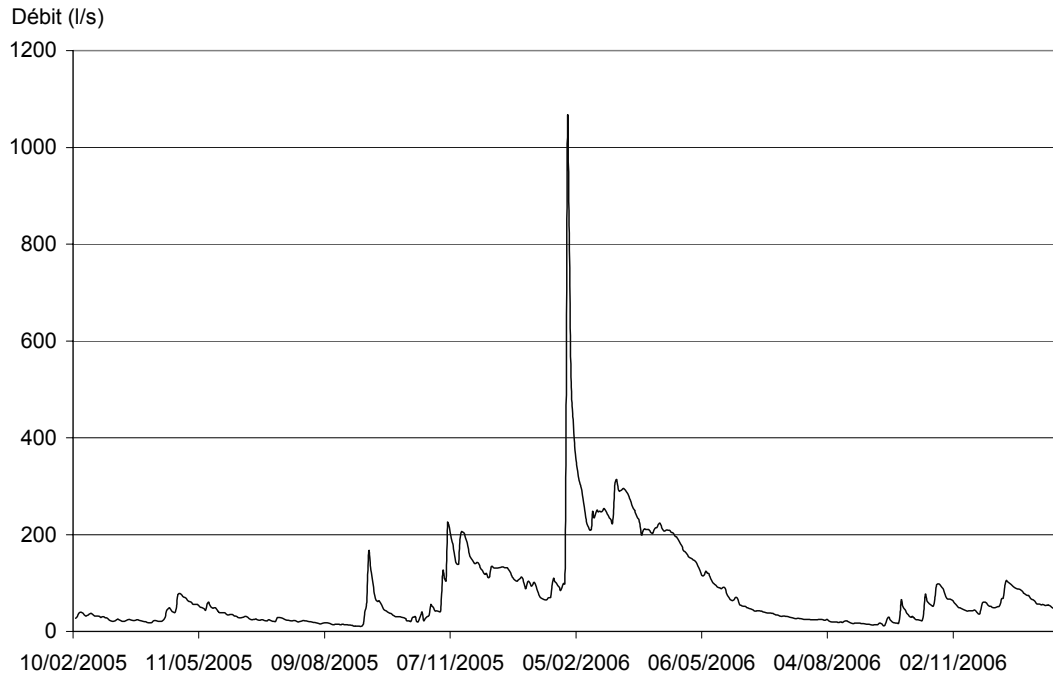


Illustration 34 - Débit à la source des Fonts (pas de temps journalier).

g) Bernade

Il s'agit d'une source captée au nord du Causse de Sauveterre, située sur la commune de Chanac. Les écoulements sont canalisés en souterrain. Au cours de deux périodes les enregistrements sont de mauvaise qualité (du 01/08/2003 au 02/11/2003 et du 27/06/2005 au 08/11/2005). Il semblerait qu'il s'agisse d'un problème instrumental. Ces parties de chroniques sont inexploitable. Les débits jaugés sont représentatifs de la gamme d'évolution des hauteurs d'eau. La courbe de tarage est de bonne qualité. Les débits sont présentés ci-dessous.

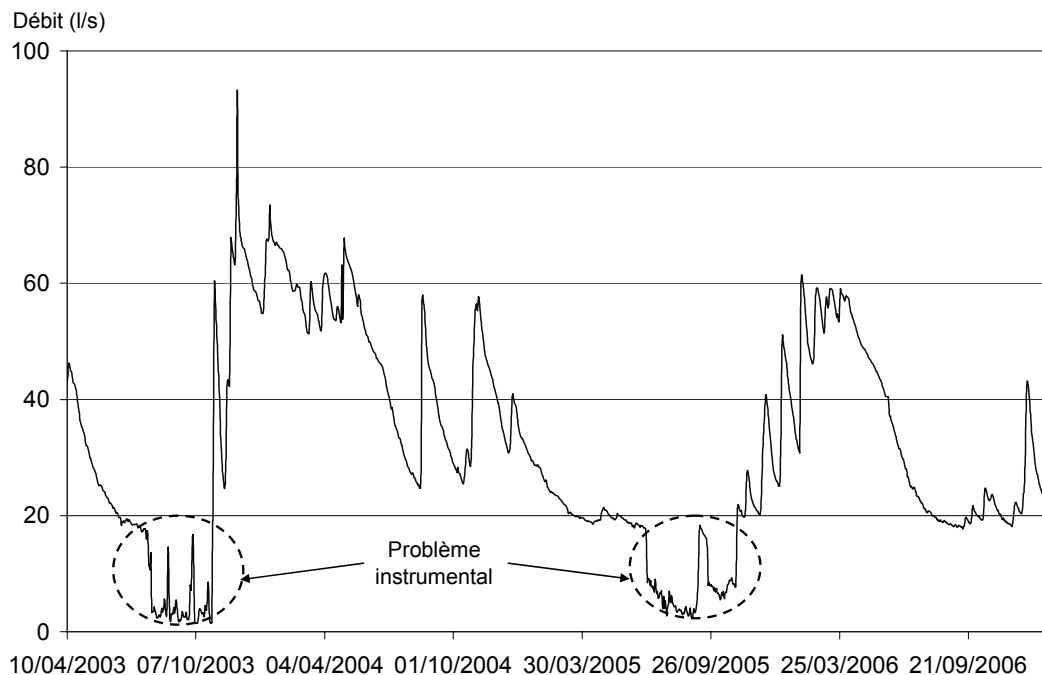


Illustration 35 - Débit à la source de Bernade (pas de temps journalier).

h) Saint-Frézal

La source est constituée d'un exutoire unique, située à l'aval d'un captage pour l'alimentation en eau potable. Ce captage n'est pas en service au cours de la période d'étude. L'écoulement est ensuite séparé en deux. Une partie, Saint-Frézal haut, est évacuée par un canal de 1,3 m de large. Ce canal rejoint la pisciculture de la Canourgue. L'autre partie des écoulements, Saint-Frézal bas, s'écoule au travers d'un canal de 1,45 m de large. La mesure des hauteurs est effectuée dans chacun des canaux. Au cours du printemps 2006 le seuil du canal de Saint-Frézal bas s'est effondré, responsable d'une chute du niveau d'eau à la station de mesure. Le seuil a été reconstruit en août 2006.

La végétation influence également les mesures. Des chutes de 4 cm sont observées sur Saint-Frézal bas, elles sont beaucoup plus faibles sur Saint-Frézal haut, de l'ordre du cm. Du point de vue des débits l'impact de la végétation est estimé à plusieurs dizaines de l/s.

La courbe de tarage est validée sur les deux sites. Le débit total de la source est présenté ci-dessous.

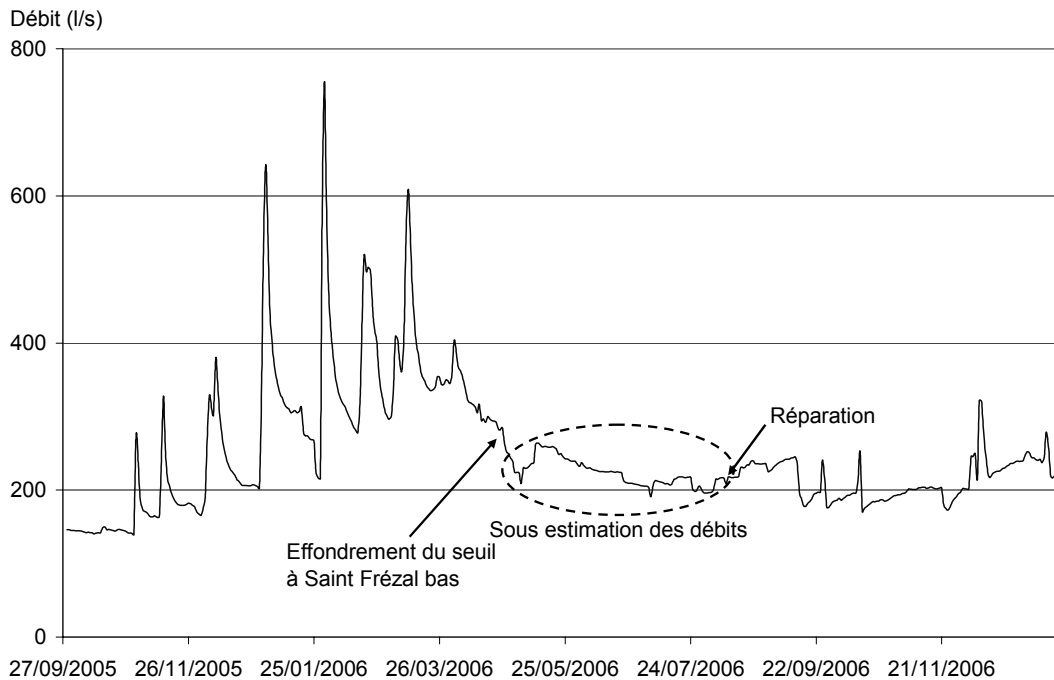


Illustration 36 - Débit à la source de Saint Frézal (pas de temps journalier).

i) Golf

L'ensemble du site est caractérisé par un développement très important de la végétation. L'analyse des données montre que les hauteurs d'eau mesurées ne sont pas représentatives des débits de la source. La végétation modifie de façon très importante les écoulements naturels, et de plus, des sous-écoulements en provenance de l'Urugne ne doivent pas être exclus. De ce fait, l'utilisation des données est impossible. L'étude hydrologique de cette source ne peut donc pas être effectuée.

De plus, lors des périodes de précipitations, des écoulements pluviaux se déversent à l'amont de la station de mesure, ainsi qu'à l'aval du seuil de jaugeage (Illustration 37), pouvant occasionner des perturbations sur les enregistrements de hauteur d'eau.

Du fait de l'influence de la végétation, les débits jaugés servant à l'établissement de la courbe de tarage ne sont pas non plus de bonne qualité. Faute de mieux, la courbe de tarage est toutefois conservée et la chronique de débit est fournie à titre indicatif (Illustration 38).



Illustration 37 - Déversement des eaux pluviales chargées en sédiments à l'aval direct du seuil de jaugeage.

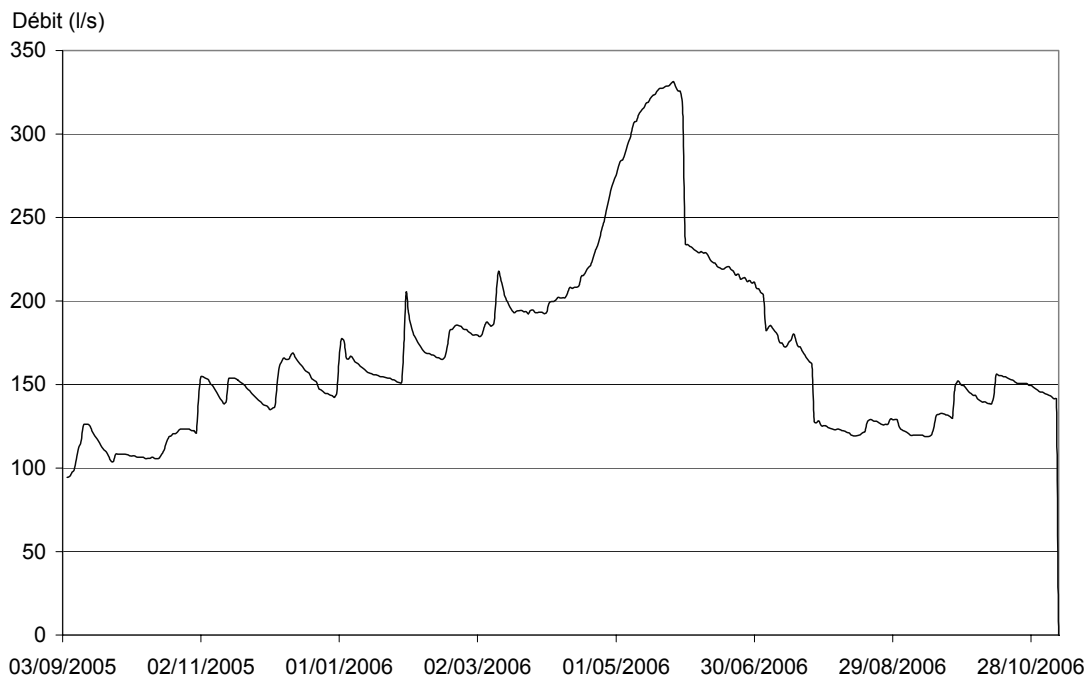


Illustration 38 - Débit à la source de Golf (pas de temps journalier).

j) *Urugne*

Les débits jaugés sont représentatifs, la courbe de tarage est ainsi de bonne qualité. La chronique des débits est présentée ci-dessous.

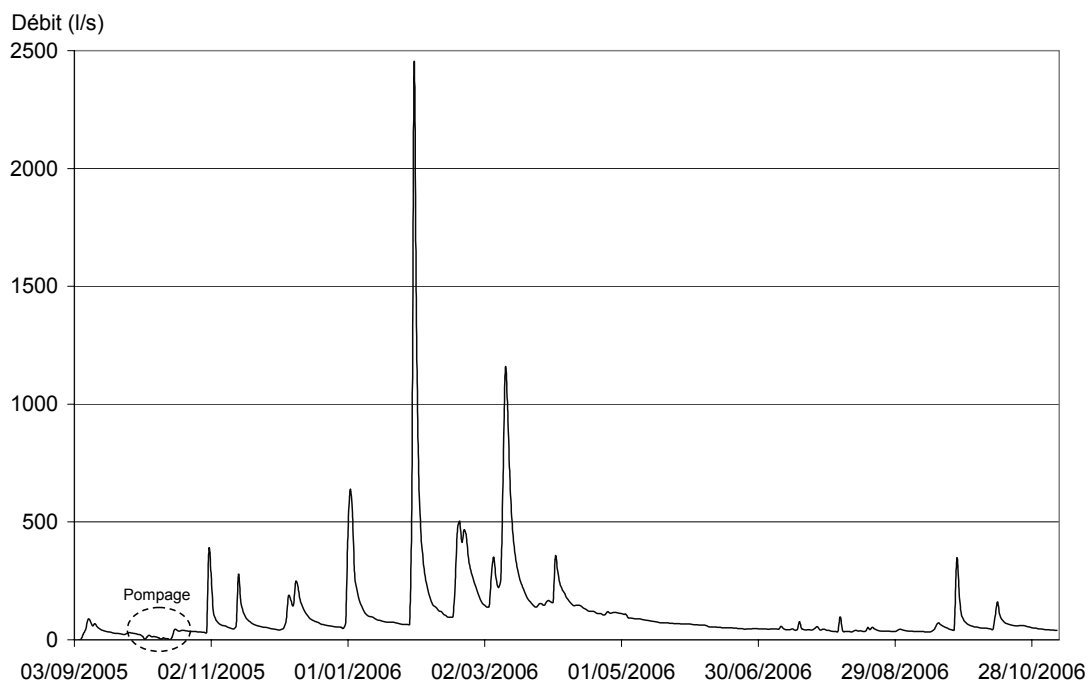


Illustration 39 - Débit à la source d'Urugne (pas de temps journalier).

Au cours des périodes d'étiage, une infiltration de l'Urugne à l'aval de la station de jaugeage prend place ; le cours d'eau se perd dans les formations géologiques. Des mesures de débits par jaugeage différentiel au micro-moulinet ont été effectuées le 19 février 2007 par GAEA, en huit points, de l'aval de la station de mesure de l'Urugne au camping à l'aval de la prise d'eau au niveau de l'ancien moulin à l'amont de la station de mesure de la source Golf. La localisation des différents points de mesures est reportée sur les illustrations suivantes : Illustration 40, Illustration 41 et Illustration 42

Les valeurs de débits mesurés au niveau des huit points sont les suivantes :

Jaugeage	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6	N°7	N°8
Débit (l/s)	231	66	45	269	261	294	46	435

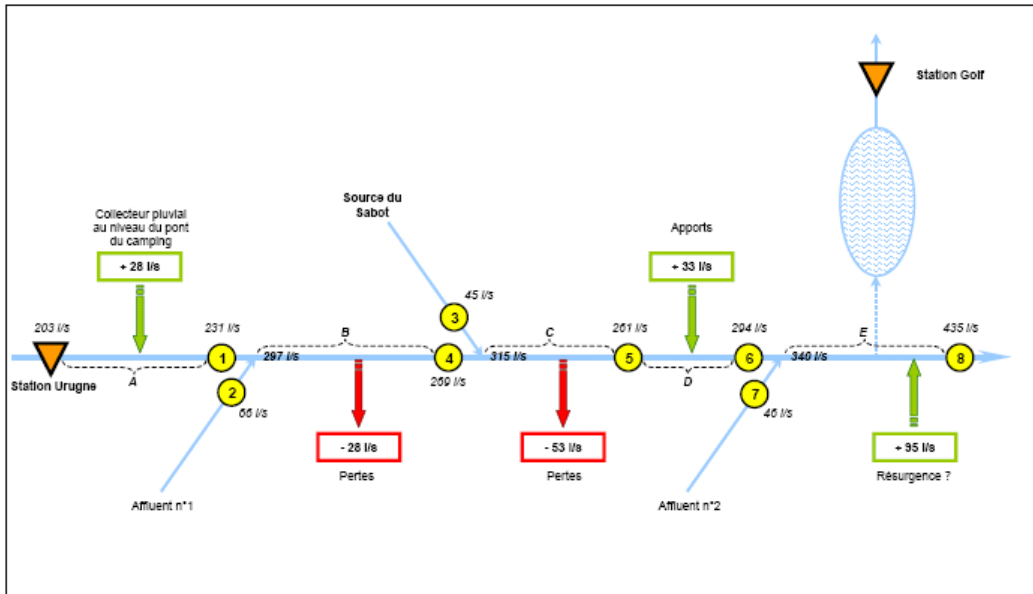


Illustration 40 - Schéma récapitulatif des jaugeages et de leur résultat à l'aval de la station de mesures de l'Urgune.

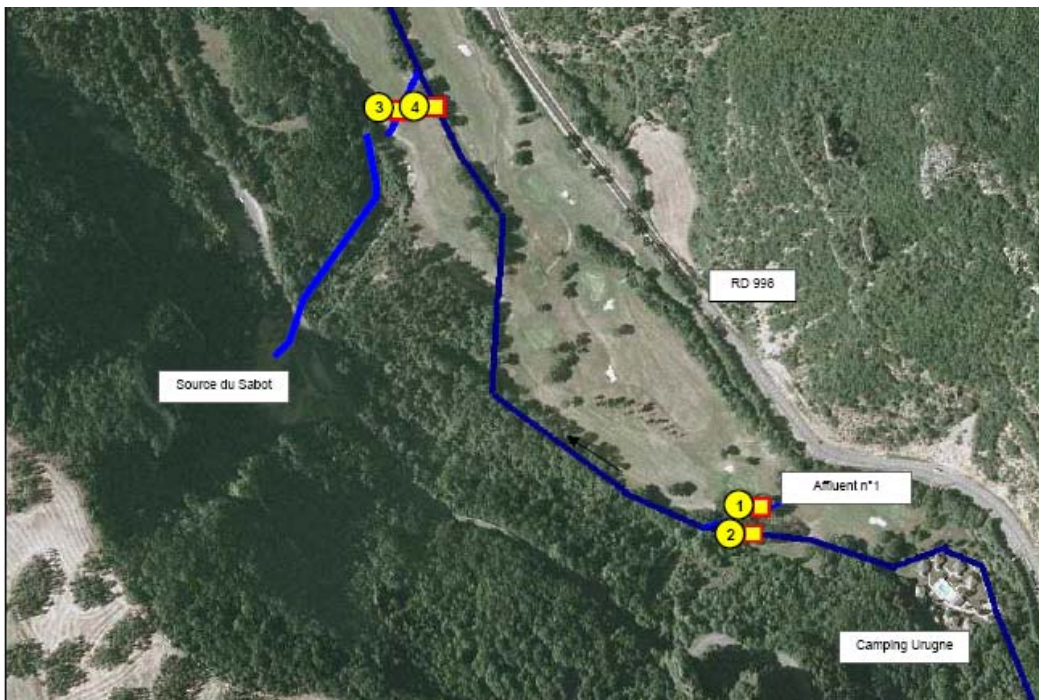


Illustration 41- Localisation des points 1 à 4 de jaugeages à l'aval de la station de mesure de l'Urgune au niveau du Camping

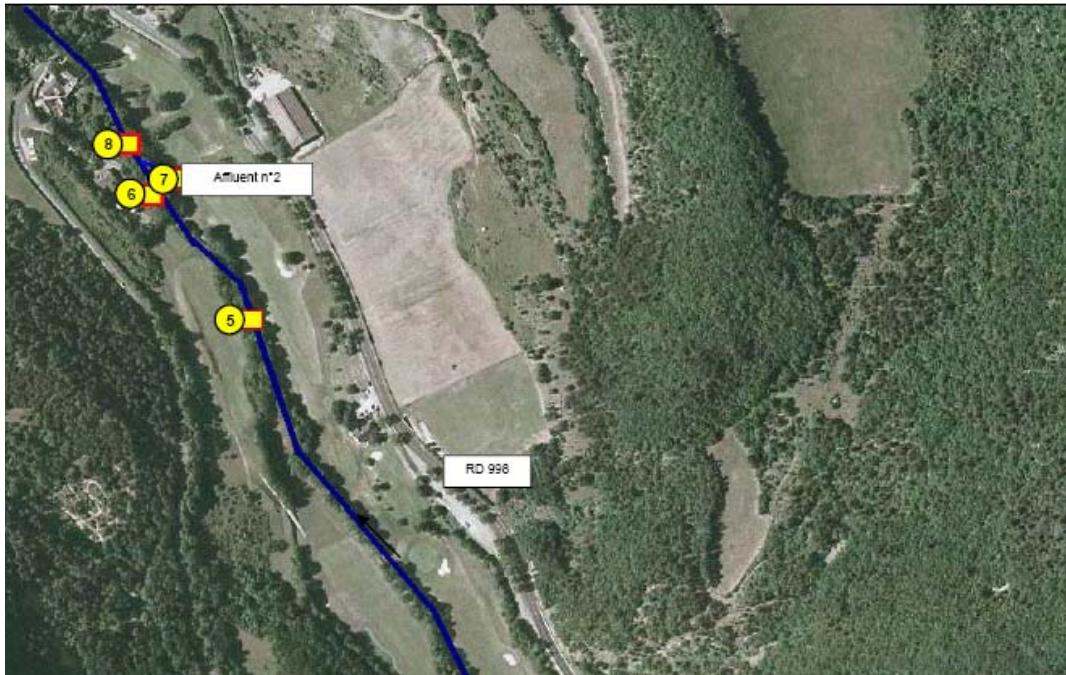


Illustration 42 - Localisation des points 5 à 8 de jaugeages à l'aval de la station de mesure de l'Urugne

Le calcul des débits d'eau au niveau des trois confluences sur l'Urugne permet de donner les valeurs suivantes :

- confluence de l'Urugne (jaugeage 1) et de l'affluent n°1 (jaugeage 2) : **297 l/s**,
- confluence de l'Urugne (jaugeage 4) et de la source du Sabot (jaugeage 3) : **315 l/s**,
- confluence de l'Urugne (jaugeage 6) et de l'affluent n°2 (jaugeage 7) : **340 l/s**.

La réalisation de jaugeages en différents points du cours dans la zone étudiée sur l'Urugne permet de déterminer des secteurs excédentaires (apports d'eau) et déficitaires (pertes d'eau). Ces cinq secteurs sont les suivants, reportés à Illustration 40 :

- Secteur A : apports d'eau + 297 l/s,
- Secteur B : Pertes d'eau - 28 l/s,
- Secteur C : Pertes d'eau -53 l/s,
- Secteur D : Apports d'eau + 33 l/s,
- Secteur E : apports d'eau + 95 l/s.

Au niveau du secteur A, les apports d'eau ont été clairement identifiés : il s'agit de collecte d'eaux pluviales dans des conduites se déversant au niveau du point dans le camping de l'Urugne.

En période d'étiage, le cours d'eau coule faiblement dans les secteurs A et B, puis est à sec au niveau des secteurs C et D ; une résurgence de ce cours d'eau apparaît au niveau du secteur E.

Une résurgence d'une partie des pertes de l'Urugne prend place entre les points 6 et 8, tout en considérant l'apport de l'affluent n°2. Des résurgences en provenance des pertes de l'Urugne au niveau de la vasque de l'ancien moulin de la source Golf ne sont pas à exclure. Une relation hydraulique entre les deux sources a été démontrée lors des restitutions des traçages (cf rapport du Lot N°4, BRGM-RP-55160-FR).

3.2. JAUGEAGES DES SOURCES DE CATEGORIE II ET III

Des mesures à l'étiage et en condition de moyennes eaux ont été effectuées sur les 37 sources de catégorie II et les 33 sources de catégorie III, par GAEA Ingénierie.

Ces mesures ont été réalisés à l'étiage de l'année 2005 (09/2005 et 08/2006) et pour la période de moyennes eaux en 2006 (février 2006) pour les sources de catégorie 2. Quant aux sources de catégorie 3, seules des mesures en période d'étiage ont été réalisées. En plus des mesures de débits, des données de conductivité et de températures ont été prises. Les coordonnées ont été prises à l'aide d'un GPS pour toutes les sources, ainsi que des planches photographiques établies. L'ensemble des planches photographiques constituées par GAEA, ainsi que les mesures sont en annexe 4, respectivement aux tableaux 8 à 13.

SOURCES ALIMENTANT LE TARN			MESURES À L'ÉTIAGE - Septembre 2005 / Août 2006					MESURES MOYENNES EAUX - Février 2006				
NOM	COMMUNE	CAUSSE	Date	Débit (en l/s)	Conductivité (en µS/cm)	pH	Température (en °c)	Date	Débit (en l/s)	Conductivité (en µS/cm)	pH	Température
Vizoir (Le) ou Source de la Fontaine	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	30/08/2005	1.00	409	7.7	12.1	07/02/2006	23.20	371	7.3	10.9
Molines (Source de) ou du Vigos	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	30/08/2005	25.96	310	8	11.1	07/02/2006	155.00	327	7.2	10.7
								07/02/2006	30.00	Trop plein1		
Vieux Moulin (Le)	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	30/08/2005	2.30	627	7.5	13.2	07/02/2006	118.00	314	7.0	10.7
Beldou	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	30/08/2005	4.50	390	7.6	12.1	Non estimable				
Pontet	Quézac	Méjean - Tarn	30/08/2005	1.50	355	8.3	11.8	07/02/2006	70.00	349	7.7	10.2
Rocheblave ou Fount de Bon Tarn	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	30/08/2005	1.14	281	8.1	11.7	07/02/2006	37.50	304	7.1	10.9
Castelbouc 1	Sainte-Énimie	Méjean - Tarn	31/08/2005	-	x	x	x	07/02/2006	*1650.00	292	7.4	10.1
Castelbouc 2	Sainte-Énimie	Méjean - Tarn	31/08/2005	-	x	x	x	07/02/2006	715.00	304	7.4	10.1
Castelbouc 3	Sainte-Énimie	Méjean - Tarn	31/08/2005	-	x	x	x	07/02/2006	9.00	302	7.4	9.8
Castelbouc 4	Sainte-Énimie	Méjean - Tarn	31/08/2005	-	x	x	x	07/02/2006	29.00	320	7.6	9.3
Estivants	Sainte-Énimie	Méjean - Tarn	31/08/2005	57.00	301	8.1	11.1	07/02/2006	238.00	303	7.3	10.2
Moulin-de-Pelatan	Montbrun	Méjean - Tarn	31/08/2005	13.50	305	8.1	12.0	08/02/2006	124.00	321	7.3	10.6
Piboulède ou de la Rabinelle	Prades	Sauveterre - Tarn	31/08/2005	-	x	x	x	08/02/2006	147.00	324	7.2	10.8
Jargile ou Faubio ou Piboulède	Sainte-Énimie	Méjean - Tarn	31/08/2006	7.30	305	7.3	11.5	08/02/2006	82.00	340	7.5	10.3
Coussac	Sainte-Énimie	Sauveterre - Tarn	04/09/2005	120.00	369	7.7	12.3	06/02/2006	581.00	383	7.0	10.8

Tableau 9 - Données de débit et des paramètres physico-chimiques des sources de catégorie 2 –côté Tarn –(GAEA Ingénierie)

SOURCES ALIMENTANT LE TARN			MESURES À L'ÉTIAGE - Septembre 2005 / Août 2006					MESURES MOYENNES EAUX - Février 2006				
NOM	COMMUNE	CAUSSE	Date	Débit (en l/s)	Conductivité (en µS/cm)	pH	Température (en °c)	Date	Débit (en l/s)	Conductivité (en µS/cm)	pH	Température
Pougnadoires	Sainte-Énimie	Sauveterre - Tarn	04/09/2005	1.60	375	8.0	11.1	08/02/2006	114.00	382	6.9	10.3
Barque (La) ou Fontchaude	Sainte-Énimie	Méjean - Tarn	04/09/2005	3.50	360	7.6	12.9	08/02/2006	21.60	353	7.1	12.6
Château de la Caze	Laval-du-Tarn	Sauveterre - Tarn	04/09/2005	0.55	408	8.1	11.9	08/02/2006	149.00	401	6.9	10.6
Fontaine (La) ou Clujade	Sainte-Énimie	Sauveterre - Tarn	04/09/2005	4.00	376	7.7	12.5	08/02/2006	46.00	378	6.9	12.0
Moulin	La Malène	Sauveterre - Tarn	04/09/2005	0.70	340	7.7	17.6	08/02/2006	*8.00	x	x	x
Pont de la Malène	La Malène	Méjean - Tarn	05/09/2005	7.50	362	7.6	11.2	08/02/2006	*24.00	x	x	x
Ardennes	La Malène	Méjean - Tarn	05/09/2005	176	322	7.7	12.2	08/02/2006	*1150.00	318	7.0	10.7
								08/02/2006	21.00	Trop plein1		
								08/02/2006	17.00	Trop plein2		
								08/02/2006	1 047.00	Trop plein3		
Débarcadère (nom approximatif)	Saint-Georges de Lévejac	Sauveterre - Tarn	05/09/2005	5.40	368	7.8	10.7	08/02/2006	10.00	387	7.1	10.6

Tableau 10 - Données de débit et des paramètres physico-chimiques des sources de catégorie 2 –côté Tarn (suite) –(GAEA Ingénierie)

SOURCES ALIMENTANT LE LOT			MESURES À L'ÉTIAGE - Septembre 2005 / Août 2006					MESURES MOYENNES EAUX - Février 2006				
NOM	COMMUNE	CAUSSE	Date	Débit (en l/s)	Conductivité (en µS/cm)	pH	Température	Date	Débit (en l/s)	Conductivité (en µS/cm)	pH	Température
Lycée ou Pas de l'Ane	La Canourgue	Sauveterre - Lot	19/09/2005	1.50	499	7.6	12.5	09/02/2006	1.83	387	7.1	9.5
St Frézal 2	La Canourgue	Sauveterre - Lot	19/09/2005	6.00	375	7.7	11.5	09/02/2006	6.00	409	7.0	10.5
Sabot	La Canourgue	Sauveterre - Lot	19/09/2005	-	x	x	x	09/02/2006	57.00	439	7.0	10.3
Source Verdios	Saint-Saturnin	Sauveterre - Lot	19/09/2005	0.30	408	8.3	11.2	09/02/2006	11.00	403	7.5	8.0
Roque ou Roque-Basse	La Canourgue	Sauveterre - Lot	19/09/2005	0.30	406	8.0	10.5	09/02/2006	16.50	412	7.4	10.0
Roque-Haute	La Canourgue	Sauveterre - Lot	31/08/2006	0.85	422	7.9	13.3	<i>Non localisée</i>				
Marijoulet ou de la Bartasse	La Canourgue	Sauveterre - Lot	19/09/2005	2.00	399	7.7	11.1	09/02/2006	27.10	416	7.2	10.1
Chardonnet	La Canourgue	Sauveterre Lot	19/09/2005	5.00	402	8.1	11.1	09/02/2006	37.00	403	7.4	9.7
Fontaine du Lait (ou Gte Guichard)	Barjac	Sauveterre - Lot	20/09/2005	15.00	449	7.6	11.1	09/02/2006	67.00	442	7.6	10.3
Castel (Fouont del)	Balsièges	Sauveterre - Lot	20/09/2005	14.00	391	7.5	10.7	09/02/2006	107.00	379	7.0	10.0
Banet ou Bannet	Balsièges	Sauveterre - Lot	20/09/2005	1.05	383	7.7	9.8	09/02/2006	16.00	395	7.1	9.7
Chalhac	Saint-Etienne du Valdonnez	Sauveterre - Lot	20/09/2005	3.50	334	7.8	8.9	09/02/2006	16.00	344	7.3	8.6
Valoubière	Saint-Etienne du Valdonnez	Sauveterre - Lot	20/09/2005	19.00	320	8.3	9.3	09/02/2006	53.00	336	7.9	7.2

Tableau 11 - Données de débit et des paramètres physico-chimiques des sources de catégorie 2 –côté Lot –(GAEA Ingénierie)

SOURCES ALIMENTANT LE TARN			MESURES À L'ÉTIAGE - Septembre 2005 / Août 2006				
NOM	COMMUNE	CAUSSE	Date	Débit (en l/s)	Conductivité (en µS/cm)	pH	Température (en °c)
Fontarnal	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	30/08/2005	0.06	342	7.8	10.4
Salanson-inf.	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	31/08/2006	0.02	289	7.5	12.5
Salanson-sup.	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	30/08/2005	0.001	324	8.0	12.1
Espinards	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	30/08/2005	0.08	373	8.4	14.7
Réjal	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	30/08/2005	-	x	x	x
Oulette ou Gourgue du pré Morjal	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	30/08/2005	-	x	x	x
Fountchardese	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	30/08/2005	-	x	x	x
Pontet 2	Quézac	Méjean - Tarn	30/08/2005	-	x	x	x
Diva	Quézac	Sauveterre - Tarn	31/08/2006	g à g	1 635	6.7	16.3
Del Ron	Quézac	Sauveterre - Tarn	31/08/2005	-	x	x	x
Charbonnières n°1 (ou Fontaine de la Crotte)	Montbrun	Méjean - Tarn	31/08/2006	0.10	292	7.9	10.5
Pont de Montbrun	Montbrun	Méjean - Tarn	31/08/2005	-	x	x	x
Fouont	Montbrun	Méjean - Tarn	31/08/2005	-	x	x	x

Tableau 12 - Données de débit et des paramètres physico-chimiques des sources de catégorie 3 –côté Tarn –(GAEA Ingénierie)

SOURCES ALIMENTANT LE TARN			MESURES À L'ÉTIAGE - Septembre 2005 / Août 2006				
NOM	COMMUNE	CAUSSE	Date	Débit (en l/s)	Conductivité (en µS/cm)	pH	Température (en °c)
Pré de Ribes	Montbrun	Méjean - Tarn	31/08/2005	-	x	x	x
Bissoudo	Montbrun	Méjean - Tarn	31/08/2005	-	x	x	x
Prades	Sainte-Énimie	Sauveterre - Tarn	31/08/2005	-	x	x	x
Tieure (La) ou Tibre (du)	Sainte-Énimie	Sauveterre - Tarn	04/09/2005	-	x	x	x
Galène (La)	La Malène	Méjean - Tarn	05/09/2005	-	x	x	x
Baumes-Basses	Saint-Georges de Lévejac	Sauveterre - Tarn	05/09/2005	-	x	x	x
St Hilaire	Saint-Georges de Lévejac	Sauveterre - Tarn	05/09/2005	-	x	x	x

Tableau 13 - Données de débit et des paramètres physico-chimiques des sources de catégorie 3 –côté Tarn (suite) –(GAEA Ingénierie)

SOURCES ALIMENTANT LE LOT			MESURES À L'ÉTIAGE - Septembre 2005 / Août 2006				
NOM	COMMUNE	CAUSSE	Date	Débit (en l/s)	Conductivité (en µS/cm)	pH	Température
Boulay	La Canourgue	Sauveterre - Lot	19/09/2005	0.01	464	7.9	15.9
Source de Débousélade	La Canourgue	Sauveterre - Lot	<i>Non trouvée - Source inconnue</i>				
Rouges-Parets	La Canourgue	Aquifères superficiels	19/09/2005	0.05	454	7.8	9.4
Fount-Matabiau ou Clau del Bousquet	Saint-Saturnin	Sauveterre - Lot	19/09/2005	0.80	412	8.3	12.0
Caumistre	Saint-Saturnin	Sauveterre - Lot	19/09/2005	-	x	x	x
Villard	Chanac	Sauveterre - Lot	<i>Mesures impossibles</i>				
Saelles	Saelles	Sauveterre - Lot	01/09/2006	0.50	527	6.9	10.3
Esclanèdes	Esclanèdes	Sauveterre - Lot	19/09/2005	0.40	477	7.6	11.8
Villaret	Barjac	Sauveterre - Lot	20/09/2005	0.06	402	8.1	13.4
Bramonas ou Fouont de l'Oume	Balsièges	Sauveterre - Lot	20/09/2005	-	x	x	x
Lion (Ravin du)	Balsièges	Sauveterre - Lot	20/09/2005	0.03	495	8.3	9.9
Delbouc ou Chomeur ou Pruneyrolles	Saint-Etienne du Valdonnez	Sauveterre - Lot	20/09/2005	0.50	349	7.9	8.8
Pruneyrolles	Saint-Etienne du Valdonnez	Sauveterre - Lot	20/09/2005	0.50	344	8.1	9.0

Tableau 14 - Données de débit et des paramètres physico-chimiques des sources de catégorie 3 –côté Lot –(GAEA Ingénierie)

4. Données hydrochimiques

4.1. DONNEES DISPONIBLES

La période d'acquisition des éléments physico-chimiques n'étant pas concomitante à la période de suivi hydrologique, l'étude des analyses chimiques est rendue plus difficile.

En particulier, l'analyse en termes de fonction de transfert à partir de l'analyse des teneurs en Ca et Mg. Deux conditions essentielles doivent être vérifiées pour mener à bien ce type d'analyse : (i) la connaissance des débits au pas de temps journalier est nécessaire pour caractériser au préalable l'hydrogramme unitaire des systèmes et (ii) le suivi hydrochimique des sources doit être réalisé à un pas de temps fin (journaliser lors des crues et hebdomadaire lors des périodes d'étiage. On peut s'affranchir d'un tel suivi chimique si les paramètres physico-chimiques (conductivité et température) sont enregistrés en continu, comme a pu le montrer Ladouche et al., (2002 et 2004) lors de l'étude sur les systèmes karstiques des Cent-Fonts (Hérault) et des Corbières Orientales (Pyrénées Orientales).

Dans cette étude, l'étude du fonctionnement hydrogéologique et de la structure géologique des systèmes a été abordée essentiellement à partir des indices de saturation vis-à-vis de la calcite, de la pCO₂ et du nitrate ; des informations complémentaires avec des données isotopiques du strontium permettent de confirmer les horizons géologiques concernés par les écoulements.

4.1.1. Suivi hydrochimique

Le suivi hydrochimique a été effectué par le Conseil Général de la Lozère en relation avec le SIVOM Grand Site, de septembre 2003 à septembre 2004 à une fréquence de tous les 2 mois, pour les 16 sources suivantes :

Dénomination de la source	Commune
Source de St-Frézal	La Canourgue
Source de Moline	Ispagnac
Source du Moulin	La Canourgue
Source d'Urugne	La Canourgue
Source de Burle	Sainte-Enimie
Source de Rocheblave	Ispagnac
Source de Bernarde	Chanac
Source Les Fonts	Saint Beuzile
Source de Angle	La Malène
Source de Famounet	Saint-Georges-de-Lévéjac
Source de la Clujade	Sainte-Enimie
Source de Beldou	Ispagnac
Source du Vieux Moulin	Ispagnac

Dénomination de la source	Commune
Source de Chalhac	Sainte Etienne du Valdonnez
Source Delcastel	Balsièges
Source de Marijoulet	La Canourgue

Les paramètres suivants ont été analysés : T°, conductivité électrique de l'eau, pH, Ca, Mg, Cl, Na, K, HCO₃, SO₄, NO₃, P total et ortho-phosphates, TAC, TH°, turbidité, silice, ainsi que la microbiologie (BSIR, CTF, Ecoli, GT22, GT36_44 et STRF) et des substances indésirables pour deux campagnes (AS, ATRZ, CD, CRT, CU, FET, NI, PB, SB, SE, ZN). Toutes ces analyses ont été effectuées par le laboratoire d'analyses du Conseil Général de la Lozère (Annexe 5)

Deux campagnes (hautes eaux et étiage en 2003 et 2004) de prélèvements ont été réalisées par le Conseil Général de la Lozère en collaboration avec le SIVOM Grand Site sur les 42 sources de catégories II et III (de débit > 1 et < 25 l/s) ; les paramètres suivants ont été analysés : T°, conductivité, pH, turbidité, Ca, Mg, Cl, Na, K, HCO₃, SO₄, NO₃, TAC°, TH°, Silice et P total et ortho-phosphates (Annexe 5).

4.1.2. Suivi isotopique

Les quatre sources suivantes ont fait l'objet d'analyses isotopiques du Tritium ainsi que de l'isotope de l'oxygène, à raison d'un échantillonnage en période d'étiage de 2005 et 2006. Les sources concernées sont d'une part deux sources de l'aquifère inférieur avec St-Frézal et Molines et l'aquifère supérieur avec Urugne et Famounet. Les analyses ont été réalisées par le service MMA du BRGM à Orléans.

4.2. ACQUISITION DES DONNEES COMPLEMENTAIRES PAR LE BRGM

Des analyses complémentaires ont été effectuées par le BRGM dans le cadre de projets annexes, en été 2006 pour certaines des sources principales. Ces analyses complémentaires concernent notamment des analyses isotopiques du strontium en plus des analyses des ions majeurs.

5. Interprétation hydrologique et hydrochimique

5.1. INTERPRETATION HYDROLOGIQUE DES SOURCES DE CATEGORIE I

L'analyse hydrologique est présentée de manière détaillée pour la source de Burle. Pour les autres sources de catégorie I, seuls les principaux résultats sont présentés aux paragraphes 5.2 pour les sources de catégorie I, côté Tarn et 5.3 pour les sources de catégorie I, côté Lot. Les sources, côté Tarn, provenant du Causse Méjean ont également été interprétées à titre comparatif, en terme de développement de la karstification. L'ensemble des informations est synthétisé dans le tableau 14, les différentes illustrations sont en annexe 6.

	Source	Qmin (l/s)	Qmax (l/s)	Qmoy (l/s)	Vinterannuel (Mm3)	α	i	K	Effet mémoire (j)	Réponse impulsionnelle	Degré de karstification
Causse Sauveterre Coté Tarn	Burle	100	30500	630	13,4	0,002	0,25	0,4	10	pointue	+++
	Angle	30	3300	70	2	0,0025	0,7	0,9	40	intermédiaire	++
	Famounet	30	630	70	1,2	0,0008	0,7	3,2	50	étalée	+ / ++
Causse Méjan	St Chély	20	1200	110	3,7	0,001	0,35	0,7	30	pointue	+++
	Cénarète	10	3900	55	2,2	0,008	0,4	0,2	28	pointue	+++
Causse Sauveterre Coté Lot	Les Fonts	10	1050	80	3,7	0,01	0,5	0,4	88	intermédiaire	++
	Bernade	18	90	33	1	0,005	0,98	0,8	98	étalée	+
	St Frézal	140	750	250	8,1	0,0015	0,6	1,7	56	intermédiaire	++
	Golf	100	330	170							
	Urugne	30	2440	120	4	0,002	0,4	0,5	6	pointue	+++

Tableau 15 - Tableau récapitulatif des différents paramètres de l'étude hydrologique (+ : système peu karstifié, ++ : système moyennement karstifié, +++ : système très karstifié).

5.2. INTERPRETATION HYDROLOGIQUE DES SOURCES DE CATEGORIE I COTE TARN

5.2.1. Source de Burle

Cette source est la source la plus importante du Causse de Sauveterre du secteur est. Sur la période d'étude, les débits varient entre 30 l/s et 30000 l/s. Le débit moyen est 630 l/s. A une centaine de mètres, une seconde source nommée Coussac sort à flanc de falaise avant de rejoindre quelques mètres plus bas le Tarn. La source de Coussac est également une source aux débits importants. Elle est à une altitude inférieure à celle de Burle et encore plus proche du Tarn. De ce fait, la source de Coussac est fréquemment submergée par le Tarn lors des crues. De plus, le site est difficile d'accès. Pour ces deux raisons la source de Coussac n'a pas été instrumentée. Compte tenu de la proximité avec la source de Burle, ces deux sources constituent l'exutoire d'un même système karstique. Faute de mesures, il n'est pas possible de préciser les relations qui existent entre elles.

a) *Analyse des débits classés*

L'analyse des débits classés est présentée à l'illustration 43. Trois ruptures ont été identifiées pour des valeurs de débits proches de 0,3 m³/s (1^{ère} rupture), des valeurs de 3 m³/s (2^{ème} rupture) et pour des débits proches de 10 m³/s (3^{ème} rupture). La première rupture de pente se produit en contexte de moyennes et/ou de basses eaux pour une fréquence cumulée d'environ 50 %. La seconde rupture (débit proche de 3 m³/s) se produit pour une fréquence cumulée de 98 % en contexte de crue. La troisième rupture (débit de plus de 10 m³/s) se produit pour une fréquence cumulée de 99,7 % en contexte de très forte crue. En moyennes et basses eaux, la pente α_2 est inférieure à α_1 . En période de crue ($Q > 3$ m³/s), la pente de la droite α_3 est inférieure à α_2 . En période de très forte crue ($Q > 10$ m³/s), la pente de la droite α_4 est supérieure à α_3 . Les caractéristiques de la distribution permettent de mettre en évidence les points suivants (Mangin, 1971, Marsaud, 1996) :

- pour des débits inférieurs à 0,3 m³/s, le comportement du système est très inertiel et traduit globalement la vidange des réserves ;
- lorsque le débit excède 0,3 m³/s, les propriétés hydrauliques du système changent, le système évacue plus facilement les eaux (les débits classés augmentent plus rapidement). Ce changement de comportement peut traduire :
 - une modification des conditions d'entrée (alimentation par exemple par les eaux ayant transitées rapidement par la zone non saturée lors des crues, on parle alors d'effet de chasse) ;
 - (et/ou) une modification des conditions de sortie. Dans ce cas, les conditions de sortie des eaux apparaissent favorisées et peuvent également traduire une diminution de la capacité de stockage du milieu ;
- lorsque le débit excède 3 m³/s, les propriétés hydrauliques du système changent à nouveau, et le système évacue encore plus facilement les eaux. Ce changement

peut être lié à l'utilisation d'un chemin préférentiel des eaux d'infiltration dans la zone noyée ;

- enfin, pour un débit supérieur à 10 m³/s, le système évacue moins facilement les eaux ($\alpha_4 > \alpha_3$). Ce comportement peut traduire un problème au niveau de la courbe de tarage pour les débits très élevés (débits sous estimés) ou la mise en fonction de trop-plein (Coussac peut peut-être avoir un fonctionnement également à partir d'un certain débit, de trop plein).

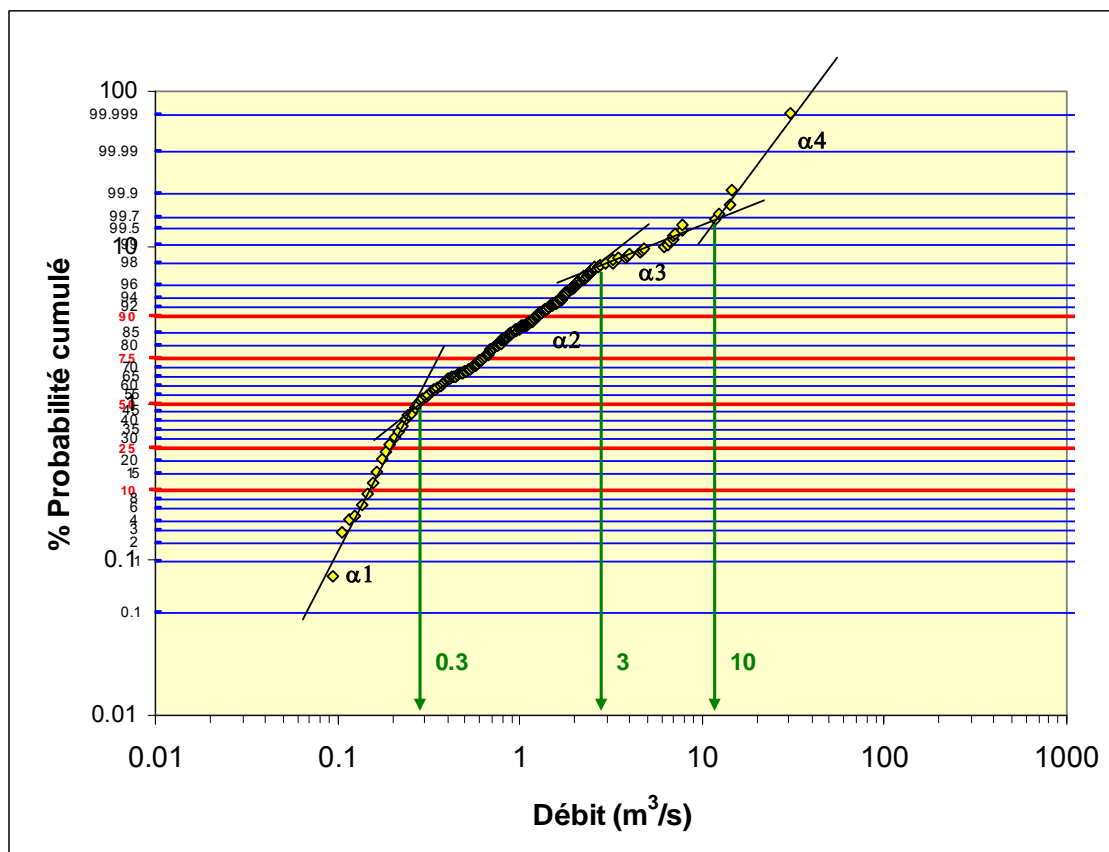
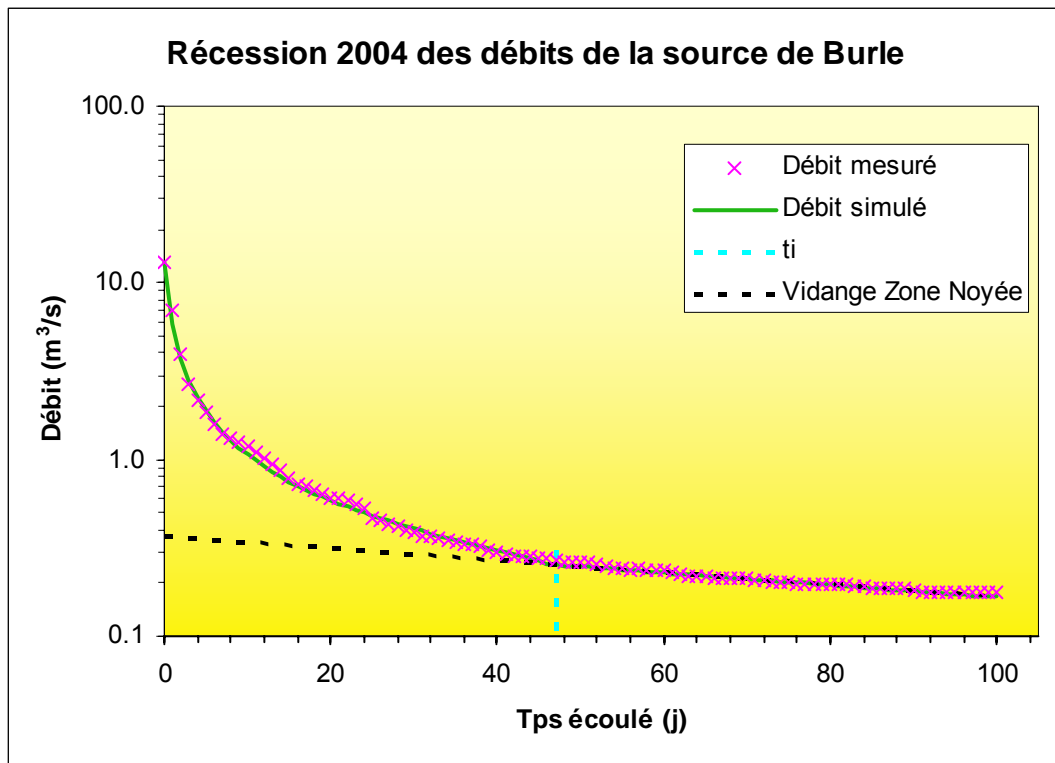


Illustration 43 - Débits classés de la source de Burle sur l'ensemble des données de la période novembre 2003-janvier 2007 (classe de débit de 0,01 m³/s).

b) Analyse des courbes de récession

La méthode de Mangin, telle que présentée au chapitre 2, permet de décrire assez fidèlement les évolutions des débits de la source de Burle lorsque les récessions sont de durée « classique », de l'ordre de 3 mois. La récession d'avril 2004 est ainsi traitée (Illustration 44).



Date	Débit (m ³ /s)
Début Récession	30/04/2004
Fin Récession	08/08/2004
alpha (coef tarisement)	0.008
epsilon (coef d'hétérogénéité d'écoulement)	1.3000
QRo	0.370
ti (tps fin d'infiltration)	47

Q0 (débit de crue debut recession)	13.187
qo (débit d'infiltration à t=0)	12.817
eta (vitesse moyenne d'infiltration)	0.0213
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.27
Critère de Nash (qualité de la simulation)	99.33
Volume dynamique (million de m ³)	4.00
V'dyn -vol écoulé après ti	1.77
Volume d'infiltration (million de m ³)	3.38
Volume moyen interannuel (million de m ³)	13.4
Pouvoir régulateur K	0.30

Illustration 44 - Décomposition de la récession 2004 de la source de Burle selon la méthode de Mangin (1970).

Pour cette récession la méthode de Mangin semble adaptée, mais l'étude d'une crue plus longue (2005) révèle que la décrue a une durée supérieure à 100 jours. Ainsi

l'étude de la récession de 2004 ne permet pas de caractériser le tarissement, car le système est encore influencé par l'infiltration (phase de décrue). Elle ne donne pas, ainsi, accès aux informations concernant le fonctionnement de la zone noyée, les résultats ne doivent pas être pris en compte.

De plus, la méthode de Mangin s'avère non appropriée pour décrire le fonctionnement du système dans un contexte hydrologique de très basses eaux comme celui observé lors du cycle 2005-2006. Pour ce cycle hydrologique la récession a débuté le 26/04/2005 et a duré 132 jours (Illustration 45). Cette récession va ainsi permettre d'accéder aux caractéristiques de la zone noyée.

Pour décrire la récession du cycle hydrologique 2005-2006, on prend en compte de manière différenciée les dynamiques d'écoulements au sein de la zone d'infiltration, à savoir l'infiltration rapide et infiltration lente (Ladouche et al., 2006).

Deux fonctions homographiques distinctes $\psi_1(t)$ et $\psi_2(t)$ ont été utilisées pour décrire l'infiltration rapide et l'infiltration lente où retardée :

$$\text{Infiltration rapide : } \psi_1(t) = q_{o1} \frac{1 - \eta_1 t}{1 - \varepsilon_1 t}$$

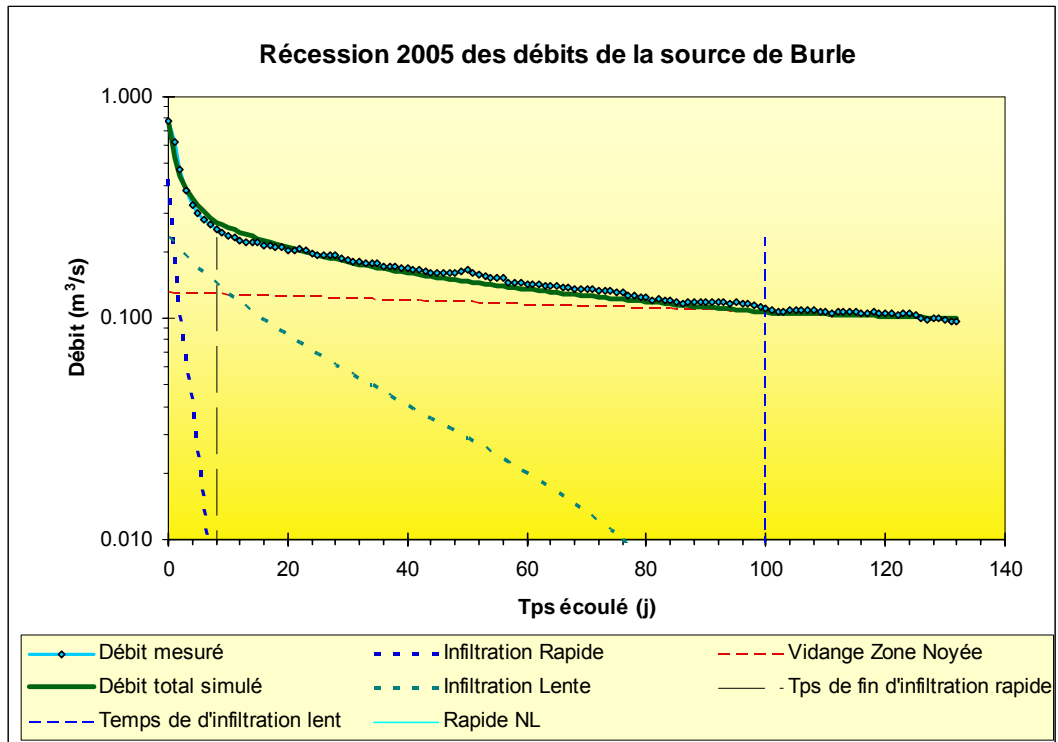
$$\text{Infiltration lente (ou retardée) : } \psi_2(t) = q_{o2} \frac{1 - \eta_2 t}{1 - \varepsilon_2 t}$$

La vidange de la zone noyée de l'aquifère est toujours décrite à l'aide du modèle 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 observés.

La récession est ainsi traitée et les résultats sont présentés de façon synthétique dans le tableau de l'illustration 45.



Début Récession	26/04/05
Fin Récession	05/09/05
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	1.000
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	8
Débit d'infiltration (à t=0)	0.421
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.06
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	100
q_{0,2} (débit d'infiltration à t=0)	0.23
Coef tarissement Zone Noyée	0.002
Q ₀ Zone noyée (m ³ /s)	0.130

vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.125
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.010
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.25
Critère de Nash (qualité de la simulation)	96.99
Volume d'infiltration rapide (million de m ³)	0.07
Volume d'infiltration lente (million de m ³)	0.43
Volume dynamique (million de m ³)	5.62
Volume interannuel	13.4
Pouvoir régulateur K (million de m ³)	0.42

Illustration 45 - Décomposition de la récession 2005 de la source de Burle selon la méthode modifiée de Mangin (Ladouche et al., 2006).

Le critère d'ajustement de la simulation (Critère de Nash = 97 %) est jugé très bon, ce qui permet l'exploitation des résultats obtenus. Les résultats des traitements mathématiques réalisés pour la récession du cycle hydrologique 2004-2005 sont présentés dans le tableau de l'illustration 45.

Le temps d'infiltration de l'infiltration rapide est court (8 jours) et la vitesse moyenne d'infiltration rapide est élevée (0,125). Ces valeurs indiquent qu'une partie des eaux de pluies infiltrées rejoint rapidement la zone noyée du système, via un réseau de fissures ou conduits karstiques, bien développé et connecté à la zone d'infiltration. En termes de flux, la composante rapide de l'infiltration pour cette récession, représente 14 % (0,07 million de m³) du volume total de l'infiltration par les pluies efficaces (0,5 million de m³). Une grande part de l'infiltration par les pluies efficaces apparaît ainsi assurée par l'infiltration lente (ou retardée) au travers d'un réseau de fissures mal connecté à la zone noyée du système. Le volume d'eau associé à la composante lente de la recharge par les pluies efficaces représente 0,43 million de m³, soit 86 % du volume d'infiltration. Le temps de fin d'infiltration de la composante lente se situe vers 100 jours. La vitesse d'infiltration moyenne de la composante lente de l'infiltration par les pluies efficaces est relativement faible (0,01).

Le paramètre i , égal à 0,25, est assez faible. Il traduit un retard à l'infiltration limité dans le temps et caractérise ainsi un transit de l'infiltration rapide efficace vers la zone noyée.

Le coefficient de tarissement (α) est très faible (0,002) ; cette valeur indique que la zone noyée du système se vidange lentement. La valeur du volume dynamique (assimilable aux réserves du système) est du même ordre de grandeur (5,6 millions de m³) que le volume moyen interannuel calculé sur les deux cycles hydrologiques 2004-2005 et 2005-2006 (13,4 millions de m³). Le pouvoir régulateur du système défini par Mangin est significatif (0,4), autrement dit, le système est en mesure d'accumuler des réserves notables au sein de sa zone noyée. Ces résultats suggèrent que la zone noyée est bien karstifiée.

En résumé, la zone noyée est bien développée, elle présente une bonne aptitude à stocker les réserves ($K = 0,4$). Toutefois la sollicitation de ces réserves est difficile. La structure de la partie inférieure de l'aquifère, constituée notamment par les terrains marno-calcaires du Callovien-Oxfordien (j3-j6) et des calcaires en petits bancs du Bathonien (j2), est à mettre en relation avec le mauvais drainage de la zone noyée.

L'essentiel de l'infiltration s'effectue lentement au travers de la zone non saturée caractérisée par une épaisseur importante de l'ordre de 400 m. Les temps de transfert importants dans la zone non saturée sont également à mettre en relation avec la présence de niveau plus marneux une centaine de mètres sous le plateau du Causse de Sauveterre. La composante rapide de l'écoulement est non linéaire, elle correspond à une vidange de type « effet de chasse ». Ainsi ce système est caractérisé par une zone non saturée hétérogène de grande épaisseur et une zone noyée bien karstifiée.

c) *Analyses corrélatoires et spectrales*

Le corrélogramme simple est perturbé par les réponses importantes et rapides des très fortes crues. Ainsi, nous n'avons pas accès à l'information sur l'effet mémoire du système qui caractérise l'inertie du système à l'ensemble des précipitations. C'est pourquoi le corrélogramme est recalculé en excluant les périodes de très fortes crues qui masquaient le signal. L'effet mémoire correspond à la durée en jours pour laquelle la fréquence est égale à 0,2. Il est ainsi de 10 jours (Illustration 46).

Pour les systèmes d'Angle et Famounet, les corrélogrammes seront effectués également en excluant les très fortes crues.

La réponse impulsionnelle est appréciée à l'aide du corrélogramme croisé entre les pluies et le débit. C'est la hauteur du pic qui caractérise la réponse impulsionnelle. Ici la réponse peut être caractérisée de pointue (Illustration 47). L'effet mémoire et la réponse impulsionnelle militent également en faveur d'un système bien karstifié.

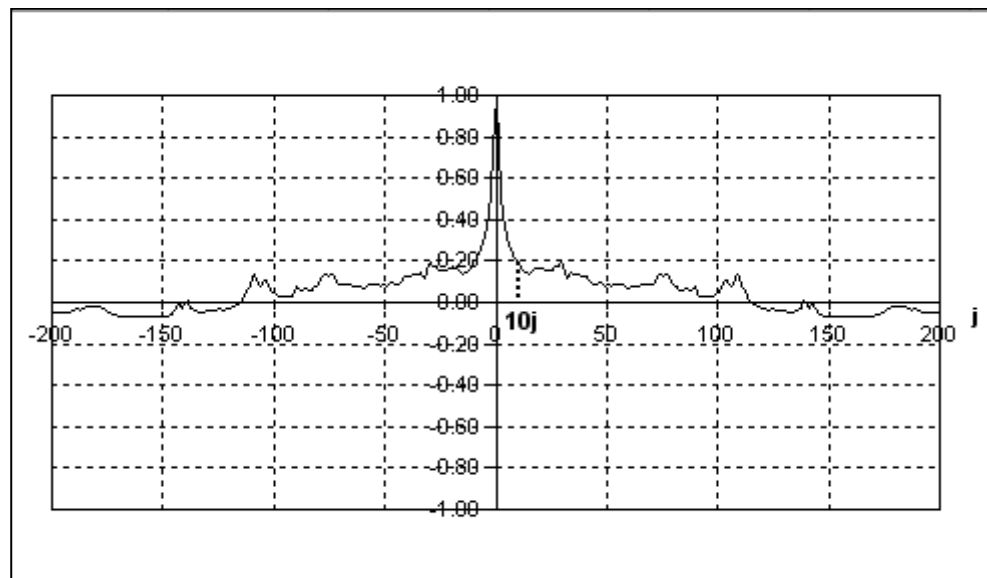


Illustration 46 - Corrélogramme simple de la chronique de débit de Burle.

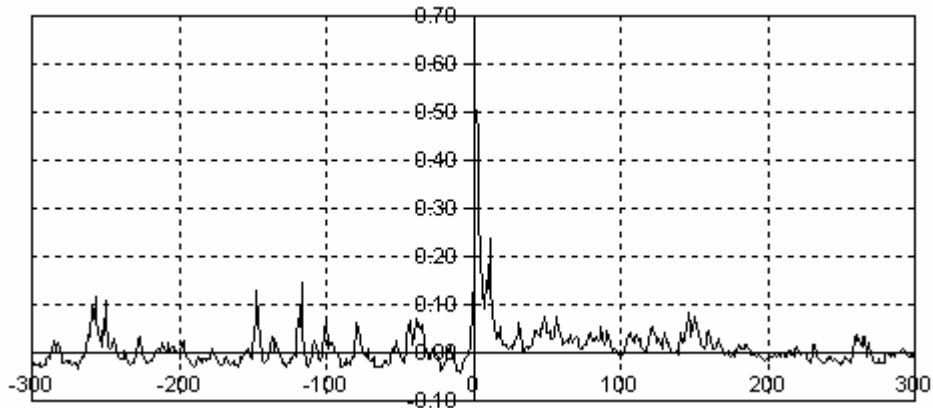


Illustration 47 - Corrélogramme croisé de la chronique de débit de Burle et des pluies de la station MétéoFrance de Sainte Enimie.

d) Analyse Qualitative et quantitative du système de Burle par une approche de modélisation globale à l'aide du logiciel « Tempo »

- Objectif :

Le suivi en continu d'un débit, d'un niveau piézométrique ou de paramètres physico-chimiques tels que la conductivité et la température de l'eau, renseigne sur les processus de transfert responsables des variations observées et, ce faisant, sur les mécanismes régissant le fonctionnement d'un hydrosystème. Ces mécanismes font intervenir en outre la recharge par les pluies efficaces, les modalités de vidange des réservoirs, mais également la contribution des différentes connexions hydrauliques lorsqu'elles existent.

Le traitement numérique des chroniques fait appel à des techniques d'inversion. On parle alors de modélisation inverse des phénomènes. Contrairement à la modélisation directe qui consiste à simuler le fonctionnement d'un hydrosystème à partir de concepts reposant à la fois sur la description de l'hydrosystème et l'application de lois de la physique, la modélisation inverse décrit le fonctionnement d'un hydrosystème à partir de réponses impulsionnelles (ruissellement, écoulement souterrain, transfert de masse). Ces réponses impulsionnelles (appelées également fonctions de transfert) sont estimées à partir de séries chronologiques : pluie, débit, niveau piézométrique, concentration de divers solutés, propriétés physico-chimiques du milieu.

- Démarche adoptée et données utilisées :

L'étude du fonctionnement du système karstique de Burle s'est focalisée sur les données acquises à l'exutoire du système sur la base des données de hauteur d'eau mesurées. Ces suivis ont permis la détermination des débits.

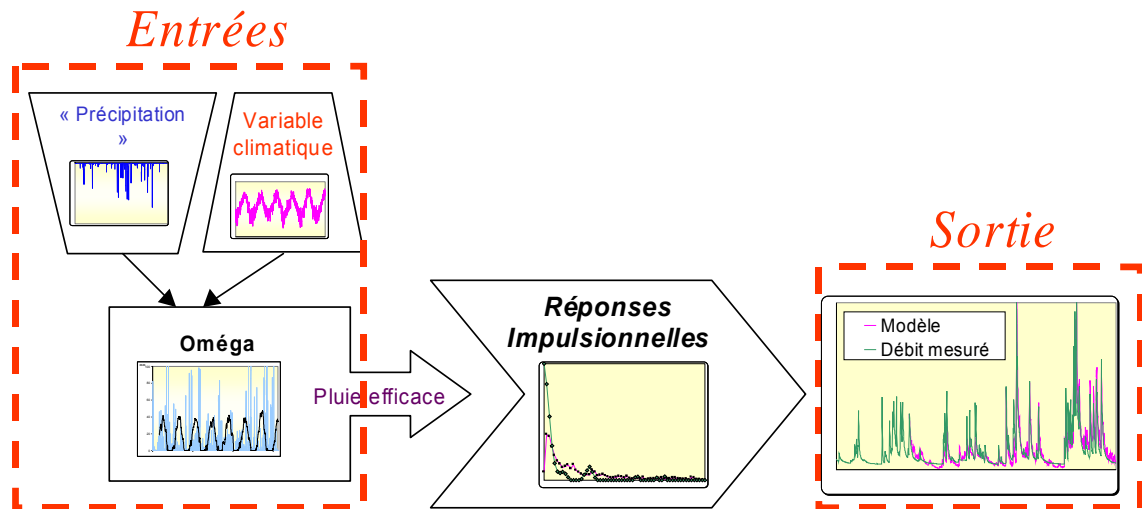


Illustration 48 - Schéma de principe du modèle de transfert

Le schéma de principe de la modélisation inverse des écoulements est présenté Illustration 48. La technique d'inversion consiste à calculer la ou des réponses impulsionnelles et une fonction « seuil » Oméga de pluie efficace de telle sorte que le modèle soit le plus proche possible du débit observé. Ce seuil Oméga est estimé par inversion à partir de la pluie et d'une variable climatique de telle façon que seule la hauteur de pluie située au-dessus de ce seuil génère un débit à l'exutoire. Dans l'approche de modélisation, le choix du type des réponses impulsionnelles est fixé par l'utilisateur. Les réponses impulsionnelles peuvent être de type paramétrique (fonction mathématique connue, fonction exponentielle par exemple) ou non paramétrique. Dans ce dernier cas, c'est le logiciel qui détermine la fonction mathématique appropriée qui permet de décrire au mieux la variable de sortie à modéliser.

L'étude du fonctionnement du système karstique de Burle a été réalisée à l'aide des deux types d'approches possibles (réponses impulsionnelles paramétrique et non paramétrique) afin de confronter les informations obtenues sur le fonctionnement.

Au préalable à l'étude du fonctionnement hydrogéologique du système karstique par l'approche de modélisation inverse à l'aide du logiciel Tempo, il a été nécessaire de déterminer « la chronique de pluie représentative » du fonctionnement du karst, c'est à dire la chronique de pluie du bassin d'alimentation. Cette étude a été menée à l'aide de l'option « pondération des chroniques de pluie » du logiciel « Tempo » qui équivaut à établir le corrélogramme croisé « pluie-débit » à partir d'une optimisation d'une combinaison linéaire des poids associés à chaque chronique de pluie.

Les postes pluviométriques utilisés pour cette analyse sont les postes Météo France suivants, les caractéristiques de la station de Mende-Brenoux où est défini l'ETP sont également présentées :

Numéro du poste	Nom du poste	Latitude	Longitude	Altitude (m)
48039001	CHANAC	44°28'00"N	3°20'24"E	637
48146001	STE ENIMIE- SAUVETERRE	44°24'30"N	3°26'36"E	1015
48146002	STE ENIMIE	44°22'00"N	3°25'00"E	450
48030001	MENDE-BRENOUX	44°30'18"N	3°31'48"E	1019

Tableau 16 - Caractéristiques des stations MétéoFrance utilisées.

Le meilleur corrélogramme croisé (pluie-débit,) a été obtenu à partir de la combinaison linéaire suivante :

$$0,14 * \text{Chanac} + 0,86 * \text{Ste Enimie-Sauveterre}$$

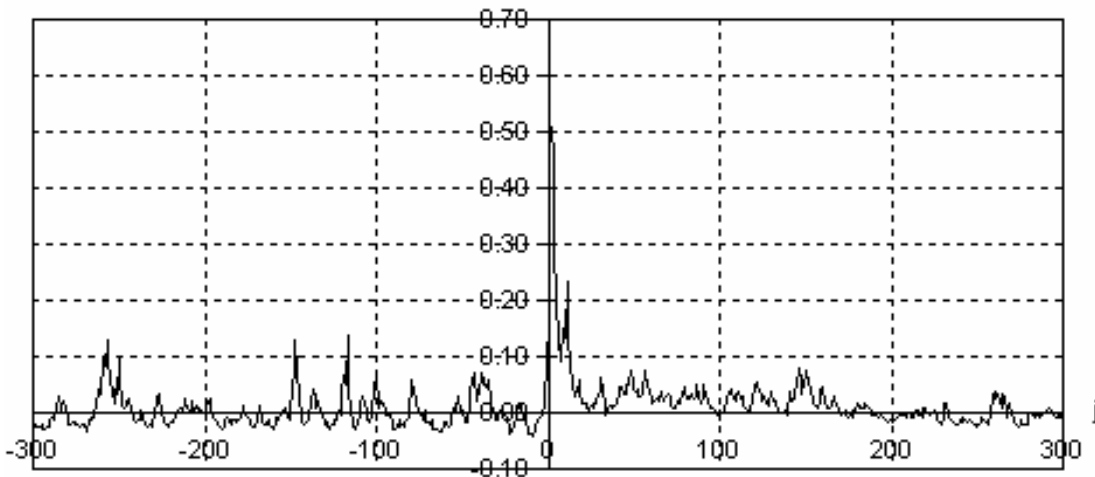


Illustration 49 - Corrélogramme croisé pluie-débit de Burle obtenu à partir de la combinaison linéaire des pluies (option pondération des chroniques de pluie de TEMPO).

La chronique de pluie utilisée pour les modélisations a donc été définie à l'aide de la combinaison linéaire précédente. Nous présentons dans le tableau suivant le cumul des précipitations des différents cycles hydrologiques étudiés :

	Cumul Pluie Bassin d'Alimentation du kars de Burle (mm)
Cycle 2003-2004	1350
Cycle 2004-2005	563
Cycle 2005-2006	964

Tableau 17 - Cumul des précipitations du bassin d'alimentation de Burle déduit par l'option de pondération des précipitations du logiciel Tempo.

La variable climatique utilisée dans les calculs est l'ETP Penman Monthei calculée par Météo-France à la station de Mende Brenoux, sa variabilité spatiale étant jugée suffisamment faible pour ne considérer qu'une seule station.

- Modélisation inverse des relations pluie-débit pour le système karstique de la source de Burle

L'objectif principal de cette étude est de caractériser les processus qui contrôlent l'évolution des débits à l'exutoire du système karstique.

Nous avons, dans un premier temps, travaillé à l'aide de l'option non paramétrique de Tempo (cf. § précédent) afin de déterminer l'allure générale des réponses impulsionnelles qui permettent de reproduire les débits mesurés. L'évolution temporelle de la pluviométrie, de l'ETP et des débits mesurés est présentée (Illustration 50).

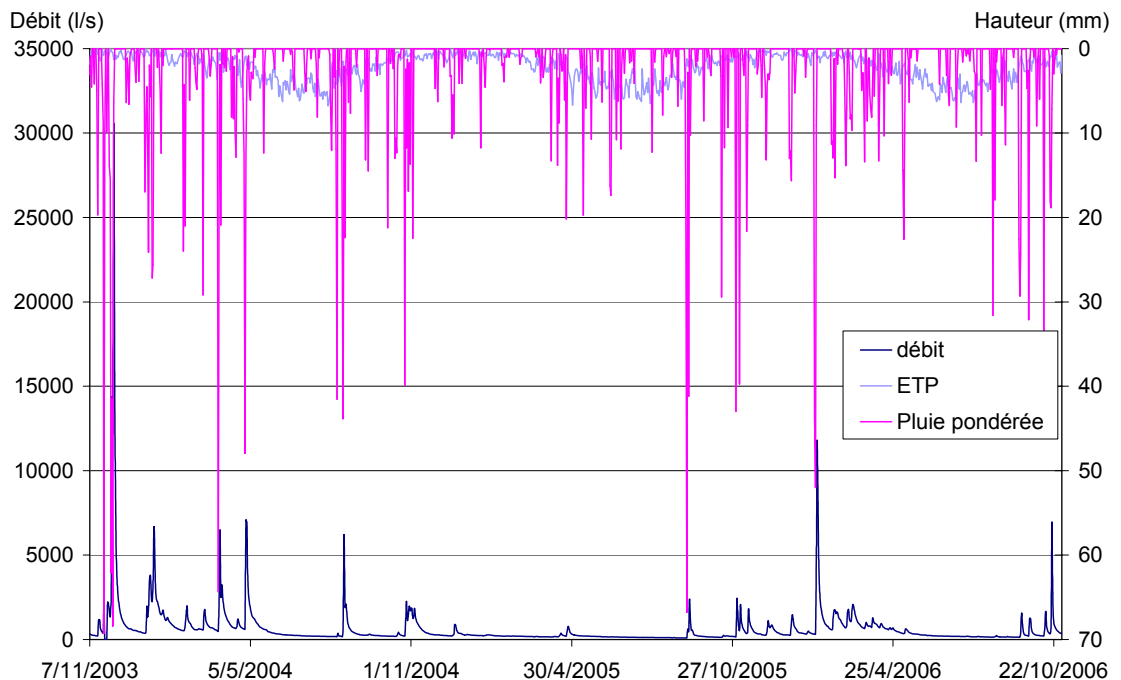


Illustration 50 - Evolution temporelle de la pluviométrie, de l'ETP et des débits mesurés du système karstique de Burle

La technique d'inversion consiste à calculer les réponses impulsionnelles et le seuil Oméga de pluie efficace de telle sorte que le modèle soit le plus proche possible du débit observé de la source.

L'étude du fonctionnement du système karstique de Burle a été réalisée à l'aide d'une approche non paramétrique afin de confronter les informations obtenues sur le fonctionnement.

Au préalable à l'étude du fonctionnement hydrogéologique du système karstique par l'approche de modélisation inverse à l'aide du logiciel Tempo, il a été nécessaire de déterminer « la chronique de pluie représentative » du fonctionnement du karst, c'est à dire la chronique de pluie du bassin d'alimentation. Cette étude a été menée à l'aide de l'option « pondération des chroniques de pluie » du logiciel « Tempo » qui équivaut à établir le corrélogramme croisé « pluie-débit » à partir d'une optimisation d'une combinaison linéaire des poids associés à chaque chronique de pluie.

Les postes pluviométriques utilisés pour cette analyse sont les postes Météo France suivants, les caractéristiques de la station de Mende-Brenoux où est défini l'ETP sont également présentées :

Numéro du poste	Nom du poste	Latitude	Longitude	Altitude (m)
48039001	CHANAC	44°28'00"N	3°20'24"E	637
48146001	STE ENIMIE-SAUVETERRE	44°24'30"N	3°26'36"E	1015
48146002	STE ENIMIE	44°22'00"N	3°25'00"E	450
48030001	MENDE-BRENOUX	44°30'18"N	3°31'48"E	1019

Tableau 18 - Caractéristiques des stations MétéoFrance utilisées.

Le meilleur corrélogramme croisé (pluie-débit), a été obtenu à partir de la combinaison linéaire suivante :

$$0,14 * \text{Chanac} + 0,86 * \text{Ste Enimie-Sauveterre}$$

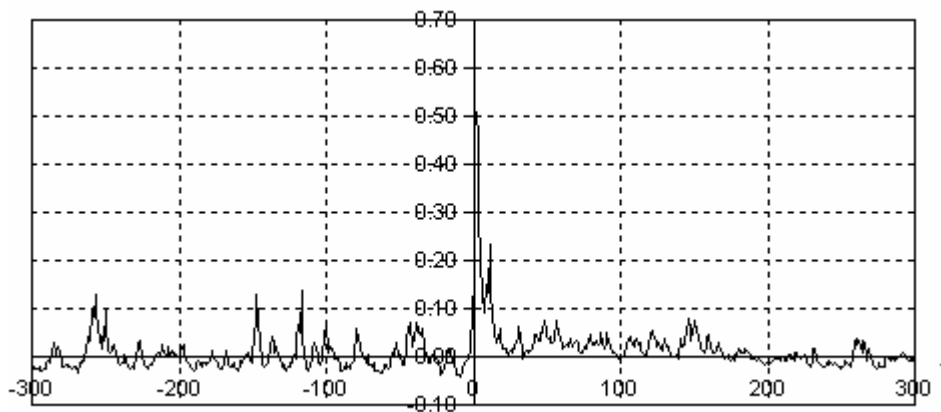


Illustration 51 - Corrélogramme croisé pluie-débit de Burle obtenu à partir de la combinaison linéaire des pluies (option pondération des chroniques de pluie de TEMPO).

La chronique de pluie utilisée pour les modélisations a donc été définie à l'aide de la combinaison linéaire précédente. Nous présentons dans le tableau suivant le cumul des précipitations des différents cycles hydrologiques étudiés :

	Cumul Pluie Bassin d’Alimentation du karst de Burle (mm)
Cycle 2003-2004	1350
Cycle 2004-2005	563
Cycle 2005-2006	964

Tableau 19 - Cumul des précipitations du bassin d'alimentation de Burle déduit par l'option de pondération des précipitations du logiciel Tempo.

La variable climatique utilisée dans les calculs est l’ETP Penman Monthei calculée par Météo-France à la station de Mende Brenoux, sa variabilité spatiale étant jugée suffisamment faible pour ne considérer qu’une seule station.

- Modélisation inverse des relations pluie-débit pour le système karstique de la source de Burle :

L’objectif principal de cette étude est de caractériser les processus qui contrôlent l’évolution des débits à l’exutoire du système karstique.

Nous avons travaillé à l’aide de l’option non paramétrique de Tempo afin de déterminer l’allure générale des réponses impulsionnelles qui permettent de reproduire les débits mesurés. L’évolution temporelle de la pluviométrie, de l’ETP et des débits mesurés est présentée (Illustration 50).

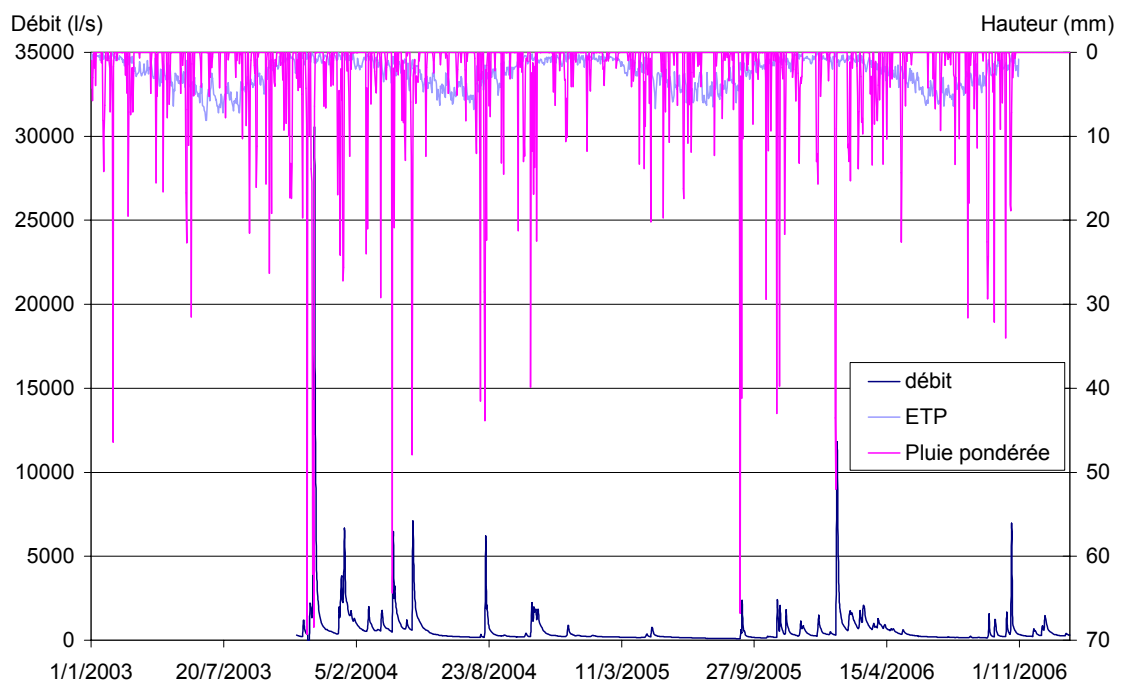


Illustration 52 - Evolution temporelle de la pluviométrie, de l'ETP et des débits mesurés du système karstique de Burle.

La technique d'inversion consiste à calculer les réponses impulsionnelles (hydrogrammes unitaires cf. Illustration 53) et le seuil Oméga de pluie efficace (Illustration 54) de telle sorte que le modèle soit le plus proche possible du débit observé de la source.

Ce seuil Oméga est estimé à partir de la pluie et d'une variable climatique de telle façon que seule la hauteur de pluie située au-dessus de ce seuil génère un débit à l'exutoire. Il est calculé à partir d'une réponse impulsionnelle à la pluie et à l'ETP (Illustration 54), également obtenue par inversion.

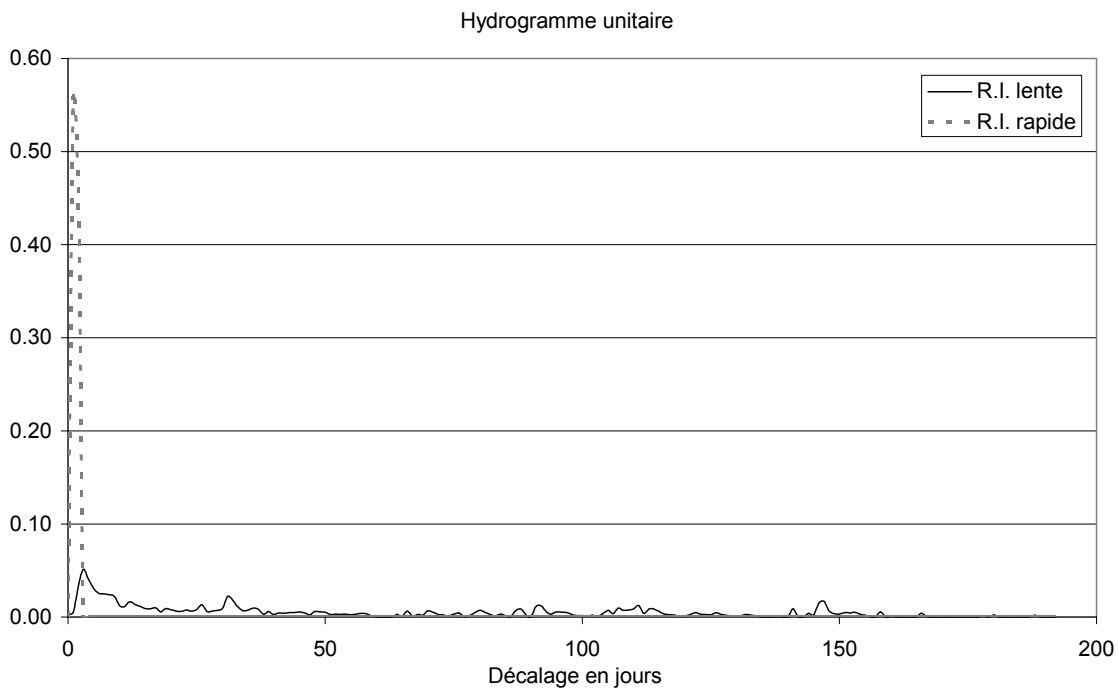


Illustration 53 - Calcul des hydrogrammes unitaires normalisés du système karstique de Burle (R. I. : réponse impulsionnelle).

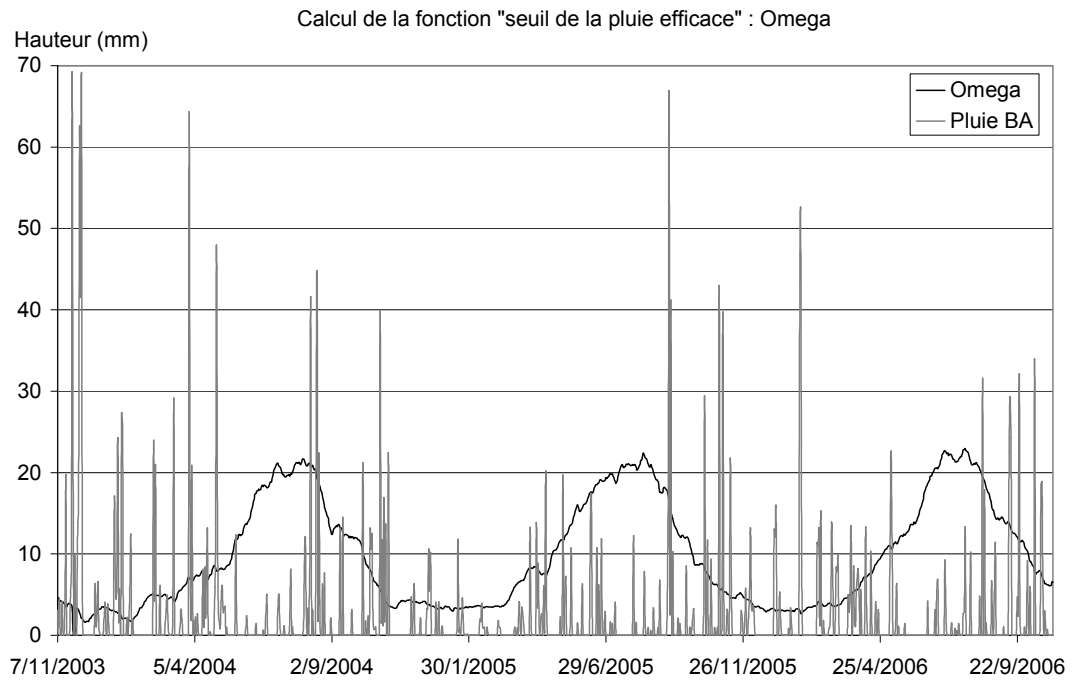


Illustration 54 - Évolution du seuil de pluie efficace Oméga et de la pluviométrie.

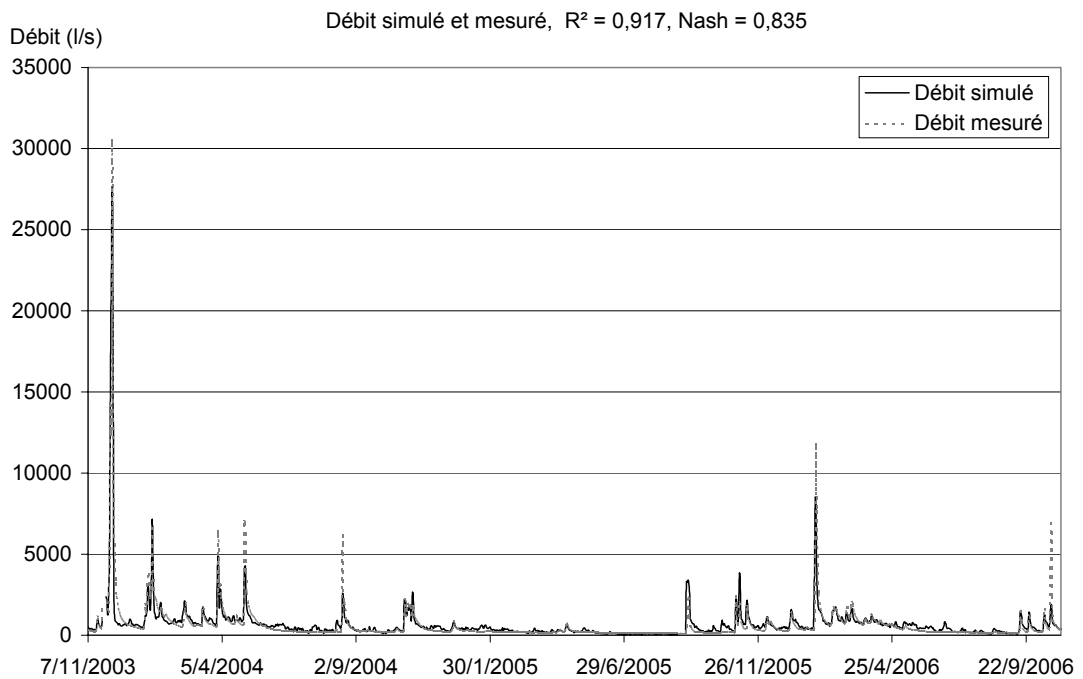


Illustration 55 - Comparaison du débit simulé au débit mesuré du système karstique de Burle. : 91.7 % de la variance totale expliquée.

Sur l'illustration 54, qui représente l'évolution temporelle de la fonction seuil Oméga et de la pluie du bassin d'alimentation, on remarque qu'à l'exception des périodes comprises entre mai et août, les épisodes de pluie provoquent une réponse de débit à source de Burle. Au cours des périodes estivales, le seuil Oméga de pluie efficace est supérieur à 20 mm. Cette valeur est liée à la demande évapo-transpiratoire (ETP) de l'atmosphère. En été, on peut donc observer une réponse des débits aux épisodes de pluies dès lors que la quantité de pluie est supérieure à 20 mm. À l'inverse, au cours des périodes hivernales et printanières, la demande évapo-transpiratoire est faible (quelques millimètres) ce qui, d'un point de vue hydrologique, signifie que les épisodes de pluies de faibles importance peuvent entraîner une réponse plus ou moins marquée du débit de Burle.

Les résultats de la modélisation sont présentés à l'illustration 55. Le modèle permet de reproduire de manière satisfaisante à la fois les pics de crues et les tarissements. Concernant les pics de crue on observe toutefois une tendance à la sous-estimation des débits simulés lors des fortes crues (pour des débits supérieurs à 5000 l/s).

Le modèle permet d'expliquer 91,7 % de la variance totale observée ce qui constitue un résultat de bonne qualité (critère de Nash = 83,5 %). Le calcul des hydrogrammes unitaires indique qu'il y a deux composantes (l'une rapide et l'autre lente). La composante rapide pour le système karstique de Burle est importante (Illustration 53). Elle intervient dès le début des précipitations (décalage = 0) et dure 3 jours environ. Cette composante rapide permet de caractériser la vidange gravitaire des eaux de pluie infiltrée dans la zone noyée par « effet de chasse ». La réponse impulsionnelle de la composante lente (Illustration 53) montre un maximum prononcé le 3^{ème} jour après les pluies, puis décroît rapidement jusqu'à ce que le décalage atteigne 20 jours environ, puis faiblement de manière plus ou moins exponentielle pendant 60 jours environ. Ce comportement évoque la recharge, puis la vidange d'un réservoir alimenté par les précipitations.

L'importance jouée par la composante rapide (écoulement non linéaire, « effet de chasse d'eau ») dans le fonctionnement du karst en période de crue rend problématique la détermination précise des débits de crue lors des périodes pluvieuses par les approches de modélisation. En effet, les outils de modélisation ont du mal à « gérer » ce type d'écoulement en raison de la complexité du phénomène. A titre d'illustration et dans un souci de simplification, une hauteur de pluie donnée (50 mm par exemple), génère plus ou moins d'écoulement rapide dans le karst selon l'intensité de la pluie. De même, l'état de saturation de la zone noyée jouera un rôle déterminant quant à l'importance du phénomène d'écoulement rapide.

e) Estimation de la surface du bassin d'alimentation.

La modélisation sous Tempo nous a permis d'obtenir une chronique de pluie efficace. Cette dernière est utilisée dans le calcul du bilan hydrologique afin de caractériser la surface du bassin d'alimentation.

	Pefficace (mm)	Volume écoulé (million de m ³)	SBA (km ²)
Cycle 2004-2005	170	8,7	51
Cycle 2005-2006	446	18,1	40

Tableau 20 - Paramètres du bilan hydrologique

La surface du bassin d'alimentation calculée pour le cycle hydrologique 2004-2005 est égale à 51 km² et à 40 km² pour le cycle suivant.

La différence de surface entre les deux cycles hydrologiques est à mettre en relation avec le rôle des réserves. Au cours du cycle 2004-2005 particulièrement déficitaire en précipitations, la vidange des réserves a permis de soutenir les débits. Il y a ainsi eu déstockage des réserves emmagasinées les cycles précédents. Ce déstockage a pour effet de surestimer la surface du bassin d'alimentation. La surface du bassin d'alimentation de la source de Burle est ainsi d'environ 40-45 km².

Par ailleurs, la pluie efficace a également été calculée à partir de l'ETR définie à partir de la formule de Turc.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{(300 + 25T + 0,05T^3)^2}}}$$

On obtient une ETR de 481 mm, la pluie (P) est égale à 962 mm et la température moyenne (T) à 8,6°C. La pluie efficace vaut ainsi 481 mm. On vérifie bien que cette valeur est très proche de celle déterminée par la modélisation. Elle donne une surface de bassin d'alimentation pour la source de Burle de 38 km².

A noter que cette surface est une surface à minima, vu qu'elle ne prend pas en considération le débit de la source de Coussac, non suivi en continu. Il faut donc rajouter à cette surface, environ un tiers en plus. La surface totaliserait alors quelques 5050 km², si on considère une surface moyenne du bassin d'alimentation de Burle de 45 km².

A partir de la pluie efficace calculée, les surfaces de bassin d'alimentation des autres sources étudiées sont calculées et présentées dans le tableau 21.

5.2.2. Source d'Angle

L'analyse des débits classés permet d'identifier deux ruptures de pente, la première à 70 l/s et la seconde à 140 l/s. Ces ruptures se produisent en contexte de hautes eaux pour des fréquences cumulées de respectivement 92 et 98 %. La pente de la droite α_3 est inférieure à α_2 , elle-même inférieure à α_1 . Ainsi, en période de crue les écoulements sont facilités, ce qui traduit une meilleure connexion et évacuation des eaux du système. A l'inverse, en période de basses eaux l'évacuation du système est difficile.

L'étude des courbes de récession, réalisée sur une récession de plus de 6 mois, donne des résultats comparables en utilisant la méthode de Mangin et la méthode de Mangin modifiée (cf. annexe 6). Le coefficient de tarissement de la zone noyée α est très faible (0,0025). Le pouvoir régulateur est fort, il est égal à 0,9. Le retard à l'infiltration est également fort ($i = 0,7$). Le volume d'infiltration rapide représente 33 % de l'infiltration, l'essentiel de l'infiltration provient donc de l'infiltration lente (67 %).

Au vu de ces résultats le système apparaît peu karstifié, ce qui est cohérent avec la structure en petits bancs calcaire et inter-bancs marneux observée dans la partie inférieure de l'aquifère. Ce karst est constitué d'une zone noyée de dimension significative, caractérisée par une vidange difficile et un bon stockage des réserves. L'infiltration au sein de la zone non saturée est dominée par des écoulements lents, caractéristiques d'un faible développement de la zone non saturée.

L'effet mémoire du système d'Angle d'une valeur proche de 40 jours ainsi que la réponse impulsionnelle caractérisée d'intermédiaire, confirment le degré de karstification moyen du système.

5.2.3. Source de Famounet

Une seule rupture est identifiée pour l'étude des débits classés. Elle se produit à 50 l/s pour des fréquences cumulées de 97 %. La pente de la droite α_2 est inférieure à α_1 . L'évacuation des eaux du système est donc facilitée en période de crue, sinon le système est très inertielle en étiage.

Les paramètres déduits de l'analyse (Mangin modifié) de la courbe de récession qui a une durée de près de 200 jours militent en faveur d'un système peu karstifié. En effet, α est très faible (0,0008), K est très fort (3,2) et i est également fort (0,7). Aussi l'infiltration rapide ne représente que 16 % de l'infiltration totale.

L'effet mémoire du système est de 50 jours et la réponse impulsionnelle est étalée. Au vu de l'ensemble des résultats, le degré de karstification du système semble limité.

5.2.4. Source de Saint-Chély

L'analyse des débits classés permet d'identifier deux ruptures de pente, la première à 35 l/s et la seconde à 300 l/s. La première rupture se produit en contexte de basses

eaux pour des fréquences cumulées de 37 %. La seconde rupture est en contexte de hautes eaux pour des fréquences cumulées de 90 %. La pente de la droite α_2 est inférieure à α_1 , caractérisant ces écoulements facilités en hautes eaux. Pour un débit supérieur à 300 l/s le système évacue moins facilement les eaux ($\alpha_3 > \alpha_2$). Les données de tarage étant de bonne qualité, ce comportement peut traduire la mise en fonction de trop-plein.

Seulement une récession a pu être étudiée sur la chronique. L'analyse avec les deux méthodes donne des résultats identiques. La récession est malheureusement courte (135 jours). Les autres systèmes étudiés étant caractérisés par une décrue très longue, nous ne sommes pas certains pour cette récession d'avoir atteint la période de tarissement (vidange de la zone noyée). Les résultats présentent donc une forte incertitude (Q_{R0} , K et α sont probablement surestimés). Le coefficient de vidange α est faible (0,001), i est plutôt faible (0,35), K est fort (0,7).

L'effet mémoire est de 30 jours et la réponse impulsionnelle est pointue.

L'ensemble des informations milite en faveur d'un système plutôt bien karstifié, proche du système de Burle.

5.2.5. Source de Cénarète

L'analyse des débits classés permet d'identifier une rupture de pente à 70 l/s. Elle se produit en contexte de hautes eaux pour des fréquences cumulées de 96 %. La pente α_2 est inférieure à α_1 , caractérisant une meilleure évacuation de l'eau pour des débits supérieurs à 70 l/s.

Comme pour Saint-Chély, les récessions sont de courtes durées ou influencées par les précipitations. Les résultats sont à prendre avec précaution. Le coefficient de vidange α est assez fort (0,008), i est plutôt faible (0,4), K est faible (0,2).

L'effet mémoire est de 28 jours et la réponse impulsionnelle est pointue.

Ce système est également bien karstifié.

5.3. INTERPRETATION HYDROLOGIQUE DES SOURCES DE CATEGORIE I COTE LOT

5.3.1. Source des Fonts

L'analyse des débits classés permet d'identifier deux ruptures de pente, la première à 200 l/s et la seconde à 330 l/s. La première rupture se produit en contexte de hautes eaux pour des fréquences cumulées de 90 %. La seconde rupture est associée à des fréquences cumulées de 98 %. Les pentes α_1 et α_3 sont identiques et α_2 est supérieur à α_1 et α_3 . Cette configuration est caractéristique du piégeage d'une réserve lors de la décrue et d'une restitution lors du tarissement.

La récession étudiée (méthode de Mangin modifiée) a une durée de 230 jours. La récession est influencée par les précipitations, les paramètres présentent donc une incertitude. Le coefficient de tarissement est assez fort 0,01, tout comme les paramètres i (0,5) et K (0,3). Ces paramètres sont très probablement surestimés. Le paramètre α est très supérieur aux coefficients de vidange définis pour les autres systèmes, ce qui porte à croire que la phase de tarissement n'est pas encore atteinte.

L'effet mémoire est égal à 88 jours, la réponse impulsionnelle est intermédiaire.

Au vu de l'ensemble des résultats, ce système semble moyennement karstifié.

5.3.2. Source Bernade

Une seule rupture est identifiée pour l'étude des débits classés. Elle se produit à 50 l/s pour des fréquences cumulées de 83 %. La pente de la droite α_2 est supérieure à α_1 . L'évacuation des eaux du système est donc plus difficile en période de hautes eaux. Ce comportement ne traduit pas un problème dans la courbe de tarage, car cette dernière a été réalisée pour des débits compris entre 10 et 80 l/s. Il s'agirait plutôt, soit de la mise en fonctionnement d'un trop plein, soit d'un stockage progressif dans l'aquifère à mettre en relation avec la nature captive de l'aquifère

Ce fonctionnement captif du système a été caractérisé grâce aux périodicités de 12 et 24 h mises en évidence par l'analyse spectrale (cf. annexe 6).

Les paramètres déduits de l'étude de deux récessions à partir de la méthode de Mangin, sont $\alpha = 0,005$, $i = 0,98$ et $K = 0,8$. Ces paramètres sont caractéristiques d'un système peu karstifié.

L'effet mémoire est de 100 jours et la réponse impulsionnelle est étalée. Le système est très inertielle et peu karstifié, il s'apparente plutôt à un milieu fissuré.

5.3.3. Source de Saint-Frézal

L'analyse des débits classés permet d'identifier deux ruptures de pente, la première à 240 l/s et la seconde à 600 l/s. La première rupture se produit en contexte de hautes eaux pour des fréquences cumulées de 70 %. La seconde pour des fréquences cumulées de 99 %. La pente α_2 est inférieure à α_1 , caractérisant une meilleure évacuation de l'eau pour des débits compris entre 240 et 600 l/s. Au delà de 600 l/s la pente α_3 est supérieure à α_2 , le système évacue moins facilement les eaux. Il est possible qu'un trop plein se mette en charge ou bien que la courbe de tarage sous-estime les débits au-delà de 600 l/s.

Une seule récession a pu être étudiée. Courte et influencée par des précipitations, il existe une incertitude importante sur les résultats. Ainsi α est faible (0,0015), i est fort (0,6), K l'est également (1,7).

L'effet mémoire est grand 56 jours et la réponse impulsionnelle intermédiaire. Le système semble moyennement karstifié.

5.3.4. Source d'Urugne

Une seule rupture est identifiée pour l'étude des débits classés. Elle se produit à 60 l/s pour des fréquences cumulées de 50 %. La pente de la droite α_2 est inférieure à α_1 . L'évacuation des eaux du système est donc plus facile en période de hautes eaux.

La récession de 2006 a une durée de 200 jours. Le coefficient de tarissement est égal à 0,002, i vaut 0,4 et K est égal à 0,5.

L'effet mémoire est faible (6 jours) et la réponse impulsionnelle pointue.

Urugne est un système bien karstifié. L'ensemble des paramètres sont proches de ceux de Burle. La structure et le fonctionnement de ces deux systèmes sont proches.

5.4. INTERPRETATION HYDROLOGIQUE DES SOURCES DE CATEGORIE I COTE TARN

5.4.1. Source d'Angle

L'analyse des débits classés permet d'identifier deux ruptures de pente, la première à 70 l/s et la seconde à 140 l/s. Ces ruptures se produisent en contexte de hautes eaux pour des fréquences cumulées de respectivement 92 et 98 %. La pente de la droite α_3 est inférieure à α_2 , elle-même inférieure à α_1 . Ainsi, en période de crue les écoulements sont facilités, ce qui traduit une meilleure connexion et évacuation des eaux du système. A l'inverse, en période de basses eaux l'évacuation du système est difficile.

L'étude des courbes de récession, réalisée sur une récession de plus de 6 mois, donne des résultats comparables en utilisant la méthode de Mangin et la méthode de Mangin modifiée (cf. annexe 6). Le coefficient de tarissement de la zone noyée α est très faible (0,0025). Le pouvoir régulateur est fort, il est égal à 0,9. Le retard à l'infiltration est également fort ($i = 0,7$). Le volume d'infiltration rapide représente 33 % de l'infiltration, l'essentiel de l'infiltration provient donc de l'infiltration lente (67 %).

Au vu de ces résultats le système apparaît peu karstifié, ce qui est cohérent avec la structure en petits bancs calcaire et inter-bancs marneux observée dans la partie inférieure de l'aquifère. Ce système karstique est constitué d'une zone noyée de dimension significative, caractérisée par une vidange difficile et un bon stockage des réserves. L'infiltration au sein de la zone non saturée est dominée par des écoulements lents, caractéristiques d'un faible développement de la zone non saturée.

L'effet mémoire du système est de quelques 40 jours et la réponse impulsionnelle de type intermédiaire confirme le degré de karstification moyen du système.

5.4.2. Source de Famounet

Une seule rupture est identifiée pour l'étude des débits classés. Elle se produit à 50 l/s pour des fréquences cumulées de 97 %. La pente de la droite α_2 est inférieure à α_1 . L'évacuation des eaux du système est donc facilitée en période de crue, sinon le système est très inertiel en étiage.

Les paramètres déduits de l'analyse (Mangin modifié) de la courbe de récession qui a une durée de près de 200 jours militent en faveur d'un système peu karstifié. En effet, α est très faible (0,0008), K est très fort (3,2) et i est également fort (0,7). Aussi l'infiltration rapide ne représente que 16 % de l'infiltration totale.

L'effet mémoire du système est de 50 jours et la réponse impulsionnelle est étalée. Au vue de l'ensemble des résultats, le degré de karstification du système semble limité.

5.4.3. Source de Saint-Chély-du-Tarn

L'analyse des débits classés permet d'identifier deux ruptures de pente, la première à 35 l/s et la seconde à 300 l/s. La première rupture se produit en contexte de basses eaux pour des fréquences cumulées de 37 %. La seconde rupture est en contexte de hautes eaux pour des fréquences cumulées de 90 %. La pente de la droite α_2 est inférieure à α_1 , caractérisant ces écoulements facilités en hautes eaux. Pour un débit supérieur à 300 l/s, le système évacue moins facilement les eaux ($\alpha_3 > \alpha_2$). Les données de tarage étant de bonne qualité, ce comportement peut traduire la mise en fonction de trop-plein.

Seule une récession a pu être étudiée sur la chronique disponible. L'analyse avec les deux méthodes donne des résultats identiques. La récession est relativement courte (135 jours). Les autres systèmes étudiés étant caractérisés par une décrue plus longue, la période de tarissement (vidange de la zone noyée) de la source n'est peut être pas atteinte. Les résultats présentent donc une forte incertitude (Q_{R0} , K et α sont probablement surestimés). Le coefficient de vidange α est faible (0,001), i est plutôt faible (0,35), K est fort (0,7).

L'effet mémoire est de 30 jours et la réponse impulsionnelle est pointue.

L'ensemble des informations milite en faveur d'un système plutôt bien karstifié, proche du système de Burle.

5.4.4. Source de Cénarète

L'analyse des débits classés permet d'identifier une rupture de pente à 70 l/s. Elle se produit en contexte de hautes eaux pour des fréquences cumulées de 96 %. La pente α_2 est inférieure à α_1 , caractérisant une meilleure évacuation de l'eau pour des débits supérieurs à 70 l/s.

Comme pour Saint-Chély, les récessions sont de courtes durées ou influencées par les précipitations. Les résultats sont à prendre avec précaution. Le coefficient de vidange α est assez fort (0,008), i est plutôt faible (0,4), K est faible (0.2).

L'effet mémoire est de 28 jours et la réponse impulsionnelle est pointue.

Ce système est également bien karstifié.

5.5. SURFACES DES BASSINS D'ALIMENTATION

Les surfaces de bassin d'alimentation ont été déterminées à partir du bilan hydrologique. La surface totale obtenue en additionnant les surfaces des sept sources étudiées appartenant au Causse Sauveterre est égale à environ 110 km². Cette surface représente quelques 25% de la surface totale du Causse Sauveterre qui est estimée à 460 km².

Les mesures sur les autres sources du système réalisées à plusieurs reprises au cours du cycle hydrologique permettent d'estimer, avec toutefois une forte incertitude, les débits moyens et ainsi les surfaces des bassins d'alimentation associés. Les données du CCTP donnant les débits moyens des sources hors crue permettent d'obtenir une superficie similaire. La surface totale de ces autres sources est de 50 km² +/- 50 km².

Ainsi la totalité des systèmes représente quelques 45% de la surface du Causse de Sauveterre, mettant ainsi en évidence des sorties non contrôlées du système (« fuites »). Il faut ainsi envisager une alimentation directe du Tarn par le Causse de Sauveterre, mais aussi une alimentation du bassin est vers le bassin ouest (soit environ 50 km² sur les 131 km² de superficie du bassin d'alimentation de la source Beldoire-Fontmaure, cf rapport de synthèse de l'étude hydrogéologique de la partie ouest du Causse de Sauveterre et de ses avants Causses, PNRGC, mars 2006).

	Source	Q min (l/s)	Q max (l/s)	Q moy (l/s)	SBA (km ²)
Causse Sauveterre Côté Tarn	Burle	100	30500	630	41+10=51km ²
	Angle	30	3300	70	5
	Famounet	30	630	70	3
Causse Méjean	St Chély	20	1200	110	9
	Cénarète	10	3900	55	5
Causse Sauveterre Côté Lot	Les Fonts	10	1050	80	9
	Bernade	18	90	33	2
	St Frézal	140	750	250	19
	Golf	100	330	170	11
	Urugne	30	2440	120	9

Tableau 21- Superficie des bassins d'alimentation des principales sources karstiques

5.6. CONCLUSION SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE CES SYSTEMES ET INTERPRETATION HYDROGEOLOGIQUE.

Ces systèmes présentent des similitudes, en particulier au niveau du fonctionnement de la zone noyée, caractérisée par une sollicitation difficile des réserves. Ce fonctionnement est à mettre en relation avec la structure de la zone noyée. Cette dernière se développe dans la partie inférieure de l'aquifère constituée des terrains marno-calcaires du Callovien-Oxfordien (j3-j6) et des calcaires en petits bancs du Bathonien (j2). La karstification dans ce type de roche est limitée, ce qui explique que les Systèmes Annexes au Drainage (SAD) sont peu développés et mal connectés.

Par ailleurs, ces sources sont situées à proximité soit du Tarn, soit du Lot ; ces deux cours d'eau constituent le niveau de base. Le niveau de base des différents systèmes est très proche de l'altitude des sources. Ainsi, les réseaux karstiques n'ont pas pu se développer en profondeur.

Les systèmes les plus karstifiés à savoir Burle, Saint-Chély et Cénarète, sont situés sur un accident majeur d'orientation NNE-SSO (faille de Sainte Enimie). Cet accident a pour effet de drainer les eaux du Causse de Sauveterre pour Burle et du Causse Méjan pour Cénarète et Saint-Chély.

La source d'Urugne est également l'exutoire d'un système bien karstifié. La source est située dans une reculée, au contact entre les calcaires du Jurassique inférieur et les niveaux imperméables du Toarcien (marnes grise). Le niveau de base est ainsi constitué par les niveaux du Toarcien.

Sur le plateau de Sauveterre l'infiltration est efficace, il n'y a pas de ruissellement. Dans la première centaine de mètres la zone d'infiltration est bien karstifiée (aven, gouffres). Au delà de 100 mètres les niveaux sont plus marneux. La zone d'infiltration cumule une épaisseur de l'ordre de 400 m. L'essentiel de l'infiltration s'effectue lentement au travers de la zone non saturée. Les temps de transfert sont importants dans cette zone non saturée et sont à mettre en relation avec la présence des niveaux marneux.

Les systèmes de Burle et d'Urugne ont bénéficié de suffisamment d'eau pour permettre un développement efficace de la karstification de la zone non saturée, permettant une infiltration rapide. La karstification de la zone non saturée est certainement plus restreinte pour les autres systèmes pouvant être liés à des quantités d'eau disponibles plus limitées. Il en résulte des transferts beaucoup plus lents dans la zone non saturée.

Globalement les systèmes sont très inertiels. Ils sont caractérisés par des transferts lents au sein de la zone non saturée. Cette zone à cause des retards à l'écoulement qu'elle induit joue également un rôle de stockage dans l'aquifère. Toutefois, c'est la zone noyée qui assure la majeure partie du stockage. Du fait du mauvais degré de connexion des SAD, la sollicitation des réserves est difficile.

5.7. ANALYSE DES DEBITS DES SOURCES DE CATEGORIE II ET III

5.7.1. Commentaires généraux sur les variations de débits

Le débit moyen des sources de catégorie 2, côté Tarn, à l'étiage est de 20 l/s (120 l/s max., 0.55 l/s min.). Le débit moyen des sources de catégorie 2 côté Lot à l'étiage est de 16 l/s (107 l/s max., 0.3 l/s min.).

Le débit moyen des sources de catégorie 3, côté Tarn, en période d'étiage est de 0.05 l/s (0.1 l/s max., 0.001 l/s min.). Le débit moyen des sources de catégorie 3, côté Lot, en période d'étiage est de 0.32 l/s (0.8 l/s max., 0.01 l/s min.).

Le débit moyen des sources de catégorie 2, côté Tarn, en moyennes eaux est de 118 l/s (581 l/s max., 8 l/s min.). Le débit moyen des sources de catégorie 2, côté Lot, en moyennes eaux est de 25 l/s (67 l/s max., 1.8 l/s min.).

5.8. INTERPRETATION HYDROCHIMIQUE DES SOURCES DU CAUSSE DE SAUVETERRE – SECTEUR EST

5.8.1. Typologie et faciès hydrochimiques

Le faciès géochimique de l'ensemble des eaux des sources du Causse de Sauveterre est de type bicarbonaté calcique. Pour les sources principales qui ont fait l'objet d'un suivi bimestriel, une distinction des eaux peut être réalisée à l'aide des teneurs en magnésium (Illustration 56). Les teneurs élevées en magnésium sont à rattacher aux formations géologiques qui contiennent des dolomies.

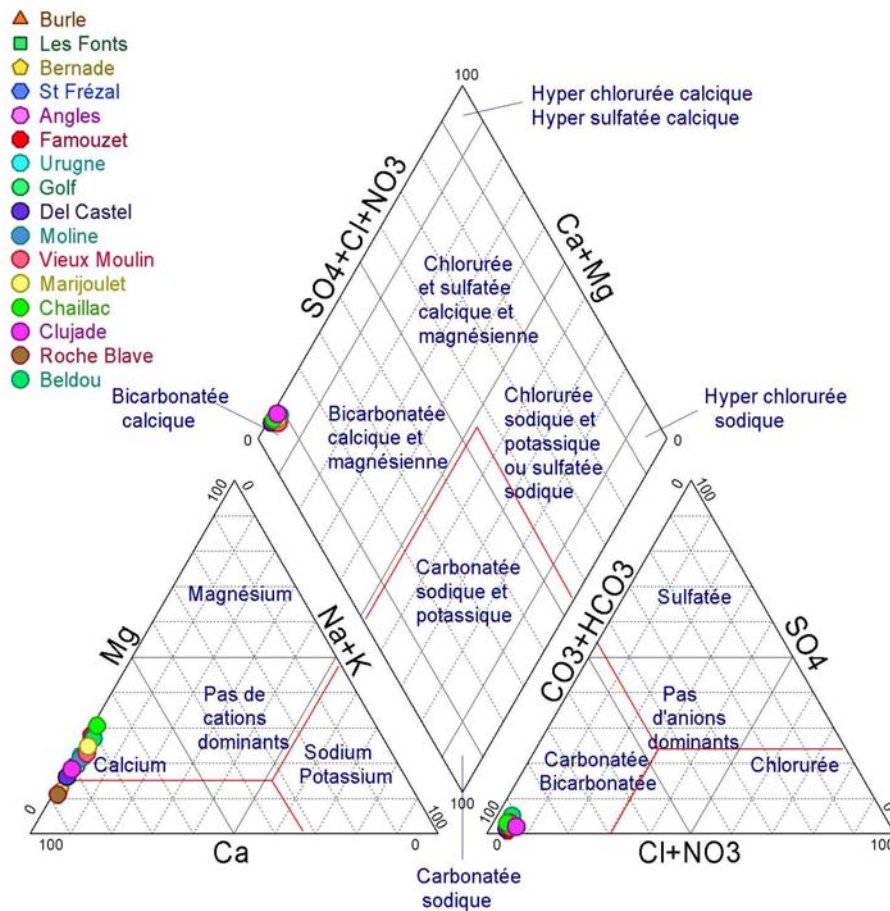


Illustration 56 - Positionnement des principales sources du Cause de Sauveterre dans les Diagramme de Piper

La minéralisation des eaux du Cause de Sauveterre, exprimée à l'aide du paramètre de conductivité, varie entre 290 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 780 $\mu\text{S}/\text{cm}$, l'essentiel (50 % = écart inter quartiles) des eaux présente de conductivité comprises entre 428 et 481 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La valeur médiane est de 458 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les histogrammes de distribution de la conductivité permettent de montrer que les sources situées côté Lot apparaissent globalement plus minéralisées que les sources situées côté Tarn (Illustration 57). Cette différenciation des eaux en fonction de la position géographique est également visible à l'aide des teneurs en hydrogénocarbonate et en calcium (Illustration 58, ces deux paramètres expliquant l'essentiel de la minéralisation), et dans une moindre mesure par leurs teneurs en magnésium (Illustration 59) et en sulfate (Illustration 60).

Des éléments de statistiques descriptives des eaux du Causse de Sauveterre (pris dans sa globalité) et par répartition selon le critère géographique (côté Tarn ou Côté Lot) sont présentés dans le Tableau 22¹. Les informations concernant les chlorures ne sont pas reportées, l'essentiel des concentrations en chlorure des eaux étant inférieur à la limite inférieure de détection (LDI = 5 mg/l). Les eaux des sources situées côté Tarn apparaissent en moyenne appauvries en calcium (de l'ordre de 8 mg/l) et en hydrogénocarbonate (de l'ordre de 30 mg/l). Cette différence est vraisemblablement liée à la dynamique d'écoulement des eaux au sein du Causse de Sauveterre, les eaux des sources situées côté Tarn semblent circuler plus rapidement au sein des formations carbonatées que les eaux des sources situées côté Lot.

Les teneurs en magnésium des eaux des sources situées côté Lot présentent un écart interquartile compris entre 9.25 mg/l et 14.5 mg/l contre 8.5 mg/l et 12 mg/l pour les eaux des sources situées côté du Tarn. Les valeurs plus élevées observées pour les sources situées côté Lot permettent donc de suggérer que les eaux ont eu un temps de résidence globalement plus élevé au sein du système que les eaux des sources situées côté Tarn.

Les teneurs en silice des eaux du Causse de Sauveterre sont peu élevées (3.8 mg/l en moyenne). Aucune différenciation n'est observable selon la répartition géographique. De même, les eaux ne peuvent pas être différenciées par leurs teneurs en sodium et potassium (Tableau 22).

Les teneurs en nitrate des eaux du Causse de Sauveterre sont comprises entre 1.6 et 22 mg/l. Les histogrammes de distribution des nitrates indiquent une distribution de type bimodal, aucune différenciation n'est observable selon la répartition géographique des sources (Illustration 61). Le premier mode autour de 3 mg/l permet de qualifier les eaux pas ou peu influencées par les apports anthropiques. Les teneurs en nitrate autour de 3 mg/l sont proches des valeurs mesurées dans les eaux de pluies des départements voisins du Gard et de l'Hérault (Ladouche et al, 2007). Le second mode identifié à l'aide des histogrammes de distribution se situe autour de la valeur de 7 mg/l et traduit les influences par les pollutions anthropiques. Compte tenu des valeurs moyennes en nitrate mesurées, les systèmes karstiques du Causse de Sauveterre sont globalement peu affectés par les pollutions anthropiques, où sont capables de les absorber. Nous tenterons d'utiliser l'information des nitrates des suivis bimestriels pour qualifier la nature et les modalités de transfert des eaux d'infiltration au sein du Causse de Sauveterre.

¹ Les éléments de statistiques descriptives relatifs aux sources qui font l'objet d'un suivi bimestriel sont présentés en annexe 5.

Global	Cond.	Ca	Mg	Na	K	HCO3	NO3	SO4	SiO2
	(µS/cm)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
Minimum	290	58.9	2.5	0.7	0.40	197	1.6	2.0	0.9
1er Quartile	427.8	71.2	8.9	1.2	0.40	273.8	4.0	3.1	3.0
Médiane	458.5	79.8	10.45	1.4	0.40	295	6.0	4.0	4.0
Moyenne	454.9	79.1	10.9	1.4	0.5	293.2	5.7	6.4	3.8
3ème Quartile	481	85.0	13.525	1.6	0.50	314	7.0	6.8	4.8
Maximum	784	107.5	18.5	3	1.50	399	22.0	128.0	6.0
Coté lot									
Minimum	405	63.1	6.47	0.90	0.40	217	2.0	3.0	0.9
1er Quartile	450	79.1	9.25	1.20	0.40	290	5.0	4.0	4.0
Médiane	471	83.2	11.20	1.50	0.40	309	5.2	5.0	4.0
Moyenne	476.1	83.2	11.7	1.5	0.6	309.2	5.5	6.0	3.9
3ème Quartile	490	87.7	14.50	1.65	0.55	324	6.3	6.3	5.0
Maximum	784	107.5	18.50	3.00	1.50	399	13.0	42.0	6.0
Coté Tarn									
Minimum	290	58.9	2.5	0.7	0.4	197	1.6	2.0	1.0
1er Quartile	395.5	68.6	8.53	1.1	0.4	250	3.8	3.0	3.0
Médiane	438	74.5	10	1.3	0.4	281	6.0	4.0	4.0
Moyenne	432.1	75.5	10.2	1.4	0.5	276.8	5.9	6.7	3.8
3ème Quartile	464.5	81.5	12	1.5	0.5	298.5	7.0	6.8	4.2
Maximum	626	100.8	18.2	2.8	0.9	392	22.0	128.0	6.0

Tableau 22 - Eléments de statistiques descriptives des eaux du Causse de Sauveterre et différenciation selon la position géographique.

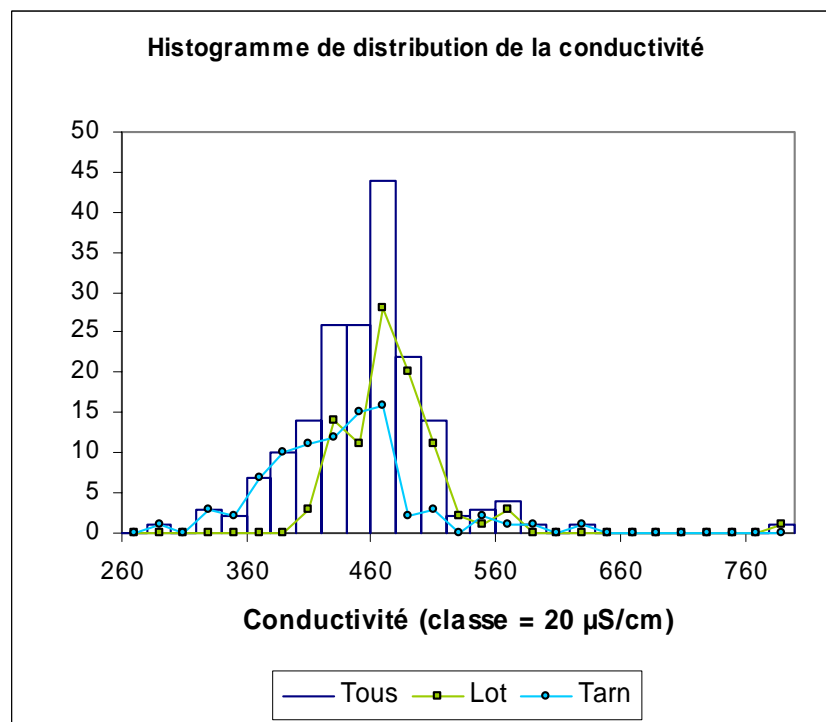


Illustration 57- Diagramme de distribution de la conductivité électrique des eaux du Causse de Sauveterre

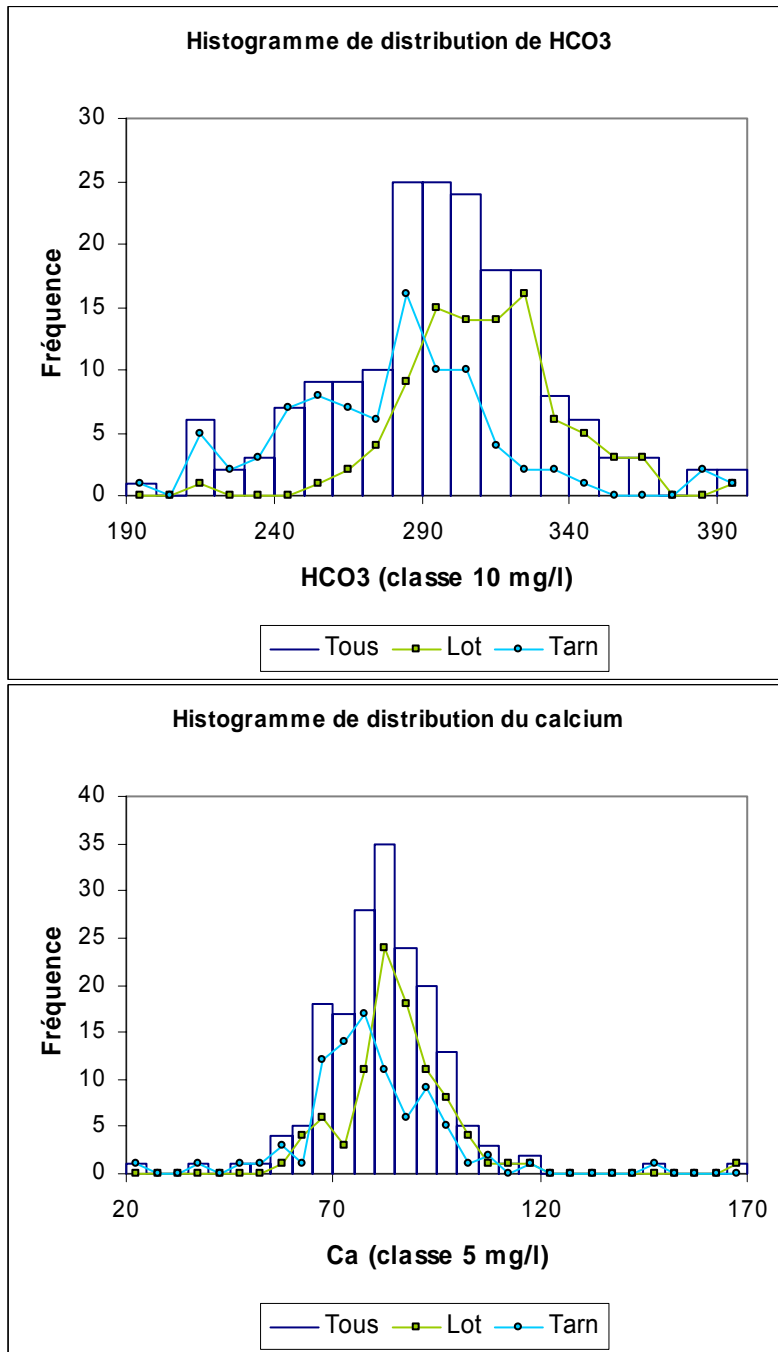


Illustration 58 - Diagrammes de distribution des teneurs en hydrogencarbonate et en calcium des eaux du Causse de Sauveterre

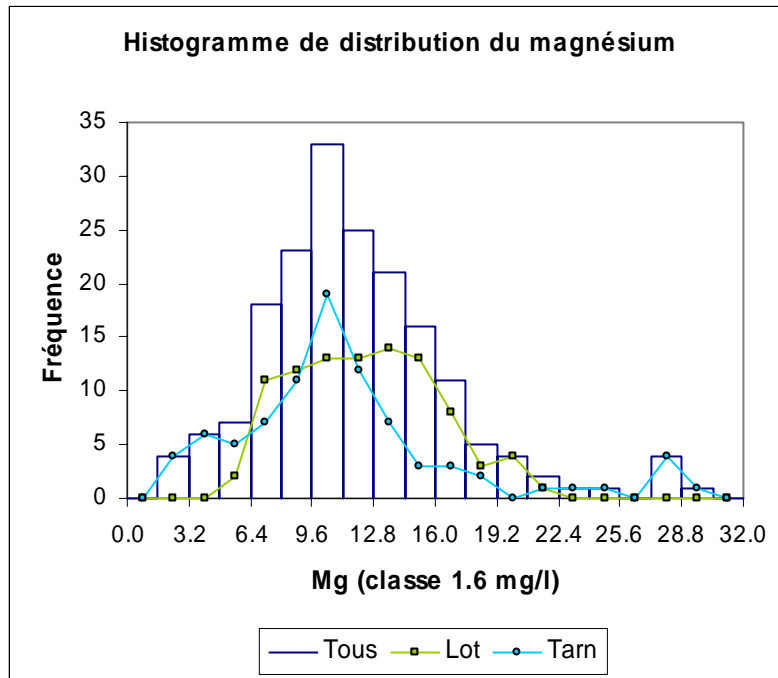


Illustration 59 - Diagramme de distribution des teneurs en magnésium des eaux du Causse de Sauveterre

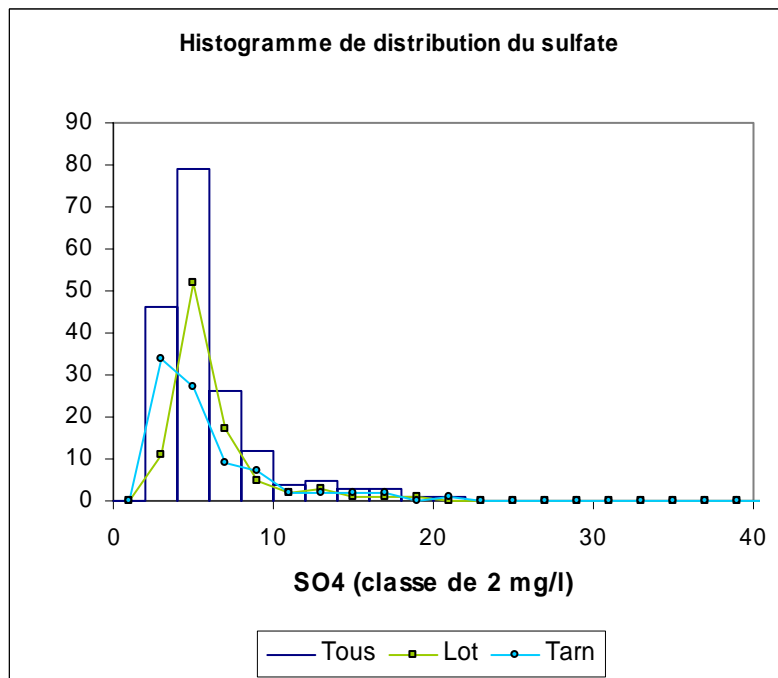


Illustration 60 - Diagramme de distribution des teneurs en sulfate des eaux du Causse de Sauveterre

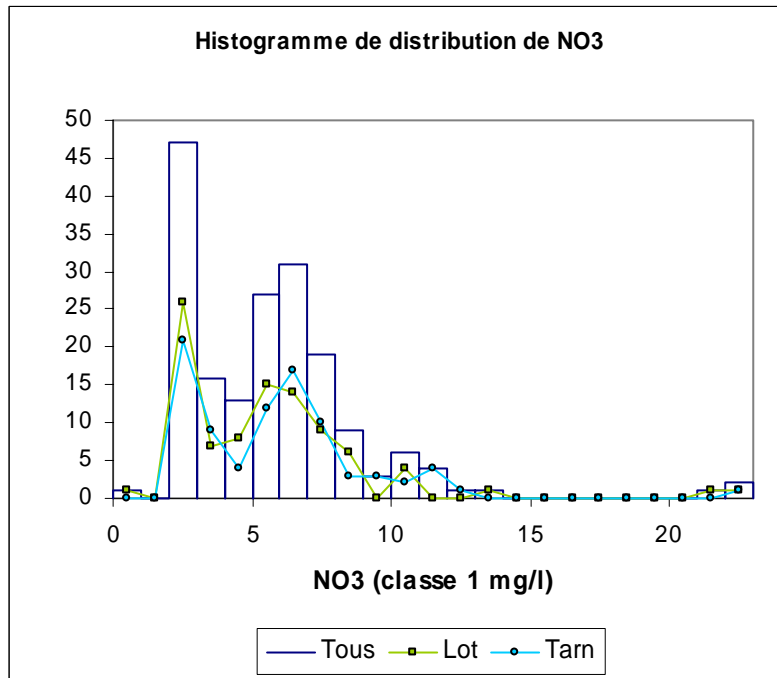


Illustration 61 - Diagrammes de distribution des teneurs en nitrate des eaux du Cause de Sauveterre

5.8.2. Qualité de l'eau et paramètres physico-chimiques de terrain

Selon les normes issues du décret français n° 2001-1220 du 20 décembre 2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles, actuellement en vigueur en France, des limites de qualité (valeurs de numération obligatoires à respecter scrupuleusement) sont définies uniquement pour *Escherichia coli* et les Entérocoques. Des références de qualité (valeurs indicatives à satisfaire, établies à des fins de suivi des installations de production et de distribution d'eau et d'évaluation des risques pour la santé des personnes, elles constituent en fait un premier niveau d'alerte) sont définies pour les coliformes totaux, les bactéries sulfito-réductrices (y compris les spores) et pour les germes aérobies revivifiables (à 22°C et 37°C).

Les limites de qualité pour les eaux de distribution pour *Escherichia coli* sont de 0/100ml tout comme pour les entérocoques. Concernant les références de qualité, elles sont les suivantes :

- coliformes totaux : 0/100ml,
- bactéries sulfito-réductrices : 0/100ml,
- germes aérobies revivifiables à 22°C : variation dans un rapport de 10 par rapport à la valeur habituelle,
- germes aérobies revivifiables à 37°C : variation dans un rapport de 10 par rapport à la valeur habituelle.

Dans le Tableau 23, les résultats des analyses microbiologiques pour les bactéries sulfito-réductrices, les coliformes totaux, *Escherichia coli*, les germes thermophiles ainsi que les streptocoques fécaux sont donnés pour les sources suivantes : Bernarde, Burle, Saint-Frézal, les Fonts pour le Causse de Sauveterre et St-Chély du Tarn (Causse Méjean). Ces sources sont toutes utilisées pour l'alimentation en eau potable, à l'exception de St-Frézal qui le sera prochainement.

Les bactéries sulfito-réductrices (BSIR) y compris les spores sont des micro-organismes anaérobies sporigènes qui ont la particularité de développer une forme de résistance. Ils se retrouvent dans les matières fécales, les sols et les rivières.

Les bactéries coliformes (CTF) sont présentes dans les matières fécales, mais se développent également dans les milieux naturels ; ce ne sont donc pas des bactéries d'origine strictement fécale. La présence d'un petit nombre de coliformes totaux dans les eaux souterraines non traitées n'a qu'une signification réduite sur le plan sanitaire. L'absence des coliformes ne signifie pas néanmoins que l'eau ne présente pas de risque pathogène, car les kystes de certains parasites sont plus résistants à la désinfection que les coliformes.

L'apparition d'*Escherichia coli* (*Ecoli*) indique la présence éventuelle de micro-organismes pathogènes ; c'est la principale bactérie du groupe des coliformes fécaux qui sont des indicateurs d'une contamination d'origine fécale, étant présents en grande quantité dans les déjections animales et humaines. Certaines souches d'*Escherichia coli* sont pathogènes pour l'homme et peuvent provoquer des troubles intestinaux (dysenterie voire choléra).

Les germes aérobies revivifiables, appelés aussi germes totaux (GT), n'ont pas d'effets directs sur la santé, mais sous certaines conditions ils peuvent générer des problèmes dans les systèmes de dialyse. Leur présence en grand nombre est le signe d'une dégradation de la qualité de l'eau. Les bactéries d'origine résiduaire (environnementale) sont dénombrées à 22°C sur une période de 72 heures d'incubation et les bactéries d'origine intestinale (humaine ou animale) à plus de 36° (36-44°C) sur une période d'incubation de 24 heures. L'ancien décret n° 89-3 du 3 janvier 1989, relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, fixait la limite des germes totaux à 100 / ml pour les germes aérobies revivifiables à 22°C et à 20 / ml pour les germes aérobies revivifiables à 37°C et ceci pour les eaux non désinfectées.

Les entérocoques appartiennent à la famille des streptocoques (STRF) ; ils sont les hôtes normaux de l'intestin, ne sont pas considérés comme pathogènes, mais peuvent provoquer des infections localisées.

Concernant les différentes eaux brutes des sources analysées, les valeurs d'*Escherichia coli* sont très souvent au-dessus de la limite de qualité à respecter scrupuleusement. La source Bernarde est la moins affectée par des contaminations d'origine fécale, avec des valeurs n'excédant pas 4/100ml. La source Les Fonts est caractérisée par un niveau de contamination proche de la Bernarde, à l'exception d'une valeur élevée pour le mois de mai 2004 avec 58 individus/100ml. Les périodes d'apparition des contaminations sont pratiquement toutes les mêmes pour l'ensemble des sources et sont à mettre en relation avec les conditions hydrologiques (période de recharge par des orages estivaux, recharge d'automne hiver voir précipitations

printanières). La source de Burle est quant à elle la plus marquée par des contaminations d'origine fécale, 9 mois sur 10 analysés, comme l'attestent les résultats pour *Escherichia coli* ainsi que les streptocoques fécaux. Les contaminations se retrouvent essentiellement de septembre à novembre 2003 et de février 2004, voire mai 2004.

Ainsi, du point de vue de la qualité bactériologique, il est important de noter que des drainages vers les eaux souterraines en provenance soit d'épandages d'origine agricole ou d'assainissement individuel prennent place au niveau des bassins d'alimentation de ces différentes sources. Ces sources étant en grande majorité utilisées pour l'alimentation d'eau potable, on constate qu'un traitement par chloration au niveau de réseau de distribution est indispensable, afin d'éviter tout problème de santé publique.

Du côté des normes de la qualité de l'eau du point de vue des éléments chimiques, nous nous arrêterons sur les éléments suivants pour lesquels les limites de qualité sont indiqués :

- nitrates NO₃ : 50 mg/l,
- pesticides et pesticides totaux : 0,10 µg/l et respectivement 0.50 µg/l.

Concernant les substances indésirables telles que mentionnées dans le Tableau 24, toutes les substances mesurées pour les périodes de basses et de hautes eaux pour les mêmes sources ayant fait l'objet d'analyse microbiologique sont en dessous des limites de qualité telles qu'indiquées.

En conclusion, en dehors des problèmes de contaminations d'origine fécale liées à de l'épandage agricole ou de boues ou à de l'assainissement individuel, l'eau est de bonne qualité selon les limites fixées pour l'eau de consommation humaine, pour les périodes d'analyses.

Cause de Sauveterre – Lot N°2 et N°3 : Hydrométrie et Hydrochimie

Analyses microbiologiques

Bernarde		paramètre	08/09/2003	22/10/2003	26/11/2003	17/12/2003	28/01/2004	24/02/2004	29/03/2004	28/04/2004	25/05/2004	24/06/2004
germe(s)/100ml	BSIR		0	0	N.M.	0	1	0		0	1	0
germe(s)/100ml	CTF		5	12	37	3	3	4	1	3	2	1
germe(s)/100ml	Ecoli		4	2	1	0	0	0	0	0	1	0
germe(s)/ml	GT22		23	7	177	18	17	11	14	20	13	31
germe(s)/ml	GT36_44		1	2	11	5	<1	<1	<1	<1	1	2
spore(s)/100ml	STRF		2	0	3	0	0	0	1	0	0	0
Burle		paramètre	08/09/2003	22/10/2003	26/11/2003	17/12/2003	28/01/2004	24/02/2004	29/03/2004	28/04/2004	25/05/2004	26/06/2004
germe(s)/100ml	BSIR		N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	3	10	3	N.M.	N.M.	0
germe(s)/100ml	CTF		20	13	100	3	9	46	2	1	3	N.M.
germe(s)/100ml	Ecoli		5	14	25	0	2	46	1	2	1	2
germe(s)/ml	GT22		300	182	300	44	25	221	39	30	24	94
germe(s)/ml	GT36_44		51	66	229	9	6	53	3	6	20	15
spore(s)/100ml	STRF		7	22	72	2	0	21	0	0	0	5
St-Frezal		paramètre	08/09/2003	22/10/2003	26/11/2003	17/12/2003	28/01/2004	24/02/2004	29/03/2004	28/04/2004	25/05/2004	24/06/2004
germe(s)/100ml	CTF		23	11	27	8	6	71	7	8	5	29
germe(s)/100ml	Ecoli		14	17	26	0	6	71	0	4	3	0
germe(s)/ml	GT22		239	131	300	159	300	300	28	145	148	163
germe(s)/ml	GT36_44		75	65	300	21	96	69	2	28	41	9
spore(s)/100ml	STRF		22	12	58	0	1	7	0	0	1	1
Les Fonts		paramètre	08/09/2003	22/10/2003	26/11/2003	17/12/2003	28/01/2004	24/02/2004	29/03/2004	28/04/2004	25/05/2004	26/06/2004
germe(s)/100ml	BSIR			0		N.M.	0	N.M.	1	0	0	0
germe(s)/100ml	CTF		14	3	31	0	0	58	1	1	3	4
germe(s)/100ml	Ecoli		4	2	3	0	0	58	0	0	1	0
germe(s)/ml	GT22		38	72	92	155	6	157	4	17	11	29
germe(s)/ml	GT36_44		10	3	5	0	<1	24	<1	<1	<1	10
spore(s)/100ml	STRF		14	7	4	7	1	14	0	0	0	0
St Chély du Tarn		paramètre	10/09/2003	22/10/2003	26/11/2003	17/12/2003	28/01/2004	24/02/2004	29/03/2004	28/04/2004	25/05/2004	26/06/2004
germe(s)/100ml	BSIR		N.M.	N.M.	N.M.	0	0	0	0	N.M.	0	0
germe(s)/100ml	CTF		4	>100	>100	1	2	9	14	0	52	26
germe(s)/100ml	Ecoli		2	2	6	1	0	2	0	0	47	0
germe(s)/ml	GT22		45	85	>300	31	25	116	18	23	108	29
germe(s)/ml	GT36_44		9	11	17	4	2	27	5	2	24	9
spore(s)/100ml	STRF		1	74	170	5	1	2	0	0	7	3

Légende	limite qualité	référence de qualité/valeur indicative	ancienne valeur
BSIR: bactéries sulfite-réductrices		0/100ml	
CTF: coliformes totaux		0/100ml	
Ecoli: Escherichia coli	0/100ml		
GT22: germes aérobies revivifiables à 22°C		variation de 10 par rapport à la valeur habituelle	100/100ml
GT36_44: germes aérobies revivifiables de 36 à 44°C		variation de 10 par rapport à la valeur habituelle	20/100ml
STRF: entérocoques: stréptocoques fécaux	0/100ml		

Tableau 23 - Résultats des analyses microbiologiques des 5 sources de catégorie I, utilisées pour l'alimentation en eau potable

Substances indésirables

Les Fonts				St-Frézal				Burle			
unite	paramètre	29/03/2004	21/07/2004	unite	paramètre	29/03/2004	20/07/2004	unite	paramètre	29/03/2004	19/07/2004
µg/l	AS	<5	<5	µg/l	AS	<5	<5	µg/l	AS	<5	<5
µg/l	ATRZ	<0.05	<0.05	µg/l	ATRZ	<0.05	0.05	µg/l	ATRZ	<0.05	<0.05
µg/l	CD	<0.5	<0.5	µg/l	CD	<0.5	<0.5	µg/l	CD	<0.5	<0.5
µg/l	CRT	<2	<2	µg/l	CRT	<2	<2	µg/l	CRT	<2	<2
mg/l	CU	<0.1	<0.1	mg/l	CU	<0.1	<0.1	mg/l	CU	<0.1	<0.1
µg/l	FET	<100	<100	µg/l	FET	<100	<100	µg/l	FET	<100	<100
µg/l	NI	<5	<5	µg/l	NI	<5	<5	µg/l	NI	<5	<5
µg/l	PB	<2	<2	µg/l	PB	<2	<2	µg/l	PB	<2	2
µg/l	SB	<5	<5	µg/l	SB	<5	<5	µg/l	SB	<5	<5
µg/l	SE	6	<5	µg/l	SE	6	<5	µg/l	SE	<6	<5
mg/l	ZN	<0.1	<0.1	mg/l	ZN	<0.1	<0.1	mg/l	ZN	<0.1	<0.1

St-Chély du Tarn				Bernarde				Limites de qualité de l'eau potable pour distribution			
unite	paramètre	29/03/2004	19/07/2004	unite	paramètre	29/03/2004	21/07/2004				
µg/l	AS	<5	<5	µg/l	AS	<5	<5	AS	arsenic	10	µg/l
µg/l	ATRZ	<0.05	<0.05	µg/l	ATRZ	<0.05	<0.05	ATRZ	atrazine	0.1	µg/l
µg/l	CD	<0.5	<0.5	µg/l	CD	<0.5	<0.5	CD	cadmium	5	µg/l
µg/l	CRT	<2	<2	µg/l	CRT	<2	<2	CRT		50	µg/l
mg/l	CU	<0.1	<0.1	mg/l	CU	<0.1	<0.1	CU	cuivre	2	mg/l
µg/l	FET	<100	<100	µg/l	FET	<100	<100	FET	fer total	200	µg/l
µg/l	NI	<5	<5	µg/l	NI	<5	<5	NI	nickel	20	µg/l
µg/l	PB	<2	2	µg/l	PB	<2	<2	PB	plomb	10	µg/l
µg/l	SB	<5	<5	µg/l	SB	<5	<5	SB	antimoine	5	µg/l
µg/l	SE	<6	<5	µg/l	SE	<6	<5	SE	sélénium	10	µg/l
mg/l	ZN	<0.1	<0.1	mg/l	ZN	<0.1	<0.1	ZN	zinc	3	mg/l

Tableau 24 - Résultats des analyses des substances indésirables pour cinq sources de catégories I utilisées pour l'alimentation en eau potable

La valeur moyenne du pH des sources est de 7.55, avec un maximum à 8.36 et un minimum à 7.2 (Illustration 62). A noter que la valeur moyenne des sources de catégorie 2 e, sur la base des mesures effectuées lors des étiages, hautes et moyennes eaux est de 7.8. (Maximum 8.4 et minimum 6.7). En intégrant ces données, la valeur moyenne du pH des sources du Causse de Sauveterre, partie Est est de 7.6.

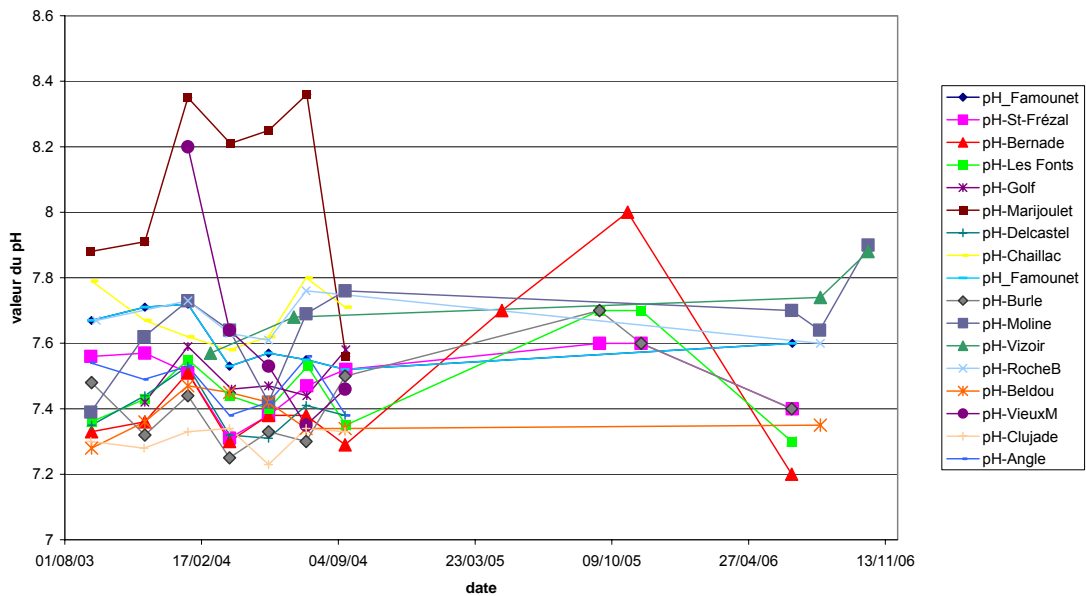


Illustration 62 - Evolution du pH des sources du Causse de Sauveterre – partie Est

La valeur moyenne de la température des sources est de 11.02°C, avec un maximum à 17.6°C et un minimum à 8.1°C (Illustration 63), intégrant les données mesurées également lors des campagnes de mesures des sources de catégories 2 et 3. La source avec la température la plus basse est celle de Chailiac, puis la source des Fonts avec une certaine constance. Les variations à la baisse des températures traduisent la reprise des écoulements en hiver avec la fonte de la neige notamment.

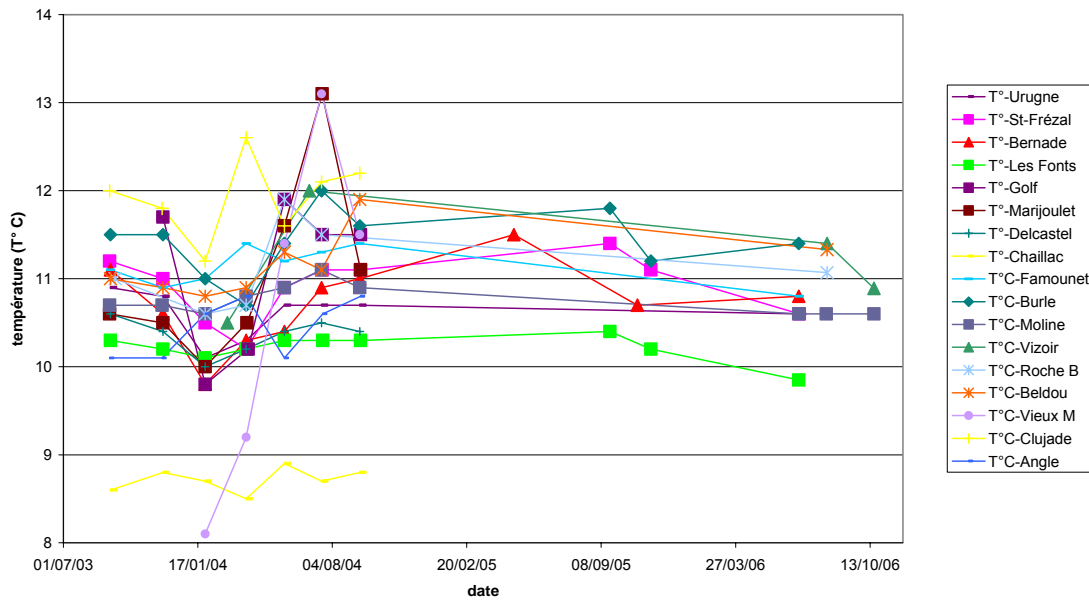


Illustration 63 - Evolution de la température du Causse de Sauveterre – partie Est

Toutes les analyses effectuées sur l'ensemble des sources de catégories I, II et III ne présentent pas d'anomalie de qualité concernant les nitrates ; la majeure des valeurs est inférieure à 10 mg/l (Illustration 64).

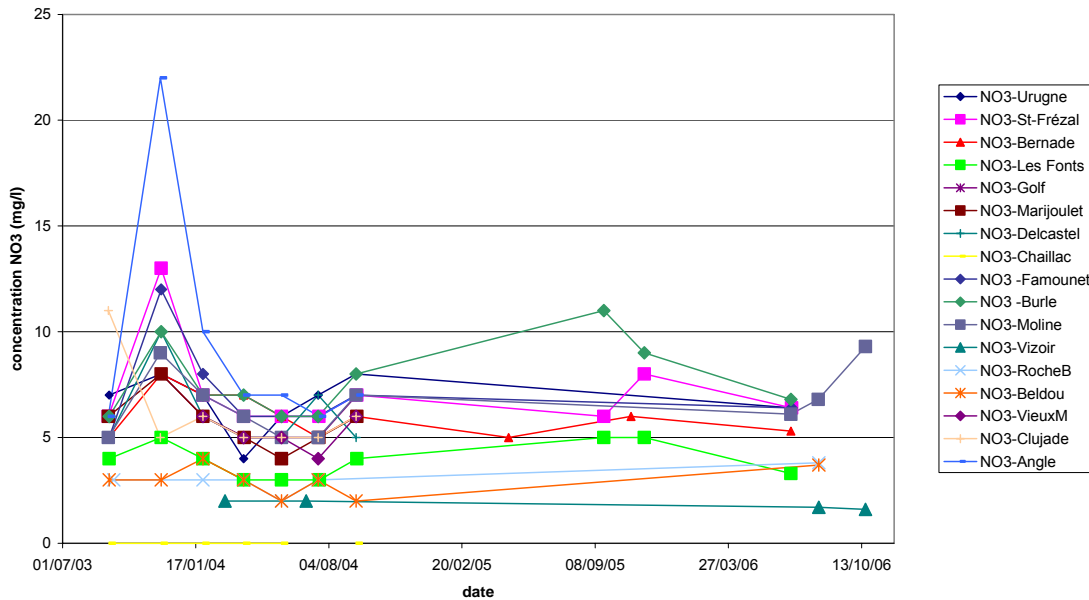


Illustration 64 - Evolution des concentrations en nitrate du Causse de Sauveterre – partie Est

5.8.3. Suivis temporels : Informations sur le fonctionnement hydrologique des sources

Description de l'évolution géochimique de la source de Burle (côté Tarn)

Nous présentons sur l'illustration 65 l'évolution temporelle des débits de la source de Burle et des concentrations en éléments majeurs depuis septembre 2003. Les échantillons de septembre 2003 et de juillet 2004 nous permettent de qualifier la signature géochimique des eaux en contexte de basses eaux. Il a été supposé que les échantillons des mois de septembre 2003 et de juillet 2004 permettent également de qualifier la signature géochimique des basses eaux des autres sources karstiques échantillonnées pour lesquelles l'information de débit n'est pas connue.

Sur l'illustration 65, on peut remarquer que les teneurs en chlorure et en sulfate n'évoluent peu ou pas. Ces quasi-absences de variation sont à mettre en relation avec les problèmes de sensibilité analytique précédemment évoqués. Ces traceurs ont peu (SO_4) ou pas (Cl) été utilisés dans la suite de l'étude pour qualifier le fonctionnement des systèmes karstiques pour lesquels des données chimiques bimestrielles sont disponibles.

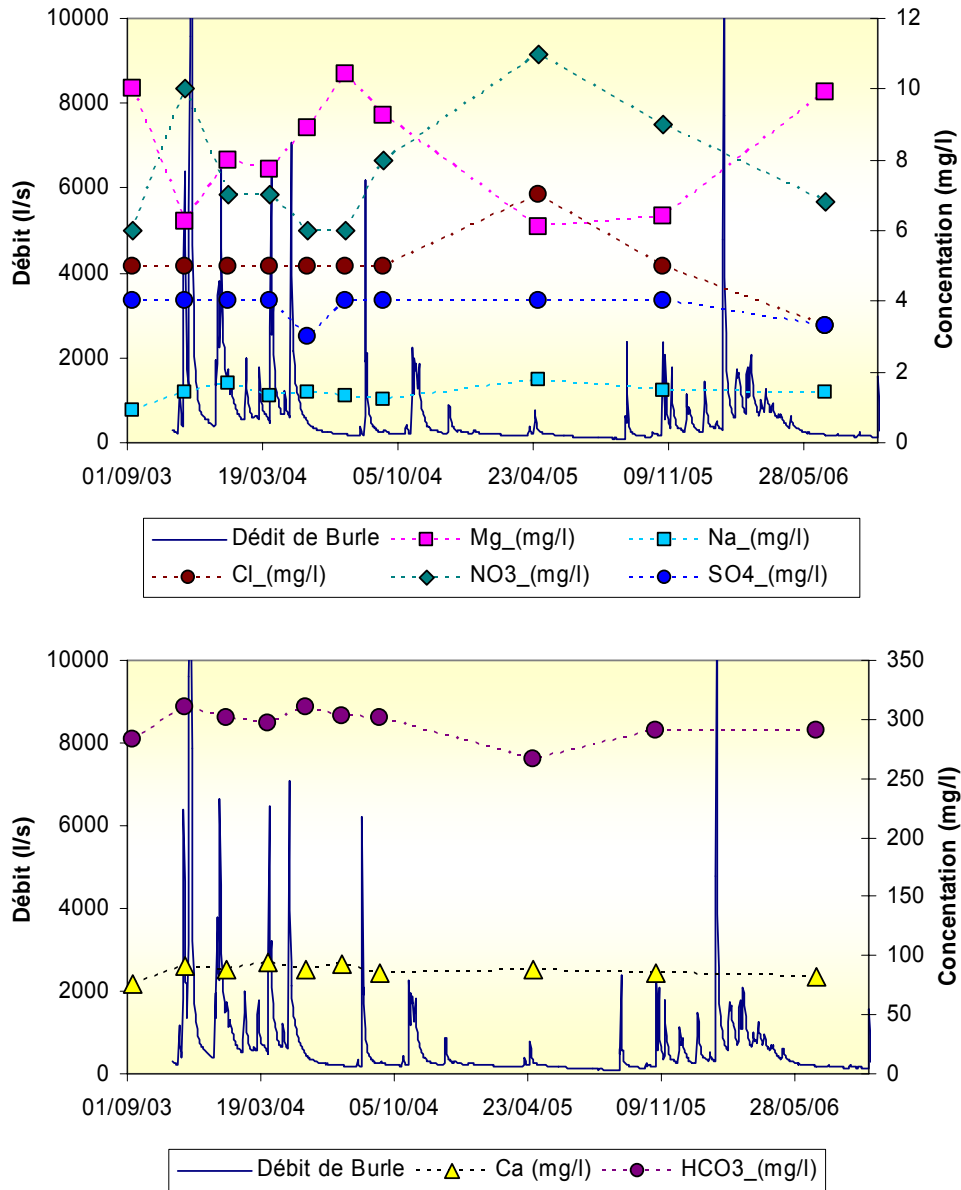


Illustration 65 - Evolution temporelle du débit et des concentrations (éléments majeurs) des eaux de la source patrimoniale de Burle depuis septembre 2003

Pour la source de Burle, les teneurs en magnésium les plus faibles sont observées lors des hautes eaux et les plus élevées lors des périodes de basses eaux (Illustration 65). Pour le calcium, une évolution inverse est globalement observée, les valeurs élevées sont généralement observées lors des hautes eaux, les valeurs les plus faibles en période de basses eaux. Les évolutions des teneurs en nitrate suivent globalement les teneurs en calcium, les valeurs élevées sont observées lors des hautes eaux, les valeurs plus faibles sont observées en basses eaux. Une évolution similaire est observée pour le sodium. Les teneurs en hydrogencarbonate présentent également

une tendance à l'augmentation lors des périodes de hautes eaux. La conductivité des eaux apparaît globalement plus élevée lors des périodes de hautes eaux.

Lors des périodes des hautes eaux, l'augmentation de la conductivité des eaux est à mettre en relation directe avec les augmentations des concentrations en HCO_3 et Ca observées. Les concentrations en magnésium diminuent également en période de crue. Ces évolutions traduisent le phénomène de dissolution des carbonates sous l'action du CO_2 biogénique entré dans le système lors de l'infiltration des eaux de pluie. Les formations géologiques de la zone d'infiltration (notamment des calcaires du Kimméridgien) contiennent peu ou pas de magnésium. Les diminutions des teneurs en magnésium observées lors des hautes eaux peuvent être expliquées par le phénomène de mélange avec les eaux en provenance de la zone épikarstique qui, compte tenu de l'augmentation des teneurs en nitrate observées, semblent être affectées par des pollutions anthropiques (de type agricole). L'augmentation des teneurs en sodium observées lors des périodes de hautes eaux traduit l'interaction que subissent les eaux d'infiltration avec niveaux argileux présents au sein du système karstique (marno- calcaires du Callovien-Oxfordien). L'interaction géochimique des eaux d'infiltration avec les marno-calcaires apparaît de faible ampleur compte tenu du faible enrichissement observé lors des hautes eaux (de l'ordre de + 0.6 mg/l par rapport aux valeurs mesurée en basses eaux).

Les informations disponibles en période de hautes eaux ne permettent pas de qualifier la dynamique de transfert des eaux entre la zone épikarstique et la zone noyée. Seul un suivi géochimique détaillé lors d'une crue ou un suivi en continu des paramètres physico-chimiques des eaux (conductivité, température) permettrait de qualifier le temps de transit des eaux d'infiltration.

L'évolution des teneurs en magnésium observées lors des périodes de récession (tendance à l'augmentation) traduit un temps d'interaction plus ou moins important des eaux avec les minéraux magnésiens. Cette évolution lente ne peut être attribuée à la seule infiltration lente au travers la zone d'infiltration mais traduit également la présence plus ou moins importante de la zone noyée au sein des dolomies.

	Mg vs Ca	Mg vs NO3	Mg vs HCO3	Mg vs Na	Mg vs SO4	Ca vs Na
Scce Famouzet	crue : Ca augmente, Mg diminue faiblement BE: pas de tendance	Mg diminue qd NO3 augmente	Mg à tendance à diminuer qd HCO3 à tendance à augmenter	Mg diminue qd Na augmente	Mg à tendance à diminuer qd SO4 à tendance à augmenter	Pas de tendance Na stable = 1-1.3 mg/l
Scce Burle	crue : Ca augmente, Mg diminue BE: pas de tendance	Mg diminue qd NO3 augmente	Pas de tendance comportement erratique	Mg à tendance à diminuer qd Na à tendance à diminuer	Pas de tendance SO4 stable = 4 mg/l	Ca augmente qd Na augmente
Scce Moline	crue : Ca augmente, Mg diminue faiblement BE: pas de tendance	Mg a tendance à diminuer qd NO3 augmente	Pas de tendance	Mg à tendance à diminuer qd Na à tendance à augmenter	Pas de tendance SO4 stable = 3-4 mg/l	Ca a tendance à augmenter qd Na a tendance à augmenter
sce Vizoir	crue : Ca diminue, Mg diminue BE: pas de tendance	Pas de tendance NO3 stable = 2 mg/l	Mg diminue qd HCO3 diminue	Mg diminue qd Na diminue	Mg diminue qd SO4 diminue	Pas de tendance
sce Roche Blave	crue : Ca augmente, Mg diminue BE: pas de tendance	Pas de tendance NO3 stable = 2-3 mg/l	Mg diminue qd HCO3 augmente	Pas de tendance Na stable = 0.8-1.1 mg/l	Pas de tendance SO4 stable = 3 mg/l	Pas de tendance Na stable = 0.8-1.1 mg/l
Scce Beldou	crue : comportement erratique BE: pas de tendance	comportement erratique	pas de tendance comportement erratique	Mg diminue qd Na diminue	Mg diminue qd SO4 diminue	Ca a tendance à augmenter qd Na augmente
Scce Vieux Moulin	crue : Ca diminue, Mg diminue BE: pas de tendance	Mg diminue qd NO3 à tendance à augmenter	Mg diminue qd HCO3 diminue	Mg diminue qd Na diminue	Mg diminue qd SO4 diminue	Ca a tendance à augmenter qd Na augmente
Scce Clujade	crue : Ca augmente, Mg diminue BE: pas de tendance	Pas de tendance NO3 globalement stable = 4-5 mg/l	Mg diminue qd HCO3 à tendance à augmenter	Mg diminue qd Na augmente	Mg diminue qd SO4 diminue	Ca augmente qd Na augmente
Scce Angle	crue : Ca augmente, Mg diminue BE: pas de tendance	Mg diminue qd NO3 diminue	Mg diminue qd HCO3 à tendance à augmenter	Mg à tendance à diminuer qd Na à tendance à augmenter	Mg diminue qd SO4 à tendance à augmenter	Ca augmente qd Na augmente

Tableau 25 - Synthèse de l'évolution de différents couples d'ions pour les sources côté Tarn

Les trois traceurs (Mg, Ca, NO₃) et dans une moindre mesure (HCO₃) permettent d'étudier les modalités d'infiltration des eaux au sein de ce système karstique. Ces traceurs ainsi que les informations des teneurs en sulfate et sodium ont été utilisées pour qualifier le fonctionnement géochimique des autres sources pour lesquelles un suivi géochimique est disponible. Les résultats synthétiques des évolutions observées pour les sources en fonction de leur position géographique sont présentés dans les tableaux suivants [

Tableau 25 (côté Tarn) et Tableau 26 (côté Lot)].

Pour les sources situées côté Tarn, il ressort que les sources de Famounet, Molines, Roche Blave, Clujade et Angle présentent des comportements similaires en période de hautes eaux à celui détaillé précédemment pour la source de Burle. Les sources de Vizoir et du Vieux Moulin se distinguent des précédentes notamment par une diminution globale de la minéralisation et des teneurs en Ca et HCO₃ en période de hautes eaux. Ces évolutions pourraient être rattachées à un faible contact des eaux d'infiltration au sein de la zone épikarstique et/ou à un meilleur drainage vers la zone noyée des eaux de pluie infiltrée dans la zone épikarstique.

Description de l'évolution géochimique de la source de Bernade (côté Lot)

Nous présentons sur l'illustration 66 l'évolution temporelle des débits de la source de Bernade et des concentrations en éléments majeurs depuis septembre 2003. Les échantillons de septembre 2003 et de juillet 2004 nous permettent de qualifier la signature géochimique des eaux en contexte de basses eaux. Il a été supposé que les échantillons des mois de septembre 2003 et de juillet 2004 permettent également de qualifier la signature géochimique des basses eaux des autres sources karstiques échantillonnées pour lesquelles l'information de débit n'est pas connue.

Sur l'illustration 66, on peut remarquer que les teneurs en chlorure n'évoluent peu ou pas. Cette quasi-absence de variation est à mettre en relation avec les problèmes de sensibilité analytique précédemment évoqués.

Les variations des teneurs en magnésium au cours du cycle hydrologique apparaissent globalement faibles (de l'ordre de 1.5 mg/l) en comparaison à ce que l'on peut observer à la source de Burle (de l'ordre de 4 mg/l, Illustration 65). Lors des périodes de hautes, les teneurs en magnésium restent stables ou augmentent légèrement lorsque les teneurs en calcium augmentent. Il n'existe pas de relation marquée entre les teneurs en Mg et Nitrate, les teneurs en nitrate les plus élevées sont globalement observées en contexte de hautes eaux. Les autres éléments (HCO₃, Na, SO₄) ne présentent pas de tendance avec les teneurs en magnésium. Les évolutions temporelles apparaissent globalement tamponnées (peu de variations). Les teneurs en calcium présentent une tendance à l'augmentation lorsque les teneurs en sodium augmentent. D'une manière globale, les évolutions géochimiques mesurées à la source de Bernade ne traduisent pas ou peu de fonctionnement karstique.

Pour les autres sources situées côté Lot, il ressort que les sources de St-Frézal, d'Urugne, les Fonts et Marijoulet présentent des comportements similaires en période

de hautes eaux à celui détaillé précédemment pour la source de Bernade (Tableau 26). Les Sources de Chaillac, Delcastel et Golf ne présentent pas ou peu d'évolution temporelle de leur chimisme, ces sources n'ont pas ou peu de comportement karstique.

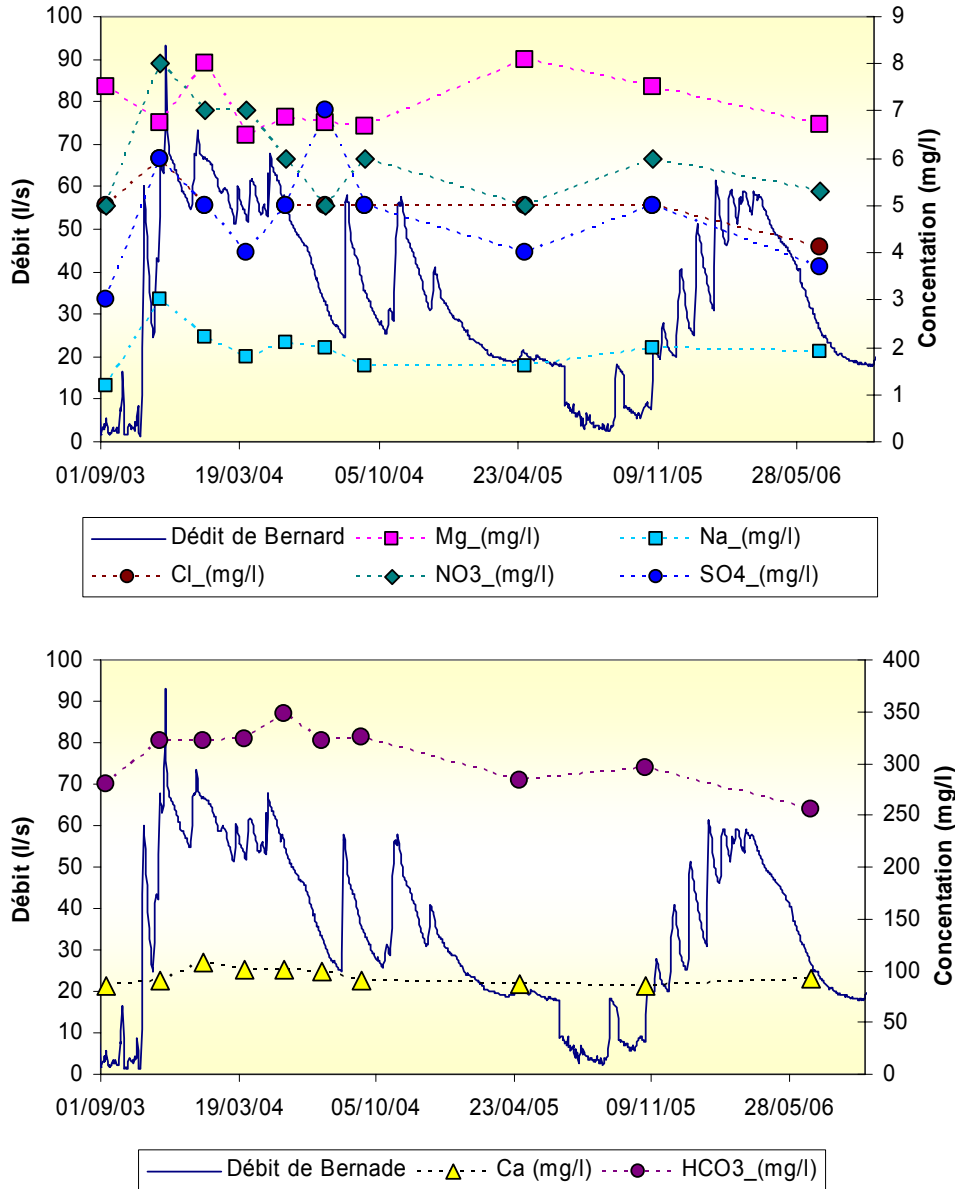


Illustration 66 - Evolution temporelle du débit et des concentrations (éléments majeurs) des eaux de la source de Bernade depuis septembre 2003

	Mg vs Ca	Mg vs NO3	Mg vs HCO3	Mg vs Na	Mg vs SO4	Ca vs Na
Sce Urugne	crue : Ca augmente, Mg reste stable ou augmente faiblement BE: Ca diminue, Mg tendance à augmenter	Mg diminue qd NO3 a tendance à augmenter	Pas de relation	Pas de tendance évolution ératique	Mg diminue qd SO4 a tendance à diminuer	Ca a tendance à augmenter qd Na augmente
Sce St-Frézal	crue : Ca augmente, Mg augmente BE: Ca diminue, Mg diminue	Mg augmente qd NO3 a tendance à augmenter	Mg augmente qd HCO3 a tendance à augmenter	Pas de tendance évolution ératique	Mg diminue qd SO4 a tendance à diminuer	Ca a tendance à diminuer qd Na augmente
Sce Bernade	crue : Ca augmente, Mg reste stable ou augmente faiblement BE: Ca diminue, Mg tendance à augmenter	Pas de tendance évolution ératique	Pas de relation	Pas de relation	Pas de tendance évolution ératique	Ca a tendance à augmenter qd Na augmente
Sce Les Fonts	crue : Ca augmente, Mg augmente BE: Ca diminue, Mg augmente	Mg diminue qd NO3 a tendance à augmenter	Pas de relation	Pas de tendance évolution ératique	Pas de tendance SO4 stable: 3 a 4 mg/l	Ca a tendance à augmenter qd Na augmente
Sce Golf (Urugne)	crue : Ca augmente, Mg pas de tendance BE: Ca diminue, Mg tendance à augmenter	Pas de tendance NO3 stable = 2 mg/l	Pas de relation	Pas de tendance évolution ératique	Mg diminue qd SO4 a tendance à diminuer	Ca a tendance à augmenter qd Na augmente
Sce Marjoulet	crue : Ca augmente, Mg augmente faiblement BE: Ca diminue, Mg globalement stable	Pas de tendance Mg globalement stable	Pas de relation	Na a tendance à diminuer qd Mg a tendance à diminuer	Pas de tendance SO4 stable: 4 a 5 mg/l	Pas de relation
Sce Delcastel	crue : Ca augmente, Mg globalement stable, pas de tendance BE: Ca diminue, Mg globalement stable	Pas de tendance Mg globalement stable	Pas de relation	Pas de relation	Pas de tendance SO4 stable: 4 a 5 mg/l	Pas de relation
Sce Chaillac	crue : Ca augmente, Mg diminue faiblement (Mg reste élevé, environ 16 mg/l) BE: Ca diminue, Mg tendance à augmenter	Pas de tendance NO3 stable = 2 mg/l	Pas de relation	Mg à tendance à diminuer qd Na a tendance à augmenter	Pas de relation	Ca a tendance à augmenter qd Na augmente

Tableau 26 - Synthèse de l'évolution de différents couples d'ions pour les sources côté Lot

Les sources situées côté Lot qui ont fait l'objet d'un suivi géochimique bimestriel présentent des teneurs moyennes en magnésium globalement élevées (de 7.2 mg/l à 17.2 mg/l) et peu de variations temporelles. Ces teneurs élevées traduisent un temps d'interaction plus ou moins important des eaux avec les minéraux magnésiens et indiquent également la présence plus ou moins importante de la zone noyée des aquifères au sein de formation contenant des dolomies. Les informations isotopiques apportées par les isotopes du strontium pourraient aider à une meilleure identification des formations géologiques au sein desquelles les zones noyées des aquifères sont développées (cf. § 5.8.6).

5.8.4. Informations sur les conditions d'écoulements au sein des systèmes karstiques à partir des suivis bimestriels.

La signature chimique des eaux au cours des périodes d'étiages permet d'accéder aux conditions d'écoulement des eaux au sein des systèmes karstiques (Plagnes 1997). D'une manière générale, les informations apportées par les paramètres du système calco-carbonique permettent de distinguer :

- les systèmes pour lesquels l'écoulement des eaux dans la zone noyée se produit en partie à surface libre,
- les systèmes pour lesquels l'écoulement des eaux dans la zone noyée se produit en charge.

Dans le premier groupe, les eaux présentent des indices de saturation élevés vis-à-vis de la calcite ($IS \gg 0$) et des pressions partielles en CO_2 (pCO_2) qui diminuent lorsque l'indice de saturation de la calcite augmente. Ce phénomène indique que les phénomènes de dégazage sont favorisés, car l'eau commence à perdre une partie du CO_2 dissous avant l'émergence. De façon simultanée, le carbonate de calcium peut commencer à précipiter (concrétion calcaire, travertin par exemple). Ce phénomène se produit lorsque l'écoulement des eaux se fait en partie à surface libre dans des conduits potentiellement pénétrables.

Dans le second groupe, les eaux apparaissent sous saturées ou à l'équilibre vis-à-vis de la calcite ($IS < 0$; $IS = 0$) et l'évolution des pressions partielles en CO_2 (pCO_2) n'apparaît pas corrélée à l'évolution de l'indice de saturation de la calcite. Les phénomènes de dégazage ne sont pas favorisés, ce qui indique que l'écoulement des eaux se produit dans des réseaux en charge (non pénétrables, exceptés par des plongeurs lorsque des vides de grandes tailles sont présents dans le système).

Nous présentons en annexe les indices de saturation (IS^2) des eaux des sources vis-à-vis des phases minérales calcite ($CaCO_3$), aragonite ($CaCO_3$), dolomite $CaMg(CO_3)_2$, Quartz (SiO_2) et Chalcédoine (SiO_2) des Adoux et de Las Bordes.

² IS : indice de saturation calculé à l'aide du logiciel PhreeqcV2, Parkhurst and Appelo, 1999

Les eaux présentent dans leurs ensembles des indices de saturation vis à vis de la calcite proche de l'équilibre ($IS = 0$) voire élevés vis-à-vis de la calcite ($IS \gg 0$). Les indices maximum sont observés pour la source Marijoulet (côté Lot, Illustration 67). Les indices de saturation les plus faibles vis-à-vis de la calcite et de la dolomite sont observés lors des périodes de hautes eaux. L'importance des valeurs des indices de saturation de la dolomite lors des périodes de basses eaux indique que les eaux sont évoluées chimiquement et témoigne d'un temps de contact important vis-à-vis de cette phase minérale. D'une manière générale, les indices de saturation (IS_{Dol}) les plus élevés sont observés pour les sources côté Lot. Ce résultat est en accord avec les teneurs en magnésium qui sont globalement plus importantes pour les sources situées côté Lot.

Les pressions partielles de CO_2 dissous (pCO_2) sont globalement faibles ($< 1.4\%$). La relative stabilité des teneurs en carbone inorganique total dissous en étiage (CMTD, tableaux 10 à 13 de l'annexe 5) indique que les systèmes karstiques ne sont pas affectés par une source de CO_2 (gazeux) d'origine profonde. La faiblesse des pressions partielles de CO_2 (pCO_2) renforce cette interprétation. Un apport de CO_2 profond se traduirait par une nette élévation du CMTD et des pCO_2 , notamment en étiage.

L'évolution des pCO_2 en fonction des indices de saturation vis à vis de la calcite est présentée sur l'illustration 68 (sources situées côté Tarn) et sur l'illustration 69 (sources situées côté Lot). D'une manière générale, on observe une diminution des pCO_2 des eaux lorsque les indices de saturation vis-à-vis de la calcite augmentent ce qui traduit un dégazage des eaux avant leur émergence. Seuls les pCO_2 des sources de Clujade, Angle et Vizoir ne présentent pas d'évolution claire lorsque les indices de saturation vis-à-vis de la calcite évoluent. Les résultats semblent donc indiquer que l'écoulement des eaux de la plupart des sources karstiques se fait en partie à surface libre dans des conduits potentiellement pénétrables s'ils sont de grandes tailles. Seules les sources de Clujade, Angle et Vizoir semblent présenter un écoulement dans des drains en charge. Pour la source de Bernade, le dégazage peut se produire dans la galerie de drainage du champ captant.

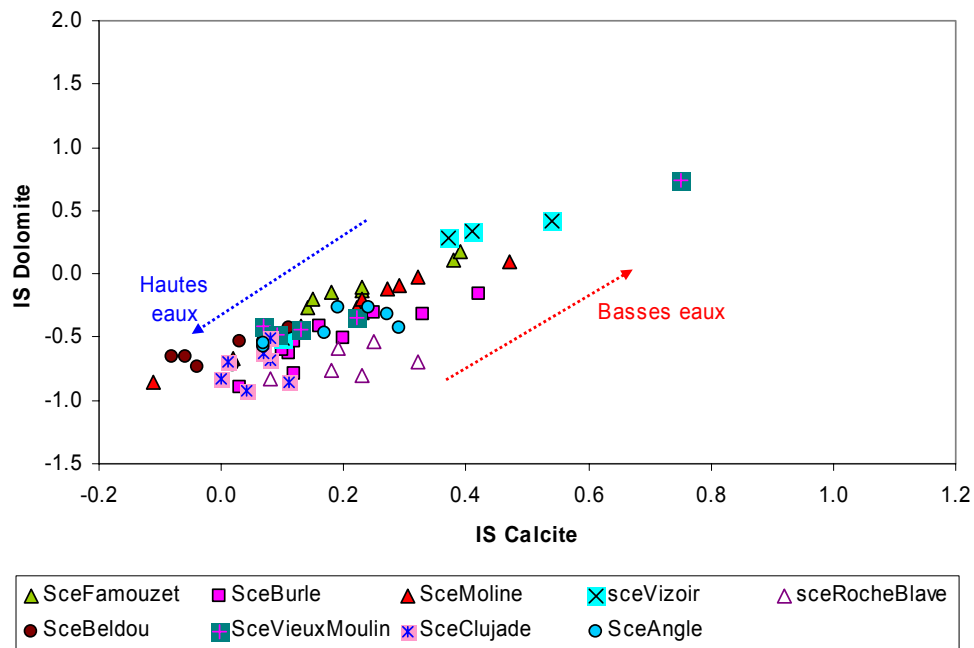
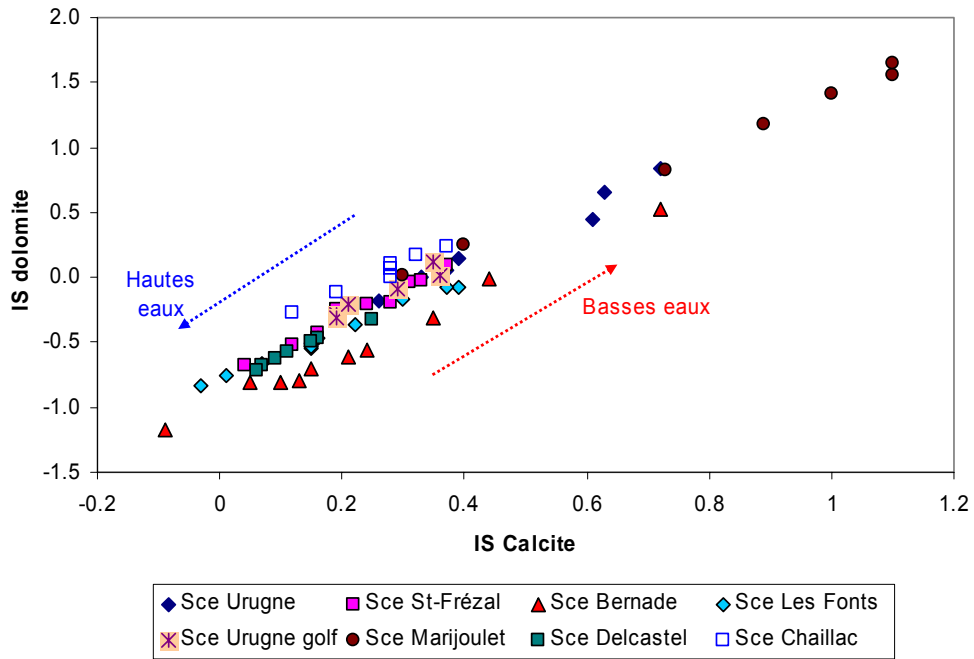
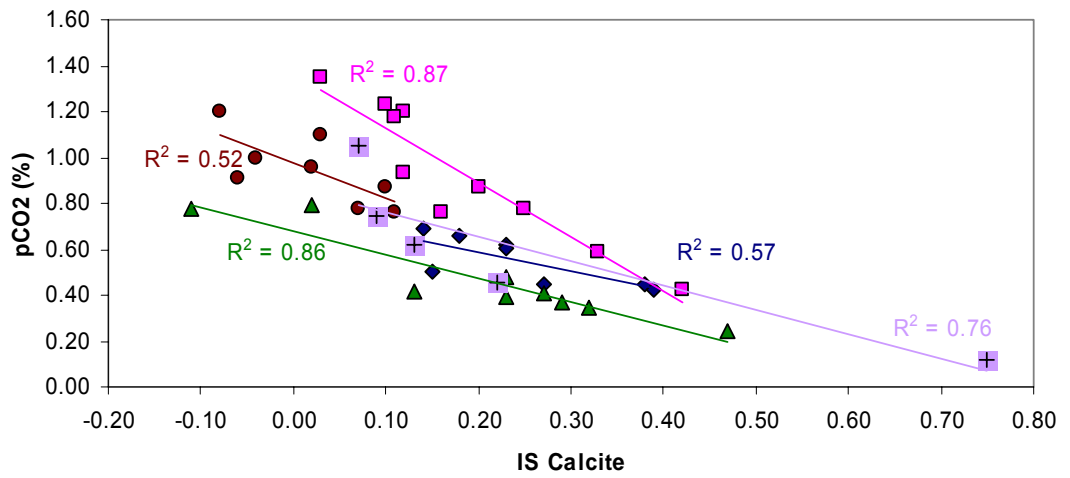
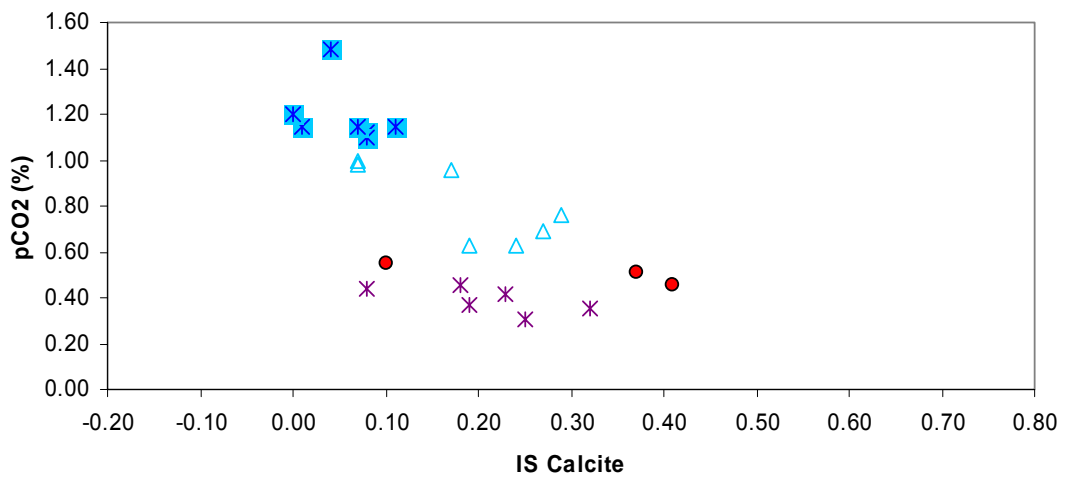


Illustration 67- Evolution des indices de saturation de la calcite et de la dolomite des eaux du causse de Sauveterre (côté Lot graphique supérieur et côté Tarn graphique inférieur).



◆ SceFamouzet ■ SceBurle ▲ SceMoline ● SceBeldou ⊕ SceVieuxMoulin



● sceVizoir ✖ sceRocheBlave ⊗ SceClujade △ SceAngle

Illustration 68 - Evolution de l'indice de saturation de la calcite et de la pCO2 des sources côté Tarn du Causse de Sauveterre

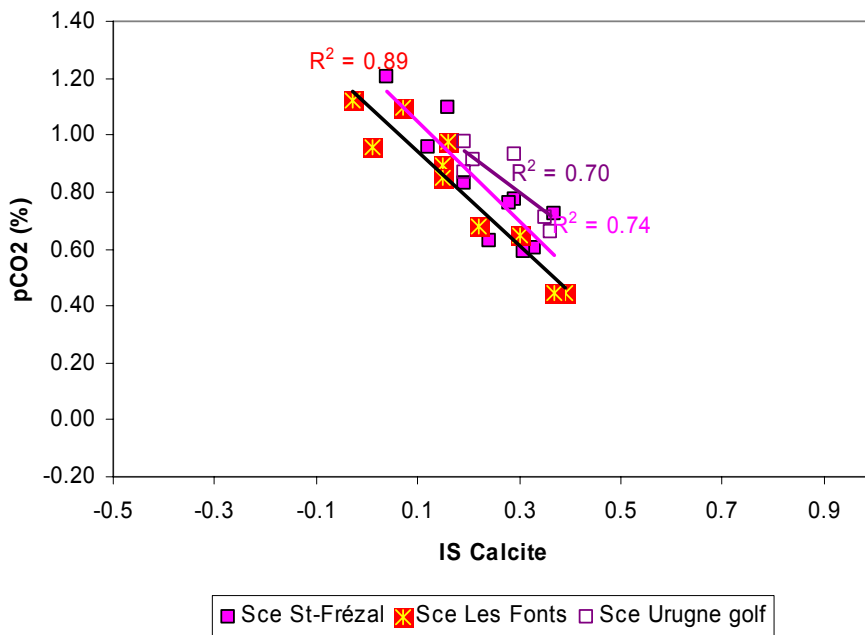
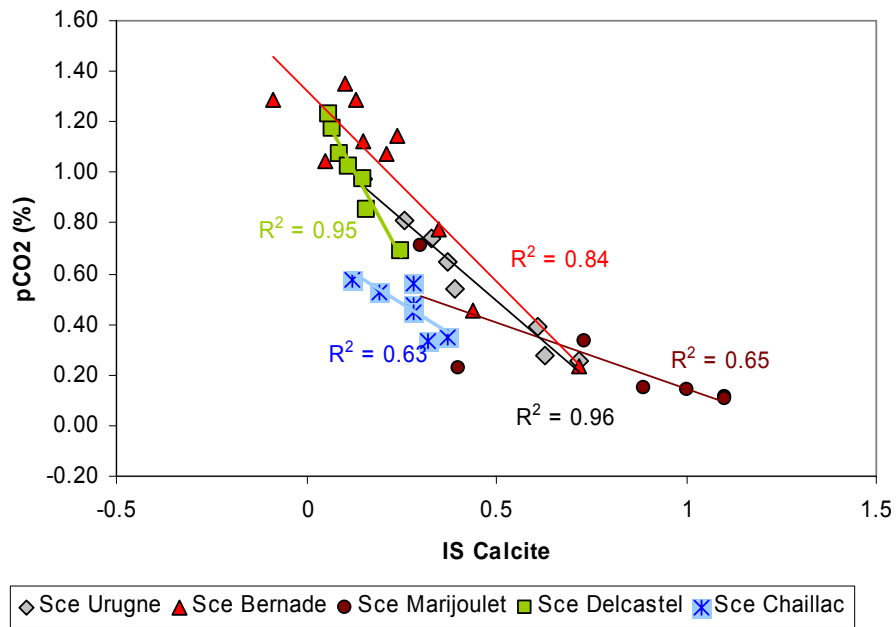


Illustration 69 - Evolution de l'indice de saturation de la calcite et de la pCO2 des sources côté Lot du Causse de Sauveterre

5.8.5. Informations apportées par les isotopes de l'eau

Nous présentons dans le Tableau 27, les résultats des signatures isotopiques des eaux des sources de St-Frézal, Famouzet, Molines et Urugne.

L'isotope tritium de la molécule d'eau est instable dans le temps et est fréquemment utilisé comme chronomètre pour dater les eaux. (^3H , isotope radioactif de période courte de 12,26 ans)³. C'est un marqueur des masses d'eaux contemporaines. En effet, une production artificielle s'est ajoutée à la production naturelle au cours des essais thermonucléaire aériens, pendant la période 1952-1963 ; les essais ont cessé depuis 1963. Par l'intermédiaire de cette production artificielle, on peut donc différencier les eaux qui résultent des précipitations sans tritium nucléaire (avant 1952) des eaux de précipitations formées dans une atmosphère contenant du tritium nucléaire. La présence de tritium dans une eau témoigne d'une alimentation récente.

Les teneurs en tritium des pluies actuelles sont très faibles et globalement comprises entre 2 et 7 unités tritium, les valeurs les plus élevées étant observées en hiver et au printemps (BD-ISO, <http://infoterre.brgm.fr>).

Les teneurs en tritium mesurées sont comprises entre 4 et 7 unités tritium. Les valeurs mesurées indiquent que l'écoulement des sources est assuré par des eaux infiltrées récemment dans les systèmes karstiques (pluies actuelles).

Nom	Date	$\delta^2\text{H}$ (‰) (± 0.8 ‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) (± 0.1 ‰)	Activité Tritium
St-Frézal	31/10/2005	-55	-8.5	7 \pm 2
St-Frézal	30/06/2006	-54.8	-8.5	6 \pm 2
Urugne	31/10/2005	-53.7	-8.2	4 \pm 1
Urugne	30/06/2006	-55.1	-8.4	5 \pm 2
Famouzet	31/10/2005	-56.1	-8.6	4 \pm 2
Famouzet	30/06/2006	-55.7	-8.6	5 \pm 2
Moline	31/10/2005	-52.6	-8.2	4 \pm 1
Moline	29/06/2006	-53.7	-8.2	6 \pm 2

Tableau 27 - Compositions isotopiques de l'eau des sources de St-Frézal et Urugne (côté Lot) et des sources de Moline et Famouzet (côté Tarn).

La signature isotopique ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) des sources échantillonnées présente peu de variabilité spatiale. L'illustration 70 permet de montrer que les eaux souterraines se répartissent entre la droite des pluies mondiales (DEMM : $\delta^2\text{H}=8* \delta^{18}\text{O} +10$, Craig 1961) et la droite des pluies locales définie pour le département de l'Hérault (DEML : $\delta^2\text{H}=8* \delta^{18}\text{O} +14$; Ladouche et al, 2007).

³ Production naturelle de 1 atome pour 10^{18} atomes

En l'absence de connaissance sur la signature isotopique de la pluie sur le Causse de Sauveterre, la détermination des altitudes présumés de recharge à l'aide des isotopes stables de l'eau nécessite plusieurs informations complémentaires, à savoir (1) la signature isotopique de la pluie annuelle au niveau de la mer et (2) du gradient isotopique altitudinal. Sur la base des éléments de connaissance régionale des pluies Méditerranéennes (Ladouche et al, 2007) le gradient isotopique altitudinal dans la zone d'étude est supposé à celui observé dans l'Hérault (-0.25 ‰/100 m en oxygène 18). La signature isotopique moyenne, de la pluie au niveau de la Mer est supposé égale aux valeurs mesurées dans l'Hérault et le Gard ($\delta^{18}\text{O} = -5.8 \text{ ‰}$).

L'illustration 71 permet de renseigner sur l'altitude de recharge des différentes sources échantillonnées. Compte tenu des hypothèses de départ, on estime pour les points que l'altitude moyenne de recharge est comprise entre 950 et 1100. Ces altitudes sont compatibles avec les altitudes rencontrées sur le Causse de Sauveterre.

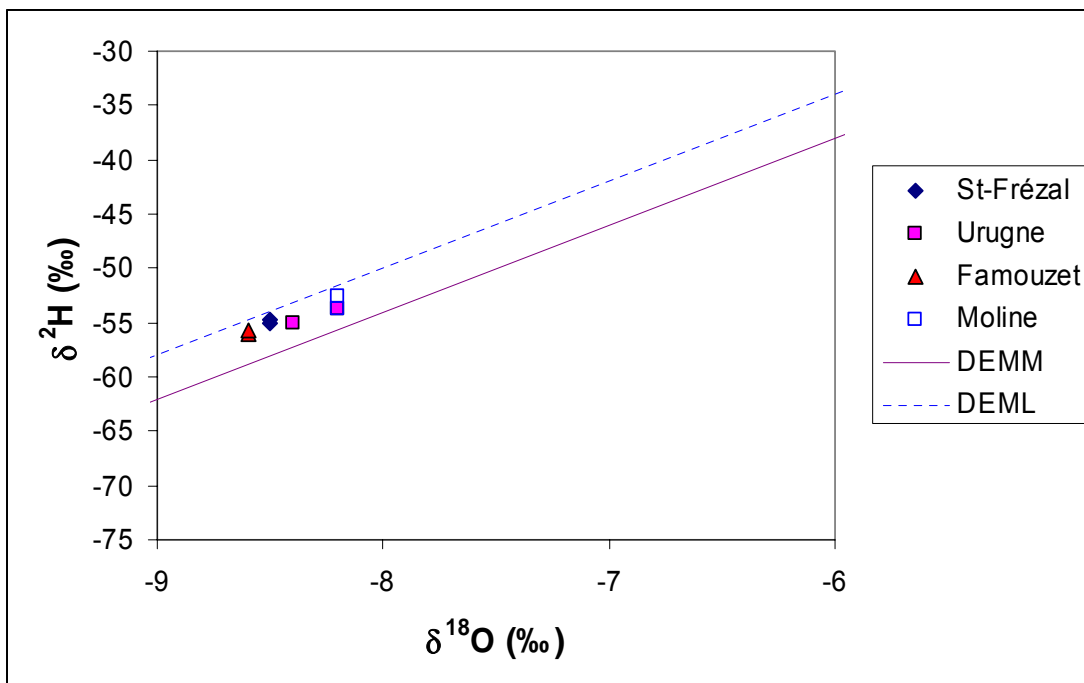


Illustration 70 - Evolution des teneurs en deutérium en fonction des teneurs en oxygène 18 des eaux des sources de St-Frézal et Urugne (côté Lot) et des sources de Moline et Famouzet (côté Tarn)

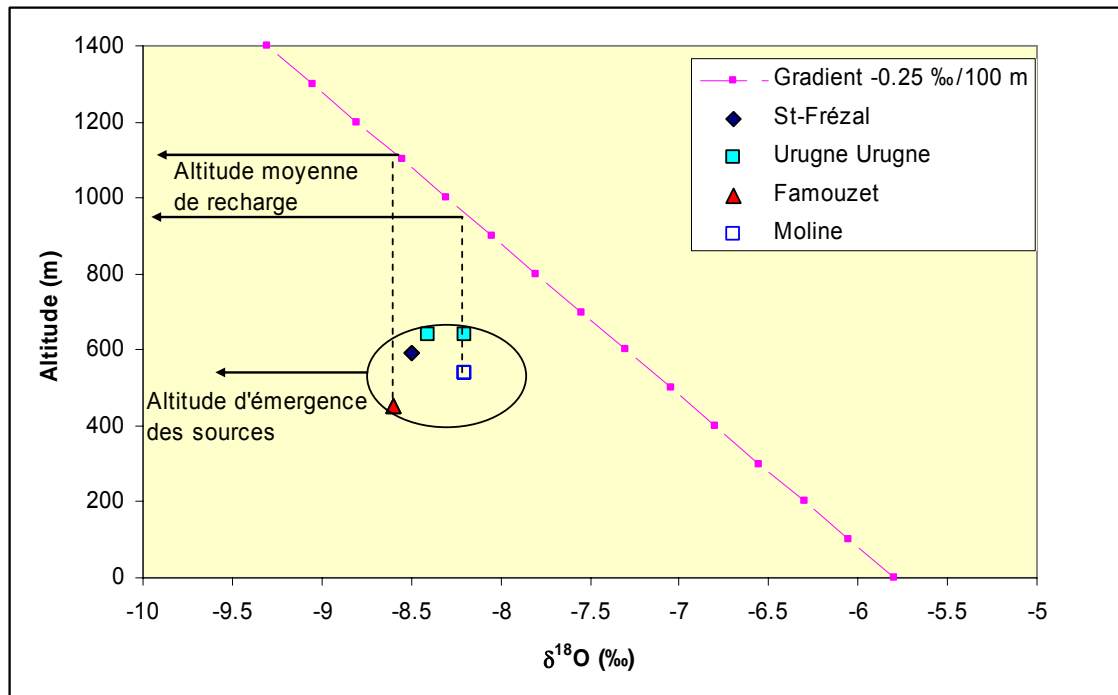


Illustration 71 - Evolution des teneurs en oxygène 18 des eaux des sources et des altitudes d'émergence. L'estimation de l'altitude moyenne de recharge des sources est également reportée

5.8.6. Informations apportées par les isotopes du strontium couplé aux informations chimiques

Rappelons en préambule, que les eaux qui drainent les roches acquièrent la composition isotopique en Sr (rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) des minéraux de cette roche les plus sensibles à la dissolution. Ainsi, les eaux qui drainent des roches silicatées (granite par exemple) présentent des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ élevés, celles qui drainent des roches carbonatées ont des signatures plus faibles (moins radiogéniques). Le strontium n'est pas modifié par des processus tels que l'évaporation ou la précipitation de minéraux. Sa composition isotopique reflète donc un terme source soit celui du strontium de l'eau initiale, soit celui d'un minéral avec lequel elle a été en contact (dissolution).

Nous présentons sur le Tableau 28 la nature du contexte géologique de la zone d'émergence des sources en fonction de leur localisation sur les cartes géologiques au 50000^{ème}. Le Tableau 29 présente les teneurs en Mg, Ca, HCO₃, Sr et SO₄ et les valeurs des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des eaux des sources échantillonnées au cours de l'été 2006⁴.

⁴ Les résultats des analyses complémentaires sont présentés en Annexe 5

nom	zone d'émergence présumée	
Sce Famouzet	Bathonien Supérieur	J2b
Sce Burle	Bathonien Supérieur	J2b
Sce Moline	Bajocien supérieur	j1b
Sce Roche Blave	Bajocien supérieur	j1b
Sce Urugne	Bajocien Inférieur	j1a
Sce Bernade	Aalénien	L9
Sce Les Fonts	Aalénien	L9
Sce St-Frézal	Héttangien	L2
Sce Vizoir	Héttangien	L2

Tableau 28 - Contexte géologique des émergences des sources déduit à partir des cartes géologiques au 50000^{ème}.

Nom	date	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	Ca mg/l	Mg mg/l	HCO3 mg/l	SO4 mg/l	Sr μg/l
Sce Urugne	30/06/2006	0.708480	0.000009	78.2	14.3	324	3.8	29.1
Sce St-Frézal	30/06/2006	0.708836	0.000008	81.2	10.7	297	3.2	20.8
Sce Famouzet	30/06/2006	0.708265	0.000009	64.9	14.9	247	3.1	24.2
Sce Bernade	29/06/2006	0.708793	0.000010	92.4	6.7	255	3.7	25.5
Sce Les Fonts	29/06/2006	0.708601	0.000008	78.6	10	281	3.1	18.9
Sce Burle	29/06/2006	0.708198	0.000008	82	9.9	290	3.3	29.7
Sce Moline	29/06/2006	0.708351	0.000009	63.5	10	241	3.1	21.5
Sce Moline	09/08/2006	0.708286	0.000009	60.4	9.8	224	3.3	23.1
Sce Vizoir	10/08/2006	0.708638	0.000009	69.2	16	315	13.4	56.4
Sce Roche Blave	10/08/2006	0.707956	0.000009	61.2	4.5	212	2.8	33.5

Tableau 29 - Résultats des analyses isotopiques (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) et chimique (Ca, Sr, SO4, HCO3 et Mg) de la campagne de prélèvement de l'été 2006 réalisé dans le cadre de l'étude (en cours) de la ressource thermo-minérale de Quézac.

L'illustration 72 présente l'évolution des rapports isotopiques (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) du strontium des eaux échantillonnées en fonction des rapports chimiques HCO3/Sr et SO4/Sr. Ce type de représentation permet de distinguer très nettement les différents types d'eau en présence dans la zone d'étude. Les informations sont très significatives, l'incertitude sur la détermination du rapport isotopique ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr est très faible (2σ = 0.000009), soit inférieure à la taille du point sur l'illustration. Les rapports isotopiques ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr les plus faibles sont observés à la source de Roche Blave, les rapports isotopiques les plus élevés à la source de St-Frézal.

La signature isotopique en strontium des eaux de la source de Roche Blave est comparable aux signatures isotopiques des calcaires de l'oxfordien que l'on rencontre dans les systèmes karstiques Nord-Montpelliérains (Ladouche et al., 1999). La zone noyée de cette source apparaît donc développé dans le l'Oxfordien (J6) et non dans le Bajocien supérieur. Les très faibles teneurs en Mg (4.5 mg/l) de cette source indiquent par ailleurs l'absence de dolomie au sein de la zone noyée. Ce résultat apparaît cohérent avec la description lithologique des calcaires de l'Oxfordien (cf. § 3.1.2).

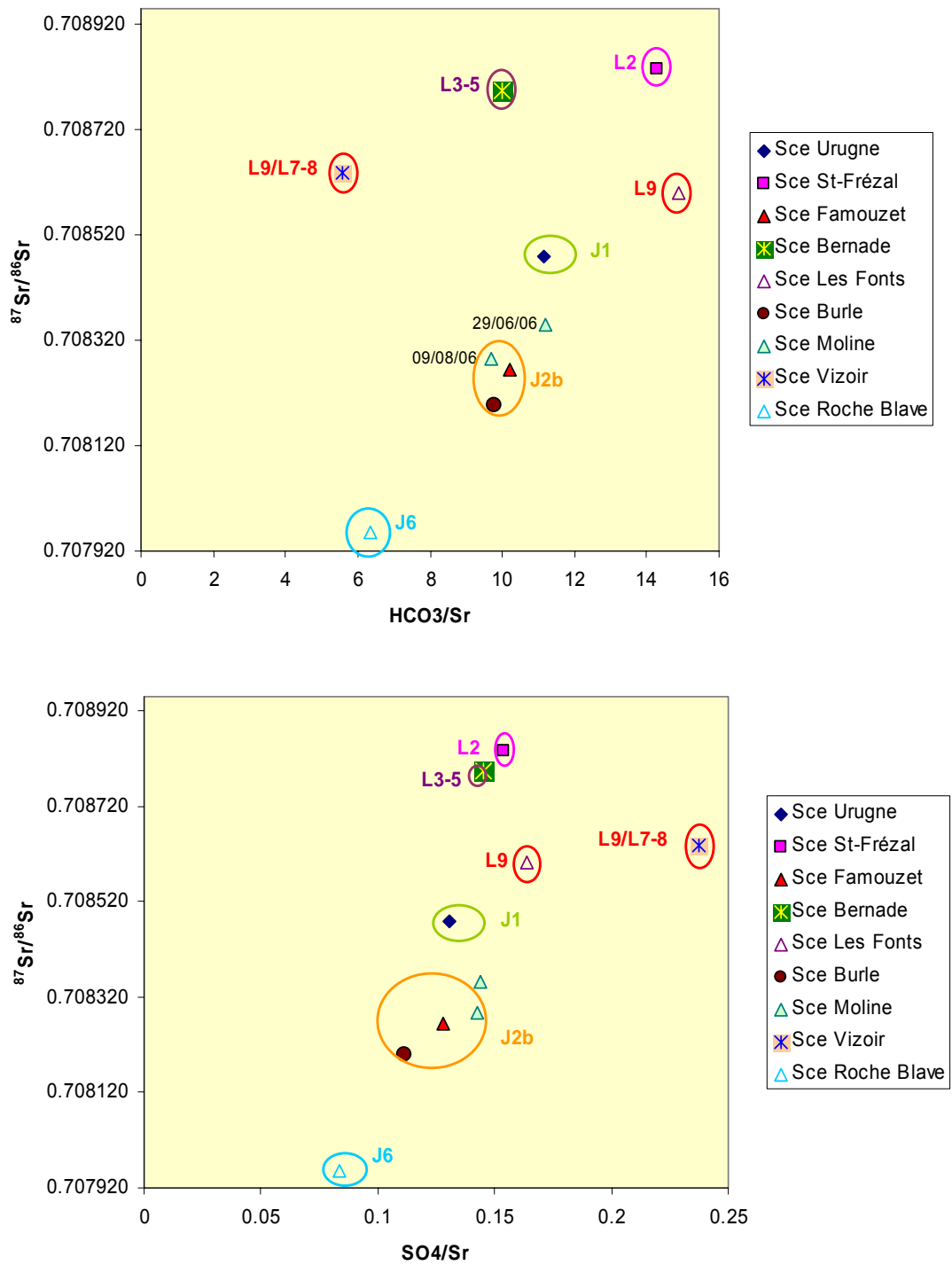


Illustration 72- Rapports isotopiques du strontium des eaux en fonction des rapports chimiques HCO_3^-/Sr et SO_4/Sr

L'eau des sources de Burle, Moline et Famounet présentent des rapports isotopiques comparables aux valeurs rencontrées dans les sources des Fontailles et Cent Fonts (systèmes karstiques nord-montpelliérains, Ladouche et al., 1999). La zone noyée de ces sources est développée dans les dolomies du Bathonien (J2b), les teneurs en magnésium sont comprises entre 10 et 15 mg/l.

La signature isotopique en strontium de l'eau de la source d'Urugne est caractéristique de la formation du Bajocien (J1) dans laquelle les dolomies sont également reportées (J1b). Les teneurs en magnésium de la zone noyée de cette source sont de l'ordre de 14 mg/l.

La signature isotopique en strontium de l'eau de la source des Fonts est caractéristique de la formation de l'Aalénien dans laquelle des calcarénites plus ou moins dolomitiques sont rencontrées. Les teneurs en magnésium de la zone noyée de cette source sont de l'ordre de 9.5 mg/l.

L'eau de la source de Vizoir présente un rapport isotopique en strontium proche de celui de la source des Fonts, mais est caractérisée par des teneurs élevées en strontium et sulfate. La zone noyée de cette source est développée dans l'Aalénien, mais les eaux subissent des interactions chimiques avec les formations imperméables du Toarcien (L7-8) sous jacentes. Les teneurs en magnésium de la zone noyée sont importantes de l'ordre de 17 mg/l en période de basses eaux.

La signature isotopique en strontium de l'eau de la source Bernade est caractéristique de la formation du Sinémurien-Carixien (L3-5) dans laquelle les dolomies ne sont pas exprimées. Les teneurs en magnésium de la zone noyée demeurent modestes de l'ordre de 7 mg/l. La zone noyée de cet aquifère est vraisemblablement captive, cette hypothèse a été corroborée à l'aide des techniques de traitement du signal piézométrique (cf § 5.3.2.).

La signature isotopique en strontium de l'eau de la source de St-Frézal est caractéristique de la formation de l'Hettangien (L2) dans laquelle les dolomies sont exprimées. Les teneurs en magnésium de la zone noyée sont comprises entre 10 et de 14 mg/l.

Nous présentons dans le Tableau 30, la nature des formations géologiques au sein desquelles se développent les zones noyées des systèmes aquifères étudiés par l'approche isotopique du strontium.

Nom	Localisation de la zone noyée des aquifères déduit par les isotopes du Strontium
Sce Famouzet	Bathonien Supérieur J2b
Sce Burle	Bathonien Supérieur J2b
Sce Moline	Bathonien Supérieur J2b
Sce Roche Blave	Oxfordien supérieur J6
Sce Urugne	Bajocien sup/inf J1b/J1a
Sce Bernade	Sinémurien-Carixien L3-5
Sce Les Fonts	Aalénien L9
Sce St-Frézal	Héttangien L2
Sce Vizoir	Aalénien et contact avec le Toarcien L9/L7-8

Tableau 30 - Contexte géologique des zones noyées des sources déduit à partir des informations isotopiques du Strontium.

5.8.7. Comparaison avec hydrochimie des sources du Causse de Sauveterre – secteur Ouest

Tout comme les sources étudiées sur la partie ouest du Causse de Sauveterre, les sources du secteur Est sont caractérisées par un faciès bicarbonaté calcique. Le faciès mixte calcique et magnésien caractéristique du milieu dolomitique est moins marqué pour les sources de la partie Est que celles de la partie Ouest.

Concernant les concentrations en nitrate, les sources de la partie Est du Causse de Sauveterre sont caractérisées par des teneurs globalement inférieures à celles de la partie Ouest. Seule la source Angle a une teneur ponctuelle supérieure à 20 mg/l.

6. Conclusions et perspectives

6.1. CONCLUSIONS

Du point de vue hydrogéologique et caractérisation du degré de karstification, l'étude des sources de catégorie I permet de mettre en évidence que de manière générale, les systèmes ne sont pas caractérisés par des développements karstiques importants. Seules deux sources, à savoir la source de Burle (côté Tarn) et la source d'Urugne (côté Lot) sont des sources de systèmes karstiques bien karstifiés. En dehors de la source de Bernade, caractéristique d'une source de milieu fissuré (et captif) et la source Famounet caractérisée par un degré de karstification limité, les autres sources sont caractérisées par des inerties importantes, traduisant d'une part des zones d'infiltration importante et hétérogène (quelques 400 mètres pour les sources côté Tarn) et d'autre part une karstification modérée de la zone noyée. Le contexte lithologique des zones noyées, avec la présence de marno-calcaires et de calcaires en bancs de petites dimensions, n'étant pas favorable au développement de larges conduits en profondeur, sous le niveau de base.

Les volumes dynamiques, estimation par défaut des réserves, estimés à partir de l'analyse des courbes de récession, sont faibles à moyens pour les sources de Famounet (3.78 Mm³), Urugne (2.16 Mm³), Les Fonts (1.12 Mm³), Angle (1.73 Mm³), Bernade (0.65 Mm³). Concernant Burle et St-Frézal, ces deux systèmes sont caractérisés par des réserves importantes : 5.62 Mm³, respectivement plus de 10Mm³ pour St-Frézal. Ces volumes de réserves sont à mettre en relation avec les valeurs des volumes interannuels qui logiquement sont les plus élevés pour la source de Burle (13 Mm³) et la source de St-Frézal (8 Mm³). Les volumes pour les autres sources sont inférieurs à 4 Mm³, voire proche de 1Mm³ pour les sources de Famounet et de Bernade.

L'étude hydrologique des sources de catégorie I a permis de calculer des superficies de bassin d'alimentation, et d'en déduire pour des conditions de pluies efficaces moyennes annuelles similaires les superficies des bassins d'alimentation des sources de catégorie II et III. La superficie totale du Causse de Sauveterre, partie Est, est estimée à 456 km² ; considérant la superficie totale calculée pour les principales sources de catégorie I, soit 110 km² ± 20km² et la superficie des sources de catégories II et III, soit 50km² ± 50 km² (grande incertitude sur l'estimation du débit moyen annuel de ces sources), ce ne sont que 210 km² de superficie du Causse de Sauveterre qui seraient déduites du bilan hydrologique des sources. A noter que quelques 50 km² de la partie ouest, appartiennent au bassin d'alimentation des sources de Beldoire-Fontmaure. Au vu des incertitudes du calcul du bilan hydrologique des sources de catégorie II et III, ce seraient quelques 200 km² qui participeraient à des écoulements alimentant le Lot et plus particulièrement le Tarn, directement au niveau du cours d'eau.

S'il l'on considère les superficies des bassins d'alimentation délimitées à partir des essais de traçage et des éléments de tectonique, c'est une superficie totale de quelques 215 km², sans considérer les 50km² participant au bassin d'alimentation des sources Fontmaure-Beldoire.

Les deux approches sont consistantes ; une certaine incertitude sur la délimitation des bassins d'alimentation réside, tout comme celle concernant le débit moyen annuel des nombreuses sources bordant le Causse au niveau du Lot et du Tarn.

Du point de vue de la qualité de l'eau des différentes sources, mis à part les analyses microbiologiques qui traduisent la vulnérabilité des sources vis-à-vis des pollutions d'origine anthropique (agricoles et par assainissement individuel), les eaux des sources sont de bonne qualité.

Les analyses hydrochimiques ont permis d'apporter de manière limitée des informations concernant le fonctionnement et la structure des systèmes karstiques étudiés, pour des problèmes d'échantillonnage et de manque de précision de certaines analyses.

Côté Tarn, les sources de Famounet, Molines, Roche Blave, Clujade et Angle présentent des comportements similaires en périodes de hautes eaux à celui observé à Burle. Les interactions des eaux d'infiltration avec des niveaux argileux (marno-calcaire du Callovo-Oxfordien) se traduisent par une augmentation des teneurs en sodium, mais néanmoins de faible ampleur. Les informations disponibles en période de hautes eaux ne permettent cependant pas de qualifier la dynamique de transfert des eaux entre la zone épikarstique, la zone d'infiltration et la zone noyée. L'évolution des teneurs en magnésium lors des périodes de récession (tendance à l'augmentation) traduit un temps d'interaction plus ou moins important des eaux avec les minéraux magnésiens; elle ne permet pas cependant d'expliquer la dynamique de l'infiltration dans la zone non saturée par rapport à des échanges ioniques au sein de la zone noyée.

Côté Lot, les évolutions géochimiques des eaux échantillonnées à la source Bernade confirment le caractère peu karstique ou de type milieu fissuré, mis en évidence par les analyses hydrologiques. Concernant les autres sources côté Lot ayant fait l'objet d'un suivi géochimique bimestriel, elles présentent des teneurs moyennes en magnésium globalement élevées (7.2 mg/l à 17.2 mg/l) avec peu de variations temporelles, traduisant un temps d'interaction plus ou moins important des eaux avec les minéraux magnésiens. Ces teneurs moyennes en magnésium sont confirmées par des indices de saturation (IS Dol) plus élevées que pour les sources côté Tarn.

L'évolution des pCO₂ en fonction des indices de saturation vis-à-vis de la calcite indique que les écoulements des eaux de la plupart des systèmes karstiques se font en partie à surface libre.

Les analyses isotopiques de l'eau (Tritium et Oxygène 18) ont permis de confirmer l'altitude moyenne de recharge, située entre 950 et 1100m, altitudes compatibles avec les altitudes rencontrées sur le Causse de Sauveterre. Les valeurs de Tritium

confirment que les eaux s'écoulant au niveau des sources, résultent d'eaux infiltrées récemment (pluies actuelles). Aucune composante profonde d'eaux anciennes ne participe aux écoulements des sources analysées.

Les analyses isotopiques du strontium ont permis de confirmer le contexte géologique des zones noyées des principales sources.

6.2. PERSPECTIVES

Sur la base des bilans hydrologiques et des résultats des essais de traçage, les bassins d'alimentation des principales sources de catégorie I et groupes de sources de catégorie II et III seront proposés dans le cadre du Lot N°5 (synthèse).

Un suivi hydrochimique détaillé à l'échelle de crues couplé à un suivi en continu de la conductivité pour les sources les plus importantes en terme de volumes dynamiques ou de degré de karstification, à savoir Burle, Urugne et St-Frézal, permettrait d'obtenir des informations complémentaires sur la dynamique de transfert entre zone d'infiltration, importance de l'épikarst et la zone noyée. Ces informations pourraient être utiles en termes de caractérisation additionnelle vis-à-vis de la vulnérabilité des systèmes karstiques.

7. Bibliographie

Box G.E.P. & Jenkins G.M., (1976) : Time series analysis, forecasting and control. Ed. Holden Day, San Fransisco, 575 p.

Castany G. & Margat J., (1977) : Dictionnaire français d'hydrogéologie, BRGM Service géologique national, Orléans, 249 p.

Charcosset P., (1998) : « Reconstitution d'un segment de la marge Ouest-Téthysienne au Bathonien dans les Grands Causses et le Bas-Languedoc –Analyse séquentielle à divers ordres et dynamiques du Bassin-, Editions Strata.

Dörfliger N., Le Strat P., Garden M., avec la collaboration de Blaise M., Izac J-L. et Desprats J-F., (2006) : Géologie, Tectonique et Géomorphologie du Causse de Sauveterre et de ses avant-causses (secteur Est). Rapport du Lot N°1 de l'Etude hydrogéologique du Causse de Sauveterre et de ses avant-causses (secteur Est), BRGM/RP-54967-FR, 167pp., 46 ill., 8 tabl., 9 ann.

Grasso D.A. (1998) : Interprétation des réponses hydrauliques et chimiques des sources karstiques, Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel.

Jenkins G.M. & Watts D.G., (1968) : Spectral analysis and its applications. Holden Days, San Fransisco.

Ladouche B., Dörfliger N., avec la collaboration de Izac J-L., Cubizolles J., Le Strat P., du Couëdic C., Aunay B., Thomson P. (2004) : Synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des Corbières Orientales - Rapport final de la phase I du projet « Evaluation des ressources en eau des Corbières », Volume 2 – Caractérisation géologique et hydrogéologique du système karstique du « synclinal du Bas-Agly », 166 pages, 84 figures, 12 tableaux, 5 annexes.

Ladouche B., Dörfliger N., Pouget R., Petit V., Thiery D., Golaz C. (2002) : Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains. Rapport du programme 1999-2001-Buèges. BRGM/RP-51584-FR, 200 p., 111 fig., 9 tabl., 3 photos, 4 ann.

Ladouche B., Maréchal J-C., Dörfliger N., Lachassagne P., Lanini S., Le Strat P., (2005) : Pompage d'essais sur le système karstique des Cent Fonts (Cne de Causse de la Selle, Hérault). Présentation et interprétation des données recueillies, RP-54426-FR, 82 ill., 45 tabl., 9 ann., 245 pp..

Ladouche B., Aquilina L., Dörfliger N., (2007) : Chemical and isotopic investigation of rain water in southern France (1996-2002) : implication for karstic input signal, article soumis.

Mangin A., (1971) : Etude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique. Annales de spéléologie, 28(1), 21-40.

Mangin A., (1975) : Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse, Institut des Sciences de la Terre de l'Université de Dijon.

Mangin A., (1981) : Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série III, 293, 401-404.

Mangin A., (1982) : L'approche systémique du karst, conséquences conceptuelles et méthodologiques. Proc. Réunion Monographica sobre el karst, Larra, 141-157.

Mangin A., (1984) : Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. Journal of Hydrology, 67, 25-43.

Marsaud B., (1996) : Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux, Ph D Thesis, Orsay-Paris XI, BRGM, Orléans, 301p.

Padilla A. & Pulido-Bosch A., (1995) : Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. Journal of Hydrology, 168, 73-89.

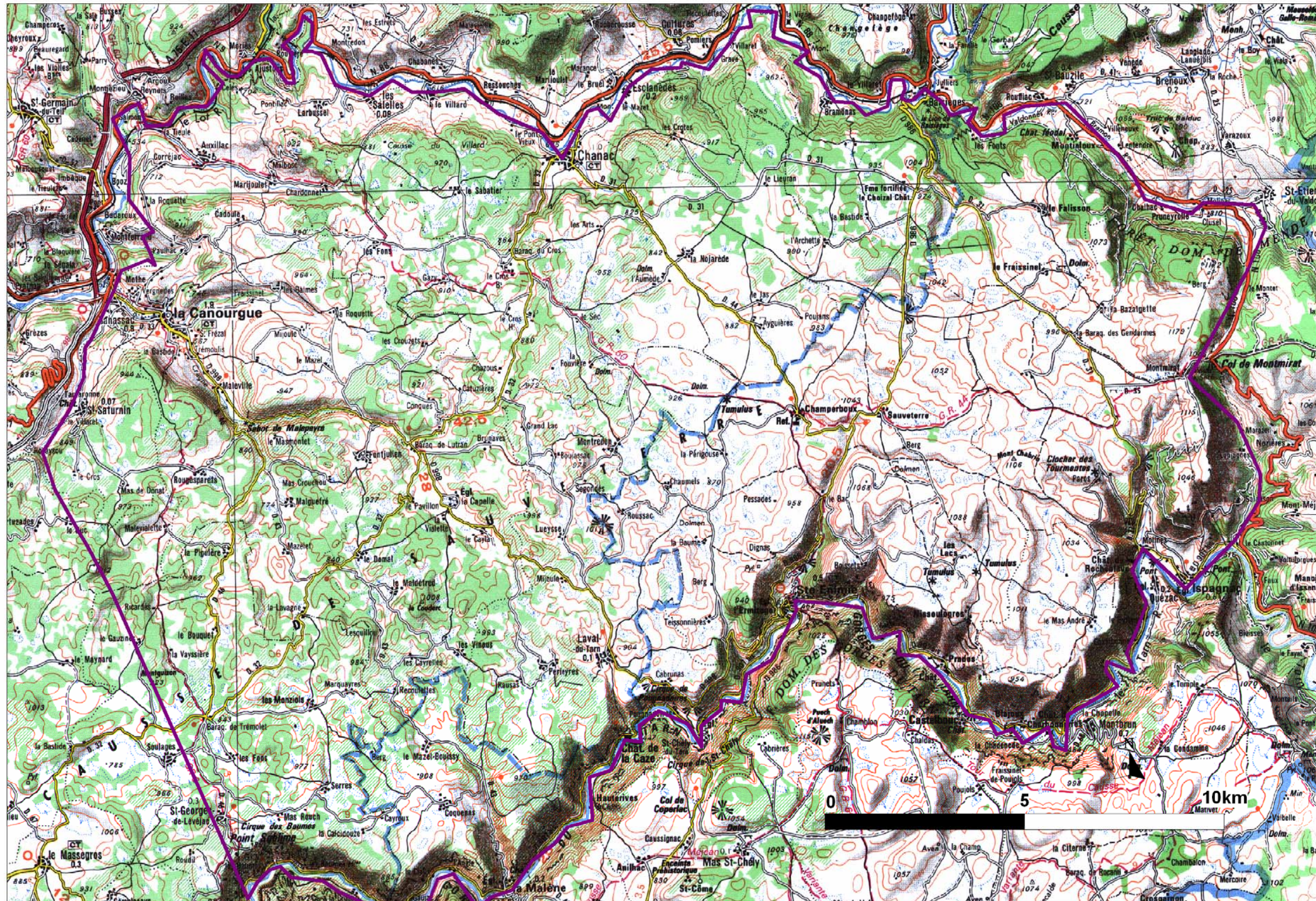
Pinault J.L., (2001) : Manuel d'utilisateur de TEMPO : logiciel de traitement et de modélisation des séries temporelles en hydrogéologie et en hydrogéochimie. Projet Modhydro. Rap. BRGM/RP-51459-FR. 221 p.

Plagnes V., (1997) : Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie des eaux, Thèse, Univ. Montpellier.

Rapport final et annexes de l'étude hydrogéologique du Causse de Sauveterre et de ses avants-causses, partie ouest, Parc Naturel Régional des Grands Causses, mars 2006.

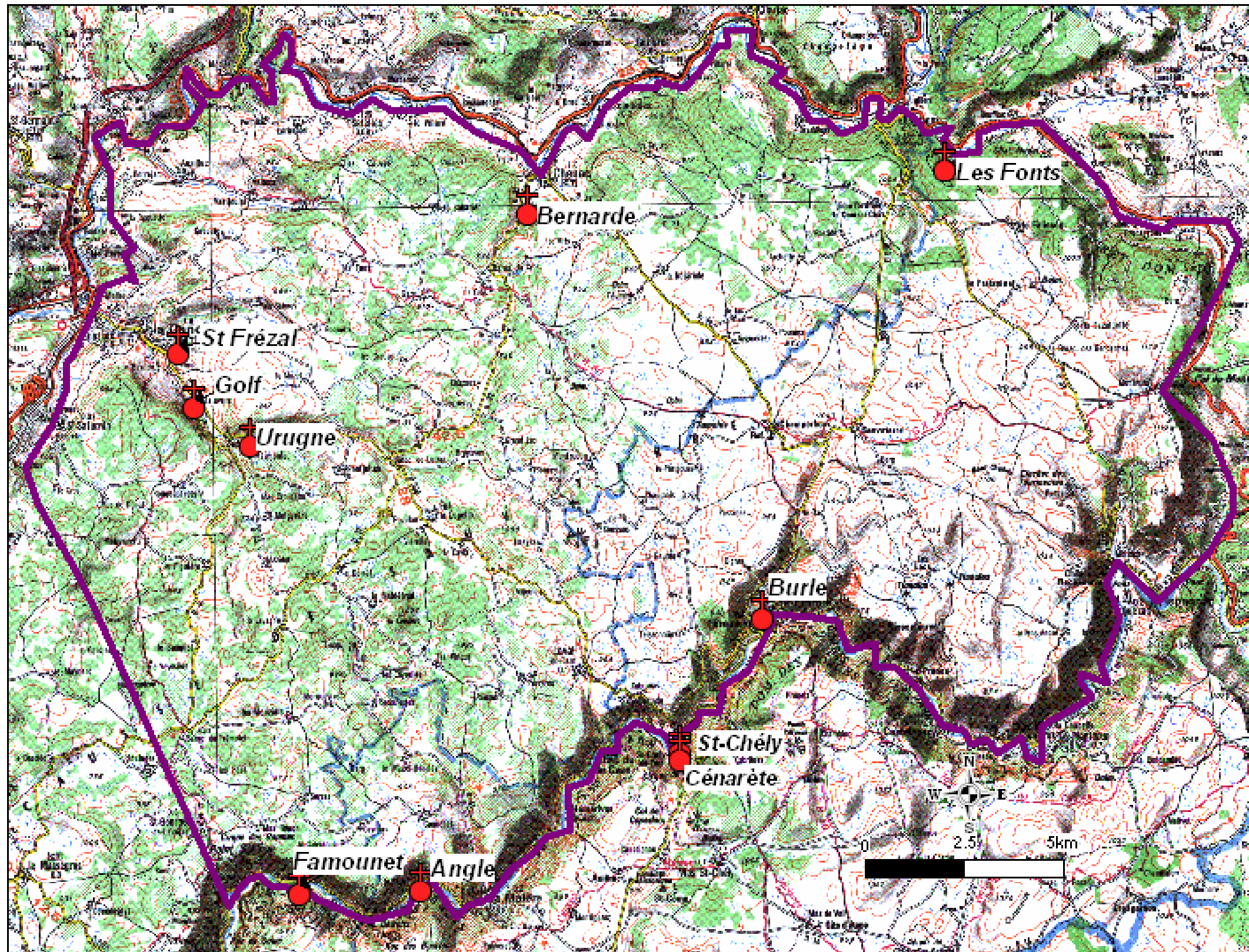
Annexe 1

Zone d'étude



Annexe 2

Localisation des sources de catégorie I et planches photographiques



Carte de localisation des sources de catégorie I

1. Source de Burle



Illustration 1 – Déversement des eaux de la source issue de la vasque dans le canal.



Illustration 2 – Ecoulement dans le canal et station de mesure.

2. Angle



Illustration 3 – Ouvrage de la source d'Angle



Illustration 4 – station de mesure d'Angle.

3. Famounet



Illustration 5 – Aménagement du site.



Illustration 6 – Source instrumentée.



Illustration 7 – Distance de la source au Tarn.

4.Saint-Chély du Tarn



Illustration 8 – Canal de Saint-Chély du Tarn.



Illustration 9 - Ecoulement dans le Tarn.

5. Cénarète



Illustration 10 – Source de Cénarète.



Illustration 11 – Canal de Cénarète et station de mesure.

6. Les Fonts



Illustration 12 – Source des Fonts.



Illustration 13 - Canaux gauche et droit, dispositifs de mesure.

7. Bernade



Illustration 14 – Ecoulements souterrains.



Illustration 15 – Station de mesure.

8. Saint Frézal



Illustration 16 – Saint Frézal (avant séparation de l'écoulement).



Illustration 17 – Saint Frézal haut.



Illustration 18 – Saint Frézal bas.

9. Golf



Illustration 19 – Source de Golf.



Illustration 20 – Ecoulement vers le canal.



Illustration 21 – Source de Golf.



Illustration 22 – Canal et instrument de mesure.

10. Urugne



Illustration 23 – Seuil et station de mesure.

Annexe 3

Données hydrologiques des sources de catégorie I

1- Burle

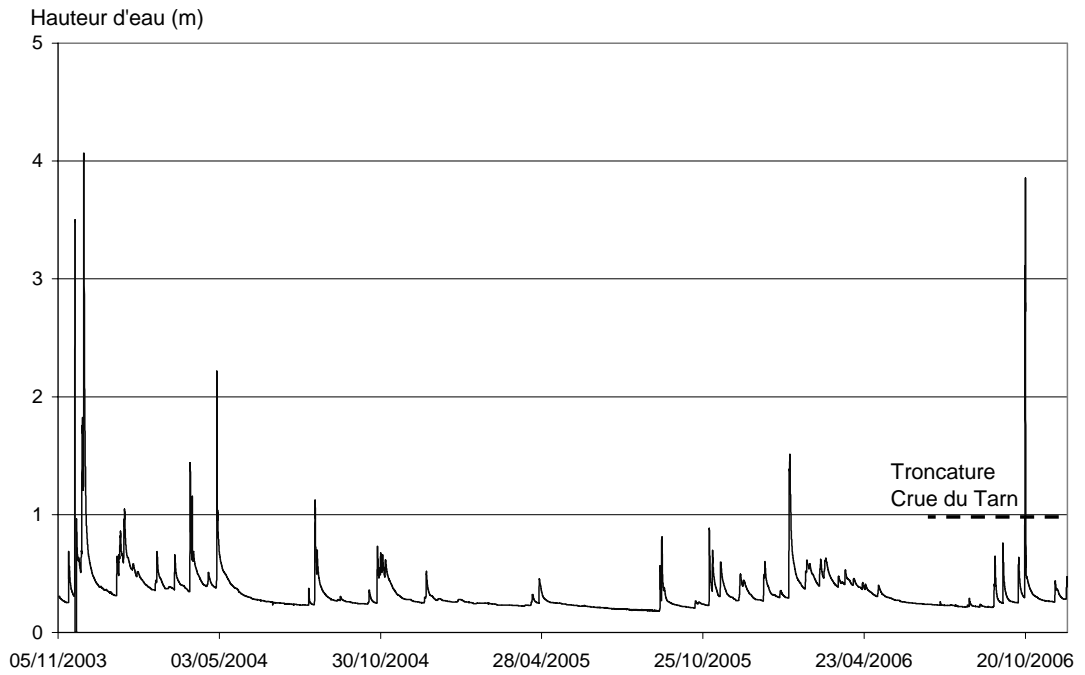


Illustration 1 - Hauteur d'eau mesurée dans le canal de Burle (données au pas de temps horaire).

2- Angle

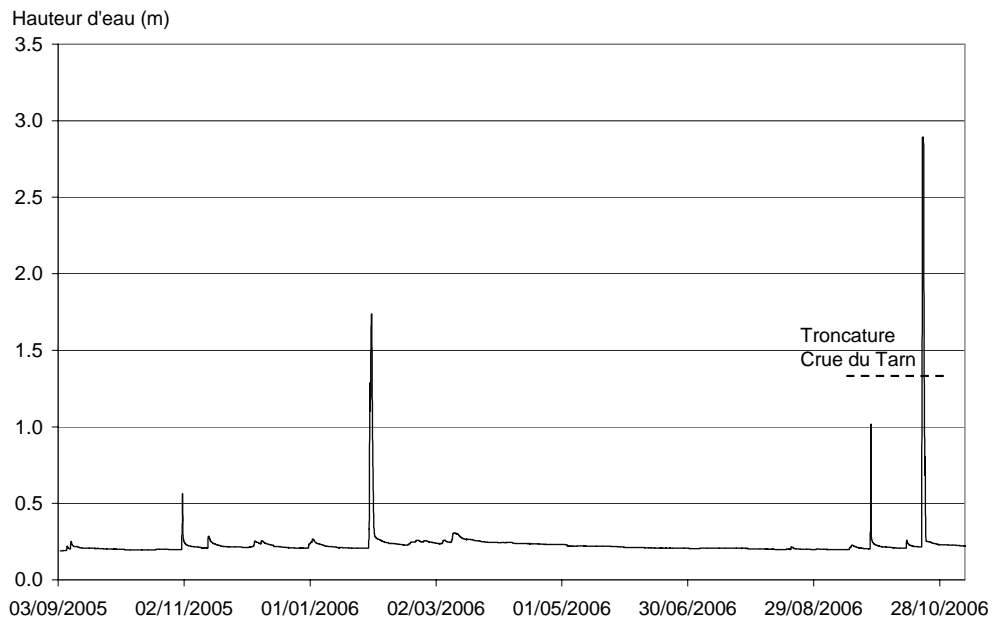


Illustration 2 - Hauteur d'eau mesurée à la source d'Angle (données au pas de temps horaire).

3- Famounet

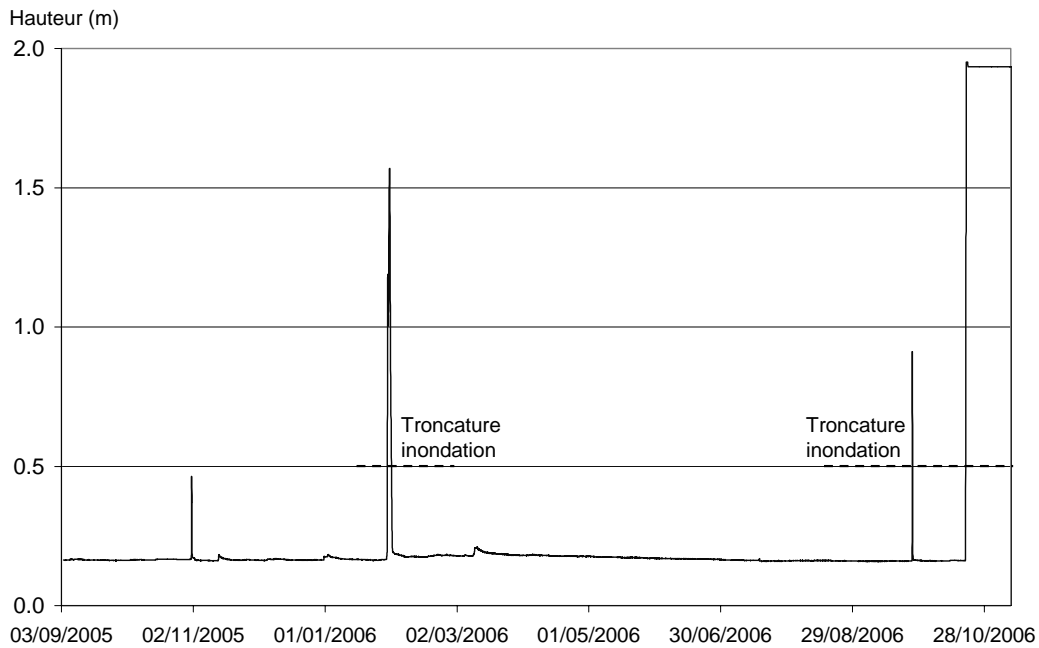


Illustration 3 - Hauteur d'eau mesurée à la source de Famounet (données au pas de temps horaire).

4- Saint-Chély du Tarn

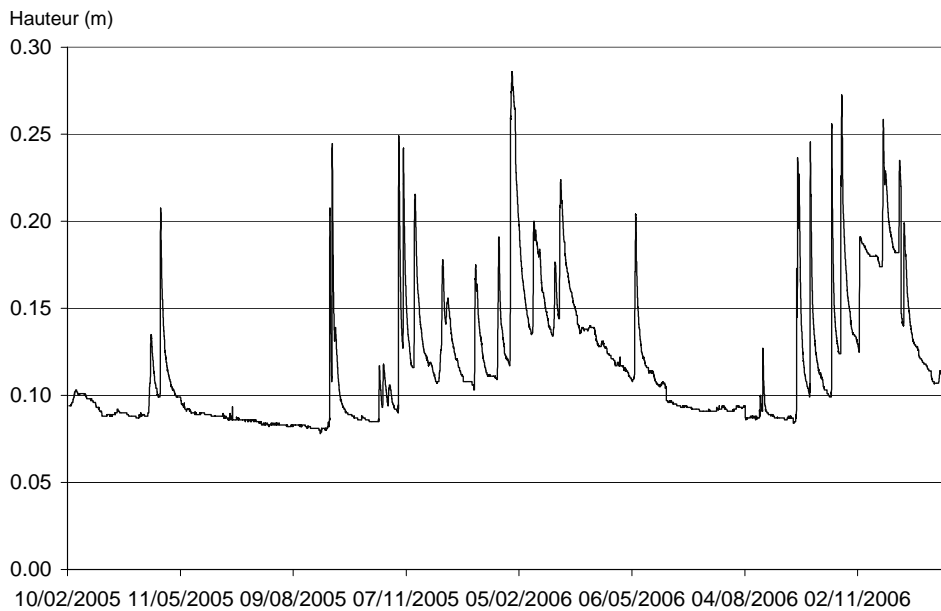


Illustration 4 - Hauteur d'eau mesurée à la source de Saint-Chély du Tarn (données au pas de temps horaire).

5- Cénarète

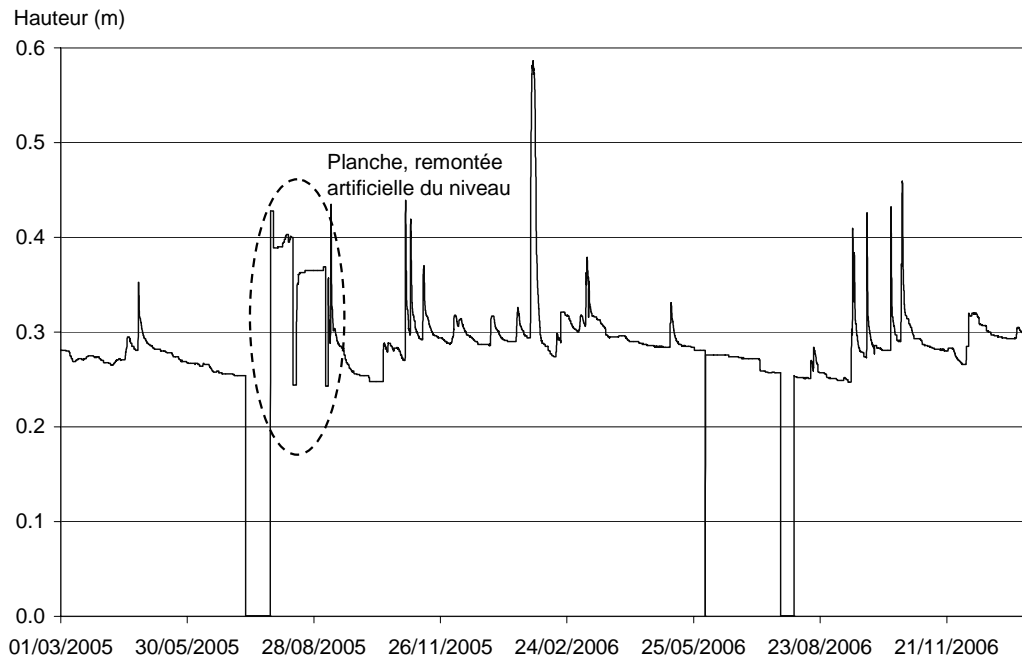


Illustration 5 - Hauteur d'eau mesurée à la source de Cénarète (données au pas de temps horaire).

6- Les Fonts

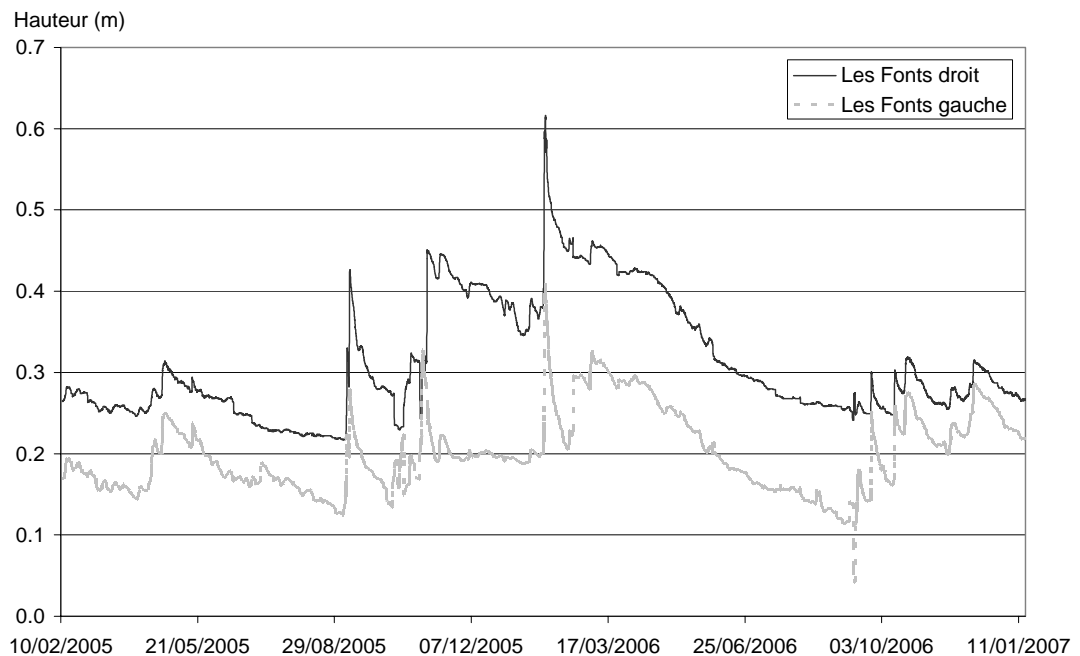


Illustration 6 - Hauteur d'eau mesurée dans les canaux de Fonts (données au pas de temps horaire).

7- Bernade

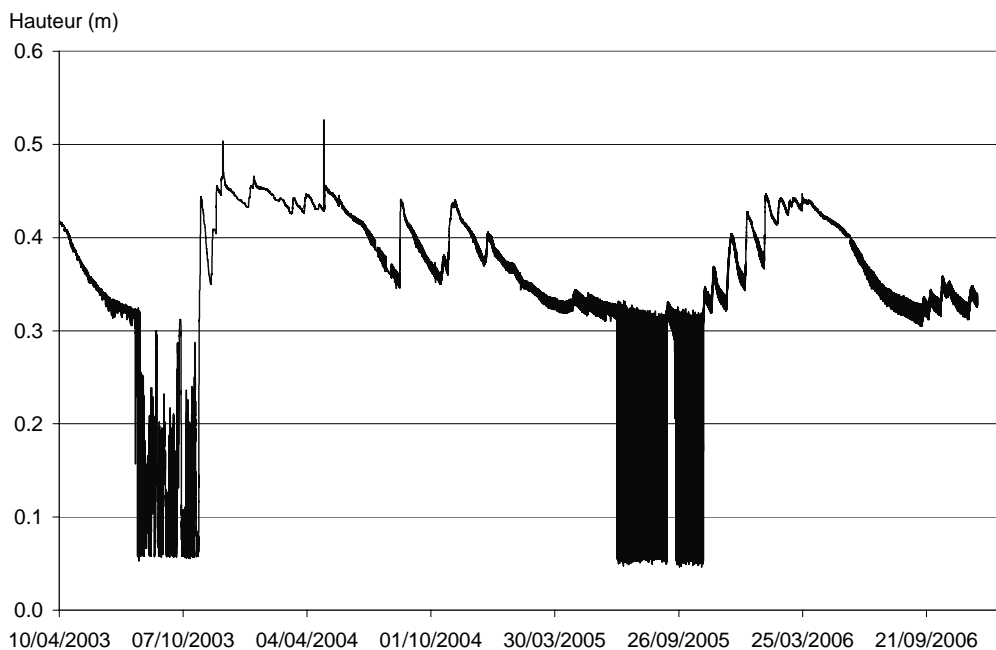


Illustration 7 - Hauteur d'eau mesurée à la source de Bernade (données au pas de temps horaire).

8- Saint Frézal

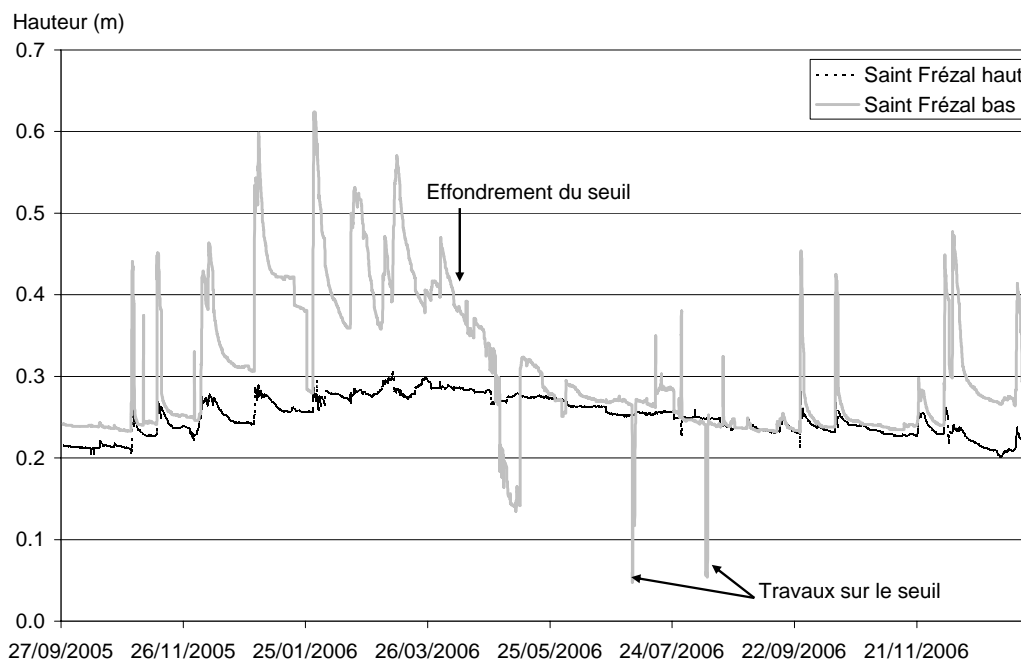


Illustration 8 - Hauteur d'eau mesurée dans les canaux de Saint-Frézal haut et bas (données au pas de temps horaire).

9- Golf

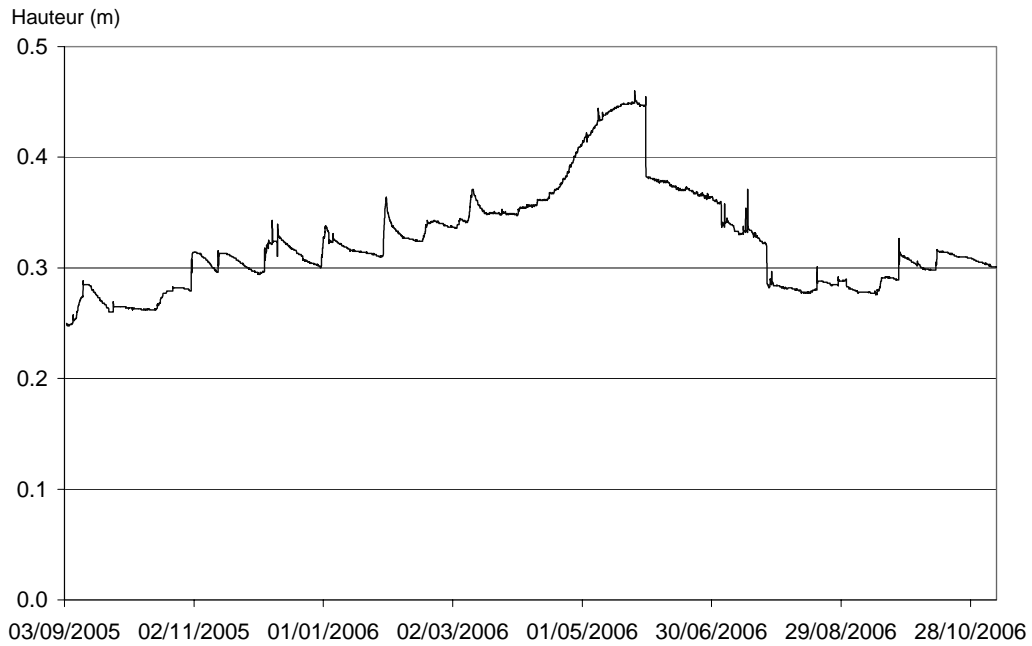


Illustration 9 - Hauteur d'eau mesurée dans le canal de Burlle (données au pas de temps horaire).

10- Urugne

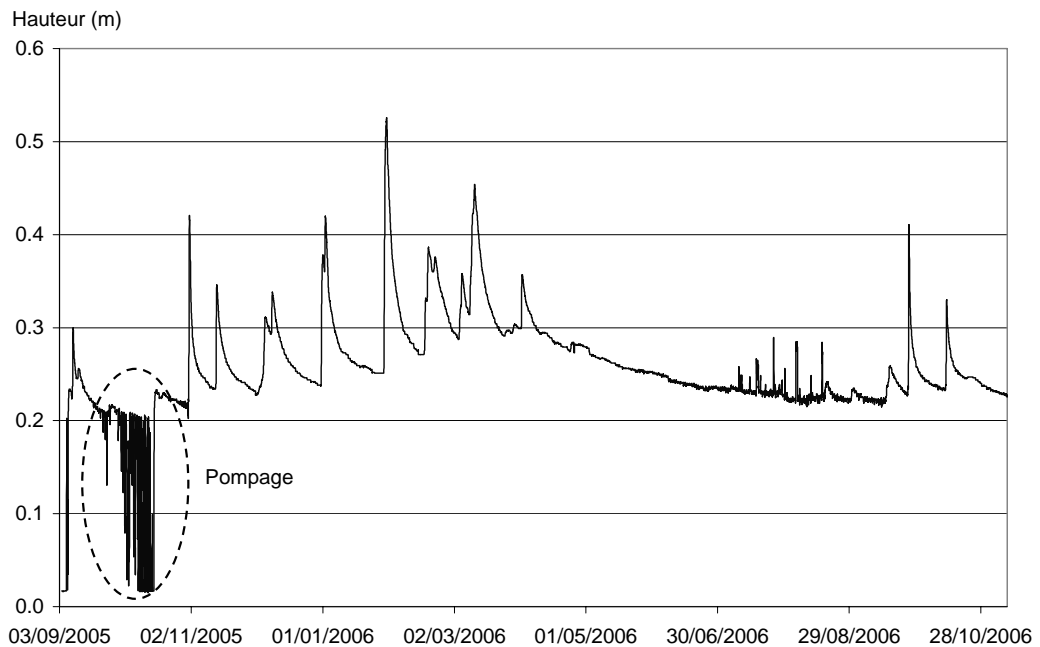


Illustration 10 - Hauteur d'eau mesurée à Urugne (données au pas de temps horaire).

Annexe 4

Planches photographiques des sources de catégories II et III

SOURCES ALIMENTANT LE TARN					MESURES À L'ÉTIAGE - Septembre 2005 / Août 2006							MESURES MOYENNES EAUX - Février 2006					
NOM	CAT	COMMUNE	CAUSSE	X - L.II étendu	Y - L.II étendu	Date	Type de mesures	Débit (en l/s)	Conductivité (en µS/cm)	pH	Température (en °c)	Date	Type de mesures	Débit (en l/s)	Conductivité (en µS/cm)	pH	Température
Fontamal	3	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	696 632	1 933 847	30/08/2005	Estimation	0.06	342	7.8	10.4						
Salanson-inf.	3	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	696 894	1 932 372	31/08/2006	Estimation	0.02	289	7.5	12.5						
Salanson-sup.	3	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	696 833	1 932 756	30/08/2005	Seau	0.001	324	8.0	12.1						
Vizoir (Le) ou Source de la Fontaine	2	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	696 002	1 932 085	30/08/2005	Estimation	1.00	409	7.7	12.1	07/02/2006	Vélocimètre	23.20	371	7.3	10.9
Espinards	3	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	696 145	1 932 285	30/08/2005	Seau	0.08	373	8.4	14.7						
Molines (Source de) ou du Vigos	2	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	694 391	1 931 564	30/08/2005	Seau	25.96	310	8	11.1	07/02/2006	Vélocimètre	155.00	327	7.2	10.7
												07/02/2006	Vélocimètre	30.00	Trop plein1		
Réjal	3	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	694 952	1 931 549	30/08/2005	x	-	x	x	x						
Vieux Moulin (Le)	2	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	694 772	1 931 264	30/08/2005	Estimation	2.30	627	7.5	13.2	07/02/2006	Vélocimètre	118.00	314	7.0	10.7
Oulette ou Gorgue du pré Morjal	3	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	695 144	1 931 139	30/08/2005	x	-	x	x	x						
Beldou	2	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	694 942	1 930 923	30/08/2005	Estimation	4.50	390	7.6	12.1	Non estimable : source noyée dans le Tarn					
Fountchardese	3	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	693 705	1 932 789	30/08/2005	x	-	x	x	x						
Pontet 2	3	Quézac	Méjean - Tarn	694 708	1 929 437	30/08/2005	x	-	x	x	x						
Pontet	2	Quézac	Méjean - Tarn	694 904	1 929 012	30/08/2005	Estimation	1.50	355	8.3	11.8	07/02/2006	Vélocimètre	70.00	349	7.7	10.2
Diva	3	Quézac	Sauveterre - Tarn	694 737	1 931 048	31/08/2006	Estimation	g à g	1 635	6.7	16.3						
Rocheblave ou Fount de Bon Tarn	2	Ispagnac	Sauveterre - Tarn	694 352	1 930 913	30/08/2005	Estimation	1.14	281	8.1	11.7	07/02/2006	Vélocimètre	37.50	304	7.1	10.9
Del Ron	3	Quézac	Sauveterre - Tarn	690 801	1 926 969	31/08/2005	x	-	x	x	x						
Castelbouc 1	2	Sainte-Énimie	Méjean - Tarn	690 303	1 927 007	31/08/2005	x	-	x	x	x	07/02/2006	Estimation	1 650.00	292	7.4	10.1
Castelbouc 2	2	Sainte-Énimie	Méjean - Tarn	690 195	1 927 075	31/08/2005	x	-	x	x	x	07/02/2006	Vélocimètre	715.00	304	7.4	10.1
Castelbouc 3	2	Sainte-Énimie	Méjean - Tarn	690 081	1 927 107	31/08/2005	x	-	x	x	x	07/02/2006	Vélocimètre	9.00	302	7.4	9.8
Castelbouc 4	2	Sainte-Énimie	Méjean - Tarn	689 955	1 927 137	31/08/2005	x	-	x	x	x	07/02/2006	Vélocimètre	29.00	320	7.6	9.3
Estivants	2	Sainte-Énimie	Méjean - Tarn	690 606	1 926 957	31/08/2005	Vélocimètre	57.00	301	8.1	11.1	07/02/2006	Vélocimètre	238.00	303	7.3	10.2
Charbonnières n°1 (ou Fontaine de la Crotte)	3	Montbrun	Méjean - Tarn	691 983	1 926 407	31/08/2006	Estimation	0.10	292	7.9	10.5						
Pont de Montbrun	3	Montbrun	Méjean - Tarn	693 274	1 926 593	31/08/2005	x	-	x	x	x						
Fouont	3	Montbrun	Méjean - Tarn	693 263	1 926 367	31/08/2005	x	-	x	x	x						
Pré de Ribes	3	Montbrun	Méjean - Tarn	693 783	1 927 635	31/08/2005	x	-	x	x	x						
Moulin-de-Pelatan	2	Montbrun	Méjean - Tarn	693 934	1 927 840	31/08/2005	Vélocimètre	13.50	305	8.1	12.0	08/02/2006	Vélocimètre	124.00	321	7.3	10.6
Bissoudo	3	Montbrun	Méjean - Tarn	692 833	1 927 009	31/08/2005	x	-	x	x	x						
Prades	3	Sainte-Énimie	Sauveterre - Tarn	689 479	1 928 278	31/08/2005	x	-	x	x	x						
Piboulède ou de la Rabinelle	2	Prades	Sauveterre - Tarn	688 277	1 929 328	31/08/2005	x	-	x	x	x	08/02/2006	Vélocimètre	147.00	324	7.2	10.8
Jargile ou Faubio ou Piboulède	2	Sainte-Énimie	Méjean - Tarn	688 278	1 929 097	31/08/2006	Estimation	7.30	305	7.3	11.5	08/02/2006	Vélocimètre	82.00	340	7.5	10.3
Coussac	2	Sainte-Énimie	Sauveterre - Tarn	685 625	1 929 932	04/09/2005	Vélocimètre	120.00	369	7.7	12.3	06/02/2006	Vélocimètre	581.00	383	7.0	10.8
Pougnadoires	2	Sainte-Énimie	Sauveterre - Tarn	682 849	1 927 152	04/09/2005	Estimation	1.60	375	8.0	11.1	08/02/2006	Vélocimètre	114.00	382	6.9	10.3
Barque (La) ou Fontchaude	2	Sainte-Énimie	Méjean - Tarn	683 009	1 926 862	04/09/2005	Estimation	3.50	360	7.6	12.9	08/02/2006	Vélocimètre	21.60	353	7.1	12.6
Château de la Caze	2	Laval-du-Tarn	Sauveterre - Tarn	681 573	1 926 601	04/09/2005	Estimation	0.55	408	8.1	11.9	08/02/2006	Vélocimètre	149.00	401	6.9	10.6
Tieure (La) ou Tibre (du)	3	Sainte-Énimie	Sauveterre - Tarn	680 798	1 925 850	04/09/2005	x	-	x	x	x						
Fontaine (La) ou Clujade	2	Sainte-Énimie	Sauveterre - Tarn	680 673	1 925 209	04/09/2005	Estimation	4.00	376	7.7	12.5	08/02/2006	Vélocimètre	46.00	378	6.9	12.0
Moulin	2	La Malène	Sauveterre - Tarn	678 973	1 923 021	04/09/2005	Estimation	0.70	340	7.7	17.6	08/02/2006	Estimation	8.00	x	x	x
Pont de la Malène	2	La Malène	Méjean - Tarn	678 623	1 922 596	05/09/2005	Estimation	7.50	362	7.6	11.2	08/02/2006	Estimation	24.00	x	x	x
Galène (La)	3	La Malène	Méjean - Tarn	678 653	1 922 636	05/09/2005	x	-	x	x	x						
Ardennes	2	La Malène	Méjean - Tarn	679 173	1 923 046	05/09/2005	Vélocimètre	176	322	7.7	12.2	08/02/2006	Estimation	1 150.00	318	7.0	10.7
												08/02/2006	Estimation	21.00	Trop plein1		
												08/02/2006	Estimation	17.00	Trop plein2		
												08/02/2006	Vélocimètre	1 047.00	Trop plein3		
Baumes-Basses	3	Saint-Georges de Lévejac	Sauveterre - Tarn	673 393	1 923 218	05/09/2005	x	-	x	x	x						
Débarcadère (nom approximatif)	2	Saint-Georges de Lévejac	Sauveterre - Tarn	672 967	1 923 418	05/09/2005	Estimation	5.40	368	7.8	10.7	08/02/2006	Vélocimètre	10.00	387	7.1	10.6
St Hilaire	3	Saint-Georges de Lévejac	Sauveterre - Tarn	672 792	1 923 418	05/09/2005	x	-	x	x	x						

Le symbole "-" indique le tarissement de la source

SOURCES ALIMENTANT LE LOT						MESURES À L'ÉTIAGE - Septembre 2005 / Août 2006						MESURES MOYENNES EAUX - Février 2006					
NOM	CAT	COMMUNE	CAUSSE	CAUSSE	CAUSSE	Date	Type de mesures	Débit (en l/s)	Conductivité (en µS/cm)	pH	Température	Date	Type de mesures	Débit (en l/s)	Conductivité (en µS/cm)	pH	Température
Lycée ou Pas de l'Ane	2	La Canourgue	Sauveterre - Lot	670 243	1 937 029	19/09/2005	Estimation	1.50	499	7.6	12.5	09/02/2006	Estimation	1.83	387	7.1	9.5
St Frézal 2	2	La Canourgue	Sauveterre - Lot	670 858	1 936 814	19/09/2005	Seau	6.00	375	7.7	11.5	09/02/2006	Seau	6.00	409	7.0	10.5
Boulay	3	La Canourgue	Sauveterre - Lot	671 349	1 936 844	19/09/2005	Seau	0.01	464	7.9	15.9						
Source de Débousélade	3	La Canourgue	Sauveterre - Lot			Non trouvée - Source inconnue											
Sabot	2	La Canourgue	Sauveterre - Lot	671 485	1 934 753	19/09/2005	x	-	x	x	x	09/02/2006	Vélocimètre	57.00	439	7.0	10.3
Rouges-Parets	3	La Canourgue	Aquifères superficiels	670 560	1 932 901	19/09/2005	Seau	0.05	454	7.8	9.4						
Fount-Matabiau ou Clau del Bousquet	3	Saint-Saturnin	Sauveterre - Lot	668 087	1 934 851	19/09/2005	Estimation	0.80	412	8.3	12.0						
Caumistre	3	Saint-Saturnin	Sauveterre - Lot	667 882	1 935 321	19/09/2005	x	-	x	x	x						
Source Verdios	2	Saint-Saturnin	Sauveterre - Lot	668 056	1 936 567	19/09/2005	Estimation	0.30	408	8.3	11.2	09/02/2006	Vélocimètre	11.00	403	7.5	8.0
Roque ou Roque-Basse	2	La Canourgue	Sauveterre - Lot	670 487	1 939 146	19/09/2005	Seau	0.30	406	8.0	10.5	09/02/2006	Vélocimètre	16.50	412	7.4	10.0
Roquette (La)	2	La Canourgue	Sauveterre - Lot	669 466	1 940 006	19/09/2005	x	-	x	x	x						
Roque-Haute	2	La Canourgue	Sauveterre - Lot	670 968	1 938 979	31/08/2006	Estimation	0.85	422	7.9	13.3						
Marijoulet ou de la Bartasse	2	La Canourgue	Sauveterre - Lot	672 518	1 940 288	19/09/2005	Seau	2.00	399	7.7	11.1	09/02/2006	Vélocimètre	27.10	416	7.2	10.1
Chardonnet	2	La Canourgue	Sauveterre - Lot	674 284	1 940 189	19/09/2005	Vélocimètre	5.00	402	8.1	11.1	09/02/2006	Vélocimètre	37.00	403	7.4	9.7
Villard	3	Chanac	Sauveterre - Lot	676 600	1 942 372	Mesures impossibles - pompage AEP, puits trop profond											
Salelles	3	Salelles	Sauveterre - Lot	674 422	1 942 467	01/09/2006	Seau	0.50	527	6.9	10.3						
Esclanèdes	3	Esclanèdes	Sauveterre - Lot	681 664	1 942 915	19/09/2005	Seau	0.40	477	7.6	11.8						
Fontaine du Lait (ou Gte Guichard)	2	Barjac	Sauveterre - Lot	683 565	1 943 316	20/09/2005	Vélocimètre	15.00	449	7.6	11.1	09/02/2006	Vélocimètre	67.00	442	7.6	10.3
Villaret	3	Barjac	Sauveterre - Lot	683 915	1 943 377	20/09/2005	Seau	0.06	402	8.1	13.4						
Castel (Fouont del)	2	Balsièges	Sauveterre - Lot	686 718	1 942 643	20/09/2005	Vélocimètre	14.00	391	7.5	10.7						
Bramonas ou Fouont de l'Oume	3	Balsièges	Sauveterre - Lot	686 468	1 942 522	20/09/2005	x	-	x	x	x						
Banet ou Bannet	2	Balsièges	Sauveterre - Lot	688 209	1 942 348	20/09/2005	Estimation	1.05	383	7.7	9.8						
Lion (Ravin du)	3	Balsièges	Sauveterre - Lot	688 820	1 942 269	20/09/2005	Estimation	0.03	495	8.3	9.9						
Chalzac	2	Saint-Etienne du Valdonnez	Sauveterre - Lot	694 826	1 939 731	20/09/2005	Seau	3.50	334	7.8	8.9						
Valoubière	2	Saint-Etienne du Valdonnez	Sauveterre - Lot	694 151	1 939 370	20/09/2005	Vélocimètre	19.00	320	8.3	9.3	09/02/2006	Vélocimètre	53.00	336	7.9	7.2
Delbouc ou Chomeur ou Pruneyrolles	3	Saint-Etienne du Valdonnez	Sauveterre - Lot	695 327	1 939 421	20/09/2005	Seau	0.50	349	7.9	8.8						
Pruneyrolles	3	Saint-Etienne du Valdonnez	Sauveterre - Lot	696 518	1 939 121	20/09/2005	Seau	0.50	344	8.1	9.0						

Le symbole "x" indique le tarissement de la source

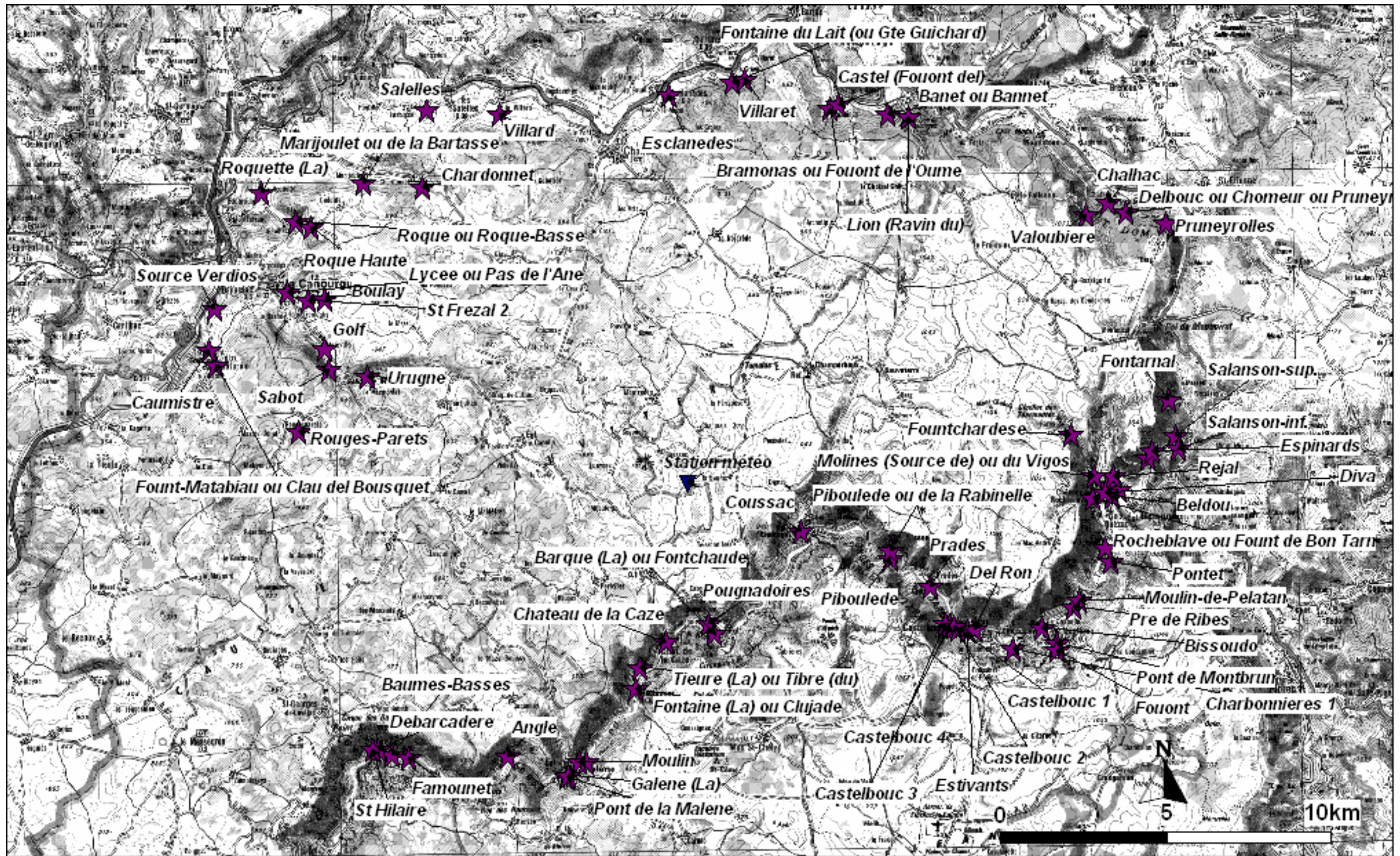


TABLE DES FIGURES – SOURCES ALIMENTANT LE TARN

Figure 1 : Fontarnal	
Figure 2 : Salançon inférieure	179
Figure 3 : Salançon supérieure	
Figure 4 : Le Vizoir ou source de la Fontaine.....	179
Figure 5 : Espinard	
Figure 6 : Molines ou source du Vigo.....	179
Figure 7 : Réjal	
Figure 8 : Le Vieux Moulin.....	180
Figure 9 : Oulette ou Gourgue du Pré Morjal	
Figure 10 : Beldou.....	180
Figure 11 : Fountchardese	
Figure 12 : Pontet2.....	180
Figure 13 : Pontet	
Figure 14 : Diva.....	181
Figure 15 : Rocheblave ou Fount de Bon Tarn	
Figure 16 : Del Ron.....	181
Figure 17 : Castelbouc1	
Figure 18 : Castelbouc2	181
Figure 19 : Castelbouc3	
Figure 20 : Castelbouc4.....	182
Figure 21 : Estivants	
Figure 22 : Charbonnières ou Fontaine de la Grotte.....	182
Figure 23 : Fouont	
Figure 24 : Pré de Ribes	182
Figure 25 : Moulin de Pelatan	
Figure 26 : Bissoudo	183
Figure 27 : Prades	
Figure 28 : Piboulède ou de la Rabinelle.....	183
Figure 29 : Jargile ou Faubio ou Piboulède	
Figure 30 : Coussac	183
Figure 31 : Pugnadoires	
Figure 32 : Barque ou la Fontchaude.....	184
Figure 33 : Château de la Caze	
Figure 34 : Tieure ou source du Tibre	184
Figure 35 : Fontaine ou Clujade	
Figure 36 : Moulin	184
Figure 37 : Pont de la Malène	
Figure 38 : La Galène	185
Figure 39 : Ardennes	
Figure 40 : Baumes Basses	185
Figure 41 : Débarcadère	
Figure 42 : St Hilaire	185

TABLE DES FIGURES – SOURCES ALIMENTANT LE LOT

<i>Figure 43 : Lycée ou Pas de l'Âne</i>	
<i>Figure 44 : St Frézal2</i>	186
<i>Figure 45 : Boulay</i>	
<i>Figure 46 : Sabot</i>	186
<i>Figure 47 : Rouge-Parets</i>	
<i>Figure 48 : Fount Matabiau ou Clau del Bousquet</i>	186
<i>Figure 49 : Caumistre</i>	
<i>Figure 50 : Source Verdios</i>	187
<i>Figure 51 : Roque ou Roque basse</i>	
<i>Figure 52 : La Roquette</i>	187
<i>Figure 53 : Roque Haute</i>	
<i>Figure 54 : Marijoulet ou de la Bartasse</i>	187
<i>Figure 55 : Chardonnet</i>	
<i>Figure 56 : Villard</i>	188
<i>Figure 57 : Salelles</i>	
<i>Figure 58 : Esclanèdes</i>	188
<i>Figure 59 : Fontaine du Lait ou Grotte Guichard</i>	
<i>Figure 60 : Villaret</i>	188
<i>Figure 61 : Fouont del Castel</i>	
<i>Figure 62 : Bramonas ou Fouont de l'Oume</i>	189
<i>Figure 63 : Banet ou Bannet</i>	
<i>Figure 64 : Ravin du Lion</i>	189
<i>Figure 65 : Chalhac</i>	
<i>Figure 66 : Valoubière</i>	189
<i>Figure 67 : Delbouc ou Chomeur ou Pruneyrolles</i>	
<i>Figure 68 : Pruneyrolles</i>	190



Figure 1 : Fontarnal

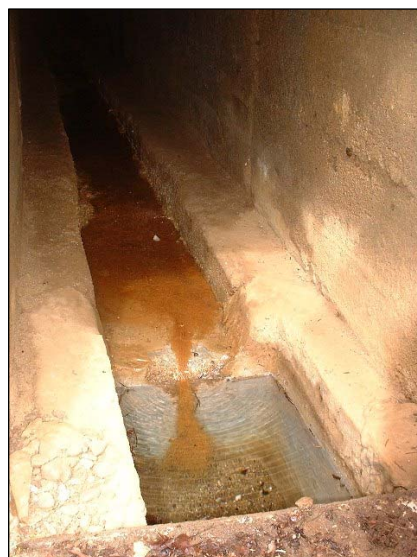


Figure 2 : Salançon inférieure



Figure 3 : Salançon supérieure



Figure 4 : Le Vizoir ou source de la Fontaine



Figure 5 : Espinard



Figure 6 : Molines ou source du Vigo



Figure 7 : Réjal



Figure 8 : Le Vieux Moulin



Figure 9 : Oulette ou Gourgue du Pré Morjal



Figure 10 : Beldou



Figure 11 : Fountchardese



Figure 12 : Pontet2



Figure 13 : Pontet



Figure 14 : Diva



Figure 15 : Rocheblave ou Fount de Bon Tarn



Figure 16 : Del Ron



Figure 17 : Castelbouc1



Figure 18 : Castelbouc2



Figure 19 : Castelbouc3



Figure 20 : Castelbouc4



Figure 21 : Estivants



Figure 22 : Charbonnières ou Fontaine de la Grotte



Figure 23 : Fouont

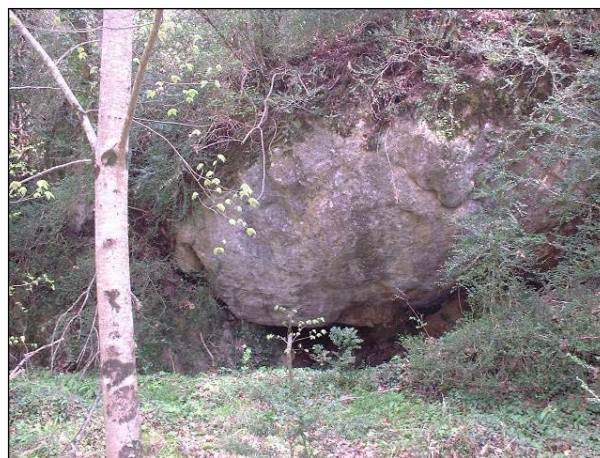


Figure 24 : Pré de Ribes



Figure 25 : Moulin de Pelatan



Figure 26 : Bissoudo



Figure 27 : Prades



Figure 28 : Piboulède ou de la Rabinelle



Figure 29 : Jargile ou Faubio ou Piboulède



Figure 30 : Coussac



Figure 31 : Pugnadoires



Figure 32 : Barque ou la Fontchaude



Figure 33 : Château de la Caze



Figure 34 : Tieure ou source du Tibre



Figure 35 : Fontaine ou Clujade

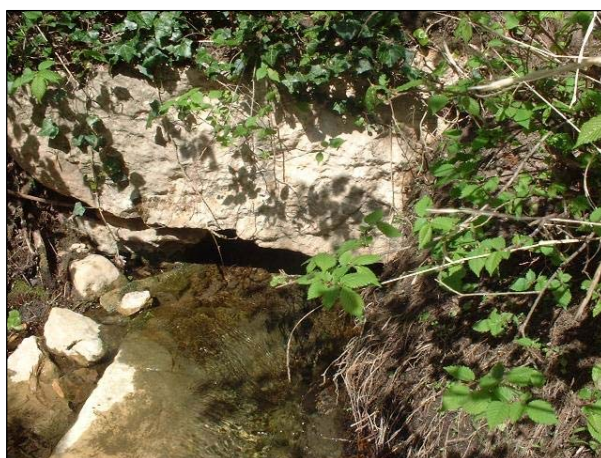


Figure 36 : Moulin

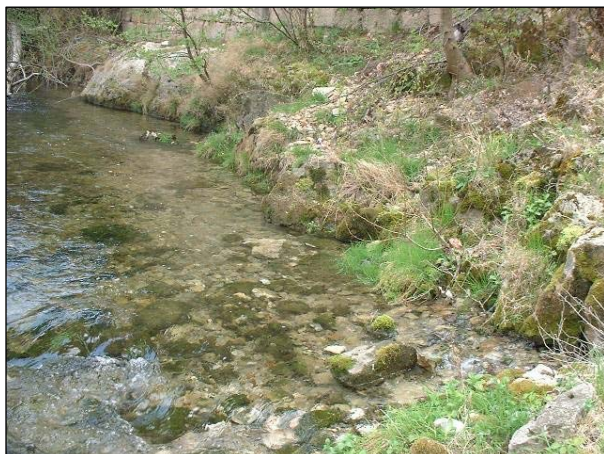


Figure 37 : Pont de la Malène



Figure 38 : La Galène



Figure 39 : Ardennes



Figure 40 : Baumes Basses



Figure 41 : Débarcadère



Figure 42 : St Hilaire



Figure 43 : Lycée ou Pas de l'Âne



Figure 44 : St Frézal2



Figure 45 : Boulay



Figure 46 : Sabot

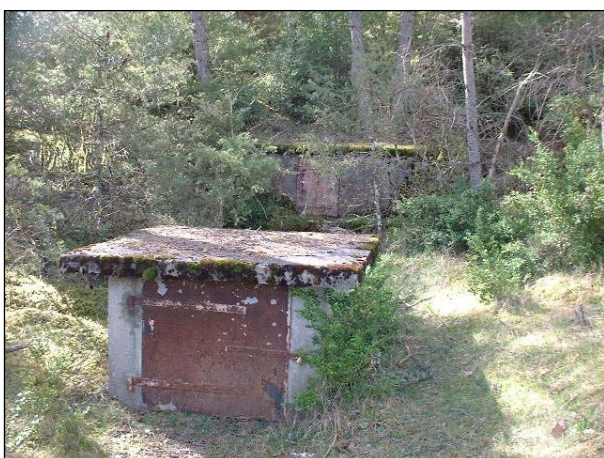


Figure 47 : Rouge-Parets



Figure 48 : Fount Matabiau ou Clau del Bousquet



Figure 49 : Caumistre



Figure 50 : Source Verdios



Figure 51 : Roque ou Roque basse



Figure 52 : La Roquette



Figure 53 : Roque Haute

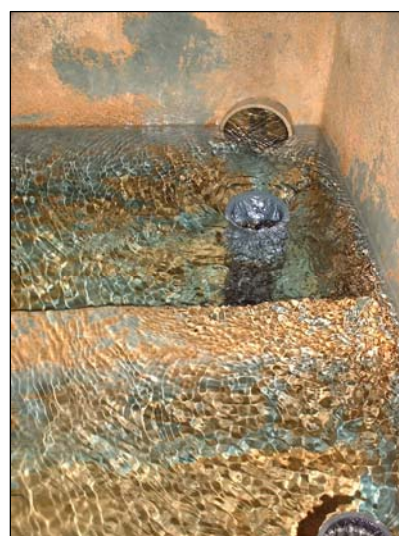


Figure 54 : Marijoulet ou de la Bartasse



Figure 55 : Chardonnet



Figure 56 : Villard



Figure 57 : Salettes

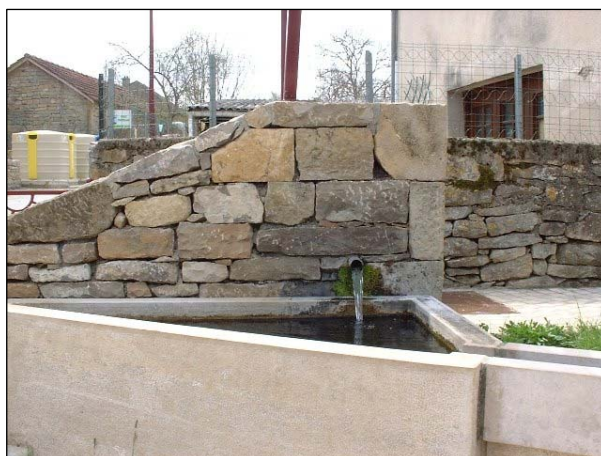


Figure 58 : Esclanèdes



Figure 59 : Fontaine du Lait ou Grotte Guichard



Figure 60 : Villaret



Figure 61 : Fouont del Castel



Figure 62 : Bramonas ou Fouont de l'Oume



Figure 63 : Banet ou Bannet



Figure 64 : Ravin du Lion

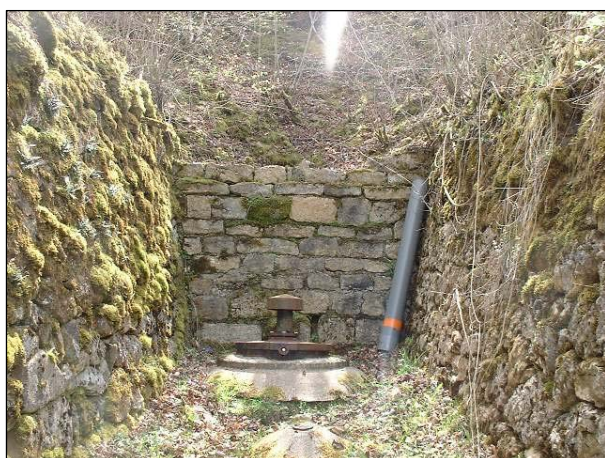


Figure 65 : Chalhac



Figure 66 : Valoubière



Figure 67 : Delbouc ou Chomeur ou Pruneyrolles

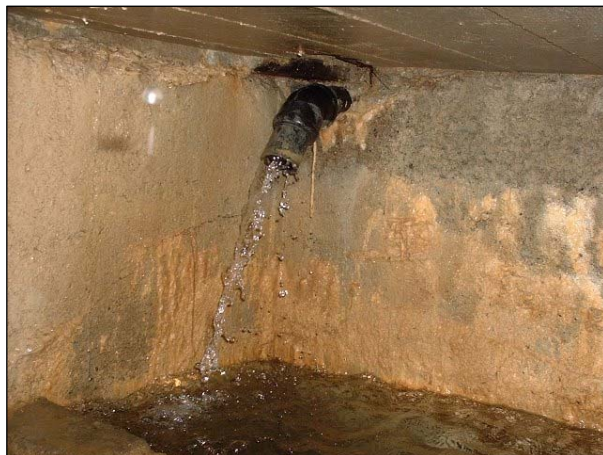


Figure 68 : Pruneyrolle

Annexe 5

Données hydrochimiques des sources

Tableau 1 : Résultats des suivis géochimiques bimestriels (sources situées côté Lot)

source	date_heure	pH	Temp °C	Cond µS/cm	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	HCO3 mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l
Sce Urugne	09/09/2003	7.93	10.9	478	80.0	14.00	1.6	0.4	299	5	7	5	5
Sce Urugne	26/11/2003	7.82	10.8	490	90.3	11.00	2.0	0.6	326	5	8	6	3
Sce Urugne	28/01/2004	7.6	10.1	501	89.5	13.50	2.1	0.5	323	5	7	5	4
Sce Urugne	29/03/2004	7.4	10.3	487	86.3	9.90	1.9	0.4	311	5	4	4	4
Sce Urugne	25/05/2004	7.55	10.7	491	86.2	14.15	2.2	0.4	332	5	6	4	<2
Sce Urugne	19/07/2004	7.65	10.7	471	85.5	14.50	2.0	0.4	303	5	7	4	4
Sce Urugne	14/09/2004	7.5	10.7	486	84.9	12.25	2.1	0.4	323	5	8	4	4
Sce Urugne	30/06/2006	8	10.6	467	78.2	14.3	1.9	0.5	324	4.8	6.4	3.8	4.4
Sce St-Frézal	08/09/2003	7.56	11.2	457	76.5	11.20	1.2	0.6	285	<5	6	3	4
Sce St-Frézal	26/11/2003	7.57	11.0	483	87.8	14.50	1.6	1.5	339	6	13	7	4
Sce St-Frézal	28/01/2004	7.51	10.5	499	91.0	14.50	1.5	0.9	317	<5	7	5	4
Sce St-Frézal	29/03/2004	7.31	10.2	467	82.8	10.90	1.2	0.4	305	<5	6	4	4
Sce St-Frézal	25/05/2004	7.38	10.9	477	86.3	11.25	1.5	0.5	328	<5	6	4	2
Sce St-Frézal	20/07/2004	7.47	11.1	460		13.50	1.3	<0.4	305	<5	6	4	4
Sce St-Frézal	15/09/2004	7.52	11.1	461	84.5	10.65	1.2	0.5	316	<5	7	4	
Sce St-Frézal	21/09/2005	7.60	11.4	443	83.3	11.90	1.2	0.5	296	5	6	3	4
Sce St-Frézal	21/11/2005	7.60	11.1	467	82.1	12.90	1.4	0.6	290	5	8	5	4
Sce St-Frézal	30/06/2006	7.4	10.6	458	81.2	10.7	1.4	0.5	297	3.3	6.4	3.2	4.2
Sce Bernade	09/09/2003	7.33	11.1	784	85.2	7.50	1.2	0.4	280	<5	5	3	4
Sce Bernade	26/11/2003	7.36	10.6	502	90.3	6.75	3.0	0.7	322	6	8	6	4
Sce Bernade	28/01/2004	7.51	9.8	518	107.5	8.00	2.2	0.5	321	<5	7	5	4
Sce Bernade	29/03/2004	7.30	10.3	509	100.8	6.47	1.8	0.4	324		7	4	4
Sce Bernade	25/05/2004	7.38	10.4	510	100.1	6.85	2.1	0.4	348	5	6	5	2
Sce Bernade	19/07/2004	7.38	10.9	488	98.6	6.75	2.0	0.5	321	<5	5	7	2
Sce Bernade	14/09/2004	7.29	11.0	490	91.2	6.67	1.6	<0.4	326	5	6	5	
Sce Bernade	01/05/2005	7.70	11.5	451	87.3	8.10	1.6	0.4	283	5	5	4	5
Sce Bernade	01/11/2005	8.00	10.7	472	84.5	7.50	2.0	0.4	295	5	6	5	5
Sce Bernade	29/06/2006	7.2	10.8	480	92.4	6.7	1.9	0.5	255	4.1	5.3	3.7	4.6
Sce Les Fonts	09/09/2003	7.36	10.3	439	76.5	9.50	1.2	0.5	270	<5	4	3	5
Sce Les Fonts	26/11/2003	7.43	10.2	441	82.5	8.75	1.8	0.4	299	<5	5	4	4
Sce Les Fonts	28/01/2004	7.55	10.1	458	93.5	12.00	1.6	<0.4	290	<5	4	3	4
Sce Les Fonts	29/03/2004	7.44	10.2	460	80.8	9.12	1.3	<0.4	296	<5	3	3	4
Sce Les Fonts	25/05/2004	7.40	10.3	450	89.9	10.95	1.5	<0.4	306	<5	3	3	2
Sce Les Fonts	21/07/2004	7.53	10.3	437	80.6	9.25	1.3	<0.4	284	<5	3	3	2
Sce Les Fonts	15/09/2004	7.35	10.3	441	78.9	9.45	1.3	<0.4	309	<5	4	3	
Sce Les Fonts	21/09/2005	7.70	10.4	438	81.8	8.50	1.6	0.4	279	5.00	5	3	4
Sce Les Fonts	21/11/2005	7.70	10.2	449	77.8	8.90	1.8	0.4	283	5.00	5	4	4
Sce Les Fonts	29/06/2006	7.3	9.85	441	78.6	10	1.6	<0.5	281	3.5	3.3	3.1	4.9
Sce Golf (Urugne)	26/11/2003	7.42	11.7	483	84.5	12.50	1.8	0.6	321	5.00	8	5	4
Sce Golf (Urugne)	28/01/2004	7.59	9.8	504	89.5	13.50	1.9	0.5	323	5.00	6	5	4
Sce Golf (Urugne)	01/04/2004	7.46	10.2	472	79.8	12.43	1.4	0.4	318	<5	5	5	4
Sce Golf (Urugne)	25/05/2004	7.47	11.9	495	90.4	13.25	1.8	0.4	339	<5	5	4	2
Sce Golf (Urugne)	20/07/2004	7.44	11.5	471	86.7	14.50	1.6	0.4	314	<5	5	4	4
Sce Golf (Urugne)	15/09/2004	7.58	11.5	488	82.1	15.35	1.5	<0.4	334	<5	7	4	4
Sce Marijoulet	08/09/2003	7.88	10.6	433	70.5	14.50	1.2	1.2	217	<5	6	5	6
Sce Marijoulet	26/11/2003	7.91	10.5	452	94.3	16.50	1.4	1.5	348	5	8	5	0.9
Sce Marijoulet	28/01/2004	8.35	10.0	504	88.0	15.00	1.3	1.1	331	<5	6	4	4
Sce Marijoulet	30/03/2004	8.21	10.5	470	77.3	14.10	1.1	0.7	307	<5	5	4	5
Sce Marijoulet	25/05/2004	8.25	11.6	475	83.0	14.75	1.3	0.9	329	<5	4	4	<2
Sce Marijoulet	20/07/2004	8.36	13.1	446	82.7	15.50	1.2	0.8	306	<5	5	4	5
Sce Marijoulet	15/09/2004	7.56	11.1	476	79.8	15.00	1.5	1.0	324	<5	6	5	5
Sce Delcastel	09/09/2003	7.35	10.6	463	85.3	10.00	1.0	0.5	301	<5	5	4	6
Sce Delcastel	26/11/2003	7.44	10.4	461	84.0	10.00	1.7	1.0	296	6.00	10	5	5
Sce Delcastel	28/01/2004	7.53	10.0	468	85.0	10.00	1.5	0.6	293	5.00	6	4	5
Sce Delcastel	29/03/2004	7.32	10.2	465	85.0	9.97	1.5	<0.4	311	<5	5	4	<2
Sce Delcastel	25/05/2004	7.31	10.4	466	84.6	9.25	1.2	<0.5	312	<5	5	4	<2
Sce Delcastel	19/07/2004	7.41	10.5	462	81.4	9.50	1.4	<0.6	317	<5	7	4	5
Sce Delcastel	14/09/2004	7.38	10.4	466	82.5	9.80	1.3	<0.7	309	<5	5	4	5
Sce Chaillac	09/09/2003	7.79	8.6	413	64.3	17.50	0.9	<0.4	261	<5	<2	7	5
Sce Chaillac	26/11/2003	7.67	8.8	422	71.3	18.50	1.0	<0.4	288	<5	<2	12	4
Sce Chaillac	28/01/2004	7.62	8.7	425	66.2	17.50	1.1	<0.4	276	<5	<2	7	3
Sce Chaillac	29/03/2004	7.58	8.5	428	63.3	15.40	0.9	<0.4	276	<5	<2	14	5
Sce Chaillac	25/05/2004	7.62	8.9	430	75.1	16.70	1.3	<0.4	303	<5	<2	6	<2
Sce Chaillac	19/07/2004	7.80	8.7	420	66.6	16.50	1.6	<0.4	281	<5		6	<2
Sce Chaillac	14/09/2004	7.71	8.8	423	63.1	18.15	1.1	<0.4	290	<5	<2	6	5

source	date_heure	pH	Temp °C	Cond µS/cm	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	HCO3 mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l
Banet (catégorie 2)_lot	28/01/2004	7.41		405	82	12.22	1.1	<0.4	323	<5	<2	4	5
Banet (catégorie 2)_lot	25/05/2004	7.75		486	86.4	12	1.3	<0.4	327	<5	<2	4	<2
Bramonas (Catégorie 3)_lot	20/03/2004	7.55		469	89.8	10.83	1.3	<0.4	312	<5	4	3	5
Bramonas (Catégorie 3)_lot	30/07/2004	7.41		481	90.1	9.5	1.1	<0.4	309	<5	4	4	<2
Chardonnet (catégorie 2)_lot	30/03/2004	7.62		488	95.3	6.98	1.1	<0.4	307	<5	10	4	5
Chardonnet (catégorie 2)	20/07/2004	8.12		475	99.2	7	1.1	<0.4	310	<5	10	4	5
Coussac (catégorie 2)	16/09/2003				91	11.5	1.1	<0.4	273	<5	6	4	5
Delboub (Catégorie 3)_lot	07/04/2004	7.84		460	69.7	19.4	0.9	<0.4	314	<5	<2	9	5
Delboub (Catégorie 3)_lot	21/07/2004	8.15		435	66.6	16.5	1.1	<0.4	296	<5	<2	7	<2
Escalanède (Catégorie 3)	21/07/2004				95.9	13	1.4	3	365	<5	10	7	<2
Fontane de lait (catégorie 2)_Lot	30/03/2004	7.60		542	95	14.9	1.3	<0.4	369	<5	2	4	4
Fontane de lait (catégorie 2)_Lot	21/07/2004	7.81		528	93.8	13.25	1.4	<0.4	350	<5	2	6	<2
Fontmatabiau (Catégorie 3)_Lot	30/03/2004	8.80		505	99.5	14.2	1.3	<0.4	343	<5	<2	5	4
Fontmatabiau (Catégorie 3)_Lot	20/07/2004	8.08		482	93.5	13	1.4	<0.4	332	<5	<2	6	4
Le Villard (Catégorie 3)_lot	01/04/2004	7.34		473	89	6.43	1	<0.4	307	<5	2	16	5
Le Villard (Catégorie 3)_lot	21/07/2004	7.63		476	91.8	6.25	1.1	<0.4	310	<5	3	8	<2
Pas de l'ane (catégorie 2)_lot	01/04/2004	7.54		463	70	15.15	1.5	0.7	290	<5	3	10	5
Pas de l'ane (catégorie 2)_lot	20/07/2004	7.45		539	101.3	19.5	3.7	0.7	343	11	2	18	6
Prunéyrols (Catégorie 3)_Lot	07/04/2004	8.14		431	69.7	19.4	0.9	<0.4	314	<5	<2	9	5
Prunéyrols (Catégorie 3)_Lot	21/07/2004	8.36		420	57.5	17.5	1	<0.4	283	<5	<2	7	<2
Ravin du Lion (Catégorie 3)_Lot	30/03/2004	8.11		510	80.3	12.38	6	<0.4	300	19	<2	7	5
Ravin du Lion (Catégorie 3)_Lot	21/07/2004	8.30		489	83.2	13.25	6.1	<0.4	296	18	<2	7	<2
Roque basse (catégorie 2)_lot permien	30/03/2004	7.72		491	76.8	18.6	1.3	<0.4	323	<5	3	5	5
Roque basse (catégorie 2)_lot permien	20/07/2004	7.80		493	83	20	1.3	<0.4	343	<5	3	6	5
Roque haute (catégorie 2)_lot permien	30/03/2004	7.94		567	97	11	4	2.3	368	5	4	11	29
Roque haute (catégorie 2)_lot permien	20/07/2004	7.98		577	114.6	14	4.9	2.2	399	5	4	12	28
Roquette (Catégorie 3)_Lot	30/03/2004	7.63		474	84.5	5.62	1.6	0.5	254	10	22	9	5
Roquette (Catégorie 3)_Lot	20/07/2004	7.70		483	104	6.75	1.8	<0.4	283	11	21	9	5
Sabot (catégorie 2)_lot	30/03/2004	7.24		559	116.5	10.02	1.3	<0.4	356	<5	<2	4	4
Sabot (catégorie 2)_lot	20/07/2004	7.68		553	98.5	11.5	1.2	<0.4	355	<5	<2	5	4
Urugne 2 (Catégorie 3)_Lot	18/09/2003				81.3	16	1.3	0.5	313	<5	6	4	5
Valoudière (catégorie 2)_Lot	30/03/2004	8.29		456	67.2	21.85	0.8	<0.4	315	<5	<2	5	4
Valoudière (catégorie 2)_Lot	20/07/2004	8.30		405	61.8	16.5	1.1	<0.4	287	<5	<2	5	<2
Verdios (catégorie 2)_Verdios	30/03/2004	7.81		509	93	12.3	1.2	<0.4	339	<5	<2	4	4
Verdios (catégorie 2)_Verdios	20/07/2004	7.65		515	94.2	14	1.8	1.1	301	10	21	14	5
Villaret (Catégorie 3)_Lot	01/04/2004	7.82		481	77.3	12.45	0.9	0.5	261	<5	<2	42	6
Villaret (Catégorie 3)_Lot	21/07/2004	7.93		436	75.1	12.25	1.2	0.4	292	<5	<2	12	2

Tableau 2 : Résultats des suivis géochimiques des campagnes de hautes et basses eaux (sources situées côté Lot)

Tableau 3 : Résultats des suivis géochimiques bimestriels (sources situées côté Tarn)

source	date_heure	pH	Temp °C	Cond µS/cm	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	HCO3 mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l
Sce Famouzet	09/09/2003	7.67	11.1	438	69.5	16.50	1.0	0.4	259	<5	5	2	6
Sce Famouzet	26/11/2003	7.71	10.9	428	75.5	12.50	1.2	0.5	285	5	12	4	3
Sce Famouzet	28/01/2004	7.72	11	442	77.0	14.00	1.3	0.5	280	<5	8	3	4
Sce Famouzet	29/03/2004	7.53	11.4	411	72.3	15.85	1.0	<0.4	280	<5	6	2	4
Sce Famouzet	25/05/2004	7.57	11.2	425	71.9	13.40	1.2	0.4	287	<5	6	2	2
Sce Famouzet	19/07/2004	7.55	11.3	418	82.2	15.95	1.0	<0.4	266	<5	6	4	4
Sce Famouzet	14/09/2004	7.52	11.4	415	65.5	13.80	1.3	<0.4	280	<5	7	2	4
Sce Famouzet	30/06/2006	7.6	10.8	413	64.9	14.9	1.2	0.5	247	2.6	6.4	3.1	3.7
Sce Burle	09/09/2003	7.48	11.5	456	76.2	10.00	0.9	<0.4	283	<5	6	4	5
Sce Burle	26/11/2003	7.32	11.5	472	91.8	6.25	1.4	0.5	310	5	10	4	3
Sce Burle	28/01/2004	7.44	11.0	474	87.7	8.00	1.7	<0.4	301	5	7	4	4
Sce Burle	29/03/2004	7.25	10.7	466	94.8	7.72	1.3	<0.4	297	<5	7	4	4
Sce Burle	25/05/2004	7.33	11.4	466	88.0	8.90	1.4	<0.4	311	<5	6	3	2
Sce Burle	19/07/2004	7.30	12.0	452	93.0	10.40	1.3	<0.4	303	<5	6	4	5
Sce Burle	14/09/2004	7.50	11.6	459	85.0	9.25	1.2	<0.4	302	<5	8	4	4
Sce Burle	21/09/2005	7.70	11.8	458	87.9	6.10	1.8	0.9	267	7	11	4	4
Sce Burle	21/11/2005	7.60	11.2	471	84.5	6.40	1.5	<0.4	290	5	9	4	1
Sce Burle	29/06/2006	7.4	11.4	454	82.0	9.9	1.4	<0.5	290	3.3	6.8	3.3	4.2
Sce Moline	08/09/2003	7.39	10.7	380	59.3	10.00	1.3	0.4	234	<5	5	4	4
Sce Moline	25/11/2003	7.62	10.7	389	74.5	9.50	1.4	0.5	249	<5	9	4	3
Sce Moline	28/01/2004	7.73	10.6	399	66.0	10.50	1.5	0.4	249	<5	7	4	3
Sce Moline	29/03/2004	7.64	10.8	395	67.8	9.70	1.4	<0.4	250	<5	6	3	4
Sce Moline	25/05/2004	7.42	10.9	388	69.2	9.62	1.4	<0.4	259	<5	5	3	<2
Sce Moline	19/07/2004	7.69	11.1	378	68.6	11.00	1.3	<0.4	245	<5	5	3	4
Sce Moline	14/09/2004	7.76	10.9	383	65.9	10.15	1.3	<0.4	249	<5	7	3	4
Sce Moline	29/06/2006	7.7	10.6	379	63.5	10	1.4	<0.5	241	3.6	6.1	3.1	3.9
Sce Moline	09/08/2006	7.64	10.6	381	60.4	9.8	1.8	0.5	224	4.3	6.8	3.3	4
Sce Moline	19/10/2006	7.9	10.6	407	69.8	7.4	1.8	0.6	240	4.3	9.3	2.6	3.5
sce Vizoir	01/03/2004	7.57	10.5	373	59.8	8.53	0.7	0.4	253	5	2	4	3
sce Vizoir	01/07/2004	7.68	12	468	74.2	18.20	0.9	0.4	303	5	2	15	5
sce Vizoir	10/08/2006	7.74	11.4	455	69.2	16	1.5	0.6	315	2.3	1.7	13.4	4.4
Sce Vizoir	19/10/2006	7.88	10.89	445	74.5	12	1.1	0.5	282	1.8	1.6	5	4.2
sce Roche Blave	16/09/2003	7.67	11	325	67.8	5.20	0.8	<0.4	214	<5	3	3	4
sce Roche Blave	28/01/2004	7.73	10.6	368	74.2	2.50	0.9	<0.4	235	<5	3	3	3
sce Roche Blave	29/03/2004	7.63	10.7	352	80.3	3.22	0.8	<0.4	221	<5	3	3	3
sce Roche Blave	25/05/2004	7.61	11.9	335	68.5	3.63	1.1	<0.4	228	<5	2	3	<2
sce Roche Blave	19/07/2004	7.76	11.5	328	58.9	3.95	0.8	<0.4	219	<5	3	3	3
sce Roche Blave	10/08/2006	7.6	11.07	331	61.2	4.5	1.0	0.5	212	2.1	3.8	2.8	4
Sce Beldou	09/09/2003	7.28	11	461	71.0	16.50	1.8	0.8	281	<5	3	13	6
Sce Beldou	26/11/2003	7.36	10.9	418	76.3	9.75	1.5	0.6	272	<5	3	6	4
Sce Beldou	28/01/2004	7.47	10.8	441	71.5	12.00	2.0	0.6	277	5	4	9	5
Sce Beldou	29/03/2004	7.45	10.9	433	70.8	10.67	1.6	0.4	269	<5	3	8	5
Sce Beldou	25/05/2004	7.42	11.3	427	77.5	11.40	1.9	0.4	281	<5	2	7	<2
Sce Beldou	19/07/2004	7.34	11.7	437	75.8	13.60	2.0	0.4	293	<5	3	10	5
Sce Beldou	14/09/2004	7.34	11.9	409	68.0	10.52	1.3	0.4	269	<5	2	8	5
Sce Beldou	10/08/2006	7.35	11.33	453	67.8	14.2	2.4	0.7	254	5.1	3.7	11.3	5.1
Sce Vieux Moulin	28/01/2004	8.20	8.7	407	71.0	10.00	2.0	0.5	250	5	6	7	3
Sce Vieux Moulin	29/03/2004	7.64	9.2	401	72.0	9.42	1.7	0.4	250	5	5	5	3
Sce Vieux Moulin	25/05/2004	7.53	11.4	394	67.9	9.80	1.9	0.4	257	5	5	5	<2
Sce Vieux Moulin	19/07/2004	7.35	13.7	444	78.6	14.45	2.8	0.6	281	5	4	8	4
Sce Vieux Moulin	14/09/2004	7.46	11.5	407	70.8	11.35	2.0	0.4	264	5	6	6	4
Sce Clujade	08/09/2003	7.30	12.0	442	80.8	11.20	1.0	0.4	278	5	11	5	4
Sce Clujade	25/11/2003	7.28	11.8	462	81.5	8.75	1.1	0.4	281	<5	5	3	4
Sce Clujade	28/01/2004	7.33	11.2	479	89.5	5.40	1.3	0.4	306	<5	6	3	4
Sce Clujade	29/03/2004	7.34	12.6	440	80.5	7.77	1.1	<0.4	295	<5	5	2	5
Sce Clujade	25/05/2004	7.23	11.6	466	92.4	6.60	1.3	0.4	313	<5	5	2	<2
Sce Clujade	19/07/2004	7.34	12.1	450	82.7	12.30	1.0	<0.4	295	<5	5	2	5
Sce Clujade	14/09/2004	7.33	12.2	445	78.6	9.32	1.0	<0.4	303	<5	6	3	5
Sce Angle	08/09/2003	7.54	10.7	435	75.8	12.70	1.5	0.6	273	<5	6	3	4
Sce Angle	25/11/2003	7.49	10.7	451	100.8	7.50	1.4	0.8	294	6	22	5	4
Sce Angle	28/01/2004	7.53	10.6	466	87.5	9.00	1.3	0.6	293	<5	10	3	4
Sce Angle	29/03/2004	7.38	10.8	432	78.0	10.77	1.2	<0.4	289	<5	7	<2	<2
Sce Angle	25/05/2004	7.42	10.7	456	84.8	9.60	1.3	0.4	310	<5	7	<2	<2
Sce Angle	21/07/2004	7.56	10.6	442	76.0	10.50	1.0	<0.4	288	<5	6	<2	<2
Sce Angle	15/09/2004	7.38	10.8	438	74.2	11.32	1.2	<0.4	299	<5	7	<2	4

source	date_heure	pH	Temp °C	Cond µS/cm	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	HCO3 mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l
Boulay (Catégorie 3)_Tarn	30/03/2004	7.60		626	147	8.2	2.1	0.7	382	8	11	16	6
Boulay (Catégorie 3)_Tarn	20/07/2004	7.50		569	116.7	7.75	2.4	0.5	334	9	6	20	6
Caumistre (Catégorie 3)_tarn	30/03/2004	7.66		483	84.8	11.65	1.6	1.2	304	<5	11	11	5
Caumistre (Catégorie 3)_tarn	20/07/2004	7.85		502	95	14	1.3	<0.4	347	<5	<2	6	4
Château de la case (catégorie 2)_tarn	16/09/2003				98.3	5	2	1	296	<5	6	28	5
Château de la case (catégorie 2)_tarn	29/03/2004	7.42		487	106.3	3.63	1.5	0.4	308	<5	7	4	4
Château de la case (catégorie 2)_tarn	19/07/2004	7.36		471	99.8	6.4	1.3	0.4	299	<5	7	4	4
Débarcadère (catégorie 2)_Tarn	29/03/2004	7.8		381	70.8	10.85	1.2	<0.4	287	<5	9	3	3
Débarcadère (catégorie 2)_Tarn	19/07/2004	7.5		368	91.7	13.1	1.1	<0.4	289	<5	8	3	3
Débousélade (Catégorie 3)_tarn	30/03/2004	7.63		588	96	18.05	1.4	1.7	217	<5	<2	128	5
Débousélade (Catégorie 3)_tarn	20/07/2004	7.34		463	81.9	9.25	1.9	1.3	213	<5	<2	13	6
Delron (Catégorie 3)-tarn	29/03/2004	7.35		439	77	10.5	1.1	0.4	288	<5	3	3	4
Delron (Catégorie 3)-tarn	19/07/2004	7.50		396	77.7	12.07	1.8	0.5	259	<5	5	5	4
Fontcharde (Catégorie 3)_Tarn	07/04/2004	7.56		404	84.6	2.88	1	<0.4	269	<5	<2	5	3
Fontcharde (Catégorie 3)_Tarn	19/07/2004	7.60		469	105.5	4.65	1.6	<0.4	327	<5	<2	7	4
Morjal (Catégorie 3)_Tarn	29/03/2004	7.62		407	75	9.6	1.3	<0.4	260	<5	2	6	5
Pougnatoire (catégorie 2)_Tarn	29/03/2004	7.52		455	94.8	2.31	1.1	<0.4	293	<5	6	3	4
Pougnatoire (catégorie 2)_Tarn	19/07/2004	7.64		437	95	2.95	0.9	<0.4	287	<5	5	3	4
Pougnatoire (catégorie 3)_Tarn	29/03/2004	7.6		382	79	4.7	1.3	0.5	241	<5	6	4	3
Prades (Catégorie 3)_Tarn	19/07/2004	7.71		357	99.9	5.45	2.1	0.7	217	<5	6	8	4
Prades (Catégorie 3)_Tarn	30/03/2004	7.63		474	77	24.75	1.4	<0.4	380	<5	<2	4	<2
Rouge parret (Catégorie 3)_Tarn	20/07/2004	7.70		483	82.8	28	1.6	<0.4	392	<5	<2	4	2
Saint Hilaire (Catégorie 3)_Tarn	07/04/2004	7.24		518	61.7	28.3	1	<0.4	325	<5	<2	7	<2
Saint Hilaire (Catégorie 3)_Tarn	21/07/2004	7.32		509	67.7	28.2	1.3	<0.4	305	<5	<2	7	2
Salaison Inf (Catégorie 3)_Tarn	31/03/2004	7.71		364	38.1	30.2	0.9	0.5	241	<5	<2	8	6
Salaison Inf (Catégorie 3)_Tarn	19/07/2004	7.77		367	46.2	22.5	1.1	0.5	235	<5	<2	9	5
Salaison Sup (Catégorie 3)_Tarn	31/03/2004	7.98		290	24.2	21.6	1.1	0.4	197	<5	<2	4	4
Salaison Sup (Catégorie 3)_Tarn	19/07/2004	7.82		379	50.2	27.7	1.7	0.6	240	<5	<2	16	5
Tibre (Catégorie 3)_Tarn	29/03/2004				87.5	10.35	1.3	<0.4	316	<5	6	3	4

Tableau 4 : Résultats des suivis géochimiques des campagnes de hautes et basses eaux (sources situées côté Tarn)

	pH	T (°C)	C (µS/cm)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	NO3 (mg/l)	SO4 (mg/l)	SiO2 (mg/l)
Scie Urugne	min	7.40	471.00	78.20	9.90	1.60	0.40	299.00	4.80	4.00	3.80	2.00
	1 ^{er} Quartile	7.53	482.00	83.68	11.94	1.90	0.40	309.00	5.00	6.30	4.00	3.75
	moyenne	7.64	486.29	85.11	12.95	1.98	0.45	317.63	4.98	6.68	4.48	3.80
	2 <i>sigma</i>	0.18	9.62	4.19	1.72	0.18	0.08	11.83	0.07	1.28	0.78	0.91
	médiane	7.60	487.00	85.85	13.75	2.00	0.40	323.00	5.00	7.00	4.00	4.00
	3 ^{ème} Quartile	7.74	490.50	87.10	14.19	2.10	0.50	324.50	5.00	7.25	5.00	4.10
Max	7.93	501.00	90.30	14.50	2.20	0.60	332.00	5.00	8.00	6.00	5.00	
Scie St-Frézal	min	7.31	443.00	76.50	10.65	1.20	0.40	285.00	5.00	6.00	3.00	2.00
	1 ^{er} Quartile	7.47	460.00	82.63	11.20	1.20	0.50	296.00	5.00	6.00	4.00	4.00
	moyenne	7.50	468.22	84.29	12.37	1.34	0.66	309.00	5.11	7.22	4.33	3.75
	2 <i>sigma</i>	0.10	16.31	4.31	1.52	0.16	0.35	17.72	0.33	2.28	1.22	0.71
	médiane	7.52	467.00	83.90	11.90	1.30	0.50	305.00	5.00	6.00	4.00	4.00
	3 ^{ème} Quartile	7.47	460.00	82.63	11.20	1.20	0.50	296.00	5.00	6.00	4.00	4.00
Max	7.60	499.00	91.00	14.50	1.60	1.50	339.00	6.00	13.00	7.00	4.00	
Scie Bernade	min	7.29	451.00	84.50	6.47	1.20	0.40	280.00	0.00	5.00	3.00	2.00
	1 ^{er} Quartile	7.33	488.00	87.30	6.75	1.60	0.40	295.00	5.00	5.00	4.00	3.50
	moyenne	7.47	524.89	93.94	7.18	1.94	0.46	313.33	4.56	6.11	4.89	3.75
	2 <i>sigma</i>	0.24	99.38	8.07	0.61	0.50	0.10	22.46	1.74	1.05	1.17	1.16
	médiane	7.38	502.00	91.20	6.85	2.00	0.40	321.00	5.00	6.00	5.00	4.00
	3 ^{ème} Quartile	7.33	488.00	87.30	6.75	1.60	0.40	295.00	5.00	5.00	4.00	3.50
Max	8.00	784.00	107.50	8.10	3.00	0.70	348.00	6.00	8.00	7.00	5.00	
Scie Les Fonts	min	7.35	437.00	76.50	8.50	1.20	0.40	270.00	5.00	3.00	3.00	2.00
	1 ^{er} Quartile	7.40	439.00	78.90	8.90	1.30	0.40	283.00	5.00	3.00	3.00	3.50
	moyenne	7.50	445.89	82.48	9.60	1.49	0.41	290.67	5.00	4.00	3.22	3.63
	2 <i>sigma</i>	0.13	8.72	5.63	1.14	0.23	0.03	12.92	0.00	0.87	0.44	1.06
	médiane	7.44	441.00	80.80	9.25	1.50	0.40	290.00	5.00	4.00	3.00	4.00
	3 ^{ème} Quartile	7.40	439.00	78.90	8.90	1.30	0.40	283.00	5.00	3.00	3.00	3.50
Max	7.70	460.00	93.50	12.00	1.80	0.50	309.00	5.00	5.00	4.00	5.00	

Tableau 5 : Statistiques descriptives établis à partir des suivis géochimiques bimestriels des sources (sources situées côté Lot)

	pH	T (°C)	C (µS/cm)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)
Scie Urugne golf	min	7.42	471.00	79.80	12.43	1.40	0.40	314.00	5.00	5.00	4.00	2.00
	1 ^{er} Quartile	7.45	474.75	82.70	12.69	1.53	0.40	318.75	5.00	5.00	4.00	4.00
	moyenne	7.49	485.50	85.50	13.59	1.67	0.45	324.83	5.00	6.00	4.50	3.67
	2 ^e sigma	0.07	12.94	4.16	1.15	0.20	0.08	9.66	0.00	1.26	0.55	0.82
	médiane	7.47	485.50	85.60	13.38	1.70	0.40	322.00	5.00	5.00	4.50	4.00
	3 ^{ème} Quartile	7.45	474.75	82.70	12.69	1.53	0.40	318.75	5.00	5.00	4.00	4.00
Max	7.59	11.90	504.00	90.40	15.35	1.90	0.60	339.00	5.00	8.00	5.00	4.00
Scie Marijoulet	min	7.56	433.00	70.50	14.10	1.10	0.70	217.00	5.00	4.00	4.00	0.90
	1 ^{er} Quartile	7.90	449.00	78.55	14.63	1.20	0.85	306.50	5.00	5.00	4.00	3.00
	moyenne	8.07	465.14	82.23	15.05	1.29	1.03	308.86	5.00	5.71	4.43	3.99
	2 ^e sigma	0.30	23.53	7.61	0.78	0.13	0.27	43.02	0.00	1.25	0.53	1.85
	médiane	8.21	470.00	82.70	15.00	1.30	1.00	324.00	5.00	6.00	4.00	5.00
	3 ^{ème} Quartile	7.90	449.00	78.55	14.63	1.20	0.85	306.50	5.00	5.00	4.00	3.00
Max	8.36	13.10	504.00	94.30	16.50	1.50	1.50	348.00	5.00	8.00	5.00	6.00
Scie Delcastel	min	7.31	461.00	81.40	9.25	1.00	0.40	293.00	5.00	5.00	4.00	2.00
	1 ^{er} Quartile	7.34	462.50	83.25	9.65	1.25	0.40	298.50	5.00	5.00	4.00	3.50
	moyenne	7.39	464.43	83.97	9.79	1.37	0.53	305.57	5.14	6.14	4.14	4.29
	2 ^e sigma	0.08	2.51	1.48	0.30	0.23	0.22	8.98	0.38	1.86	0.38	1.60
	médiane	7.38	465.00	84.60	9.97	1.40	0.40	309.00	5.00	5.00	4.00	5.00
	3 ^{ème} Quartile	7.34	462.50	83.25	9.65	1.25	0.40	298.50	5.00	5.00	4.00	3.50
Max	7.53	10.60	468.00	85.30	10.00	1.70	1.00	317.00	6.00	10.00	5.00	6.00
Scie Chailliac	min	7.58	413.00	63.10	15.40	0.90	0.40	261.00	5.00	2.00	6.00	2.00
	1 ^{er} Quartile	7.62	421.00	63.80	16.60	0.95	0.40	276.00	5.00	2.00	6.00	2.50
	moyenne	7.68	423.00	67.13	17.18	1.13	0.40	282.14	5.00	2.00	8.29	3.71
	2 ^e sigma	0.09	5.60	4.49	1.06	0.25	0.00	13.26	0.00	0.00	3.30	1.38
	médiane	7.67	423.00	66.20	17.50	1.10	0.40	281.00	5.00	2.00	7.00	4.00
	3 ^{ème} Quartile	7.62	421.00	63.80	16.60	0.95	0.40	276.00	5.00	2.00	6.00	2.50
Max	7.80	8.90	430.00	75.10	18.50	1.60	0.40	303.00	5.00	2.00	14.00	5.00

Tableau 6 : Statistiques descriptives établis à partir des suivis géochimiques bimestriels des sources (sources situées côté Lot)

	pH	T (°C)	C (µS/cm)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	
Scie Famouzet	min	10.90	411.00	64.90	12.50	1.00	0.40	247.00	2.60	5.00	2.00	2.00	
	1 ^{er} Quartile												
	moyenne	7.61	11.19	425.29	72.35	14.61	1.15	0.44	273.00	4.70	7.05	2.76	3.84
	2 ^e sigma												
	médiane	7.57	11.20	425.00	72.10	14.45	1.20	0.40	280.00	5.00	6.20	2.50	4.00
3 ^e me Quartile													
Max	7.72	11.40	442.00	82.20	16.50	1.30	0.50	287.00	5.00	12.00	4.00	6.00	
Scie Burle	min	10.70	452.00	76.20	6.10	0.90	0.40	267.00	3.30	6.00	3.00	1.00	
	1 ^{er} Quartile												
	moyenne	7.44	11.41	463.78	87.09	8.29	1.39	0.47	295.40	5.03	7.68	3.83	3.62
	2 ^e sigma												
	médiane	7.44	11.50	466.00	87.80	8.45	1.40	0.40	299.00	5.00	7.00	4.00	4.00
3 ^e me Quartile													
Max	7.70	12.00	474.00	94.80	10.40	1.80	0.90	311.00	7.00	11.00	4.00	5.00	
Scie Moline	min	10.60	378.00	59.30	7.40	1.30	0.40	224.00	3.60	5.00	2.60	2.00	
	1 ^{er} Quartile												
	moyenne	7.61	10.81	387.43	66.50	9.77	1.46	0.45	244.00	4.72	6.62	3.30	3.54
	2 ^e sigma												
	médiane	7.64	10.80	388.00	66.90	9.90	1.40	0.40	247.00	5.00	6.45	3.05	3.95
3 ^e me Quartile													
Max	7.76	11.10	399.00	74.50	11.00	1.80	0.60	259.00	5.00	9.30	4.00	4.00	
Scie Vizoir	min	10.50	373.00	59.80	8.53	0.70	0.40	253.00	1.80	1.60	4.00	3.00	
	1 ^{er} Quartile												
	moyenne	7.63	11.25	420.50	69.43	13.68	1.05	0.48	288.25	3.53	1.83	9.35	4.15
	2 ^e sigma												
	médiane	7.63	11.25	420.50	71.70	14.00	1.00	0.45	292.50	3.65	1.85	9.20	4.30
3 ^e me Quartile													
Max	7.68	12.00	468.00	74.50	18.20	1.50	0.60	315.00	5.00	2.00	15.00	5.00	

Tableau 7 : Statistiques descriptives établis à partir des suivis géochimiques bimestriels des sources (sources situées côté Tarn)

	pH	T (°C)	C (µS/cm)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	NO3 (mg/l)	SO4 (mg/l)	SiO2 (mg/l)
Scie Famouzet	min	10.90	411.00	64.90	12.50	1.00	0.40	247.00	2.60	5.00	2.00	2.00
	1 ^{er} Quartile	7.54	416.50	68.50	13.70	1.00	0.40	264.25	5.00	6.00	2.00	3.53
	moyenne	7.61	425.29	72.35	14.61	1.15	0.44	273.00	4.70	7.05	2.76	3.84
	2 ^e sigma	0.09	0.20	11.63	1.41	0.13	0.05	14.18	0.85	2.18	0.89	1.13
	médiane	7.57	11.20	425.00	72.10	1.20	0.40	280.00	5.00	6.20	2.50	4.00
	3 ^e me Quartile	7.69	11.35	433.00	75.88	1.23	0.50	281.25	5.00	7.25	3.33	4.00
Max	7.72	11.40	442.00	82.20	1.30	0.50	287.00	5.00	12.00	4.00	4.00	6.00
Scie Burle	min	7.25	10.70	452.00	76.20	0.90	0.40	267.00	3.30	6.00	3.00	1.00
	1 ^{er} Quartile	7.32	11.20	458.00	84.63	1.30	0.40	290.00	5.00	6.20	4.00	3.25
	moyenne	7.44	11.41	463.78	87.09	1.39	0.47	295.40	5.03	7.68	3.83	3.62
	2 ^e sigma	0.15	0.40	7.82	5.52	0.25	0.16	13.38	0.87	1.78	0.37	1.27
	médiane	7.44	11.50	466.00	87.80	1.40	0.40	299.00	5.00	7.00	4.00	4.00
	3 ^e me Quartile	7.50	11.60	471.00	90.85	1.48	0.48	302.75	5.00	8.75	4.00	4.15
Max	7.70	12.00	474.00	94.80	1.80	0.90	311.00	7.00	11.00	4.00	5.00	
Scie Moline	min	7.39	10.60	378.00	59.30	1.30	0.40	224.00	3.60	5.00	2.60	2.00
	1 ^{er} Quartile	7.52	10.70	381.50	64.10	1.33	0.40	240.25	4.48	5.25	3.00	3.13
	moyenne	7.61	10.81	387.43	66.50	1.46	0.45	244.00	4.72	6.62	3.30	3.54
	2 ^e sigma	0.15	0.17	7.72	4.56	0.19	0.07	9.79	0.49	1.55	0.51	0.68
	médiane	7.64	10.80	388.00	66.90	1.40	0.40	247.00	5.00	6.45	3.05	3.95
	3 ^e me Quartile	7.71	10.90	392.00	69.05	1.48	0.50	249.00	5.00	7.00	3.83	4.00
Max	7.76	11.10	399.00	74.50	1.80	0.60	259.00	5.00	9.30	4.00	4.00	
Scie Vizoir	min	7.57	10.50	373.00	59.80	0.70	0.40	253.00	1.80	1.60	4.00	3.00
	1 ^{er} Quartile	7.60	10.88	396.75	66.85	1.13	0.40	274.75	2.18	1.68	4.75	3.90
	moyenne	7.63	11.25	420.50	69.43	1.05	0.48	288.25	3.53	1.83	9.35	4.15
	2 ^e sigma	0.08	1.06	67.18	6.86	0.34	0.10	27.17	1.72	0.21	5.65	0.84
	médiane	7.63	11.25	420.50	71.70	1.00	0.45	292.50	3.65	1.85	9.20	4.30
	3 ^e me Quartile	7.65	11.63	444.25	74.28	1.20	0.53	306.00	5.00	2.00	13.80	4.55
Max	7.68	12.00	468.00	74.50	1.50	0.60	315.00	5.00	2.00	15.00	5.00	

Tableau 8 : Statistiques descriptives établis à partir des suivis géochimiques bimestriels des sources (sources situées côté Tarn)

	pH	T (°C)	C (µS/cm)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	NO3 (mg/l)	SO4 (mg/l)	SiO2 (mg/l)
scce Roche Blave												
min	7.61	10.60	325.00	58.90	2.50	0.80	0.40	212.00	2.10	2.00	2.80	2.00
1 ^{er} Quartile	7.63	10.70	328.00	62.85	3.32	0.80	0.40	215.25	5.00	3.00	3.00	3.00
moyenne	7.68	11.14	341.60	68.48	3.83	0.90	0.42	221.50	4.52	2.97	2.97	3.17
2 ^e sigma	0.06	0.55	18.09	7.97	0.95	0.13	0.04	8.69	1.18	0.57	0.08	0.75
médiane	7.67	11.00	335.00	68.15	3.79	0.85	0.40	220.00	5.00	3.00	3.00	3.00
3 ^e me Quartile	7.73	11.50	352.00	72.78	4.36	0.98	0.40	226.25	5.00	3.00	3.00	3.75
Max	7.76	11.90	368.00	80.30	5.20	1.10	0.50	235.00	5.00	3.80	3.00	4.00
Scce Beldou												
min	7.28	10.80	409.00	67.80	9.75	1.30	0.40	254.00	5.00	2.00	6.00	2.00
1 ^{er} Quartile	7.34	10.90	422.50	70.10	10.63	1.58	0.40	269.00	5.00	2.75	7.75	4.75
moyenne	7.38	11.21	432.29	72.34	12.33	1.81	0.54	274.50	5.01	2.96	9.04	4.64
2 ^e sigma	0.07	0.43	16.82	3.75	2.27	0.34	0.16	11.46	0.04	0.70	2.31	1.19
médiane	7.36	11.00	433.00	71.25	11.70	1.85	0.50	274.50	5.00	3.00	8.50	5.00
3 ^e me Quartile	7.44	11.50	439.00	75.93	13.75	2.00	0.63	281.00	5.00	3.18	10.33	5.03
Max	7.47	11.90	461.00	77.50	16.50	2.40	0.80	293.00	5.10	4.00	13.00	6.00
Scce Vieux Moulin												
min	7.35	8.70	394.00	67.90	9.42	1.70	0.40	250.00	5.00	4.00	5.00	2.00
1 ^{er} Quartile	7.46	9.20	401.00	70.80	9.80	1.90	0.40	250.00	5.00	5.00	5.00	3.00
moyenne	7.64	10.90	410.60	72.06	11.00	2.08	0.46	260.40	5.00	5.20	6.20	3.20
2 ^e sigma	0.33	2.01	19.42	3.96	2.06	0.42	0.09	12.90	0.00	0.84	1.30	0.84
médiane	7.53	11.40	407.00	71.00	10.00	2.00	0.40	257.00	5.00	5.00	6.00	3.00
3 ^e me Quartile	7.64	11.50	407.00	72.00	11.35	2.00	0.50	264.00	5.00	6.00	7.00	4.00
Max	8.20	13.70	444.00	78.60	14.45	2.80	0.60	281.00	5.00	6.00	8.00	4.00
Scce Clujade												
min	7.23	11.20	440.00	78.60	5.40	1.00	0.40	278.00	5.00	5.00	2.00	2.00
1 ^{er} Quartile	7.29	11.70	443.50	80.65	7.19	1.00	0.40	288.00	5.00	5.00	2.00	4.00
moyenne	7.31	11.93	454.86	83.71	8.76	1.11	0.40	295.86	5.00	6.14	2.86	4.14
2 ^e sigma	0.04	0.45	14.52	5.16	2.44	0.13	0.00	12.84	0.00	2.19	1.07	1.07
médiane	7.33	12.00	450.00	81.50	8.75	1.10	0.40	295.00	5.00	5.00	3.00	4.00
3 ^e me Quartile	7.34	12.15	464.00	86.10	10.26	1.20	0.40	304.50	5.00	6.00	3.00	5.00
Max	7.34	12.60	479.00	92.40	12.30	1.30	0.40	313.00	5.00	11.00	5.00	5.00
Scce Angle												
min	7.38	10.60	432.00	74.20	7.50	1.00	0.40	273.00	5.00	6.00	2.00	2.00
1 ^{er} Quartile	7.40	10.65	436.50	75.90	9.30	1.20	0.40	288.50	5.00	6.50	2.00	2.00
moyenne	7.47	10.70	445.71	82.44	10.20	1.27	0.51	292.29	5.14	9.29	2.71	3.14
2 ^e sigma	0.08	0.08	12.39	9.50	1.68	0.16	0.16	11.28	0.38	5.77	1.11	1.07
médiane	7.49	10.70	442.00	78.00	10.50	1.30	0.40	293.00	5.00	7.00	2.00	4.00
3 ^e me Quartile	7.54	10.75	453.50	86.15	11.05	1.35	0.60	296.50	5.00	8.50	3.00	4.00
Max	7.56	10.80	466.00	100.80	12.70	1.50	0.80	310.00	6.00	22.00	5.00	4.00

Tableau 9 : Statistiques descriptives établis à partir des suivis géochimiques bimestriels des sources (sources situées côté Tarn)

Tableau 10 : Paramètres du système calco-carbonique calculés à partir suivis géochimiques bimestriels des sources (sources situées côté Lot)

Nom	Date	pH	BI %	CMTD mmol/kg	Aragonite IS	Calcite IS	pCO2 IS	Dolomite IS
Sce Urugne	09/09/2003	7.93	-0.34	5.00	0.48	0.63	0.28	0.65
Sce Urugne	26/11/2003	7.82	-2.05	5.51	0.45	0.61	0.39	0.44
Sce Urugne	28/01/2004	7.6	0.27	5.62	0.22	0.37	0.65	0.05
Sce Urugne	29/03/2004	7.4	-1.66	5.61	0	0.15	0.98	-0.51
Sce Urugne	25/05/2004	7.55	-1.72	5.81	0.17	0.33	0.74	0
Sce Urugne	19/07/2004	7.65	2.39	5.23	0.23	0.39	0.54	0.14
Sce Urugne	14/09/2004	7.5	-2.8	5.71	0.11	0.26	0.81	-0.18
Sce Urugne	30/06/2006	8	-4.33	5.39	0.57	0.72	0.26	0.84
Sce St-Frézal	08/09/2003	7.56	-1.72	4.98	0.09	0.24	0.63	-0.21
Sce St-Frézal	26/11/2003	7.57	-3.48	5.91	0.21	0.37	0.72	0.09
Sce St-Frézal	28/01/2004	7.51	2.42	5.59	0.13	0.29	0.78	-0.09
Sce St-Frézal	29/03/2004	7.31	-2.24	5.63	-0.12	0.04	1.20	-0.68
Sce St-Frézal	25/05/2004	7.38	-3.59	5.93	0.01	0.16	1.10	-0.43
Sce St-Frézal	20/07/2004	7.47	-1.46	5.41	0.04	0.19	0.83	-0.25
Sce St-Frézal	15/09/2004	7.52	-3.44	5.56	0.13	0.28	0.76	-0.2
Sce St-Frézal	21/09/2005	7.60	0.49	5.14	0.18	0.33	0.60	-0.03
Sce St-Frézal	21/11/2005	7.60	1.06	5.04	0.16	0.31	0.59	-0.04
Sce St-Frézal	30/06/2006	7.4	-1.25	5.36	-0.04	0.12	0.95	-0.52
Sce Bernade	09/09/2003	7.33	0.6	5.13	-0.1	0.05	1.05	-0.81
Sce Bernade	26/11/2003	7.36	-4.6	5.86	0	0.15	1.12	-0.7
Sce Bernade	28/01/2004	7.51	4.47	5.66	0.2	0.35	0.78	-0.31
Sce Bernade	29/03/2004	7.30	1.33	5.99	-0.02	0.13	1.29	-0.8
Sce Bernade	25/05/2004	7.38	-3.37	6.30	0.08	0.24	1.15	-0.56
Sce Bernade	19/07/2004	7.38	-0.48	5.81	0.05	0.21	1.07	-0.61
Sce Bernade	14/09/2004	7.29	-4.75	6.03	-0.06	0.1	1.35	-0.81
Sce Bernade	01/05/2005	7.70	1.63	4.85	0.28	0.44	0.46	-0.01
Sce Bernade	01/11/2005	8.00	-2.51	4.91	0.57	0.72	0.23	0.52
Sce Benarde	29/06/2006	7.2	8.4	4.85	-0.24	-0.09	1.29	-1.18
Sce Les Fonts	09/09/2003	7.36	-0.32	4.92	-0.14	0.01	0.95	-0.76
Sce Les Fonts	26/11/2003	7.43	-2.82	5.36	-0.01	0.15	0.89	-0.55
Sce Les Fonts	28/01/2004	7.55	6.77	5.08	0.14	0.3	0.65	-0.17
Sce Les Fonts	29/03/2004	7.44	-2.6	5.30	-0.01	0.15	0.85	-0.53
Sce Les Fonts	25/05/2004	7.40	1.86	5.52	0.01	0.16	0.98	-0.47
Sce Les Fonts	21/07/2004	7.53	-0.59	5.00	0.07	0.22	0.68	-0.37
Sce Les Fonts	15/09/2004	7.35	-5.56	5.64	-0.09	0.07	1.10	-0.66
Sce Les Fonts	21/09/2005	7.70	0.05	4.79	0.23	0.39	0.45	-0.08
Sce Les Fonts	21/11/2005	7.70	-2.55	4.86	0.22	0.37	0.45	-0.08
Sce Les Fonts	29/06/2006	7.3	0.06	5.20	-0.18	-0.03	1.12	-0.84

BI : balance ionique.

Tableau 11 : Paramètres du système calco-carbonique calculés à partir suivis géochimiques bimestriels des sources (sources situées côté Lot)

Nom	Date	pH	BI %	CMTD mmol/kg	Aragonite IS	Calcite IS	pCO2 IS	Dolomite IS
Scé Urugne golf	26/11/2003	7.42	-2.76	5.75	0.04	0.19	0.98	-0.29
Scé Urugne golf	28/01/2004	7.59	-3.02	5.63	0.2	0.36	0.66	0.01
Scé Urugne golf	01/04/2004	7.46	-4.45	5.67	0.03	0.19	0.87	-0.31
Scé Urugne golf	25/05/2004	7.47	-1.52	6.01	0.14	0.29	0.93	-0.09
Scé Urugne golf	20/07/2004	7.44	-3.13	5.60	0.06	0.21	0.91	-0.21
Scé Urugne golf	15/09/2004	7.58	-3.15	5.81	0.2	0.35	0.71	0.12
Scé Marijoulet	08/09/2003	7.88	10.56	3.65	0.25	0.4	0.23	0.25
Scé Marijoulet	26/11/2003	7.91	0.72	5.83	0.57	0.73	0.33	0.83
Scé Marijoulet	28/01/2004	8.35	-0.33	5.36	0.94	1.1	0.11	1.55
Scé Marijoulet	30/03/2004	8.21	-2.52	5.03	0.74	0.89	0.15	1.18
Scé Marijoulet	25/05/2004	8.25	-2.31	5.36	0.85	1	0.14	1.41
Scé Marijoulet	20/07/2004	8.36	1.51	4.94	0.94	1.1	0.10	1.65
Scé Marijoulet	15/09/2004	7.56	-3.23	5.66	0.15	0.3	0.71	0.02
Scé Delcastel	09/09/2003	7.35	-1.01	5.49	-0.06	0.09	1.07	-0.62
Scé Delcastel	26/11/2003	7.44	-1.69	5.29	0.01	0.16	0.85	-0.47
Scé Delcastel	28/01/2004	7.53	0.22	5.16	0.09	0.25	0.69	-0.32
Scé Delcastel	29/03/2004	7.32	-2.56	5.72	-0.09	0.07	1.17	-0.68
Scé Delcastel	25/05/2004	7.31	-3.64	5.75	-0.1	0.06	1.23	-0.72
Scé Delcastel	19/07/2004	7.41	-6.04	5.70	0	0.15	0.98	-0.5
Scé Delcastel	14/09/2004	7.38	-3.74	5.60	-0.04	0.11	1.02	-0.57
Scé Chaillac	09/09/2003	7.79	1.12	4.44	0.16	0.32	0.33	0.17
Scé Chaillac	26/11/2003	7.67	-0.09	4.97	0.12	0.28	0.48	0.07
Scé Chaillac	28/01/2004	7.62	-0.44	4.80	0.03	0.19	0.52	-0.11
Scé Chaillac	29/03/2004	7.58	-5.57	4.83	-0.03	0.12	0.58	-0.27
Scé Chaillac	25/05/2004	7.62	-0.74	5.26	0.12	0.28	0.56	0
Scé Chaillac	19/07/2004	7.80	-1.18	4.78	0.22	0.37	0.35	0.24
Scé Chaillac	14/09/2004	7.71	-3.69	4.98	0.12	0.28	0.45	0.11

BI : balance ionique.

Tableau 12 : Paramètres du système calco-carbonique calculés à partir suivis géochimiques bimestriels des sources (sources situées côté Tarn)

Nom	Date	pH	CMTD mmol/kg	BI %	Aragonite IS	Calcite IS	pCO2 IS	Dolomite IS
SceFamouzet	09/09/2003	7.67	4.46	4.0	0.12	0.27	0.45	0.06
SceFamouzet	26/11/2003	7.71	4.88	-2.3	0.22	0.38	0.45	0.11
SceFamouzet	28/01/2004	7.72	4.79	1.5	0.24	0.39	0.43	0.18
SceFamouzet	29/03/2004	7.53	4.92	1.0	0.03	0.18	0.66	-0.15
SceFamouzet	25/05/2004	7.57	5.01	-2.4	0.08	0.23	0.62	-0.13
SceFamouzet	19/07/2004	7.55	4.65	7.9	0.08	0.23	0.60	-0.11
SceFamouzet	14/09/2004	7.52	4.93	-4.5	-0.02	0.14	0.69	-0.26
SceFamouzet	30/06/2006	7.6	4.29	2.8	0.00	0.15	0.50	-0.20
SceBurle	09/09/2003	7.48	5.01	-3.0	0.01	0.16	0.76	-0.41
SceBurle	26/11/2003	7.32	5.68	-2.9	-0.04	0.12	1.20	-0.79
SceBurle	28/01/2004	7.44	5.38	-1.5	0.04	0.20	0.87	-0.51
SceBurle	29/03/2004	7.25	5.56	2.2	-0.13	0.03	1.35	-0.90
SceBurle	25/05/2004	7.33	5.69	-2.0	-0.05	0.11	1.17	-0.63
SceBurle	19/07/2004	7.30	5.57	2.6	-0.06	0.10	1.23	-0.60
SceBurle	14/09/2004	7.50	5.33	-2.4	0.10	0.25	0.78	-0.31
SceBurle	21/09/2005	7.70	4.57	1.6	0.27	0.42	0.43	-0.16
SceBurle	21/11/2005	7.60	5.04	-3.1	0.18	0.33	0.59	-0.32
SceBurle	29/06/2006	7.4	5.22	-0.5	-0.03	0.12	0.93	-0.53
SceMoline	08/09/2003	7.39	4.23	-3.7	-0.27	-0.11	0.78	-0.86
SceMoline	25/11/2003	7.62	4.32	1.4	0.08	0.23	0.48	-0.30
SceMoline	28/01/2004	7.73	4.26	-2.2	0.14	0.29	0.37	-0.09
SceMoline	29/03/2004	7.64	4.32	-1.7	0.06	0.22	0.46	-0.27
SceMoline	25/05/2004	7.42	4.65	-2.5	-0.13	0.02	0.79	-0.67
SceMoline	19/07/2004	7.69	4.21	1.1	0.11	0.27	0.41	-0.12
SceMoline	14/09/2004	7.76	4.24	-2.5	0.17	0.32	0.35	-0.03
SceMoline	29/06/2006	7.7	4.14	-1.8	0.08	0.23	0.39	-0.20
SceMoline	09/08/2006	7.64	3.88	-0.8	-0.03	0.13	0.42	-0.41
SceMoline	19/10/2006	7.9	4.03	-0.9	0.31	0.47	0.24	0.09
sceVizoir	01/03/2004	7.57	4.43	-8.5	-0.05	0.10	0.55	-0.51
sceVizoir	01/07/2004	7.68	5.20	-2.0	0.22	0.37	0.51	0.29
sceVizoir	10/08/2006	7.74	5.37	-6.8	0.26	0.41	0.46	0.34
SceVizoir	19/10/2006	7.88	4.74	-0.4	0.38	0.54	2.75	0.42

BI : balance ionique.

Tableau 13 : Paramètres du système calco-carbonique calculés à partir suivis géochimiques bimestriels des sources (sources situées côté Tarn)

Nom	Date	pH	CMTD mmol/kg	BI %	Aragonite IS	Calcite IS	pCO2 IS	Dolomite IS
sceRocheBlave	16/09/2003	7.67	3.69	1.3	0.04	0.19	0.37	-0.59
sceRocheBlave	28/01/2004	7.73	4.02	-1.8	0.17	0.32	0.35	-0.70
sceRocheBlave	29/03/2004	7.63	3.83	5.5	0.08	0.23	0.42	-0.80
sceRocheBlave	25/05/2004	7.61	3.96	-2.6	0.03	0.18	0.46	-0.76
sceRocheBlave	19/07/2004	7.76	3.73	-7.6	0.09	0.25	0.31	-0.53
sceRocheBlave	10/08/2006	7.6	3.69	-2.5	-0.07	0.08	0.44	-0.83
SceBeldou	09/09/2003	7.28	5.22	-0.7	-0.24	-0.08	1.20	-0.66
SceBeldou	26/11/2003	7.36	4.95	-0.9	-0.13	0.02	0.95	-0.72
SceBeldou	28/01/2004	7.47	4.92	-2.9	-0.05	0.11	0.76	-0.43
SceBeldou	29/03/2004	7.45	4.80	-3.0	-0.08	0.07	0.78	-0.54
SceBeldou	25/05/2004	7.42	5.04	-0.3	-0.05	0.10	0.87	-0.48
SceBeldou	19/07/2004	7.34	5.34	-2.0	-0.12	0.03	1.10	-0.53
SceBeldou	14/09/2004	7.34	4.91	-4.8	-0.19	-0.04	1.00	-0.73
SceBeldou	10/08/2006	7.35	4.63	0.8	-0.22	-0.06	0.91	-0.66
SceVieuxMoulin	28/01/2004	8.20	4.11	-0.2	0.59	0.75	0.12	0.74
SceVieuxMoulin	29/03/2004	7.64	4.33	0.3	0.06	0.22	0.46	-0.35
SceVieuxMoulin	25/05/2004	7.53	4.52	-2.9	-0.03	0.13	0.62	-0.44
SceVieuxMoulin	19/07/2004	7.35	5.09	2.7	-0.08	0.07	1.05	-0.41
SceVieuxMoulin	14/09/2004	7.46	4.70	-1.4	-0.07	0.09	0.74	-0.48
SceClujade	08/09/2003	7.30	5.12	0.3	-0.15	0.01	1.15	-0.69
SceClujade	25/11/2003	7.28	5.21	-0.5	-0.16	0.00	1.20	-0.83
SceClujade	28/01/2004	7.33	5.60	-3.4	-0.05	0.11	1.15	-0.86
SceClujade	29/03/2004	7.34	5.37	-4.0	-0.07	0.08	1.12	-0.68
SceClujade	25/05/2004	7.23	5.88	-1.7	-0.12	0.04	1.48	-0.92
SceClujade	19/07/2004	7.34	5.37	0.9	-0.07	0.08	1.10	-0.51
SceClujade	14/09/2004	7.33	5.54	-5.3	-0.09	0.07	1.15	-0.63
SceAngle	08/09/2003	7.54	4.79	1.4	0.04	0.19	0.63	-0.26
SceAngle	25/11/2003	7.49	5.20	2.6	0.13	0.29	0.76	-0.43
SceAngle	28/01/2004	7.53	5.15	0.1	0.11	0.27	0.69	-0.32
SceAngle	29/03/2004	7.38	5.23	-2.0	-0.08	0.07	0.98	-0.58
SceAngle	25/05/2004	7.42	5.56	-2.8	0.02	0.17	0.95	-0.47
SceAngle	21/07/2004	7.56	5.04	-3.0	0.08	0.24	0.63	-0.26
SceAngle	15/09/2004	7.38	5.42	-5.2	-0.09	0.07	1.00	-0.55

BI : balance ionique.

Annexe 6

Interprétation hydrologiques des sources de catégorie

1. Angle

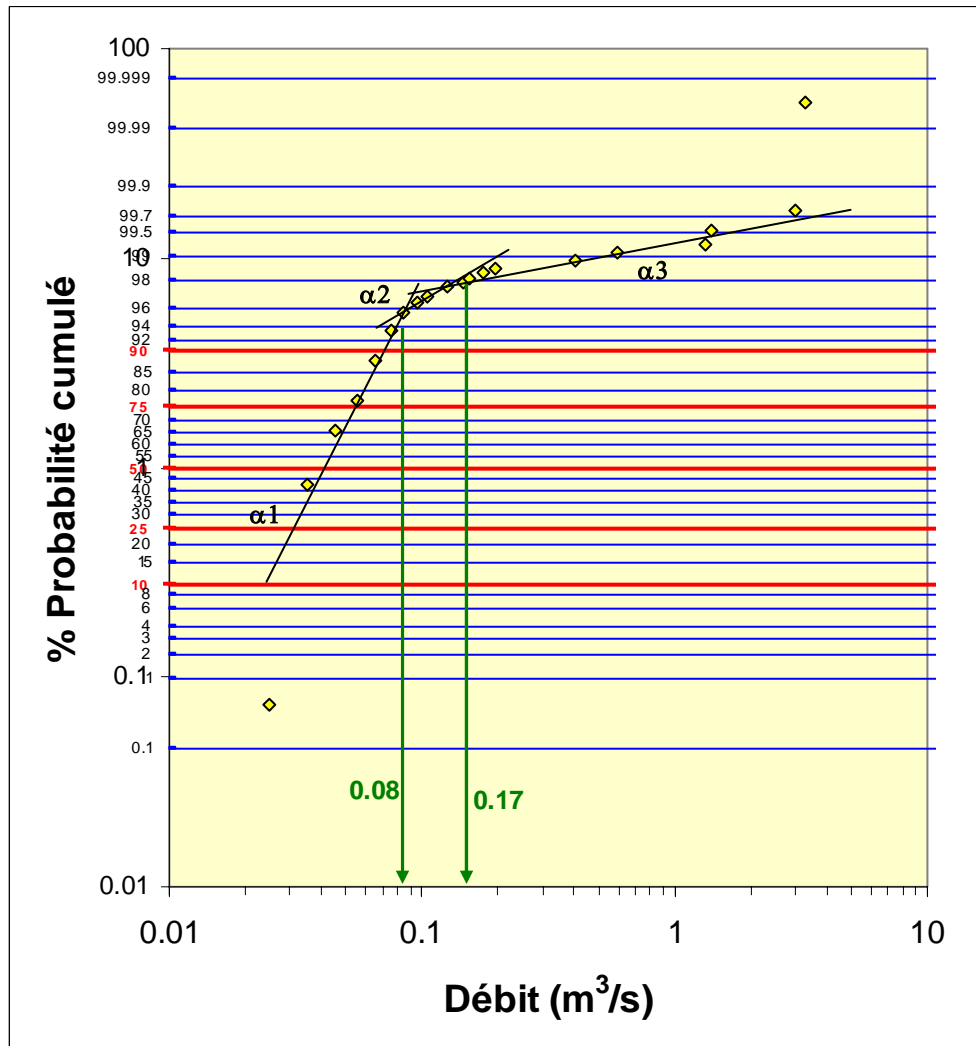
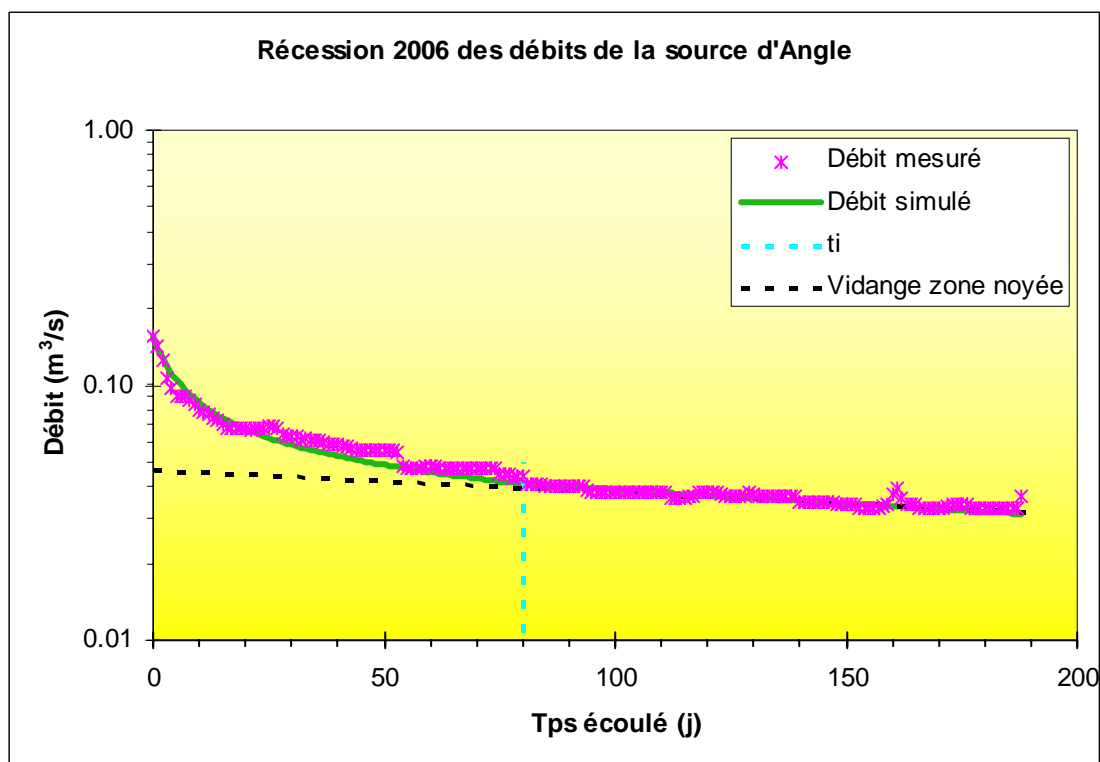


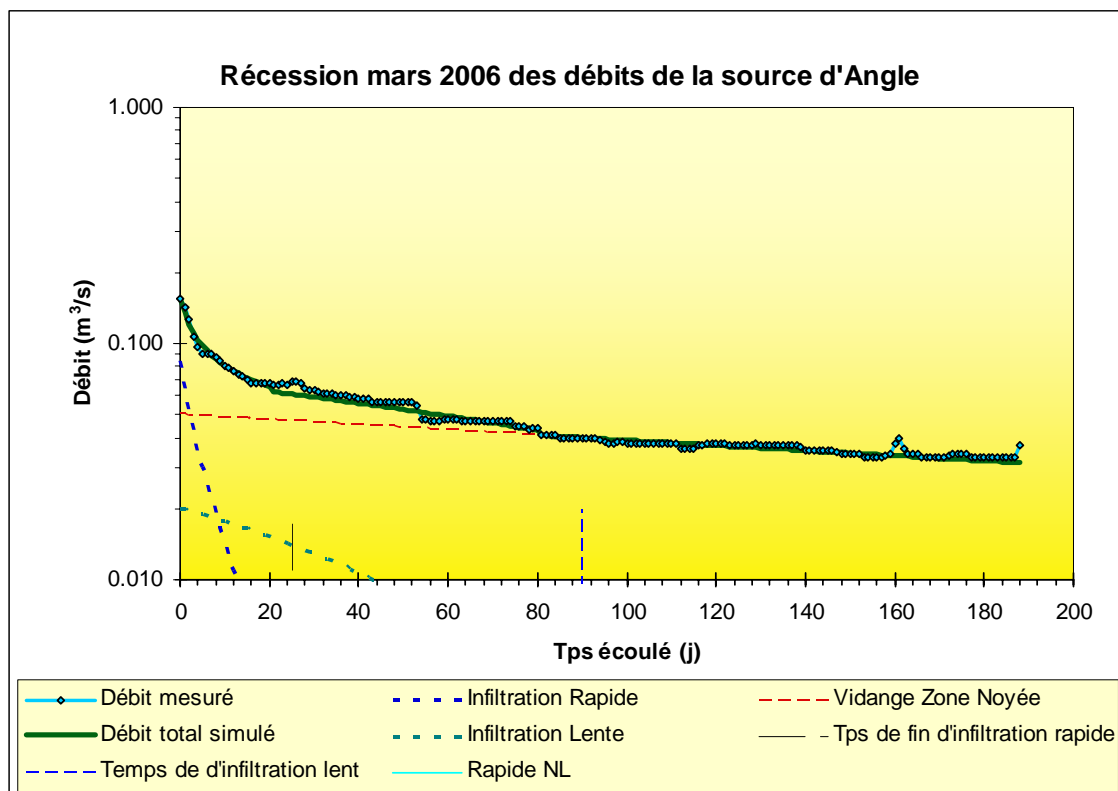
Illustration 1 – Débits classés de la source d'Angle sur l'ensemble des données (classe de débit de 0,01 m³/s).



Début Récession	11/03/2006
Fin Récession	15/09/2006
alpha (coef tarissement)	0.0025
epsilon (coef d'hétérogénéité d'écoulement)	0.1500
QRo	0.050
ti (tps fin d'infiltration)	80

Q0 (débit de crue debut recession)	0.154
q0 (débit d'infiltration à t=0)	0.104
eta (vitesse moyenne d'infiltration)	0.0125
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.75
Critère de Nash (qualité de la simulation)	97.66
Vdyn (million de m ³)	1.73
Vdyn-vol écoulé après ti	1.29
Vinfil (million de m ³)	0.11
Volume moyen interannuel (million de m ³)	2
Pouvoir régulateur K	0.9

Illustration 2 - Décomposition de la récession 2006 selon la méthode de Mangin (1970).



Début Récession	11/03/06
Fin Récession	15/09/06
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	0.250
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	25
Débit d'infiltration (à t=0)	0.084
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.001
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	90
qp_2 (débit d'infiltration à t=0)	0.02
Coef tarissement Zone Noyée	0.0025
Qo Zone noyée (m ³ /s)	0.050

vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.040
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.011
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.61
Critère de Nash (qualité de la simulation)	97.79
Volume d'infiltration rapide (million de m ³)	0.04
Volume d'infiltration lente (million de m ³)	0.08
Volume dynamique (million de m ³)	1.73
Volume moyen interannuel	2
Pouvoir régulateur K	0.9

Illustration 3 - Décomposition de la récession 2006 selon la méthode modifiée de Mangin.

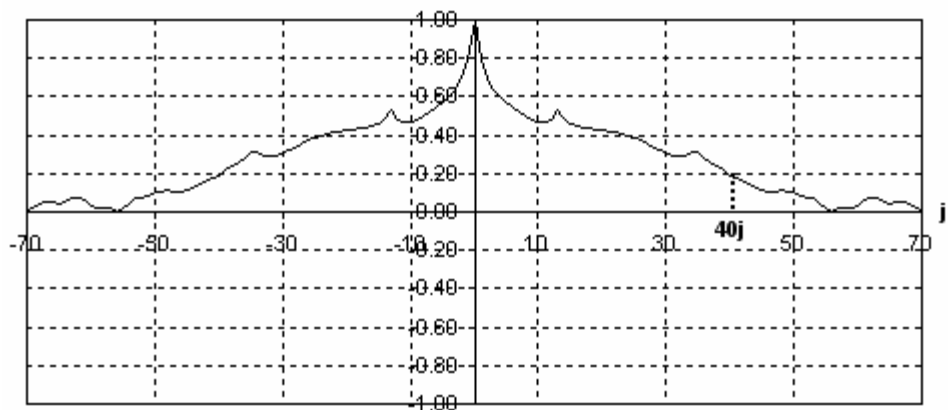


Illustration 4 – Corrélogramme simple de la chronique de débit d'Angle.

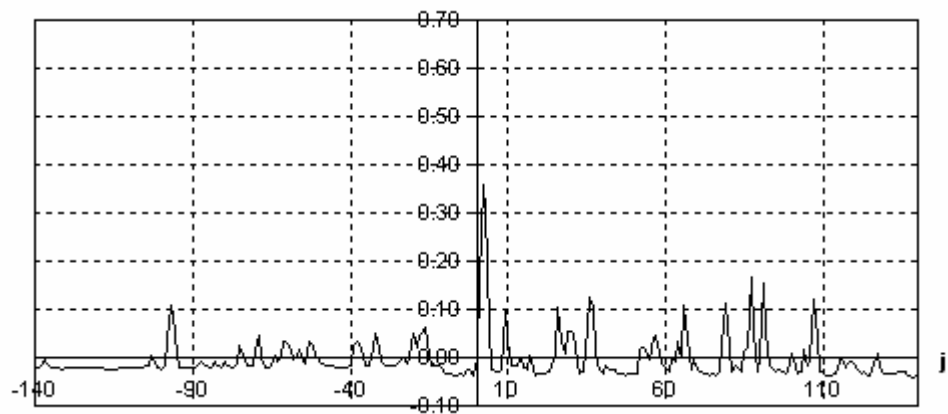


Illustration 5 – Corrélogramme croisé de la chronique de débit d'Angle et des pluies de la station MétéoFrance de Sainte Enemie.

2. Famounet

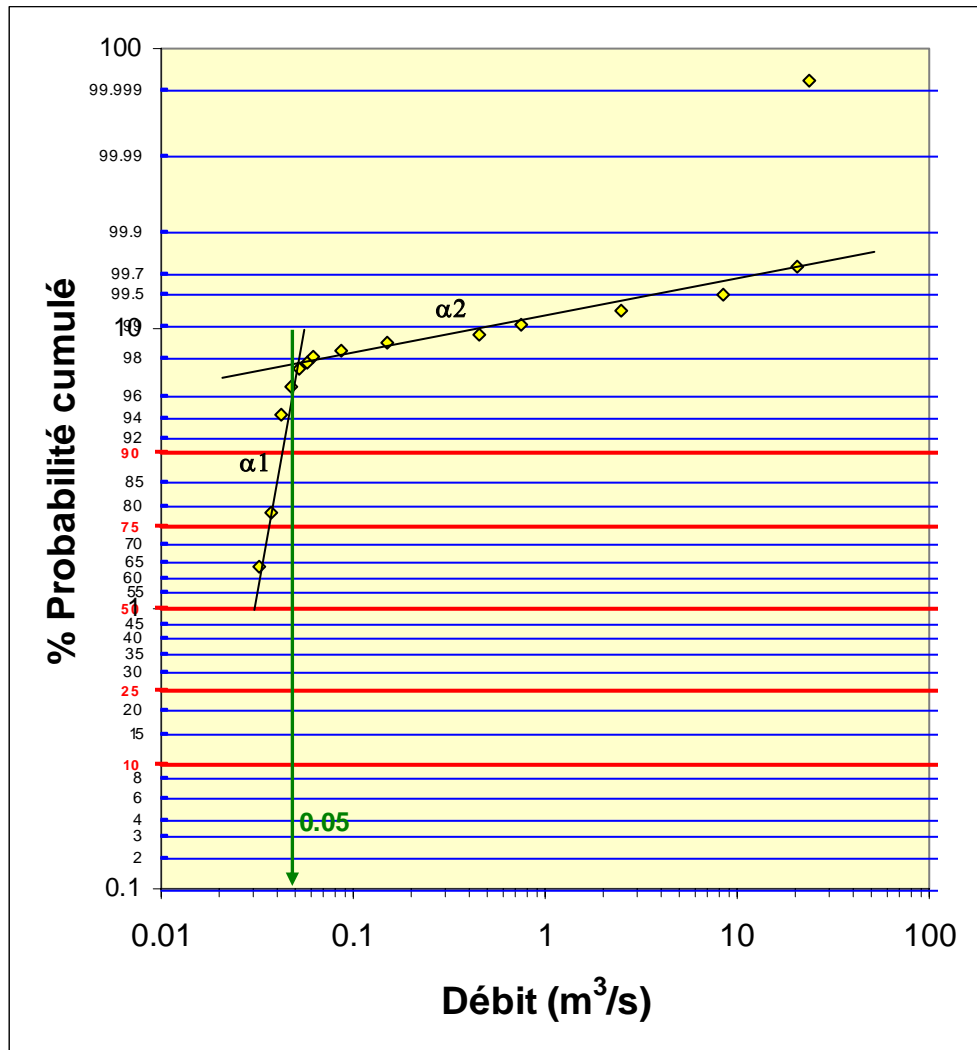
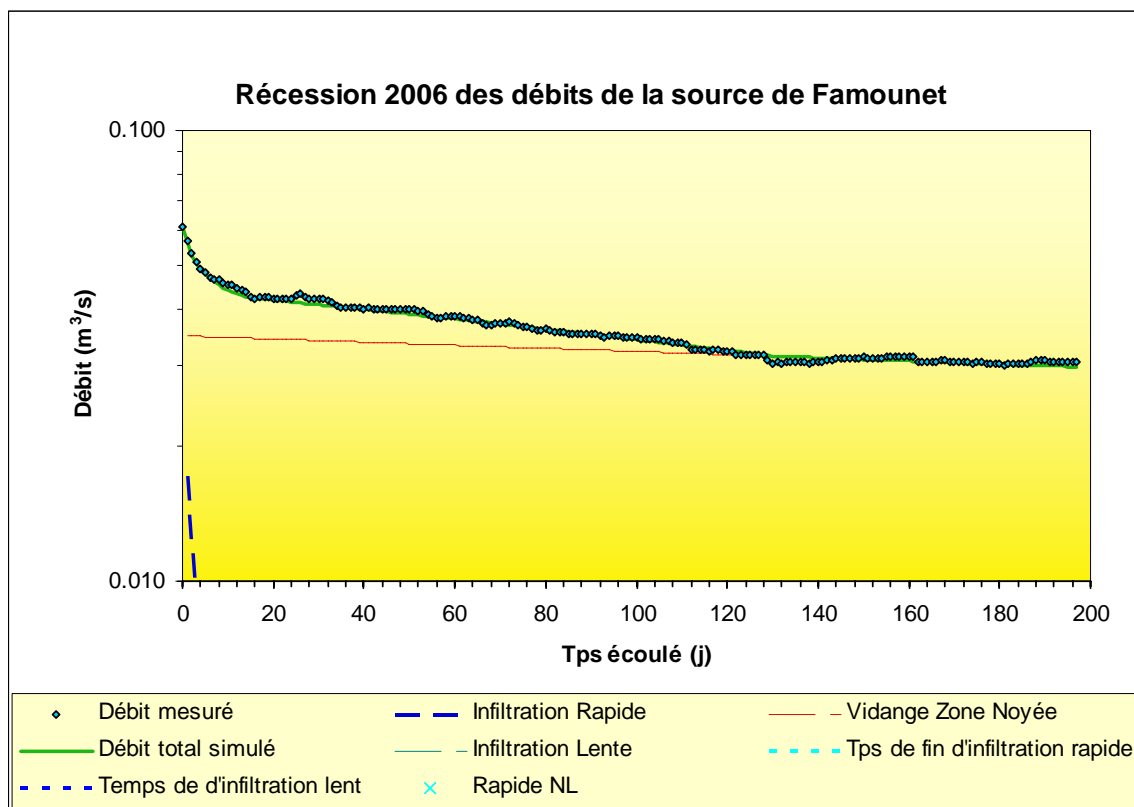


Illustration 6 – Débits classés de la source de Famounet sur l'ensemble des données (classe de débit de 0,005 m³/s).



Début Récession	11/03/06
Fin Récession	24/09/06
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	0.300
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	14
Débit d'infiltration (à t=0)	0.017
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.0001
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	130
qo_2 (débit d'infiltration à t=0)	0.009
Coef tarissement Zone Noyée	0.0008
Qo Zone noyée (m ³ /s)	0.035

vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.071
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.008
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.54
Critère de Nash (qualité de la simulation)	98.63
Volume d'infiltration rapide (million de m ³)	0.01
Volume d'infiltration lente (million de m ³)	0.05
Volume dynamique (million de m ³)	3.78
Volume moyen interannuel	1.2
Pouvoir régulateur K	3.2

Illustration 7 - Décomposition de la récession 2006 selon la méthode modifiée de Mangin.

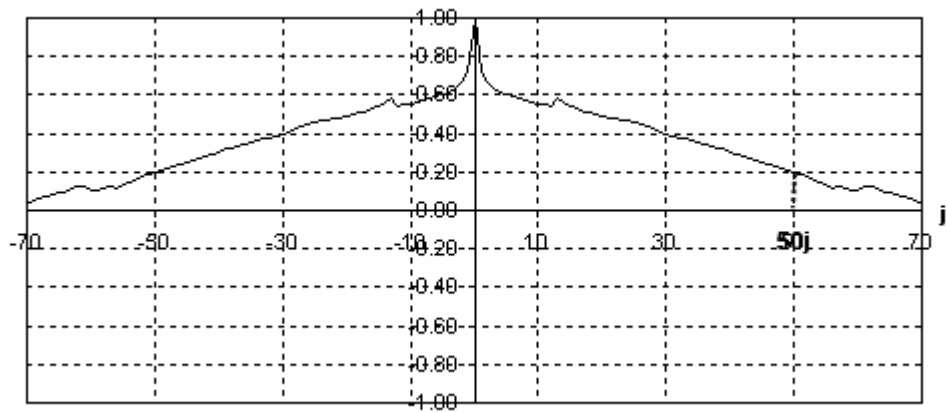


Illustration 8 - Corrélogramme simple de la chronique de débit de Famounet.

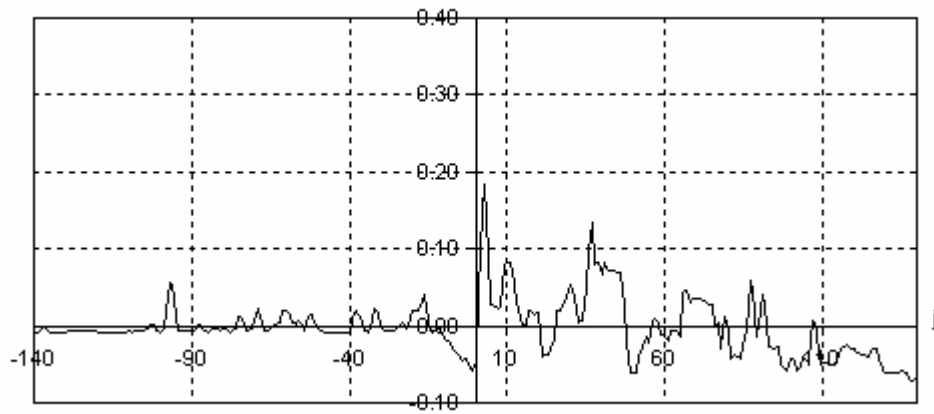


Illustration 9 - Corrélogramme croisé de la chronique de débit de Famounet et des pluies de la station MétéoFrance de Sainte Enimie.

3. Saint-Chély du Tarn

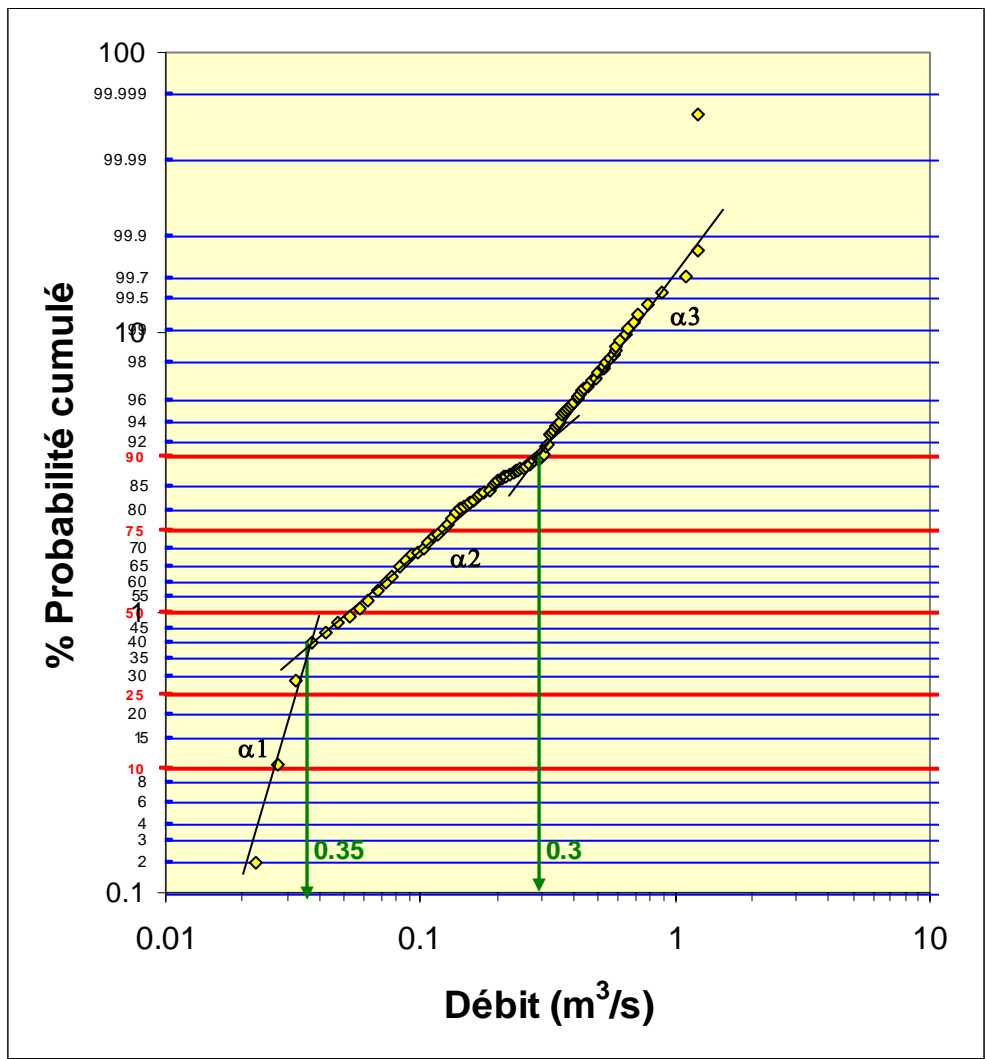
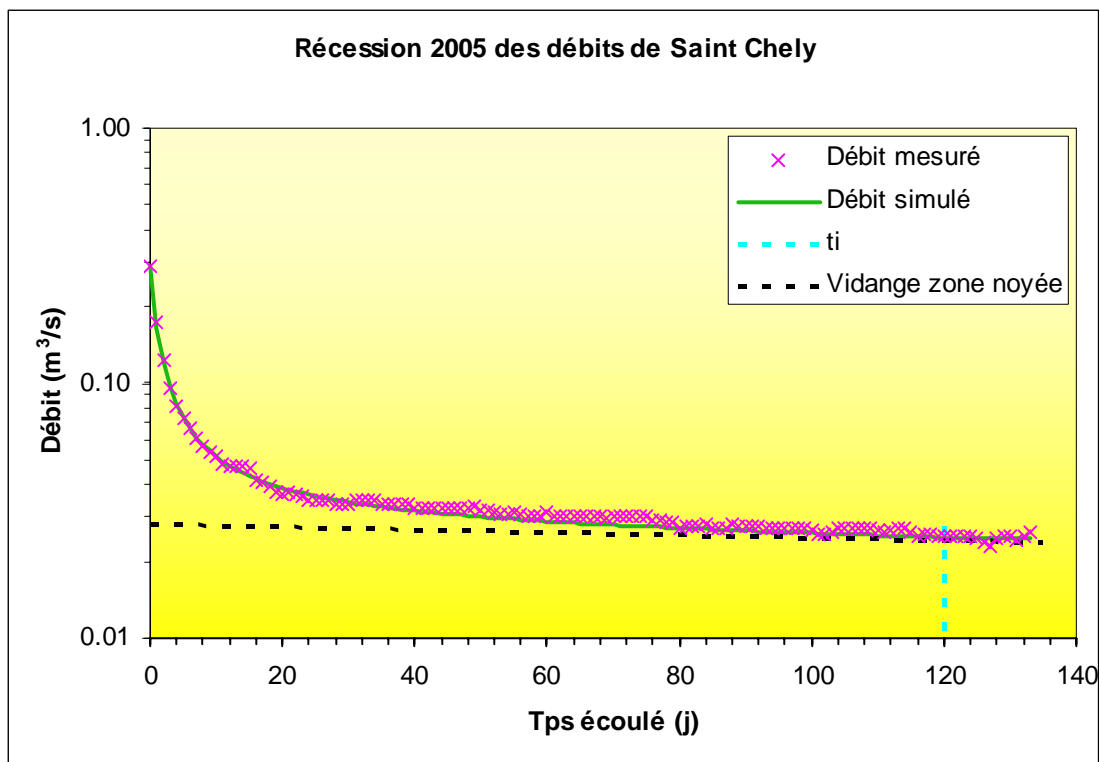


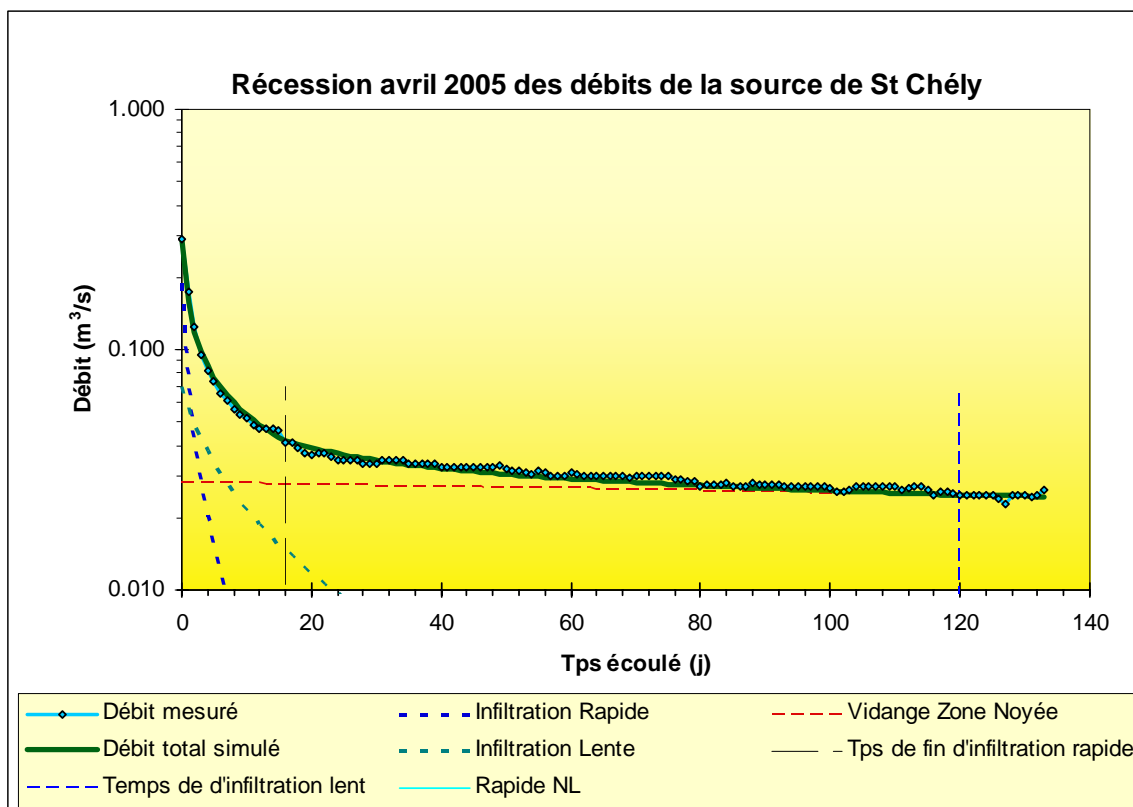
Illustration 10 – Débits classés de la source de Saint-Chély sur l'ensemble des données (classe de débit de 0,005 m³/s).



Début Récession	26/04/2005
Fin Récession	06/09/2005
alpha (coef tarissement)	0.001
epsilon (coef d'hétérogénéité d'écoulement)	0.9000
QRo	0.028
ti (tps fin d'infiltration)	120

Q0 (débit de crue debut recession)	0.288
qo (débit d'infiltration à t=0)	0.260
eta (vitesse moyenne d'infiltration)	0.0083
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.35
Critère de Nash (qualité de la simulation)	99.73
Vdyn (million de m ³)	2.42
Vdyn -vol écoulé après ti	2.24
Vinfil (million de m ³)	0.10
Vinterannuel (million de m ³)	3.7
Pouvoir régulateur K	0.7

Illustration 11 – Décomposition de la récession 2005 selon la méthode de Mangin (1970).



Début Récession	26/04/05
Fin Récession	06/09/05
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	1.500
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	16
Débit d'infiltration (à t=0)	0.190
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.2
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	120
qo_2 (débit d'infiltration à t=0)	0.07
Coef tarissement Zone Noyée	0.0010
Qo Zone noyée (m ³ /s)	0.028

vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.063
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.008
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.22
Critère de Nash (qualité de la simulation)	98.07
Volume d'infiltration rapide (million de m ³)	0.04
Volume d'infiltration lente (million de m ³)	0.07
Volume dynamique (million de m ³)	2.42
Volume moyen interannuel	3.7
Pouvoir régulateur K	0.7

Illustration 12 - Décomposition de la récession 2006 selon la méthode modifiée de Mangin.

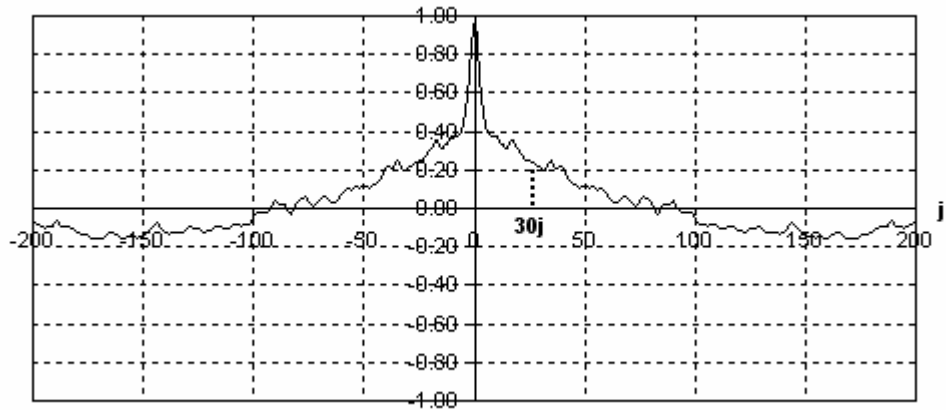


Illustration 13 - Corrélogramme simple de la chronique de débit de Saint-Chély.

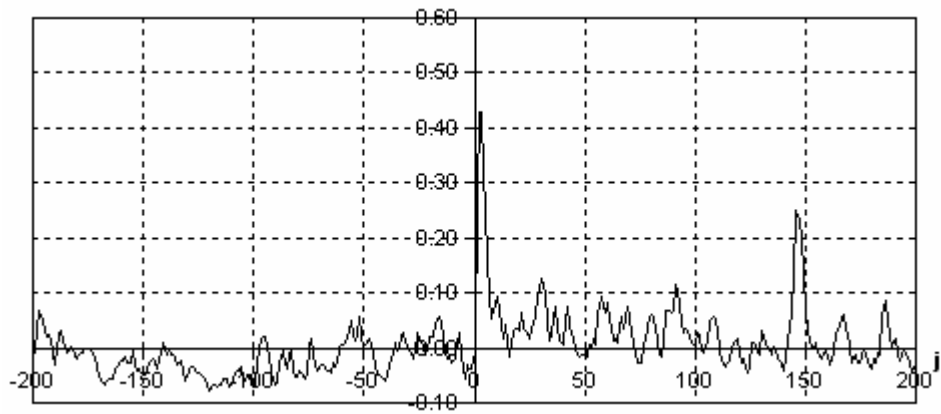


Illustration 14 - Corrélogramme croisé de la chronique de débit de Saint-Chély et des pluies de la station MétéoFrance de Sainte Enimie.

4. Cénarète

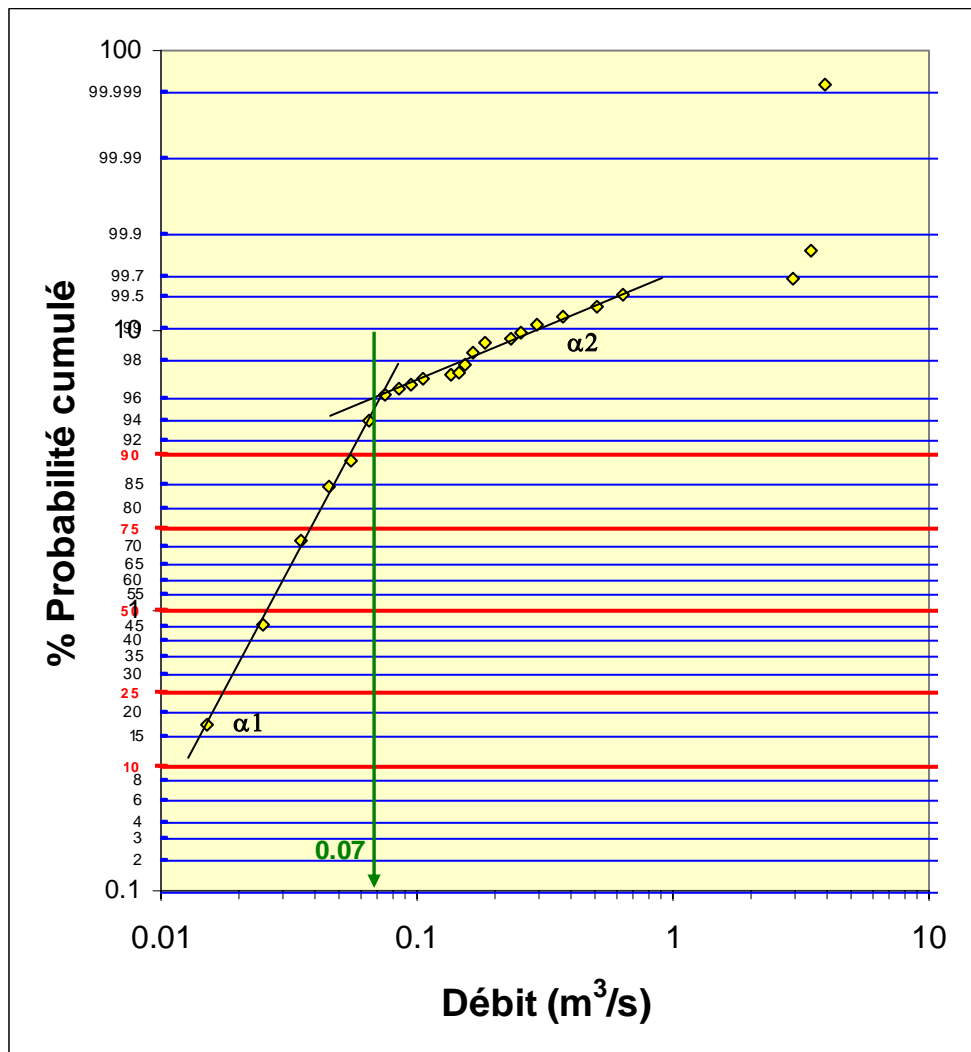
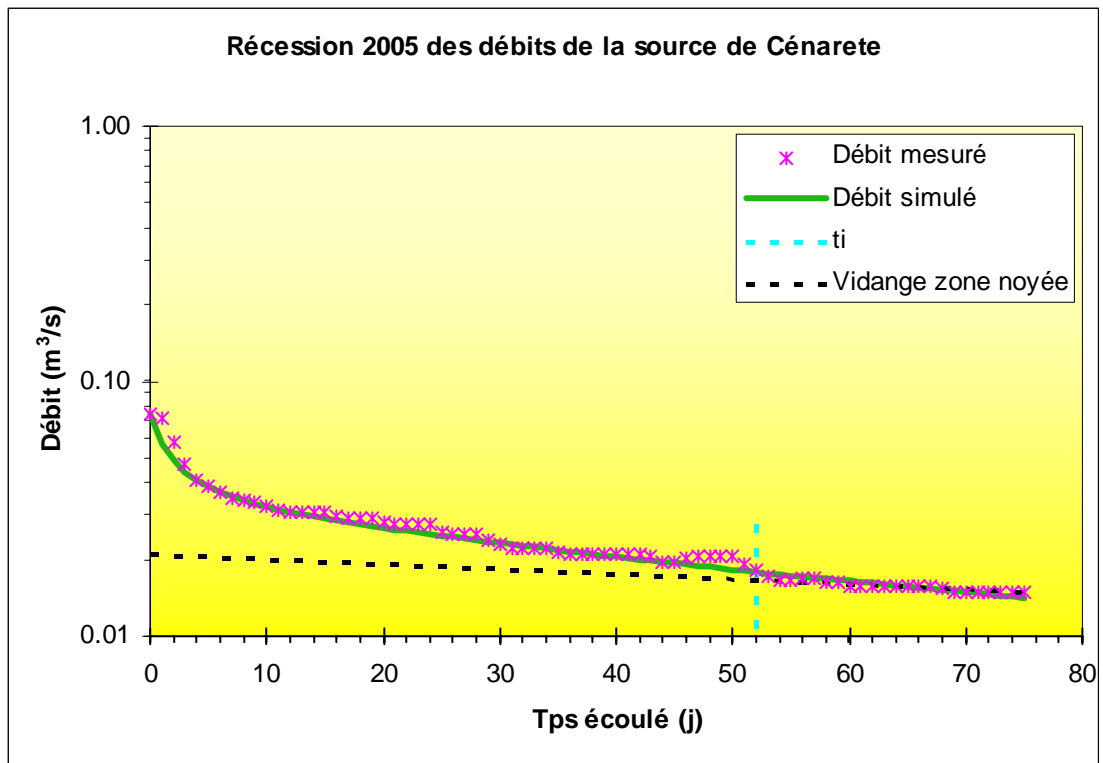


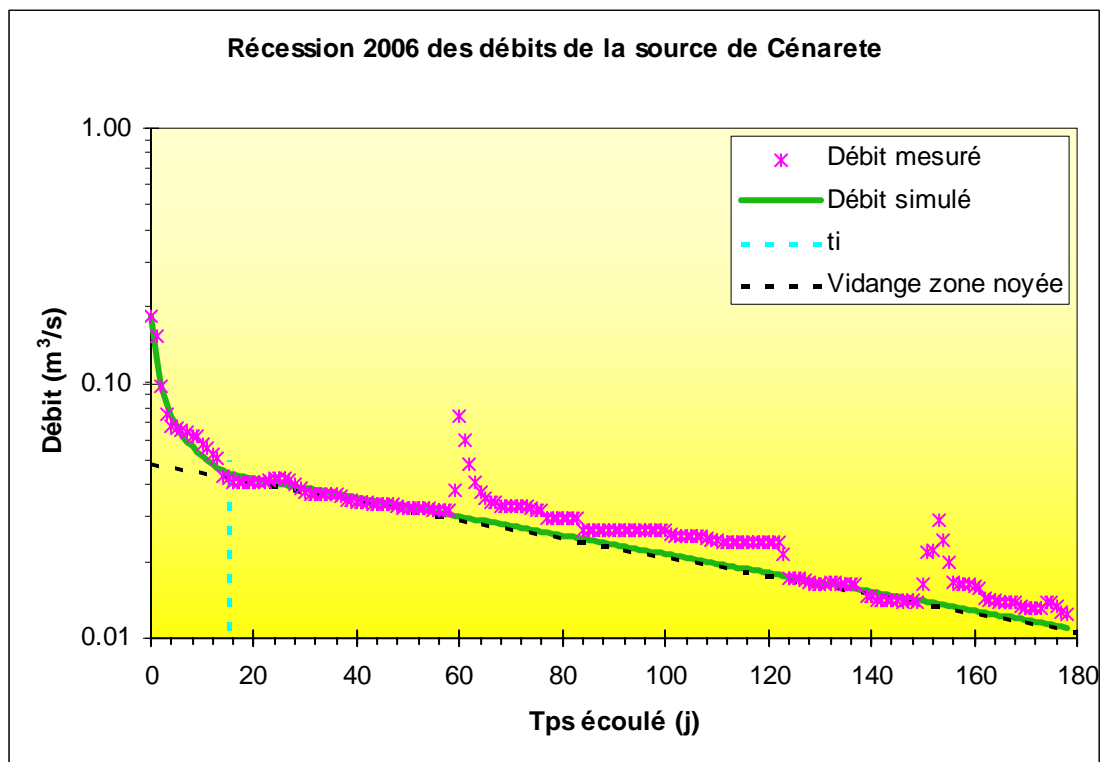
Illustration 15 - Débits classés de la source de Cénarète sur l'ensemble des données non influencées par la planche (classe de débit de 0,01 m^3/s).



Début Récession	14/05/2005
Fin Récession	28/07/2005
alpha (coef tarisement)	0.01
epsilon (coef d'hétérogénéité d'écoulement)	0.6000
QRo	0.030
ti (tps fin d'infiltration)	52

Q0 (débit de crue debut recession)	0.074
qo (débit d'infiltration à t=0)	0.044
eta (vitesse moyenne d'infiltration)	0.0192
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.44
Critère de Nash (qualité de la simulation)	96.99
Vdyn (million de m ³)	0.26
Vdyn-vol écoulé après ti	0.12
Vinfil (million de m ³)	0.02
Volume moyen interannuel (million de m ³)	2.2
Pouvoir régulateur K	0.1

Illustration 16 – Décomposition de la récession 2005 selon la méthode de Mangin (1970).



Début Récession	29/03/2006
Fin Récession	23/09/2006
alpha (coef tarissement)	0.0085
epsilon (coef d'hétérogénéité d'écoulement)	0.7000
QRo	0.050
ti (tps fin d'infiltration)	15

Q0 (débit de crue debut recession)	0.184
qo (débit d'infiltration à t=0)	0.134
eta (vitesse moyenne d'infiltration)	0.0667
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.36
Critère de Nash (qualité de la simulation)	91.54
Vdyn (million de m ³)	0.51
Vdyn-vol écoulé après ti	0.19
Vinfil (million de m ³)	0.03
Volume moyen interannuel (million de m ³)	2.2
Pouvoir régulateur K	0.2

Illustration 17 – Décomposition de la récession 2006 selon la méthode de Mangin (1970).

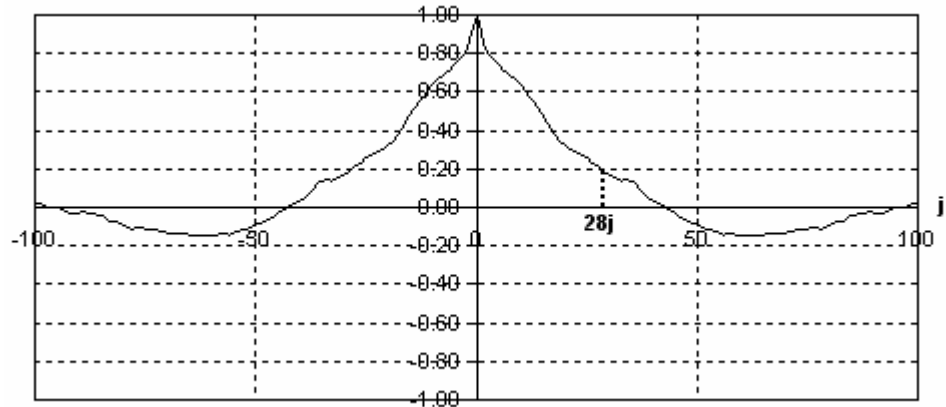


Illustration 18 - Corrélogramme simple de la chronique de débit de Cénarète.

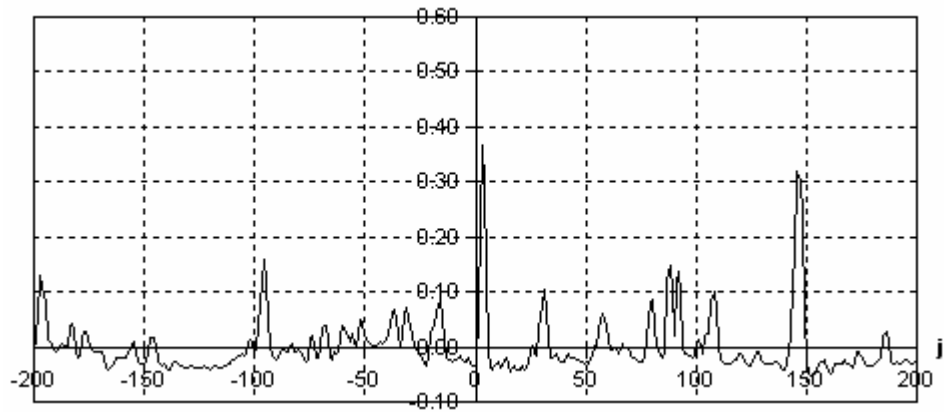


Illustration 19 - Corrélogramme croisé de la chronique de débit de Cénarète et des pluies de la station MétéoFrance de Sainte Enemie.

5. Les Fonts

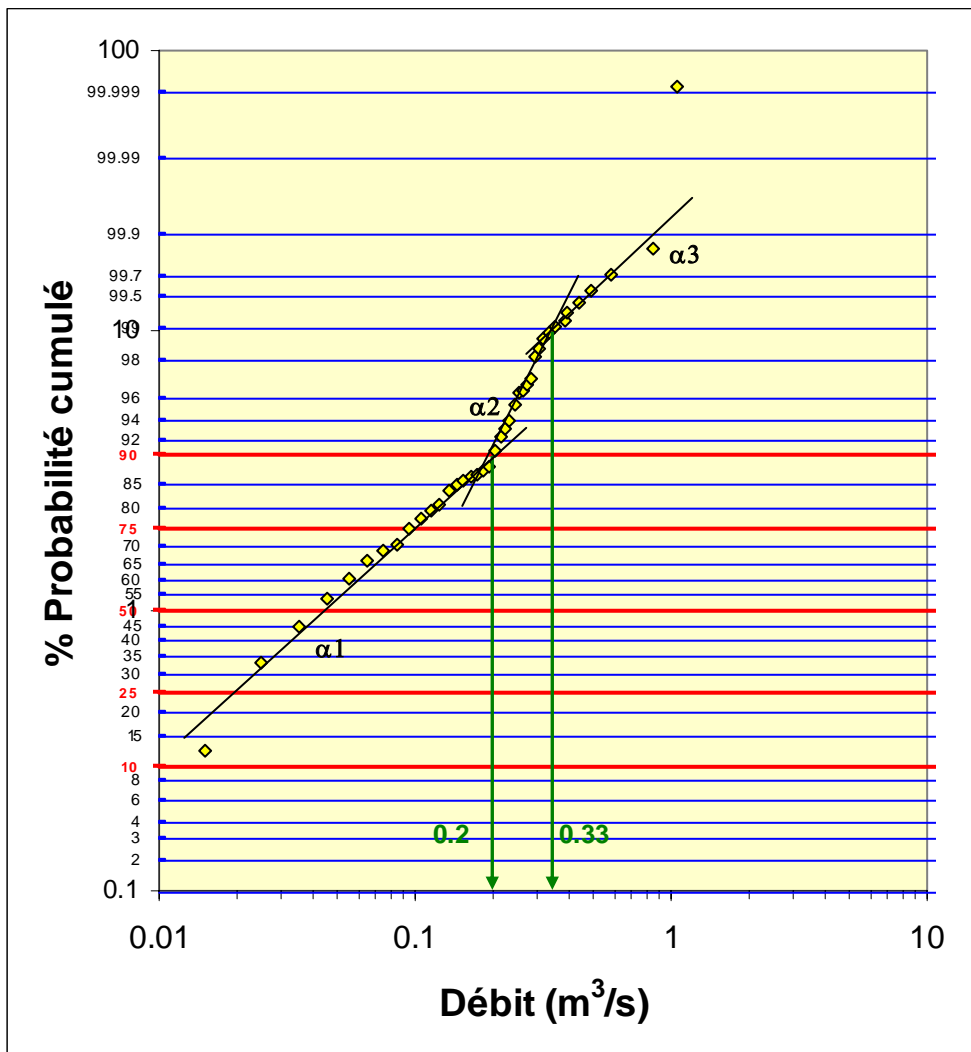
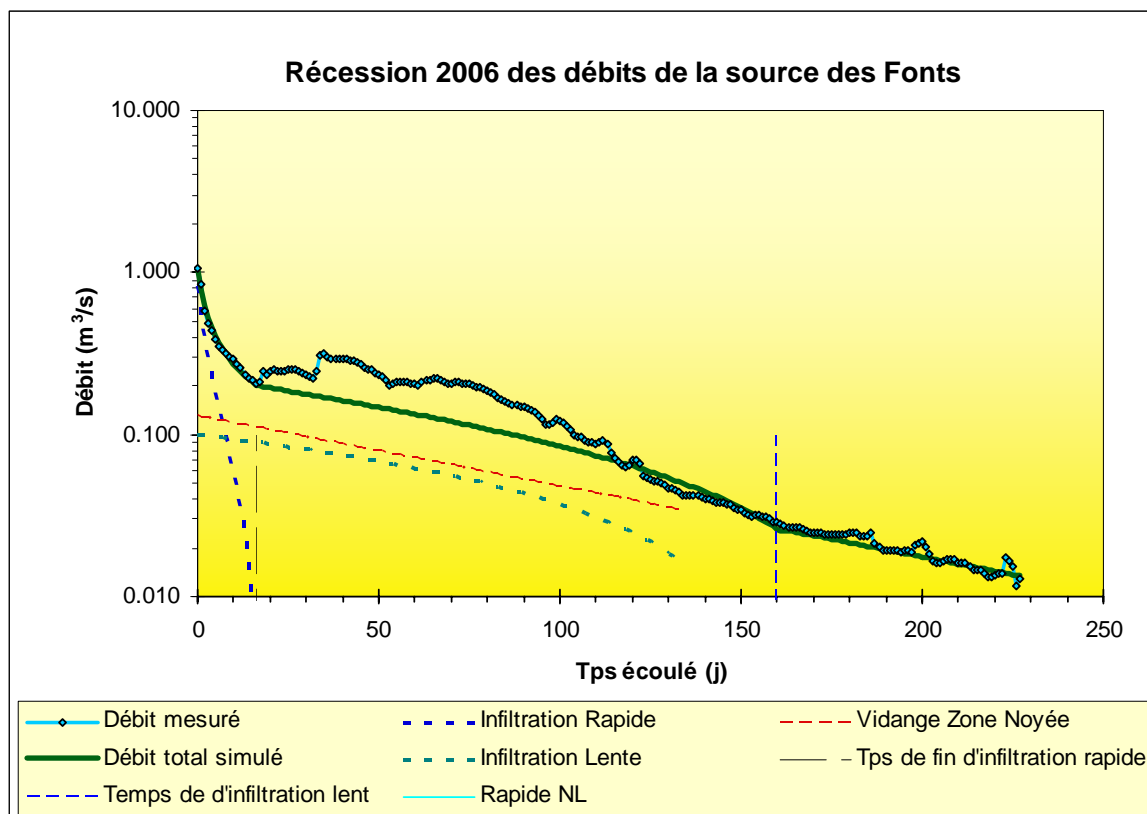


Illustration 20- Débits classés de la source des Fonts sur l'ensemble des données (classe de débit de 0,01 m³/s).



Début Récession	30/01/06
Fin Récession	14/09/06
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	0.400
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	16
Débit d'infiltration (à t=0)	0.818
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.0001
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	160
q_{0 2} (débit d'infiltration à t=0)	0.1
Coef tarissement Zone Noyée	0.0100
Q ₀ Zone noyée (m ³ /s)	0.130

vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.063
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.006
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.49
Critère de Nash (qualité de la simulation)	64.83
Volume d'infiltration rapide (million de m ³)	0.27
Volume d'infiltration lente (million de m ³)	0.69
Volume dynamique (million de m ³)	1.12
Volume moyen interannuel (million de m ³)	3.7
Pouvoir régulateur K	0.3

Illustration 21 – Décomposition de la récession 2006 selon la méthode modifiée de Mangin.

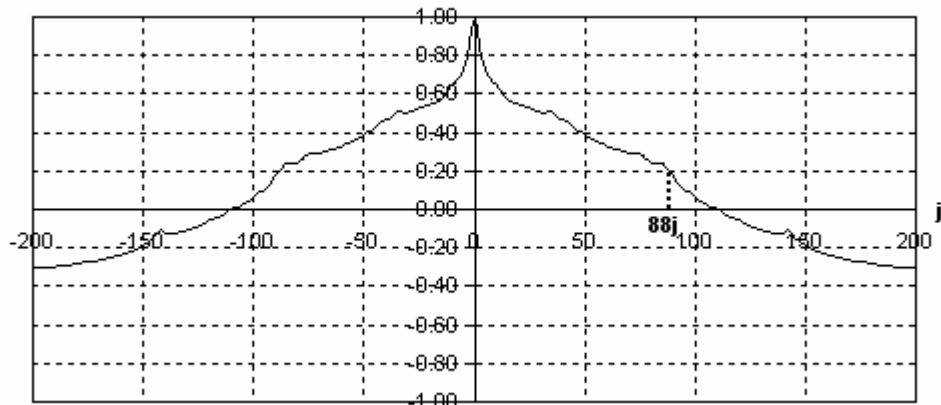


Illustration 22 - Corrélogramme simple de la chronique de débit des Fonts.

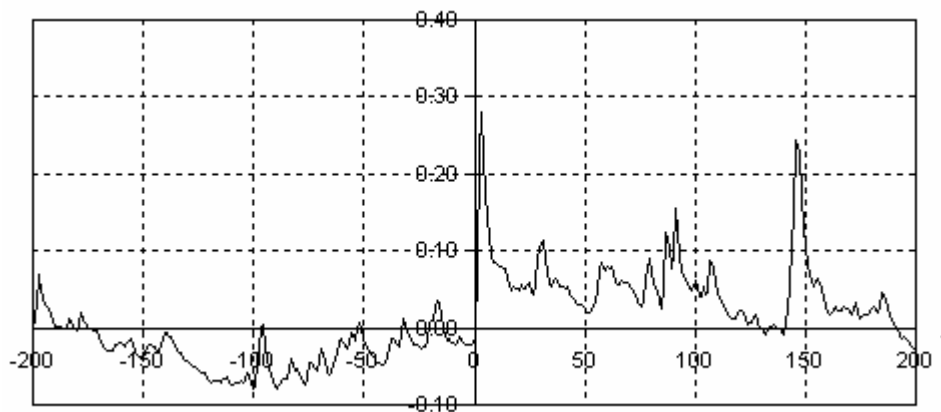


Illustration 23 - Corrélogramme croisé de la chronique de débit des Fonts et des pluies de la station MétéoFrance de Sainte Enimie.

6. Bernade

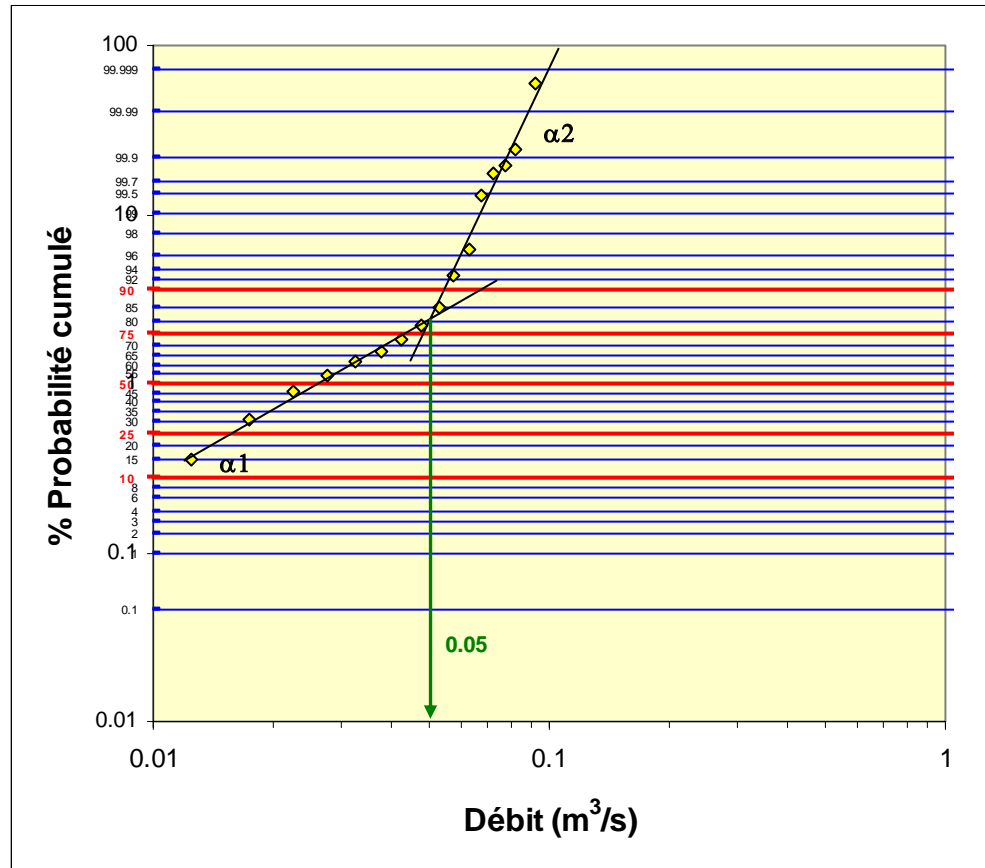
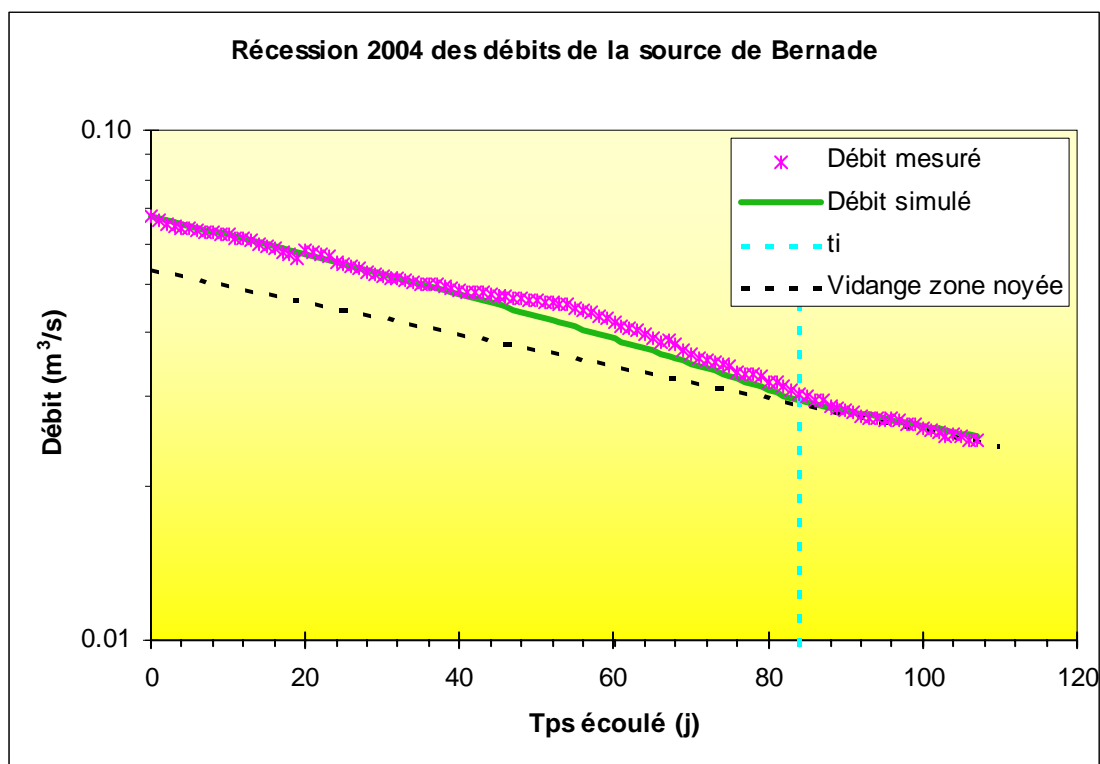


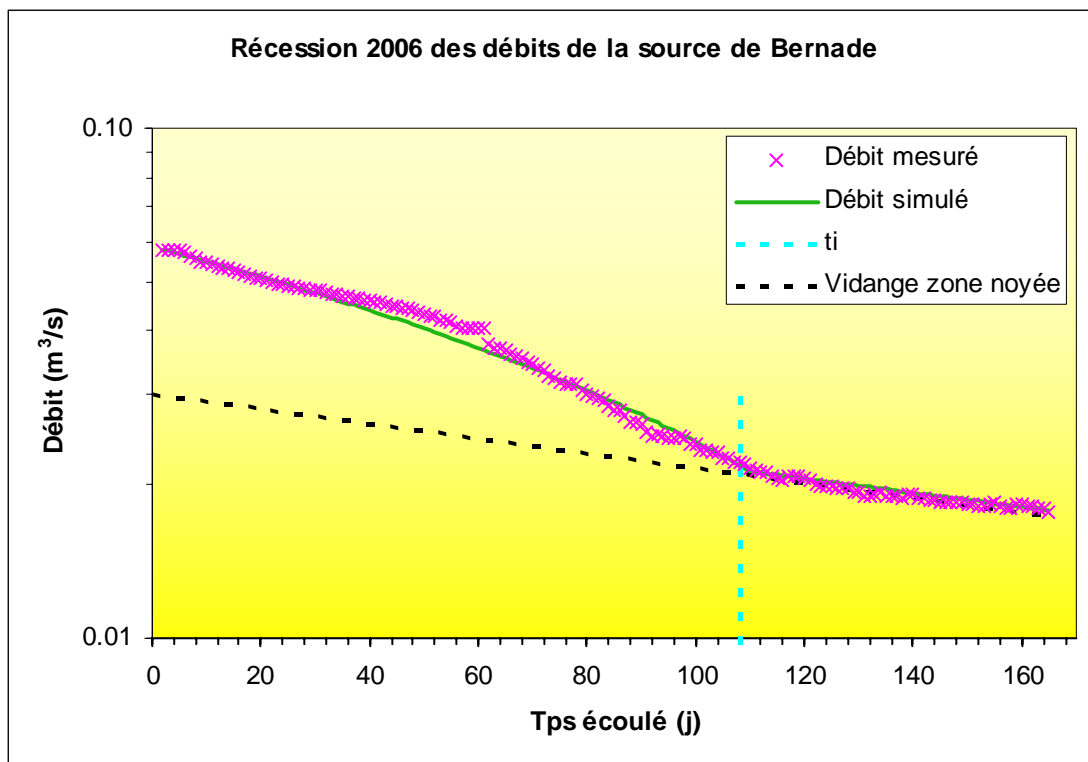
Illustration 24 - Débits classés de la source de Bernade sur l'ensemble des données (classe de débit de 0,005 m³/s).



Début Récession	01/05/2004
Fin Récession	16/08/2004
alpha (coef tarissement)	0.007
epsilon (coef d'hétérogénéité d'écoulement)	0.0001
QRo	0.053
ti (tps fin d'infiltration)	84

Q0 (débit de crue debut recession)	0.068
qo (débit d'infiltration à t=0)	0.015
eta (vitesse moyenne d'infiltration)	0.0119
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.98
Critère de Nash (qualité de la simulation)	96.90
Vdyn (million de m ³)	0.65
Vdyn-vol écoulé après ti	0.38
Vinfil (million de m ³)	0.05
Volume moyen interannuel (million de m ³)	1
Pouvoir régulateur K	0.7

Illustration 25 – Décomposition de la récession 2004 selon la méthode de Mangin (1970).



Début Récession	03/04/2006
Fin Récession	13/09/2006
alpha (coef tarisement)	0.0032
epsilon (coef d'hétérogénéité d'écoulement)	0.0010
QRo	0.030
ti (tps fin d'infiltration)	108

Q0 (débit de crue debut recession)	0.058
qo (débit d'infiltration à t=0)	0.028
eta (vitesse moyenne d'infiltration)	0.0093
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.98
Critère de Nash (qualité de la simulation)	96.54
Vdyn (million de m ³)	0.81
Vdyn-vol écoulé après ti	0.63
Vinfil (million de m ³)	0.12
Volume moyen interannuel (million de m ³)	1
Pouvoir régulateur K	0.8

Illustration 26 – Décomposition de la récession 2006 selon la méthode de Mangin (1970).

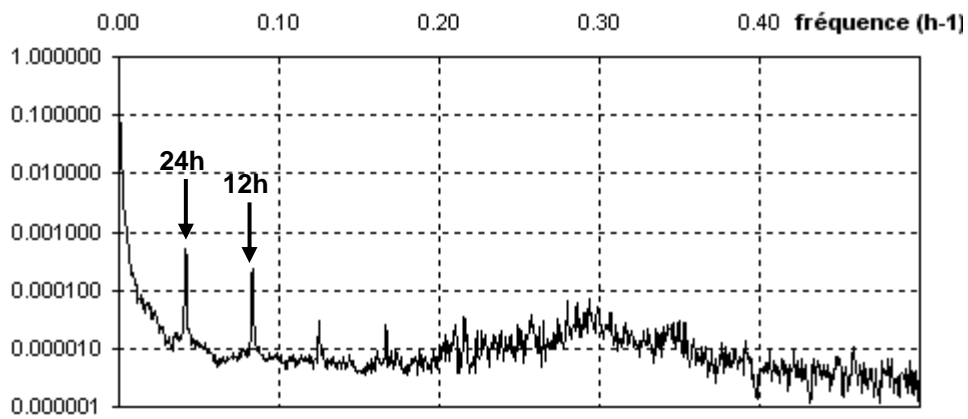


Illustration 27 – Spectre simple de la chronique de débit de la source de Bernade.

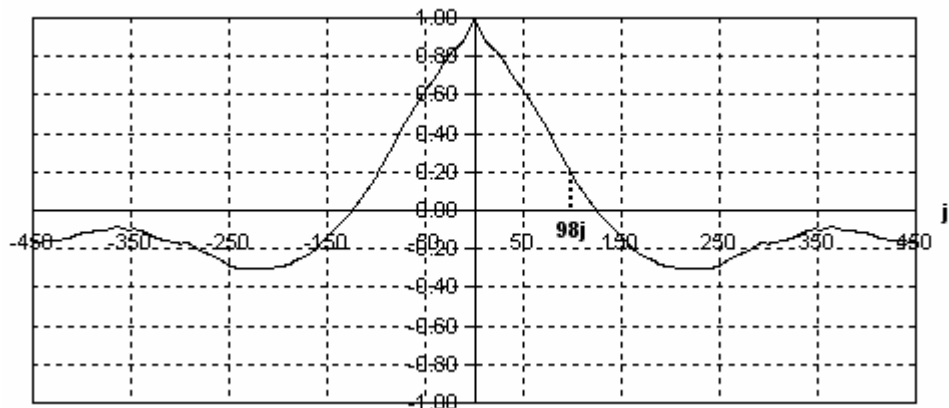


Illustration 28 - Corrélogramme simple de la chronique de débit de Bernade.

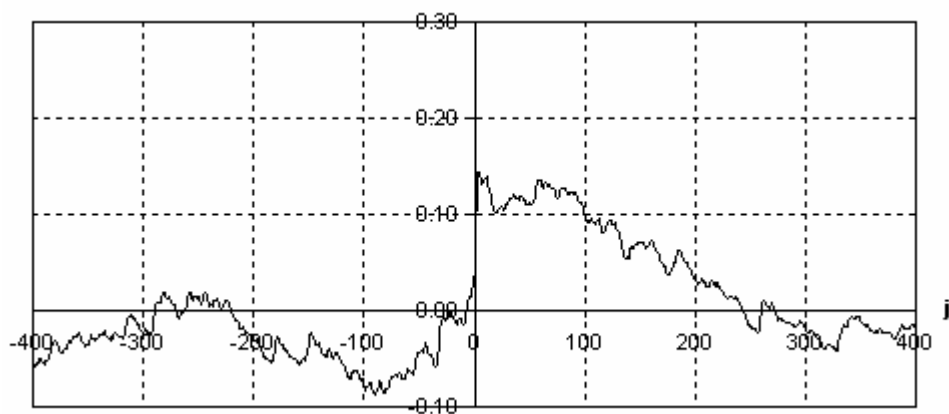


Illustration 29 - Corrélogramme croisé de la chronique de débit de Bernade et des pluies de la station MétéoFrance de Sainte Enimie.

7. Saint Frézal

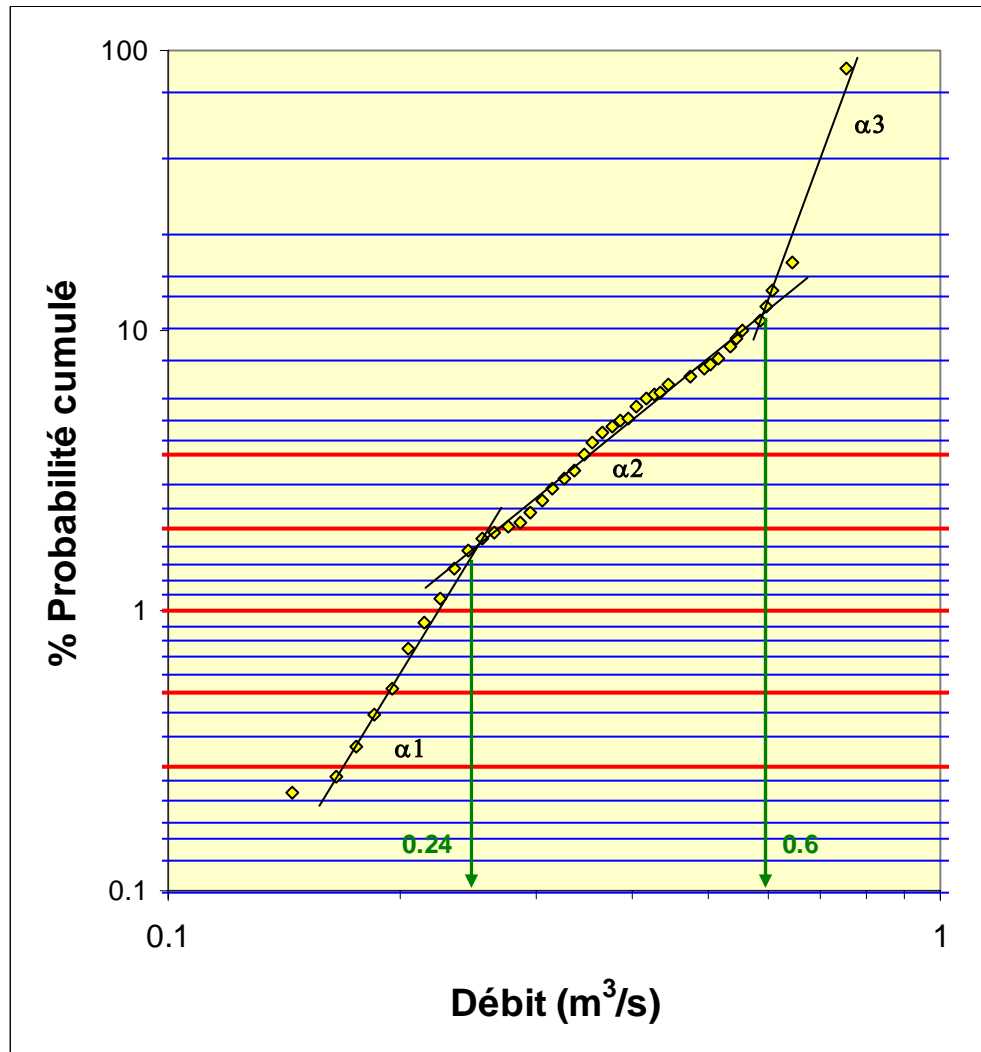
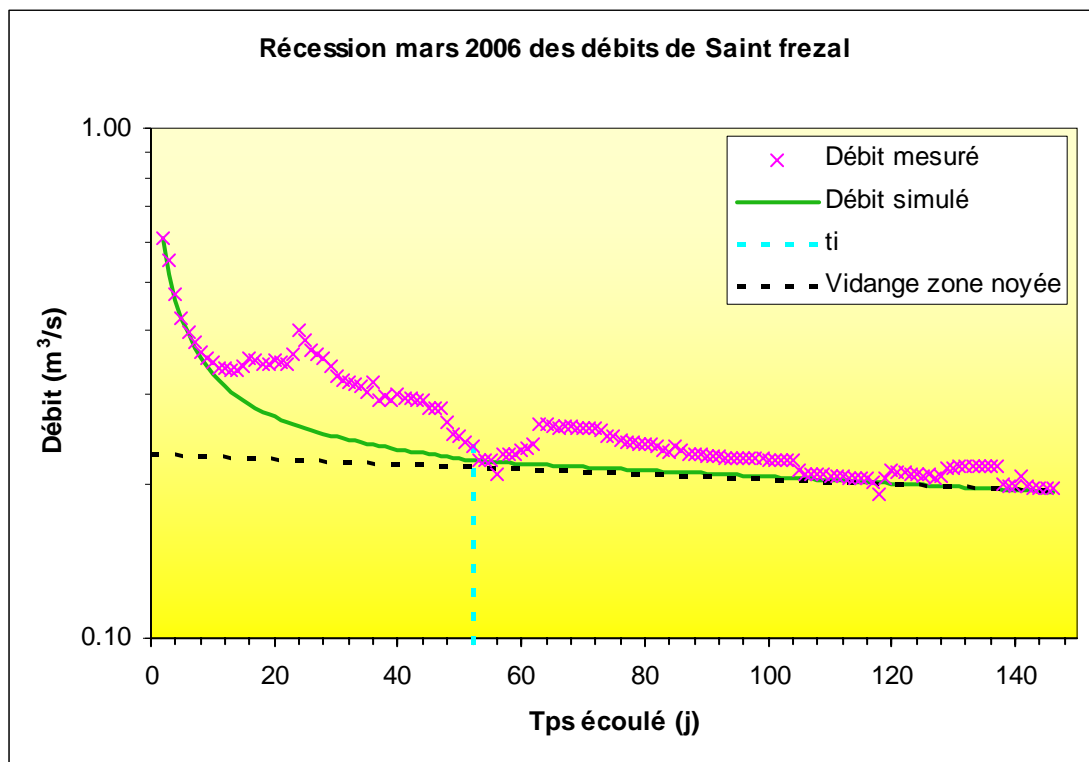


Illustration 30 - Débits classés de la source de Saint Frézal sur l'ensemble des données (classe de débit de 0,01 m³/s).



Début Récession	11/03/2006
Fin Récession	02/08/2006
alpha (coef tarissement)	0.0015
epsilon (coef d'hétérogénéité d'écoulement)	0.3000
QRo	0.240
ti (tps fin d'infiltration)	52

Q0 (débit de crue debut recession)	0.610
qo (débit d'infiltration à t=0)	0.370
eta (vitesse moyenne d'infiltration)	0.0192
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.60
Critère de Nash (qualité de la simulation)	51.02
Vdyn (million de m ³)	13.82
Vdyn-vol écoulé après ti	12.33
Vinfil (million de m ³)	0.23
Volume moyen interannuel (million de m ³)	8.1
Pouvoir régulateur K	1.7

Illustration 31 – Décomposition de la récession 2006 selon la méthode de Mangin (1970).

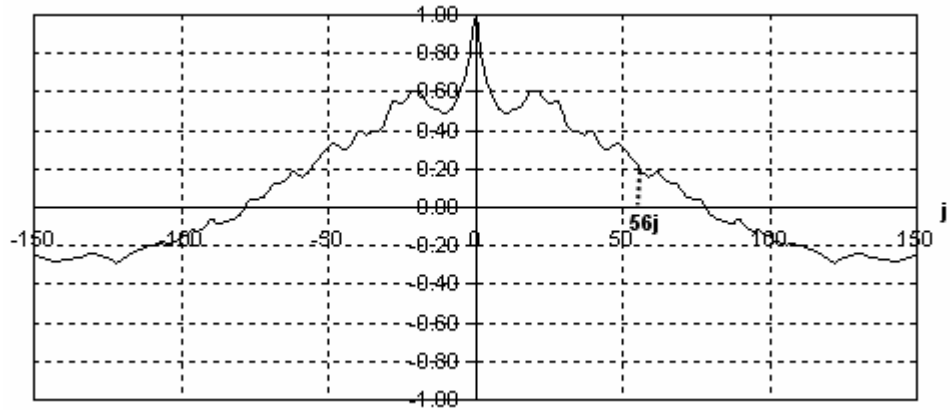


Illustration 32 - Corrélogramme simple de la chronique de débit de Saint Frézal.

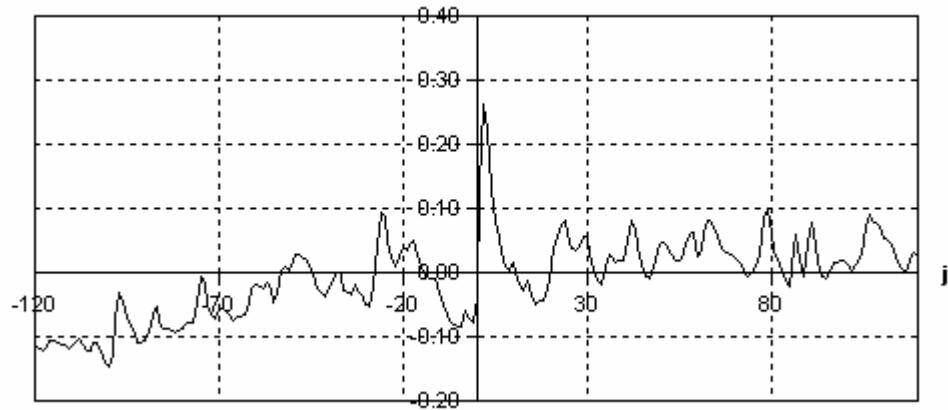


Illustration 33 - Corrélogramme croisé de la chronique de débit de Saint Frézal et des pluies de la station MétéoFrance de Sainte Enimie.

8. Urugne

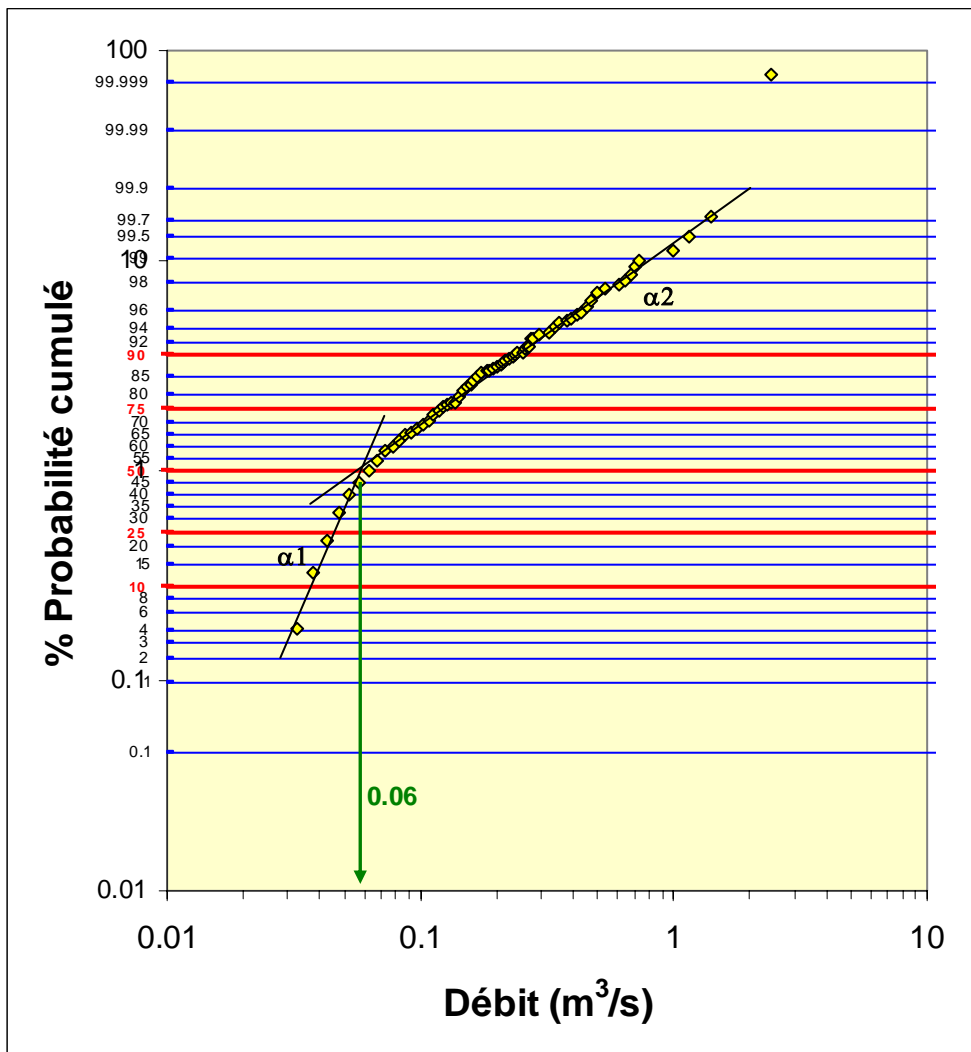
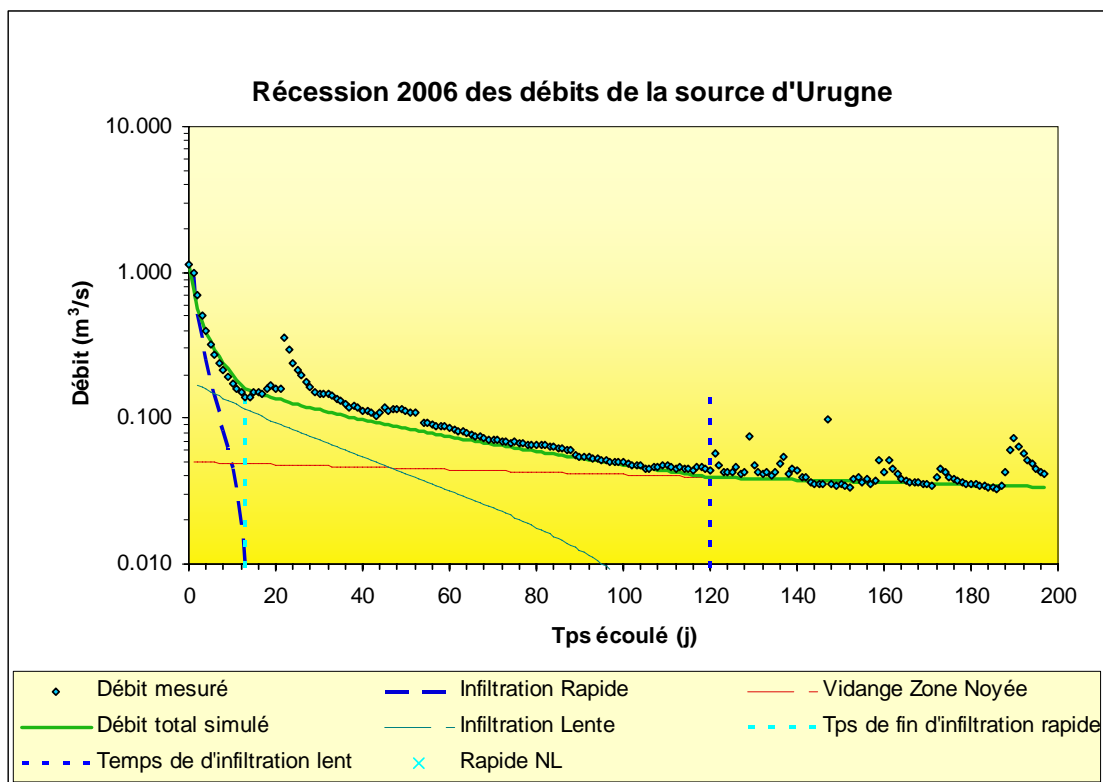


Illustration 34 - Débits classés de la source d'Urugne sur l'ensemble des données (classe de débit de 0,01 m³/s).



Début Récession	11/03/06
Fin Récession	24/09/06
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	0.600
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	13
Débit d'infiltration (à t=0)	0.928
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.03
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	120
qo_2 (débit d'infiltration à t=0)	0.17
Coef tarissement Zone Noyée	0.0020
Qo Zone noyée (m ³ /s)	0.050

vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.077
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.008
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.38
Critère de Nash (qualité de la simulation)	97.79
Volume d'infiltration rapide (million de m ³)	0.24
Volume d'infiltration lente (million de m ³)	0.47
Volume dynamique (million de m ³)	2.16
Volume moyen interannuel	4
Pouvoir régulateur K	0.5

Illustration 35 – Décomposition de la récession 2006 selon la méthode modifiée de Mangin.

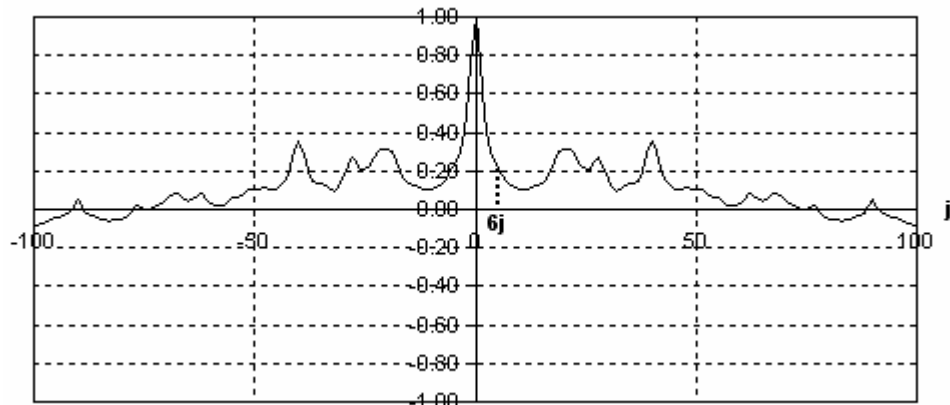


Illustration 36 - Corrélogramme simple de la chronique de débit d'Urugne.

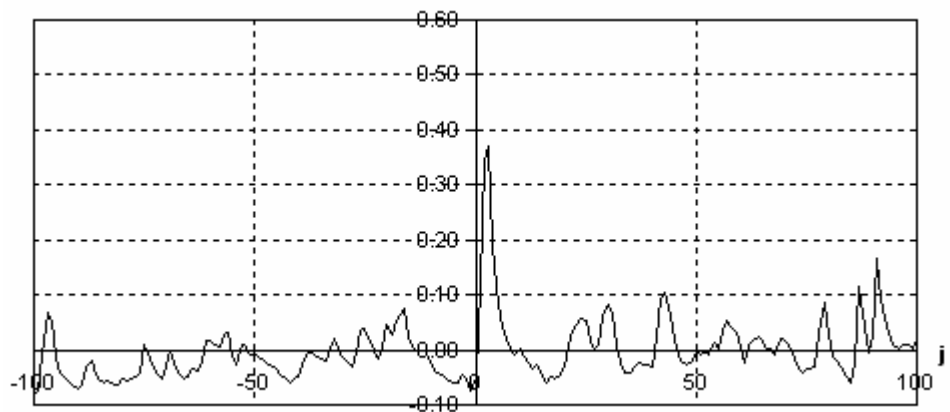


Illustration 37 - Corrélogramme croisé de la chronique de débit d'Urugne et des pluies de la station MétéoFrance de Sainte Enemie.



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service EAU
Unité RMD
1039 rue de Pinville
34000 Montpellier - France
Tél. : 04 67 15 79 90