



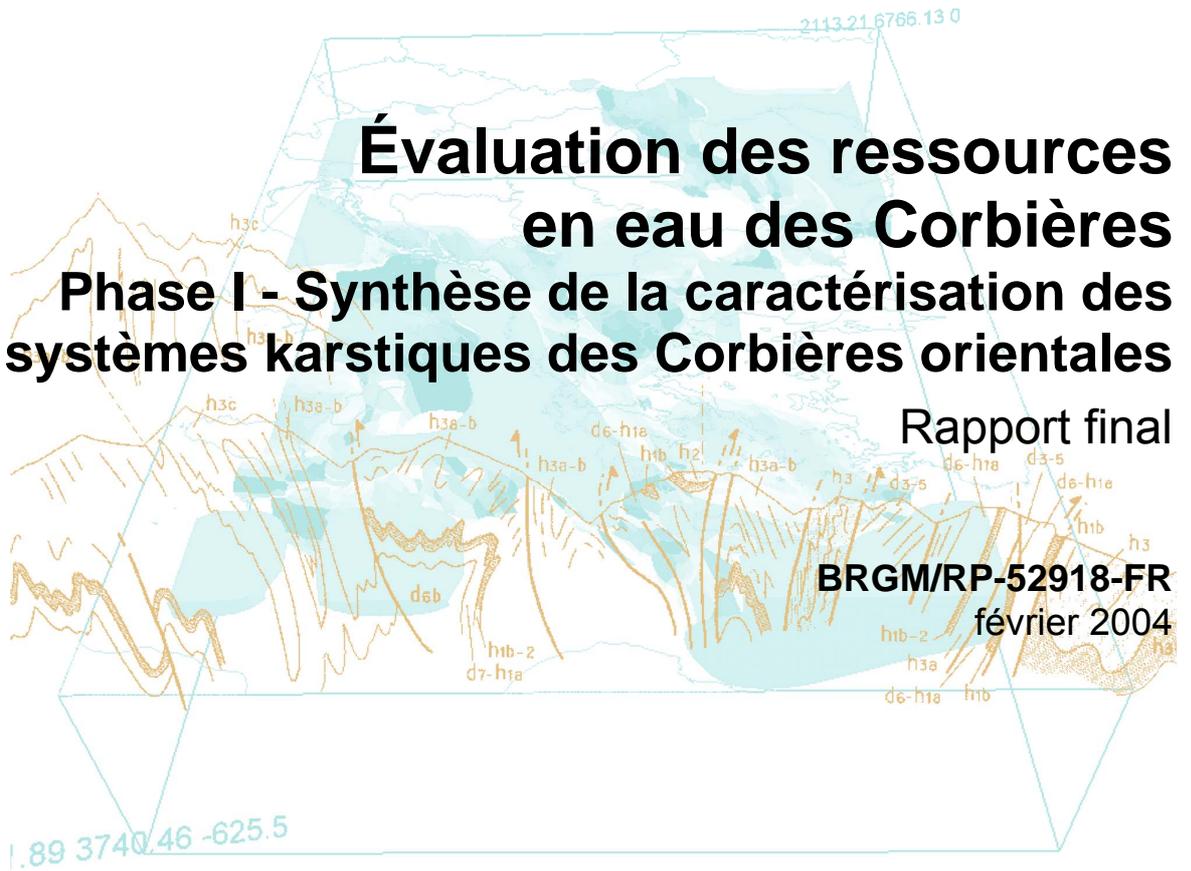
Évaluation des ressources en eau des Corbières

Phase I - Synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des Corbières orientales

Rapport final

BRGM/RP-52918-FR

février 2004



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Évaluation des ressources en eau des Corbières

Phase I - Synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des Corbières orientales

Volume 1 - Moyens mis en œuvre et
méthodologie de caractérisation

Rapport final



BRGM/RP-52918-FR
février 2004

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2004-EAU-01

N. Dörfliger, B. Ladouche, P. Le Strat

Avec la collaboration de

B. Aunay, J. Cubizolles, C. Du Couëdic, J.L. Izac et P. Thomson
Contrôle Qualité : P. Lachassagne & M. Bakalowicz



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : Hydrogéologie, Karst, Métrologie, Corbières, Font Estramar, Font Dame, Synclinal du Bas-Agly, Carte géologique numérique, Sources Mouillère, Tirounère, Verdoble, Adoux-Las Bordes.

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

Dörfliger N., Ladouche B., Le Strat P., avec la collaboration de Aunay B., Cubizolles J., Du Couëdic C., Izac J.L. et Thomson P. (2004) - Évaluation des ressources en eau des Corbières. Phase I - Synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des Corbières orientales. Rapport final. Volume 1 - Moyens mis en œuvre et méthodologie de caractérisation. BRGM/RP-52918-FR, 107 p., 85 ill., 2 ann.

Synthèse

Dans le cadre du projet « Évaluation des ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières » initié au cours du premier trimestre 2001, projet cofinancé par les conseils généraux des Pyrénées-Orientales et de l'Aude, par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse et le BRGM (dotation de recherche), cinq systèmes karstiques des Corbières orientales ont fait l'objet de suivi, en vue de caractériser leur ressource et fonctionnement hydraulique. Ce projet participe à la croissance des connaissances sur le fonctionnement des principaux systèmes karstiques du secteur afin de proposer des solutions pour :

- assurer une gestion durable des eaux souterraines et respectueuse de l'environnement ;
- sécuriser l'approvisionnement actuel et futur. Ce projet s'inscrit ainsi dans la perspective de satisfaire les demandes en eau à l'horizon 2010.

Au terme de la phase I (2001-2003), quatre rapports et un volume de synthèse constituent le rendu et l'interprétation des principaux résultats concernant la caractérisation des systèmes suivants :

- système karstique des Corbières d'Opoul – Synclinal du Bas-Agly ;
- système karstique de la Mouillère ;
- système karstique de la Tirounère, système karstique du Verdoble ;
- système karstique des Adoux - Las Bordes.

Le présent rapport (vol. 1) décrit les moyens mis en œuvre au cours de la phase I (2001-2003) et les méthodes de caractérisation utilisées (géologique, hydrogéologique et hydrochimique). Cinq sources principales ont été équipées pour l'acquisition de données hydrologiques, ainsi qu'un certain nombre d'ouvrages existants ou nouveaux (deux piézomètres). Des courbes de tarage ont été définies avec une moyenne de douze jaugeages pour chaque source, pour des conditions hydrologiques différentes. Des prélèvements réguliers d'eau ont été réalisés sur les sources principales et lors de campagnes spatiales au niveau du contact Karst-Plio-Quaternaire dans le Roussillon et, dans la zone nord-pyrénéenne, au contact avec le Mouthoumet. Les échantillons ont fait l'objet d'analyses géochimiques et isotopiques selon un protocole validé en comité de pilotage en 2001.

Le tableau ci-après résume le type d'équipement réalisé, les données de contrôle acquises, ainsi que les problèmes rencontrés sur certaines sources.

Site	Type d'équipement	Date d'installation	Mesures de contrôle et jaugeages	Problèmes rencontrés
Mouillère	Station OTT, h, C, T°, pluviomètre	01/2002 06/2002 (pluvio)	30 visites 18 jaugeages	Humidité station 1 ^{er} mois Carte mémoire changée 04/02
Tirounère	Station OTT, h, C, T°, modem	02/2002 (appui ANTEA)	25 visites 16 jaugeages	/
Verdoble	Station OTT, h, C, T°	1 ^{er} trimestre 2002	28 visites et 20 jaugeages	Dégâts suite à crues avril 2002 Station HS en juin 2002 Réinstallation complète août 2002 Perturbation d'acquisition sur 2002
Les Adoux-Las Bordes	Station OTT : C et T° Débit (Débitmètre Krohne)	12/2002-03/2003	20 visites 16 jaugeages	Complexité système Perturbation sur puits de mesures (vandalisme) Problème perturbation électrique sur débitmètre Incidents sur câble conductivimètre (arrachés accidentellement lors de travaux sur le site pour le compte du syndicat des eaux)
Font Estramar Font Dame Synclinal du Bas-Agly + Corbières d'Opoul	Station OTT, h, C, T° Station OTT, h, C, T° Piézo : h, et/ou C, T°	03/2001 03/2001 01/2001 ↔ 06/2003 (piézomètre 105) 06/2002 (Baixas, piézomètre 107) 02/2003 Rivesaltes, Roboul, AEP Opoul	30 visites 15-20 jaugeages	Vol de l'Orphimède OTT à Baixas, remplacement sonde pression (06/2002)

Légende : - h : mesure de niveaux d'eau
 - C : conductivité électrique de l'eau
 - T° : température de l'eau en degré Celsius.

Sommaire

1. Introduction	13
2. Méthodes de caractérisation	17
2.1. IDENTIFICATION GÉOLOGIQUE	17
2.1.1. Carte géologique numérique	18
2.1.2. Synthèse géologique régionale	18
2.1.3. Géométrie et stratigraphie des surfaces.....	19
2.1.4. Synthèse géologique locale et étude de terrain à l'échelle des systèmes karstiques	21
2.2. CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE	22
2.2.1. Bilan hydrologique et surface d'alimentation	22
2.2.2. Analyse des débits classés	24
2.2.3. Analyse des courbes de récession.....	25
2.2.4. Analyse corrélatoire et spectrale	28
2.2.5. La modélisation inverse	30
2.3. CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE.....	34
2.3.1. Utilisation des « traceurs » géochimiques	35
3. Description des sites et métrologie	43
3.1. OBJECTIFS	43
3.2. SYSTÈME KARSTIQUE « SYNCLINAL DU BAS-AGLY ».....	43
3.2.1. Objectifs.....	43
3.2.2. Équipement des principaux exutoires.....	44
3.2.3. Équipement de forages	46
3.2.4. Mesures de contrôle	50
3.2.5. Établissement des courbes de tarage des sources.....	54
3.2.6. Prélèvements pour analyses hydrochimiques	61

3.3. SYSTÈME KARSTIQUE DE LA MOUILLÈRE	61
3.3.1. Objectifs	61
3.3.2. Description du site.....	67
3.3.3. Équipement de la source	68
3.3.4. Mesures de contrôle.....	71
3.3.5. Établissement des courbes de tarage de la source	71
3.3.6. Prélèvements pour analyses hydrochimiques et isotopiques	73
3.4. SYSTÈME KARSTIQUE DE LA TIROUNÈRE	75
3.4.1. Objectifs	75
3.4.2. Description du site.....	75
3.4.3. Équipement.....	76
3.4.4. Mesures de contrôle.....	77
3.4.5. Établissement des courbes de tarage de la source	79
3.4.6. Prélèvements pour analyses hydrochimiques.....	82
3.5. SYSTÈME KARSTIQUE DU VERDOUBLE	84
3.5.1. Objectifs	84
3.5.2. Description du site.....	84
3.5.3. Équipement.....	85
3.5.4. Mesures de contrôle.....	87
3.5.5. Établissement des courbes de tarage de la source	89
3.5.6. Prélèvements pour analyses hydrochimiques.....	91
3.6. SYSTÈME KARSTIQUE DE LAS BORDES-LES ADOUX.....	91
3.6.1. Objectifs	91
3.6.2. Description du site.....	93
3.6.3. Descriptif de la chambre du captage.....	95
3.6.4. Équipement.....	96
3.6.5. Mesures de contrôle.....	99
3.6.6. Mesures ponctuelles de débits.....	99
3.6.7. Prélèvements pour analyses chimiques et isotopiques	100
4. Principales références bibliographiques.....	103

Liste des illustrations

Illustration 1 - Surfaces et incisions des Corbières (Aunay <i>et al.</i> , rapport BRGM/RP-51595-FR, 2002).	21
Illustration 2 - Interprétation des ruptures de pente de la droite représentative des débits classés.....	24
Illustration 3 - Différents cas de rupture de pente de la droite représentative des débits classés (Marsaud, 1997).	25
Illustration 4 - Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (1971).	26
Illustration 5 - Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession (Mangin, 1975) – (i) paramètre d'infiltration et (k) pouvoir régulateur.	28
Illustration 6 - Origine et nature des informations apportées par les principaux éléments contenus dans les eaux des systèmes karstiques.	39
Illustration 7 - Nature des informations obtenues sur le système calco-carbonique.	40
Illustration 8 - Informations obtenues par les outils isotopiques « classiques ».	40
Illustration 9 - Source de Font Estramar.	45
Illustration 10 - Évolution temporelle de la conductivité électrique de l'eau et du débit de la source de Font Estramar.....	46
Illustration 11 - Évolution temporelle du niveau d'eau du ruisseau à Font Dame et du marnage de l'étang de Salses Leucate.....	47
Illustration 12 - Évolution temporelle de la conductivité électrique de l'eau au niveau du ruisseau de Font Dame.....	47
Illustration 13 - Dénomination et coordonnées des forages équipés pour un suivi des niveaux d'eau.	48
Illustration 14 - Localisation des points d'eau suivis au niveau du synclinal du Bas-Agly.....	49
Illustration 15 - Évolution de piézométrie à Baixas et à Cases de Pène depuis le 28/03/2001.....	49
Illustration 16 - Évolution piézométrique au piézomètre 102 et pluviométrie de Périllos.....	51
Illustration 17 - Évolution piézométrique et de la température au piézomètre 104.....	51
Illustration 18 - Évolution piézométrique aux forages 102 et de Font Dame.....	52
Illustration 19 - Évolution piézométrique et de la température au forage 107 à la Combe Léon.....	52
Illustration 20 - Évolution piézométrique et de la température au forage du Roboul.....	53
Illustration 21 - Évolution piézométrique au forage artésien F2 de Rivesaltes interceptant les brèches pliocènes et au forage de l'aven de Baixas.	53
Illustration 22 - Jaugeages (micro-moulinet) réalisés sur le Verdoble.....	54
Illustration 23 - Courbe de tarage de la source de Font Estramar (1997-2003).	55

Illustration 24 - Courbe de tarage de la source de Font Estramar à partir des données des jaugeages effectués par le BRGM entre 2001 et 2003.....	55
Illustration 25 - Hydrogramme de la source de Font Estramar, à partir des différentes courbes de tarage et des reconstitutions.....	57
Illustration 26 - Évolution de la hauteur d'eau de la vasque de la source de Font Estramar et sous le pont de la N9 et correction apportée.....	57
Illustration 27 - Jaugeages de la source de Font Dame et niveaux correspondants (ruisseau et piézomètre 102).....	58
Illustration 28 - Essai de construction de la courbe de tarage de la source de Font Dame, à partir des débits et des hauteurs d'eau du ruisseau.....	58
Illustration 29 - Courbe de tarage de la source de Font Dame à partir des hauteurs d'eau au piézomètre 102.....	59
Illustration 30 - Chronique de débit de la source de Font Dame reconstituée à partir de la courbe de tarage établie en considérant les hauteurs d'eau au piézomètre 102.....	59
Illustration 31 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques de la source de Font Estramar (analyses effectuées au laboratoire d'analyses du BRGM Orléans).....	60
Illustration 32 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques de la source de Font Dame (analyses effectuées au laboratoire d'analyses du BRGM Orléans).....	62
Illustration 33 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques de l'eau de l'Agly et du Verdoble au niveau de leurs pertes (analyses effectuées au laboratoire d'analyses du BRGM Orléans).....	63
Illustration 34 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux du réseau de suivi « karst » et des campagnes spatiales « karst/Plio-quadernaire » (analyses effectuées au laboratoire d'analyses du BRGM Orléans).....	64
Illustration 35 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux échantillonnées lors des campagnes spatiales « karst/Plio-quadernaire » (analyses effectuées au laboratoire d'analyses du BRGM Orléans).....	65
Illustration 36 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux prélevées à Cases de Pène au cours du pompage et lors d'une crue (analyses effectuées au laboratoire d'analyses du BRGM Orléans).....	66
Illustration 37 - Localisation la source de la Mouillère (extrait de la carte IGN à l'échelle 1/100 000).....	67
Illustration 38 - Captage de la Mouillère et installation (coffret de mesures et pluviomètre).....	68
Illustration 39 - Coffret avec centrale d'acquisition pour la source et le pluviomètre, ainsi que batterie à la source de la Mouillère.....	69
Illustration 40 - Évolution temporelle de la conductivité et de la hauteur d'eau enregistrées à la source de la Mouillère.....	70
Illustration 41 - Évolution temporelle de la conductivité et de la température enregistrées à la source de la Mouillère.....	70
Illustration 42 - Séries temporelles du débit et de la conductivité avec mesures de contrôle, pour la source de la Mouillère.....	71

Illustration 43 - Trop-plein de la source de la Mouillère après passage de la route reliant Maury au château de Quéribus.	72
Illustration 44 - Synthèse des résultats des jaugeages de la source de la Mouillère.	72
Illustration 45 - Courbe de tarage de la source de la Mouillère.	73
Illustration 46 - Principaux résultats des analyses chimiques des échantillons prélevés à la source de la Mouillère en 2002.	74
Illustration 47 - Plan (A) et coupe (B) avec positionnement de l'instrumentation de la source de la Tirounère (d'après Faillat, 1972, modifié).....	76
Illustration 48 - Installation du câble dans une gaine de protection, assurant la liaison entre les sondes et la centrale d'acquisition.	77
Illustration 49 - Valeurs caractéristiques des paramètres physiques de la source de la Mouillère.	77
Illustration 50 - Évolution temporelle des données de hauteur d'eau du lac souterrain de la Tirounère et de la conductivité électrique.	78
Illustration 51 - Évolution temporelle de la température et de la conductivité électrique de la Tirounère.	78
Illustration 52 - Situation géographique des lieux de jaugeage au moulinet et de mesure de la conductivité sur l'Agly à l'amont et l'aval de la source de la Tirounère.	80
Illustration 53 - Seuil de jaugeage sur l'Agly à l'aval de la source de la Tirounère.....	80
Illustration 54 - Valeurs des données de jaugeage différentiel (i) par micro-moulinet et (ii)-(iii) à l'aide de la conductivité et du débit amont ou aval de l'Agly à la source de la Tirounère.	81
Illustration 55 - Courbe de tarage de la source de la Tirounère.	82
Illustration 56 - Hydrogramme de la source de la Tirounère et mesures de la conductivité électrique de l'eau.	82
Illustration 57 - Principaux résultats des analyses chimiques des échantillons prélevés à la source de la Tirounère en 2002, ainsi que données de la base de données de l'AERMC entre 1997 et octobre 2001 (réseau patrimonial).	83
Illustration 58 - Localisation des principales sources du flanc nord du synclinal de Soulatgé, dont le Gourg de l'Antre et la source du Verdoble.	85
Illustration 59 - (a) Pluviomètre permettant l'échantillonnage des pluies au niveau du toit du captage de la source du Verdoble et (b) coffret de la centrale d'acquisition des paramètres enregistrés à la source et au pluviomètre.	86
Illustration 60 - (a) Source du Verdoble en crue (11 avril 2002), et (b) détail à la sortie du captage.	86
Illustration 61 - Canal en sortie de la chambre de captage de la source du Verdoble.	87
Illustration 62 - Valeurs caractéristiques des paramètres physiques de la source du Verdoble.	87
Illustration 63 - Série temporelle de 2002 à 2004 de la température et de la conductivité de la source du Verdoble.	88
Illustration 64 - Série temporelle de la hauteur d'eau et de la conductivité de la source du Verdoble pour les années 2002 et 2003.	88

Illustration 65 - Synthèse des données de hauteur d'eau et de jaugeages relatifs aux 20 mesures effectuées à la source du Verdoble entre le 21/03/2002 et le 05/11/2003.	89
Illustration 66 - Courbe de tarage pour la source du Verdoble.....	90
Illustration 67 - Hydrogramme de la source du Verdoble pour l'année 2003.	90
Illustration 68 - Principaux résultats des analyses chimiques des échantillons prélevés à la source du Verdoble en 2002 et 2003.....	92
Illustration 69 - Localisation des sources sur la commune de Fenouillet.	93
Illustration 70 - Vue extérieure du captage de la résurgence des Adoux au lieu-dit « Les Nautes ».....	94
Illustration 71 - Vues extérieures du captage de la résurgence des Adoux et du ruisseau « Le Rau Noir » au lieu-dit « Les Nautes ».....	94
Illustration 72 - Détail intérieur de la chambre de captage 1 de la source des Adoux.	95
Illustration 73 - Détail intérieur de la chambre de captage 2 de la source des Adoux.	95
Illustration 74 - Schéma d'ensemble du dispositif de captage et de mesure du trop-plein de la source des Adoux.	97
Illustration 75 - Report du dispositif de captage des trop-pleins sur le site des Adoux.....	97
Illustration 76 - Débitmètre électromagnétique Krohne, de type DMW2000, installé sur la conduite de mesure du dispositif de captage des trop-pleins à la source des Adoux.	97
Illustration 77 - Détail du puits de mise en charge et des deux venues de captage, au niveau de la passerelle sur le site de captage de la source des Adoux.	98
Illustration 78 - Détail de l'exhaure du dispositif de mesure de l'essentiel des trop-pleins au niveau du captage de la source des Adoux.....	98
Illustration 79 - Mise en fonctionnement de trop-pleins échappant au système de contrôle.	98
Illustration 80 - Détail de trop-plein échappant au système de contrôle lors de crues.....	98
Illustration 81 - Évolution temporelle de la température et de la conductivité enregistrée à la source des Adoux.	99
Illustration 82 - Débits jaugés à l'amont et à l'aval de la source des Adoux sur le Rau Noir. ...	100
Illustration 83 - Jaugeage à l'amont de la source des Adoux sur le Rau Noir.....	101
Illustration 84 - Jaugeage à l'aval de la source des Adoux sur le Rau Noir.	101
Illustration 85 - Hydrogramme des débits mesurés par jaugeage, calculés et enregistrés à la source des Adoux et évolution de la conductivité électrique.	101

Liste des annexes

Annexe 1 - Carte géologique numérique (CD Rom).....	105
Annexe 2 - Données hydrogéologiques des suivis des points d'eau (CD-Rom).....	107

1. Introduction

Le projet « Évaluation des ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières », initié au cours du premier trimestre 2001, a pour objectif d'évaluer les ressources en eau souterraine des aquifères carbonatés des Corbières orientales. Il s'agit ainsi d'augmenter les connaissances sur le fonctionnement des principaux systèmes karstiques et de proposer des solutions pour :

- assurer une gestion durable des eaux souterraines et respectueuse de l'environnement ;
- sécuriser l'approvisionnement actuel et futur. Ce projet s'inscrit ainsi dans la perspective de satisfaire les besoins en eau à l'horizon 2010.

Cette étude est motivée par la demande des conseils généraux des Pyrénées-Orientales et de l'Aude, au vu des problèmes de ressources en eau auxquels sont confrontées un certain nombre de collectivités :

- qualité et quantité de la ressource :
 - contaminations salines et risques d'intrusions salines au niveau de la plaine du Roussillon et teneurs élevées en sulfates dans la nappe calcaire dans le secteur de Ferrals-les-Corbières et Thézan-des-Corbières,
 - contamination bactériologique épisodique au niveau de l'étang de Salses Leucate,
 - importance de l'alimentation de l'étang par les eaux souterraines karstiques et besoin de préciser l'extension du bassin d'alimentation des systèmes karstiques contributifs,
 - rôle des pertes de l'Agly et du Verdoble vis-à-vis du fonctionnement du système karstique *s.l.* du « synclinal du Bas-Agly », avec notamment les exutoires de Font Estramar et de Font Dame,
 - incidence de la gestion actuelle et future du barrage Agly sur le fonctionnement du karst ;
- sécurisation de l'approvisionnement en eau potable pour les besoins futurs ;
- exploitation possible des eaux pour le thermalisme (existence de sources avec des anomalies de CO₂ et de température).

La zone d'étude s'étend sur plusieurs dizaines de kilomètres carrés, d'ouest en est du cours d'eau l'Aude à la Méditerranée, et du nord au sud de Narbonne à Perpignan. Elle est centrée sur les formations jurassico-crétacées calcaires de la nappe de charriage des Corbières. Les zones de consommation en eau potable les plus importantes sont essentiellement les secteurs littoraux compris entre Perpignan et Narbonne, à savoir de Canet-Plage à Port-la-Nouvelle, les deux villes de Narbonne et Perpignan incluses.

Le BRGM, en partenariat avec les conseils généraux de Pyrénées-Orientales et de l'Aude et l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, a bâti un projet qui s'inscrit

dans son programme de recherche sur la structure et le fonctionnement des systèmes karstiques, en appui scientifique à la politique de l'eau des conseils généraux.

Le projet d'évaluation des ressources en eau souterraine des Corbières orientales karstiques comprend deux phases. La première phase, phase I, a débuté au premier trimestre 2001 et s'achève au premier trimestre 2004. La phase II, d'une durée de 24 mois, prend le relais au terme de la phase I, afin de vérifier la présence de la ressource en eau. Elle comprend la réalisation de forages et vise aussi à finaliser la caractérisation de certains systèmes karstiques (synclinal de Soulatgé, synclinal de Boucheville). La première phase a compris la sélection des sites à caractériser, l'instrumentation des sites, le suivi hydrologique et hydrochimique des sources et autres points d'eau (piézomètres), ainsi qu'une synthèse géologique régionale. L'ensemble de ces données a fait l'objet de différents traitements dont l'interprétation conduit à un schéma de fonctionnement et à une première évaluation de la ressource pour les différents systèmes karstiques étudiés.

L'ensemble des résultats est présenté à travers une série de cinq rapports de phase I :

- **Volume 1 : « Moyens mis en œuvre et méthodologie de caractérisation » ;**
- Volume 2 : « Caractérisation géologique et hydrogéologique du système karstique « du synclinal du Bas-Agly » ;
- Volume 3 : « Interprétation de l'essai de pompage de Cases de Pène » ;
- Volume 4 : « Caractérisation hydrogéologique des systèmes karstiques des Corbières orientales : La Mouillère – La Tirounère – Le Verdoble et les Adoux Las Bordes » ;
- Volume de synthèse : « Synthèse des principaux résultats de la caractérisation de la ressource et du fonctionnement hydrogéologique des cinq systèmes karstiques des Corbières orientales ».

Les cinq rapports complètent et synthétisent les rapports édités au cours de cette première phase :

- BRGM/RP-51103-FR : État des connaissances hydrogéologiques des Corbières orientales (2001) ;
- BRGM/RP-51394-FR : Compte rendu et interprétation du pompage d'essai de puits et nappe (longue durée) à Cases de Pène (2002) ;
- BRGM/RP-51595-FR : Introduction à la géologie du karst des Corbières, (juillet 2002) ;
- BRGM/RP-52211-FR : Corbières : évaluation de la ressource en eau souterraine des Corbières karstiques. Essai de traçage des pertes du Verdoble (2003).

Le présent rapport (vol. 1) décrit les moyens mis en œuvre au cours de la phase I (2001-2003) et les méthodes de caractérisation utilisées (géologique, hydrogéologique et hydrochimique). Cinq sources principales ont été équipées pour l'acquisition de données hydrologiques, ainsi qu'un certain nombre d'ouvrages existants ou nouveaux (deux piézomètres). Des jaugeages et traçages artificiels ont été effectués. Des

prélèvements réguliers d'eau ont été réalisés sur les sources principales et lors de campagnes spatiales au niveau du contact Karst-Plio Quaternaire dans le Roussillon et dans la zone nord-pyrénéenne, au contact avec le Mouthoumet. Les échantillons ont fait l'objet d'analyses géochimiques et isotopiques selon un protocole validé en comité de pilotage.

Ce volume 1 décrit essentiellement les méthodes de caractérisation, ainsi que les aspects métrologiques concernant les cinq principaux systèmes karstiques suivis.

2. Méthodes de caractérisation

À l'échelle d'une zone telle que les Corbières, face à un contexte géologique et structural complexe, la géométrie et la structure du milieu aquifère karstique ne peuvent pas être définies de manière déterministe. En conséquence, la démarche méthodologique requise, développée par le BRGM avec le CNRS au cours de ces dernières années, est une approche dite **fonctionnelle**. Cette approche permet de caractériser le fonctionnement global du système à partir d'informations recueillies à l'exutoire (débits, chimie, traceur artificiel) et des données des pluies à l'échelle du bassin d'alimentation de la source. Il est donc nécessaire de disposer de chroniques fiables, continues et suffisamment longues pour être représentatives des variations naturelles du milieu, le minimum étant un cycle hydrologique complet.

Les résultats sont interprétés en terme de **structure** et confrontés aux informations sur la géométrie du système et la mise en place de la karstification, obtenues à l'aide d'analyses géologiques et structurales.

Cette démarche est justifiée par l'originalité de la structure et du fonctionnement des karsts. L'utilisation de cette démarche permet de répondre aux attentes du projet à savoir une évaluation des ressources en eau souterraine en vue d'une exploitation.

2.1. IDENTIFICATION GÉOLOGIQUE

La structure des systèmes karstiques est conditionnée par la géologie, l'évolution du contexte géodynamique (dépôts sédimentaires de bassin et évolution tectonique). La détermination des géométries et de la mise en place de la karstification constitue une sous-phase de la phase I du projet. Un premier rapport, intitulé « Introduction à la géologie du karst des Corbières » (BRGM-RP/51595-FR), a été édité en juillet 2002. Cette introduction à la géologie des Corbières a permis de proposer une synthèse à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude, et de développer une méthodologie d'étude en terme de géologie karstique. Les systèmes karstiques sont replacés dans un contexte d'évolution de bassin sédimentaire ; des données acquises dans le cadre d'études géologiques antérieures et en cours relatives au bassin du Roussillon (Duvail *et al.*, 2001) ont été intégrées dans un cadre géologique et dans un modèle géométrique « Corbières/Roussillon ».

Les objectifs de l'identification géologique sont, d'une part, de faire la synthèse de l'histoire géologique (sédimentaire et tectonique) de la région d'étude, de replacer les systèmes karstiques dans un contexte géodynamique, de déterminer les périodes favorables au développement de la karstification (réseau karstique) et, d'autre part, de procéder à des synthèses et études de terrain complémentaires au niveau local (à l'échelle des systèmes). À l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude, une carte géologique de synthèse a été établie au format numérique (vecteur) : schéma structural et carte numérique lithostratigraphique permettant des représentations thématiques sous système d'information géographique (Arcview-Arcinfo).

2.1.1. Carte géologique numérique

La carte géologique de synthèse des Corbières a été établie en utilisant les feuilles géologiques et minutes de terrain suivantes :

- carte géologique France (1/50 000), feuille et notice de Capendu (1060) ;
- carte géologique France (1/50 000), feuille et notice de Narbonne (1061) ;
- carte géologique France (1/50 000), feuille et notice de Quillan (1077) ;
- carte géologique France (1/50 000), feuille et notice de Tuchan (1078) ;
- carte géologique France (1/50 000), feuille et notice de Rivesaltes (1090) ;
- carte géologique France (1/50 000), feuille et notice de Perpignan (1091) ;
- carte géologique France (1/50 000), notice de Limoux (1059) ;
- carte géologique France (1/80 000), feuille et notice de Quillan (2540) ;
- minute de terrain concernant la zone située au nord de la faille nord-pyrénéenne, levés par D. Leblanc, M. Fonteil, G. Viers et A. Autun.

Ces différentes cartes ont été numérisées, puis géo-référencées, afin, après correction des erreurs de dilatation liées au support papier, d'assembler toutes les cartes dans un même document.

Au préalable, une légende synthétique issue de la corrélation des différentes cartes a été élaborée. Lors de cette étape, le maximum d'information concernant les formations d'âge mésozoïque a été conservé, alors que pour les terrains plus anciens des regroupements ont été effectués en fonction de la lithologie (formation gréseuse ou carbonatée). Des vérifications de terrain ont été ponctuellement effectuées en cas de doute ou de problème.

Les contours des formations géologiques ainsi que les failles ont été redessinés à la main sur un support transparent indéformable de type « codatrace » ; ce document a ensuite été numérisé puis vectorisé automatiquement. Les corrections, l'attribution des labels et des couleurs, l'intégration d'un titre et d'une légende sont des opérations manuelles effectuées sous le logiciel « Microstation » au service « Connaissance et Diffusion de l'information Géologique » du BRGM à Orléans. Après validation et mise en forme du document sur support papier, l'impression de la carte géologique des Corbières (1/100 000) est envisageable. Le document informatique peut être converti sous un format standard de type Mapinfo ou Arcview. Ainsi, des cartes thématiques lithologiques peuvent être extraites et imprimées selon les besoins.

2.1.2. Synthèse géologique régionale

La synthèse géologique au niveau régional a été effectuée à partir d'une étude bibliographique, du Paléozoïque au Quaternaire. Elle a permis de dresser le cadre géodynamique du massif des Corbières et un tableau de synthèse des bassins sédimentaires des Corbières (bassin d'Estagel, bassin de Tautavel, bassin de Paziols/Tuchan, bassins septentrionaux de Thézan/Fabrezan et bassin de Laplame/

Leucate). Un schéma structural des Corbières a été établi. Une coupe interprétative du bassin du Roussillon et de la nappe des Corbières a été dressée (Duvail *et al.*, 2001). Elle réunit l'ensemble des données accessibles sur le terrain d'étude. Elle a été obtenue, pour la partie sud, au niveau de la plaine du Roussillon, à partir de corrélations de profils sismiques ainsi que des données de forages profonds (Elne 1 et Canet 1). La partie nord de la coupe résulte des données cartographiques ainsi que d'observations de terrain. Deux accidents majeurs sont recoupés : la faille nord-pyrénéenne et la faille de Prades. Ces accidents subdivisent l'espace en trois grands domaines (du nord au sud) :

- la zone nord-pyrénéenne (nappe des Corbières) ;
- le prolongement du synclinal de l'Agly sous la couverture cénozoïque ;
- le bassin du Roussillon s.s.

Cette coupe met en évidence les connexions hydrauliques possibles entre les différentes formations aquifères. Il doit exister un contact entre les aquifères sédimentaires du Plio-Quaternaire et le système karstique des Corbières d'Opoul.

2.1.3. Géométrie et stratigraphie des surfaces

De grandes formes d'aplanissement marquent autant les paysages que l'histoire géodynamique de la région des Corbières. Ces surfaces, appelées paléosurfaces, matérialisent la réaction aux agents atmosphériques d'un paysage face à des événements eustatiques (variations du niveau marin) et climatiques. Des sédiments se déposent sur ces surfaces planes. Le façonnement d'une telle surface correspond à une longue durée géologique, de quelques millions à plusieurs dizaines de millions d'années. Suivre l'évolution dans l'espace des formes d'aplanissement d'époques différentes permet de retracer l'histoire géologique et de marquer les événements fondamentaux ayant affecté les Corbières.

Une méthodologie de mise en évidence et de détermination des paléosurfaces a été appliquée sur le secteur d'étude. L'identification des paléosurfaces a été effectuée dans un premier temps par traitement des données informatiques :

- À partir du modèle d'altitude numérique des départements de l'Aude et des Pyrénées-Orientales (au pas de 50 m), une carte des orientations des pentes est créée, afin d'identifier les surfaces de même orientation. De plus, une carte des pentes est créée ; les pentes, exprimées en pourcentage, sont réparties en différentes classes : 0-1 ; 1-3 ; 3-5 ; 5-7 ; 7-10 ; 10-15 ; 15-20 ; 20-30 ; 30-40 ; 40-100.
- Les pentes dont la classe est égale à 1-3 et 3-5 % sont extraites et représentées. Les paléosurfaces sont caractérisées par des pentes comprises entre 1 et 3 %.
- À chaque classe de pente est attribuée une couleur, un classement est effectué par un rééchantillonnage des altitudes. Les paléosurfaces sont ainsi non seulement classées par pente mais aussi par altitude.

- En superposant cette dernière carte avec le réseau de drainage théorique obtenu par traitement informatique du modèle numérique de terrain, les surfaces situées dans les fonds de vallée sont supprimées. Seules les paléosurfaces de type « plan subhorizontal perché en altitude » sont conservées.

Dans un deuxième temps, sur la base du résultat du traitement informatique une fois, les surfaces positionnées sur un fond topographique et/ou géologique, les axes de recherche de la campagne de terrain peuvent être définis. L'étude de terrain permet d'une part d'identifier et de relier les morphologies entre elles : formes de raccord et de dissection, emboîtement ou étagement, etc. et d'autre part d'étudier les gisements potentiellement fossilifères des sédiments piégés sur ces surfaces. Les gisements de faune découverts (bibliographie et nouvelles découvertes) permettent de calibrer la mise en place dans le temps de ces différentes surfaces.

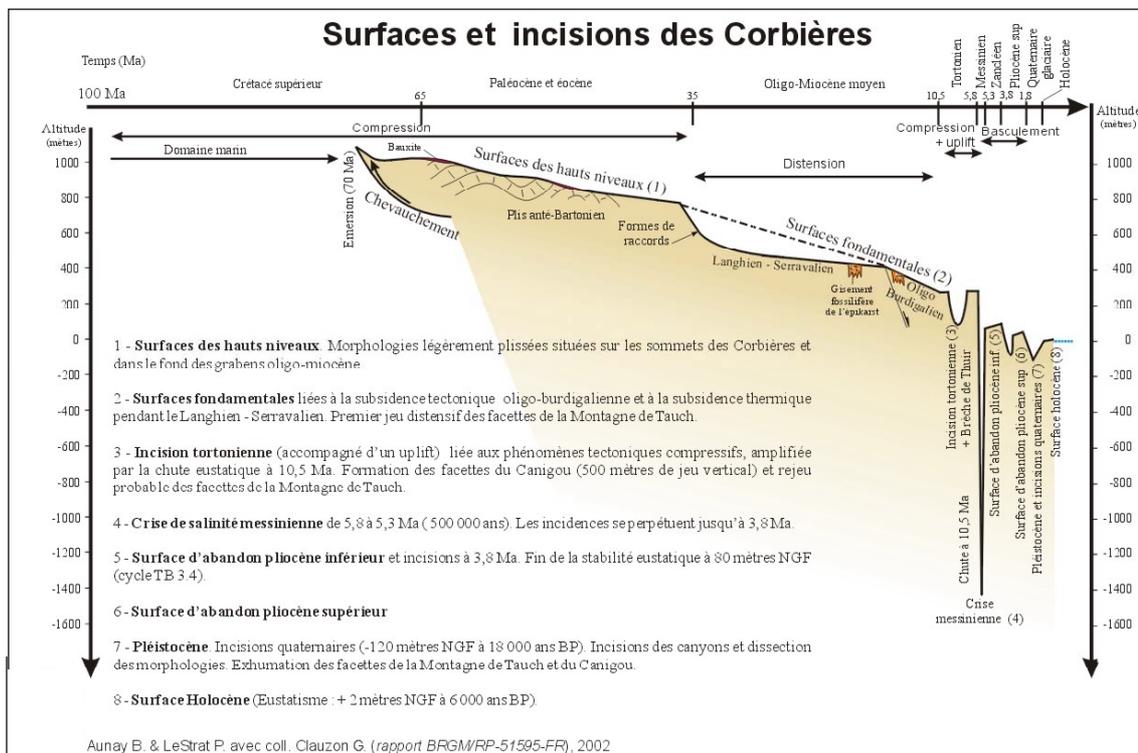
Différentes surfaces ont été identifiées et placées dans l'échelle du temps (ill. 1) :

- des surfaces de hauts niveaux ;
- des surfaces fondamentales ;
- des surfaces d'abandon pliocène inférieur ;
- des surfaces d'abandon du pliocène supérieur.

De plus, une typologie des remplissages karstiques et une analyse de certains sédiments prélevés au sein du réseau karstique noyé de Font Estramar (photos et prélèvements par l'association de recherches de Font Estramar, Cyrille Brandt), ont été effectuées. L'analyse des remplissages a été réalisée par diffractométrie des rayons X et par observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB).

Au final, des hypothèses sur la genèse des karsts des Corbières, en fonction de l'évolution du niveau de base, rattaché au niveau marin, de la tectonique et du paléoclimat ont été dressées. Le processus de karstification est lié à l'évolution du profil d'équilibre fluvial, lui-même connecté à l'évolution eustatique de la Méditerranée. L'existence de réseaux karstiques, (i) plans (le Chtulu démoniaque (18 km de développement horizontal, avec des galeries situées à une altitude moyenne comprise entre 400 et 500 m NGF ; le réseau noyé de Font Estramar, avec un développement kilométrique entre les côtes - 30 et - 50 m NGF) ou (ii) à dominante verticale (nombreux réseaux verticaux situés sur le plateau calcaire au nord de Caudiès-de-Fenouillèdes ou vers le Moutoulié de Périllou) dans les Corbières, a été pris en considération. Deux tableaux de synthèse de l'évolution du karst des Corbières depuis le Crétacé à nos jours ainsi que de l'évolution du karst languedocien au Mésozoïque inférieur (Trias-Turonien) ont été dressés.

De plus, un tableau des principaux résultats obtenus dans le cadre de l'étude géologique des Corbières pour les différents systèmes karstiques à caractériser, a été établi. Ces éléments seront repris dans les paragraphes d'introduction des volumes 2 et 4, concernant la caractérisation du fonctionnement hydrologique et de la structure des différents systèmes karstiques étudiés.



*Illustration 1 - Surfaces et incisions des Corbières
(Aunay et al., rapport BRGM/RP-51595-FR, 2002).*

2.1.4. Synthèse géologique locale et étude de terrain à l'échelle des systèmes karstiques

Des synthèses géologiques ont été menées à partir de la bibliographie ainsi que des visites de terrain pour l'essentiel des systèmes karstiques. Un effort devra encore porter sur le synclinal de Soulatgé pour apporter des compléments ainsi que sur le synclinal de Boucheville dans le cadre de la phase II du projet.

Une note de synthèse sur la géologie du synclinal du Bas-Agly en vue de proposer des sites d'implantation de forages a été rédigée. Cette note comprend les paragraphes suivants :

- étude géologique et structurale détaillée du synclinal du Bas-Agly (méthodologie, données utilisées, établissement d'une coupe interprétative, incertitudes et hypothèses) ;
- représentation graphique des principaux forages existants au niveau des flancs sud et nord du synclinal et critique des débits d'exploitation ;
- principales caractéristiques hydrogéologiques et hydrogéochimiques du système karstique ;

- zones à prospecter :
 - remarque préliminaire,
 - investigation géophysique,
 - argumentaires ;
- aspects financiers ;
- questions posées au comité technique.

Les éléments de cette note sont repris dans le volume 2 concernant les systèmes karstiques *s.l.* du synclinal du Bas-Agly.

2.2. CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE

2.2.1. 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 la précipitation 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.

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 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 es 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.

D'autres formules empiriques peuvent être utilisées afin d'établir le bilan hydrologique et notamment pour déterminer l'évapotranspiration potentielle. Parmi celles-ci, on peut citer notamment la formule de Thornwaite, établie aux États-Unis qui s'exprime comme suit :

$$ETP = 1,6 \left(\frac{10}{I}\right)^a \cdot t^a \cdot f \quad (5)$$

où ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (cm) pour une durée théorique d'éclairement de 12 heures par 24 heures

I : indice thermique annuel, défini comme la somme des indices thermiques mensuels, avec $i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$

T : température moyenne mensuelle [°C]

a : coefficient fonction de I, ou selon simplification : $a = (1,6 / 100) I + 0,5$

f : facteur de correction tenant compte de la durée réelle du mois et de l'éclairement, en fonction de latitude du lieu ; $f = N \rho$

N : durée astronomique du jour pendant le mois considéré (heures par jour)

ρ : paramètre dépendant du nombre de jours par mois

$\rho = 0,0778$ pour un mois de 28 jours

$\rho = 0,0806$ pour un mois de 29 jours

$\rho = 0,0833$ pour un mois de 30 jours

$\rho = 0,0861$ pour un mois de 31 jours

a, I et f sont constants sous un climat et un lieu donnés.

2.2.2. Analyse des débits classés

La méthode d'analyse des débits classés a pour objectif de caractériser les différents régimes d'écoulement observables à un exutoire.

Il s'agit d'identifier des événements particuliers de type mise en fonctionnement d'un trop-plein, fuites vers un autre système, etc., à partir d'une analyse des modifications qu'ils induisent sur les hydrogrammes (Marsaud, 1997).

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 (ill. 2 et 3).

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

Illustration 2 - Interprétation des ruptures de pente de la droite représentative des débits classés.

Cette méthode permet de :

- mettre en évidence la présence d'un impluvium dont la surface fluctue 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.

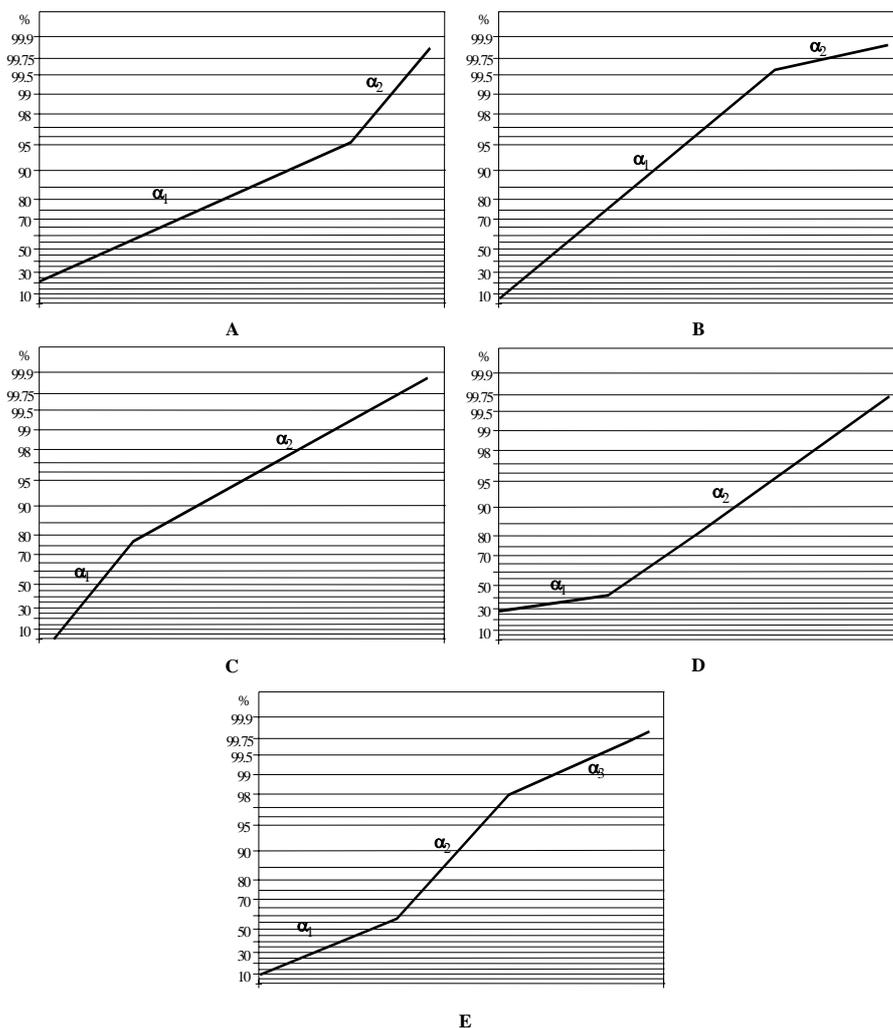


Illustration 3 - Différents cas de rupture de pente de la droite représentative des débits classés (Marsaud, 1997).

2.2.3. 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.

Deux parties peuvent être distinguées sur les courbes de récession et correspondent à un comportement hydraulique d'un des deux réservoirs définis :

- la décrue, durant laquelle l'infiltration influence la vidange du réservoir ;
- le tarissement, qui débute à l'instant où le débit d'infiltration devient nul, 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 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, 1997).

La description analytique du modèle se fait à l'aide de la formule suivante (ill. 4) :

$$Q(t) = \varphi(t) + \psi(t) \tag{5}$$

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

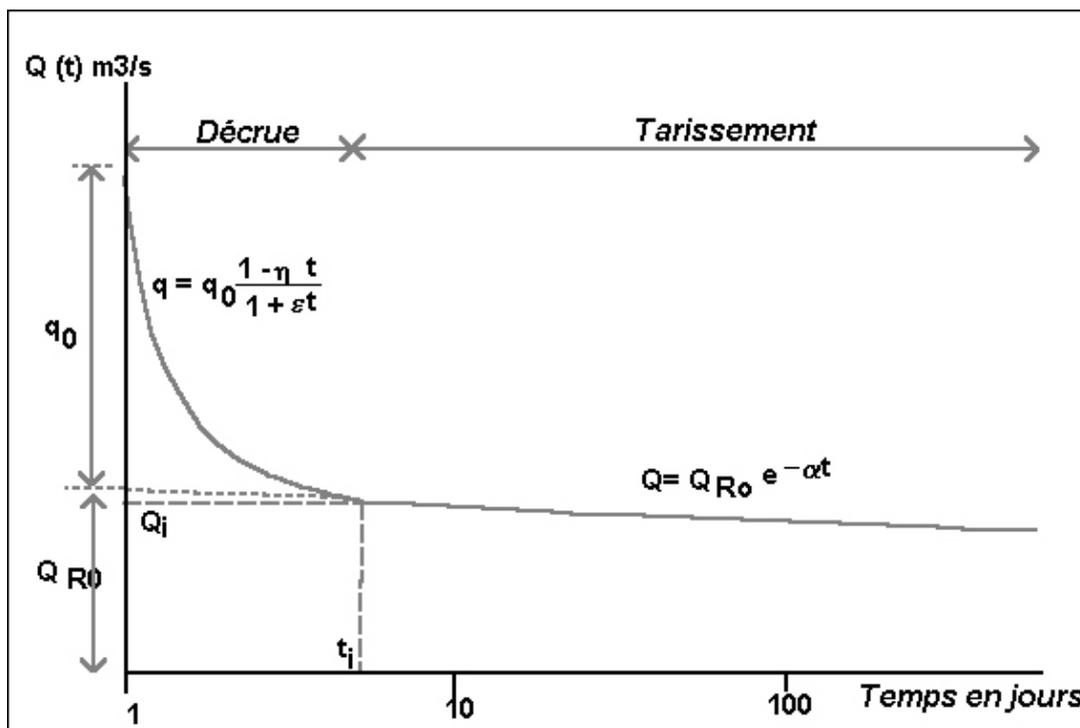


Illustration 4 - Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (1971).

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

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

avec α coefficient de tarissement. Le débit Q_{R0} 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, 1971). 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 $1/t_i$.

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.

Une classification a été établie par Mangin (1971), 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 karstiques de référence. Les données obtenues sur différents systèmes ont ainsi conduit Mangin à définir quatre domaines (ill. 5) :

- 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.

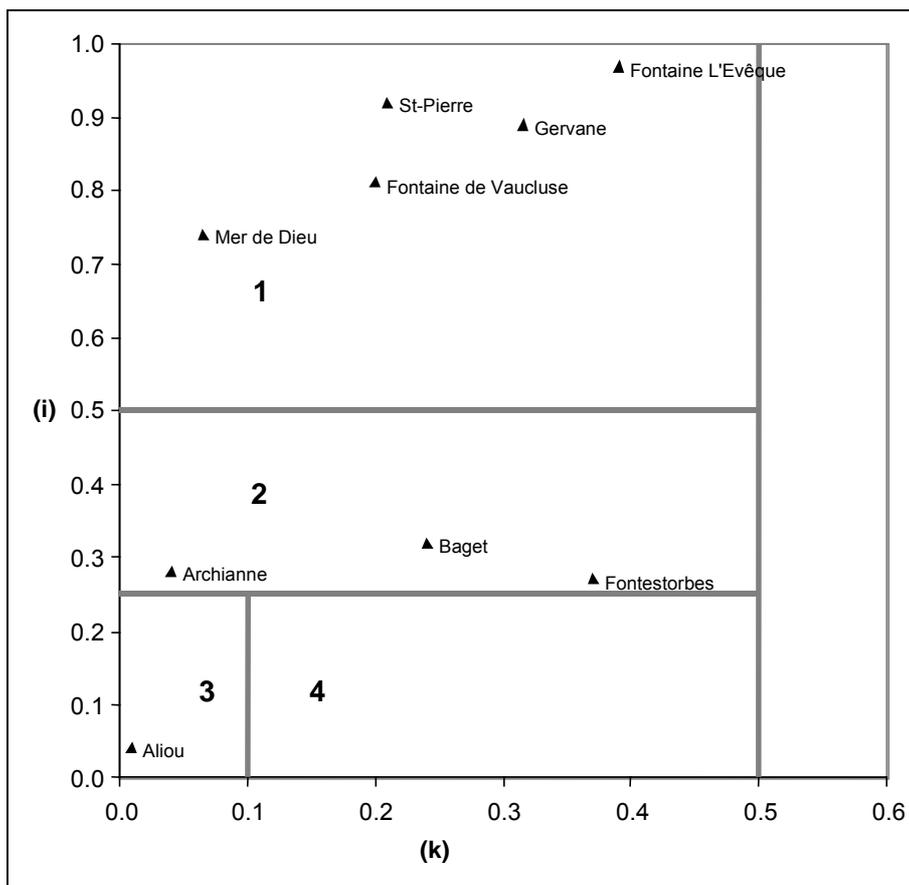


Illustration 5 - Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession (Mangin, 1975) – (i) paramètre d'infiltration et (k) pouvoir régulateur.

2.2.4. 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 (analyse corrélatoire et spectrale croisée).

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 grands, 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 nécessaires 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 (écoulables) de l'aquifère et pour classer les aquifères karstiques (Mangin, 1982, 1984 ; Muet, 1985 ; 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 (Box and Jenkins, 1970).

À 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 filtrera 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 à partir de la fréquence de coupure déterminée sur la densité spectrale de puissance (DSP) négligeable.

- 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* » 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 davantage 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 présente toujours à peu près le même volume de réserve et son état varie peu, tout comme sa réponse impulsionnelle. À l'inverse, si les pluies sont réparties de manière très hétérogène dans le temps, les phases de stockage et de déstockage vont engendrer des variations de l'état du système et donc de sa réponse aux précipitations. La fonction de cohérence présentera alors de grandes variations.
- La « *fonction de gain* » 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.

2.2.5. La modélisation inverse

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 TEMPO développé par le BRGM (Pinault, 2001), logiciel de traitement et de modélisation de séries temporelles en hydrogéologie et hydro-

géochimie. 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, etc.

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

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

où * représente le produit de convolution discret $(f * g)(k) = \sum_{i=0, i1} f(i).g(k-i)$, 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 d'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} .

a) Pluie efficace et transfert non-linéaire

La pluie efficace correspond à 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 permet de 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 :

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

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

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 (RI) 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, au total) :

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 RI 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 caractérisent la perte en eau des sols et de la végétation). Le produit de convolution de la pluie par la partie négative de la RI 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 par exemple 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 des valeurs fortes lorsque la longueur de cette base est supérieure à la durée moyenne séparant deux 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 , $\Omega(t)$ ($\Gamma_P, \Gamma_{ETP}, C_{ste}$) et $\alpha(t)$ ($\Gamma_{P_{eff}}$).

b) Le 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 »).

À 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, y 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 en général surestimer la recharge utile des sols pour exprimer une pluie efficace en accord avec les observations.

c) 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, etc.

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.

d) 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.

2.3. CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE 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 des conduits plus ou moins verticaux directement connectés au réseau de conduits karstiques de la zone noyée (le réservoir épikarstique est ainsi court-circuité).

2.3.1. Utilisation des « traceurs » géochimiques

a) Les 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. À l'exception de ce phénomène, les concentrations élevées (> 10 mg/l) dans les aquifères peuvent être attribuées principalement :

- 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. À 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).

- **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.

- **Les bromures (Br⁻)**

De manière similaire aux chlorures, les bromures présentent une charge électrique négative, ce qui n'est pas propice aux phénomènes d'adsorption. Les ions bromures sont donc conservatifs et sont globalement peu présents dans les eaux d'origine karstique. Les concentrations élevées en bromures dans les eaux peuvent être 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 (SO_4^{2-})**

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 au sein des 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 (NO_3^-) et l'ammonium (NH_4^+)**

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 (SiO_2)**

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 influencés 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 ou la dissolution d'évaporites.

L'illustration 6 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.

L'illustration 7 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.

b) Les isotopes

Dans les paragraphes suivants, sont présentées de manière plus détaillée les caractéristiques de certains des isotopes présentés de manière synthétique dans le tableau de l'illustration 8.

Ces isotopes sont fréquemment utilisés dans les études hydrogéologiques ; de plus, les apports des « nouveaux isotopes » (rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, rapport $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$) à l'étude des systèmes hydrologiques complexes, où l'origine de la salinité des eaux peut être multiple sont exposés.

- **Les isotopes stables de la molécule d'eau (^{18}O et ^2H) et instable (tritium)**

L'utilisation des isotopes stables de l'eau (^{18}O et ^2H) permet de tracer très fidèlement les flux hydriques qui s'écoulent dans les systèmes dans la mesure où ces isotopes 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 celle 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).

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 (reconcentration 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'IEC (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.

Illustration 6 - 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 IsC (Indice de saturation vis-à-vis de la calcite)	Interne	<ul style="list-style-type: none"> - Renseigne sur les conditions d'écoulement dans le système (en charge ou à surface libre) (IsC > 0, écoulement en zone d'infiltration). - Indication sur la vitesse de circulation des eaux (IsC < 0 = solution sous-saturée : 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.

Illustration 7 - Nature des informations obtenues sur le système calco-carbonique.

Outil	Applications
¹⁸ O et ² H	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 (³ H)	Radiochronologie Indicateur de temps de transit (³ H > 0,1 UT signifie un apport post 1952 dans le système)
Carbone 13 (¹³ C)	Origine et nature des composés carbonés Mise en évidence de processus diagénétique
Activité Carbone 14 (A ¹⁴ C)	Datation des eaux jusqu'à 45 000 ans Estimation des vitesses de circulation dans un aquifère
³⁴ S et ¹⁸ O des sulfates dissous	Nature et origine du soufre Mise en évidence des mécanismes bactériens Thermométrie isotopique Mise en évidence des mécanismes oxydoréduction dans le système

Illustration 8 - Informations obtenues par les outils isotopiques « classiques ».

- **Les isotopes du carbone ($\delta^{13}\text{C}$ et A¹⁴C)**

Les eaux de pluie, lorsqu'elles s'infiltrent, tendent à se charger en CO₂ du sol, lui-même issu de la dégradation de la matière organique et donc marqué isotopiquement par cette origine. Le carbone résultant possède généralement un rapport isotopique compris entre - 20 et - 25 ‰. Ce type de carbone présente également des teneurs maximales en ¹⁴C (A¹⁴C compris entre 105 et 130 %) car son temps de résidence est très faible.

À l'inverse, le second réservoir de carbone dans les systèmes est celui des carbonates dont les rapports isotopiques sont proches de zéro et les activités ^{14}C nulles.

Le carbone 13 permet de déterminer l'origine du carbone dissous dans l'eau (matière organique, carbonates...). Le carbone 14 est instable dans le temps et est fréquemment utilisé comme chrono-mètre pour dater les eaux (^{14}C , période de 5 250 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 quatre isotopes (éléments de même numéro atomique qui présentent des propriétés identiques mais qui diffèrent les uns des autres par la masse atomique). Ces quatre 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 $\mu\text{g}/\text{l}$ à quelques centaines de $\mu\text{g}/\text{l}$. 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. Une invasion marine explique aussi de fortes teneurs en strontium.

- **Les isotopes du bore (rapport $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$)**

Le bore est un élément léger et le contraste de masse entre le ^{11}B et ^{10}B est significatif pour que les isotopes du bore soient soumis à de forts fractionnements isotopiques, ce

qui entraîne des variations importantes de plus de 90 ‰ de la composition des eaux dans le milieu naturel. Ces contrastes font du bore un excellent traceur à la fois des sources du bore (fortement lié à la salinité des eaux) que des processus naturels qui l'affectent (mise en évidence de mélange, fractionnement ...).

L'utilisation couplée des isotopes du bore et du strontium apparaît très performante dès lors que l'on recherche à identifier et à caractériser l'origine de la salinité comme en témoigne la littérature scientifique récente (Kloppmann W. *et al.*, 2002). L'association de ces isotopes aux informations apportées par les rapports isotopiques ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) et ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) des sulfates dissous dans l'eau permet de bien identifier l'origine des sources de salinité des eaux, notamment lorsque le milieu présente des niveaux argileux ou gypsifères (Fritz et Fontes, 1986).

3. Description des sites et métrologie

3.1. OBJECTIFS

La description des sites ainsi que leur instrumentation sont présentées pour chacun des systèmes karstiques des Corbières orientales étudiés au sein de ce chapitre 3. Exception faite pour le *système s.l.* du « synclinal du Bas-Agly » où des points d'eau (source ou piézomètres) faisaient déjà l'objet d'un suivi assuré par la DDAF des Pyrénées-Orientales, tous les autres sites ont été équipés au cours de l'année 2002, voire 2003 pour la source des Adoux, pour laquelle des travaux pour effectuer le suivi de la majorité des trop-pleins ont dû être réalisés.

3.2. SYSTÈME KARSTIQUE « SYNCLINAL DU BAS-AGLY »

3.2.1. Objectifs

Le système karstique dit du « synclinal du Bas-Agly » constitue un des plus grands systèmes étudiés dans le cadre de ce projet. C'est un système karstique binaire, c'est-à-dire alimenté par les précipitations et également par les pertes de cours d'eau ; dans le cas présent, les pertes du Verdoble et les pertes de l'Agly sont en connexion hydraulique avec les sources de Font Estramar et Font Dame et donc appartiennent au bassin d'alimentation.

Des travaux d'investigation du système karstique de Font Estramar – Font Dame ont été initiés à la fin des années 1960 – début des années 1970 par le CERGES de Perpignan et les services de l'État (DDAF 66) : instrumentation de la source de Font Estramar, prospection spéléologique d'avens et de Font Estramar (plongées), réalisation d'essais de coloration, prospection géophysique à l'amont de Font Dame, implantation et réalisation de sondages « profonds ». Quelques quarante années de chroniques hydrologiques pour la source de Font Estramar existent (source DDAFF et BDHYDRO) et 25 années pour le suivi des sondages n° 102 et 104 de la Combe française (suivi manuel mensuel à hebdomadaire entre 1970 et 1977 ; et entre 1981 et 1991, enregistrement papier à numériser en partie pour cette même période et données enregistrées entre 1991 et 2001). Quelques analyses hydrochimiques d'études antérieures sont également disponibles pour le projet.

Des données hydrométriques relatives aux cours d'eau de l'Agly, du Verdoble et de la Désix ont été recueillies auprès des services de l'état des Pyrénées-Orientales (DDAF et DDE 66), ainsi qu'auprès de la DIREN-LRO (accès à la BDHYDRO), pour les périodes de 1970 à 2001, Les données des stations pluviométriques de Opoul-Périllos, Tautavel, Vingrau, Perpignan, Sournia, Saint-Paul-de-Fenouillet, La-Tour-de-France, Cucugnan, Fourtou et Fitou ont été recueillies ou acquises pour les périodes concernées auprès de la DDAFF des Pyrénées-Orientales et de Météo-France. Les

données piézométriques du réseau départemental des Pyrénées-Orientales n'ont pas été intégrées dans ce rapport, n'ayant pas fait l'objet de traitement du signal croisé avec les points du réseau de suivi sur le système karstique du synclinal du Bas-Agly, notamment. Ce traitement sera effectué au cours de la phase II du projet, les chroniques disponibles sur les piézomètres du réseau de suivi n'étant pas toujours de durée suffisante.

Ainsi, le débit moyen des exutoires de ce grand système étant non négligeable, ce système revêt un intérêt tout particulier du point de vue de la connaissance de la ressource en vue d'une éventuelle exploitation. Les objectifs, du point de vue de la métrologie, pour ce site, sont les suivants :

- compléter les données existantes et acquérir des chroniques d'enregistrement continu de paramètres physiques au niveau des exutoires et de piézomètres sur des périodes concomitantes ;
- procéder à l'échantillonnage de trois crues, avec des échantillons d'eau prélevés en fonction de l'hydrogramme de crue ;
- caractériser la structure, le fonctionnement et la ressource de ce système ;
- apporter des éléments sur les relations hydrauliques entre les deux aquifères (karstique et plio-quadernaire) ;
- finalement, à partir de l'interprétation des chroniques, de leur variabilité spatio-temporelle, ainsi que des analyses hydrochimiques (campagnes spatiales Karst – Plio-Quadernaire), proposer des secteurs à étudier en détail en vue d'implanter des forages de reconnaissance.

Plus particulièrement, la caractérisation hydrochimique et isotopique a pour objectifs :

- de déterminer l'importance de la zone noyée, le rôle de l'épikarst dans l'alimentation des deux sous-systèmes Font Dame et Font Estramar ;
- de caractériser la variabilité temporelle et la signature chimique des écoulements rapides et des écoulements lents, mis en évidence par les analyses hydrologiques ;
- de déterminer en terme d'impact chimique et de flux le rôle joué par la contribution des eaux de surface au système karstique, d'estimer les temps de transfert ;
- et, plus spécifiquement, de caractériser la variabilité spatio-temporelle de la salinité des eaux du système (mécanismes de salinisation liée à une intrusion d'eaux salées ou saumâtres (mer ou étang)) ainsi que des pollutions anthropiques éventuelles.

3.2.2. Équipement des principaux exutoires

Le système karstique « synclinal du Bas-Agly » *s.l.* comprend d'une part le sous-système Cases de Pène – Baixas, au niveau de l'extrémité du flanc sud du synclinal du Bas-Agly, d'autre part le système des Corbières d'Opoul dont les principaux exutoires sont les sources de Font Dame et de Font Estramar. D'autres sous-systèmes seront certainement à distinguer au moment de l'interprétation des données hydrologiques et hydrogéochimiques.

Les deux sources ont été instrumentées. La source de Font Estramar fait toujours partie, par ailleurs du réseau de suivi hydrologique de la DDAF des Pyrénées-Orientales. De plus, un certain nombre de piézomètres concernant les calcaires du synclinal du Bas-Agly ont été équipés, afin d'assurer un suivi en continu des variations des niveaux d'eau.

- **Source de Font Estramar**

L'émergence de Font Estramar se trouve au pied d'une falaise de calcaire barrémien-aptien, au contact avec les terrains quaternaires de Salses. La cote du plan d'eau est de 1,20 m NGF (étiage nivelé en juillet 1973 par la Société d'Autoroute, d'après ERRE 1977). C'est une source de type vaclusien, issue d'un conduit subvertical ascendant. Elle forme une vasque d'une trentaine de mètres de diamètre et une dizaine de mètres de profondeur. La cavité de Font Estramar est une caverne noyée ; 2 750 m de galeries ont été reconnus par des plongeurs et une profondeur de - 164 m a été atteinte (ARFE).

Ses coordonnées Lambert III sont les suivantes [km] : 650,2/3 062,38/2 m NGF (ill. 9).

La vasque est équipée d'un limnigraphe de la DDAF66 qui enregistre en permanence le niveau d'eau au niveau de la vasque. Des jaugeages mensuels sont effectués par la DDAF au niveau du ruisseau, en aval de la vasque.

En 2001, la source a fait l'objet d'un équipement installé par le BRGM (niveau d'eau, conductivité et température) ; cet équipement a été doublé en aval, sur la Rigole, au niveau de la pisciculture d'Extramar en décembre 2001 (ill. 10).



Illustration 9 - Source de Font Estramar.

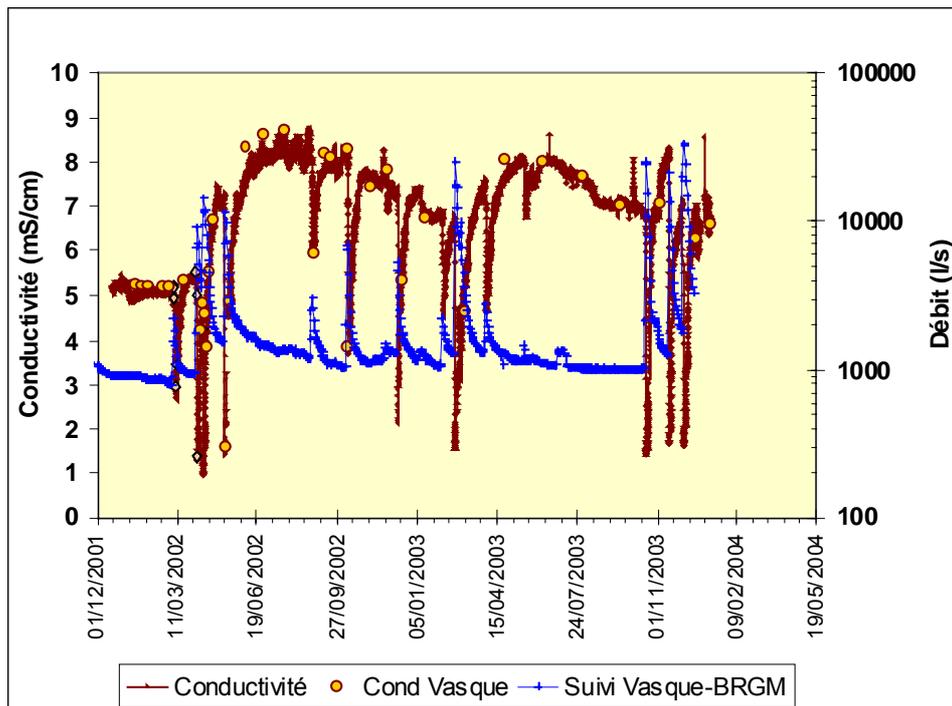


Illustration 10 - Évolution temporelle de la conductivité électrique de l'eau et du débit de la source de Font Estramar.

- **Source de Font Dame**

Cette source émerge au niveau du contact avec les formations plio-quaternaires ; elle donne lieu à un cours d'eau. Ses coordonnées Lambert III sont les suivantes [km] : 649,34 / 3061,38 ; 1 m NGF. Les paramètres enregistrés (centrale d'acquisition OTT, capteur bulle à bulle pour le niveau d'eau, sonde conductivité-température) sont reportés dans les graphiques ci-après (ill. 11 et 12).

3.2.3. Équipement de forages

Les forages détaillés dans le tableau ci-dessous ont été équipés afin d'assurer un suivi des variations du niveau d'eau au cours du temps (ill. 13). Leur positionnement est reporté sur la carte de l'illustration 14.

L'aven de Baixas est situé à l'extrémité est du chaînon calcaire du flanc sud du synclinal du Bas-Agry. Il fonctionne en source de trop-plein de manière épisodique en périodes de hautes eaux. Une sonde piézométrique (bulle à bulle OTT) a été installée en juillet 2001. La mise en place du flexible et de la cloche de mesure a nécessité l'élargissement à l'explosif de deux passages étroits afin d'accéder au plan d'eau situé au fond de l'aven. Cette sonde a été hors de l'eau lors des périodes d'étiage.

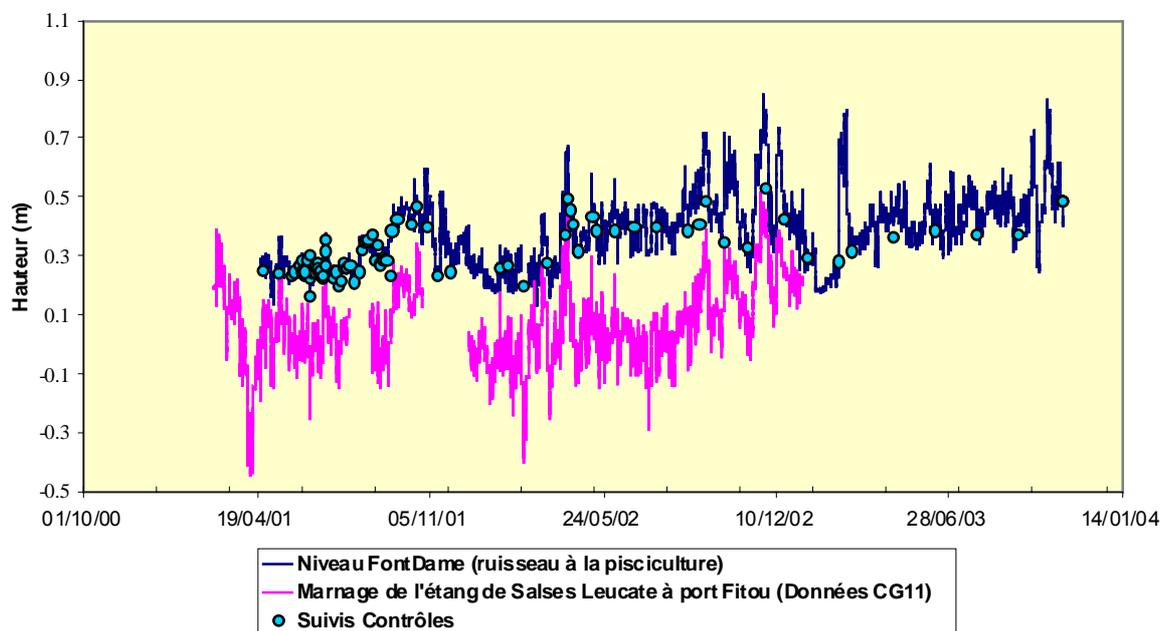


Illustration 11 - Évolution temporelle du niveau d'eau du ruisseau à Font Dame et du marnage de l'étang de Salses Leucate.

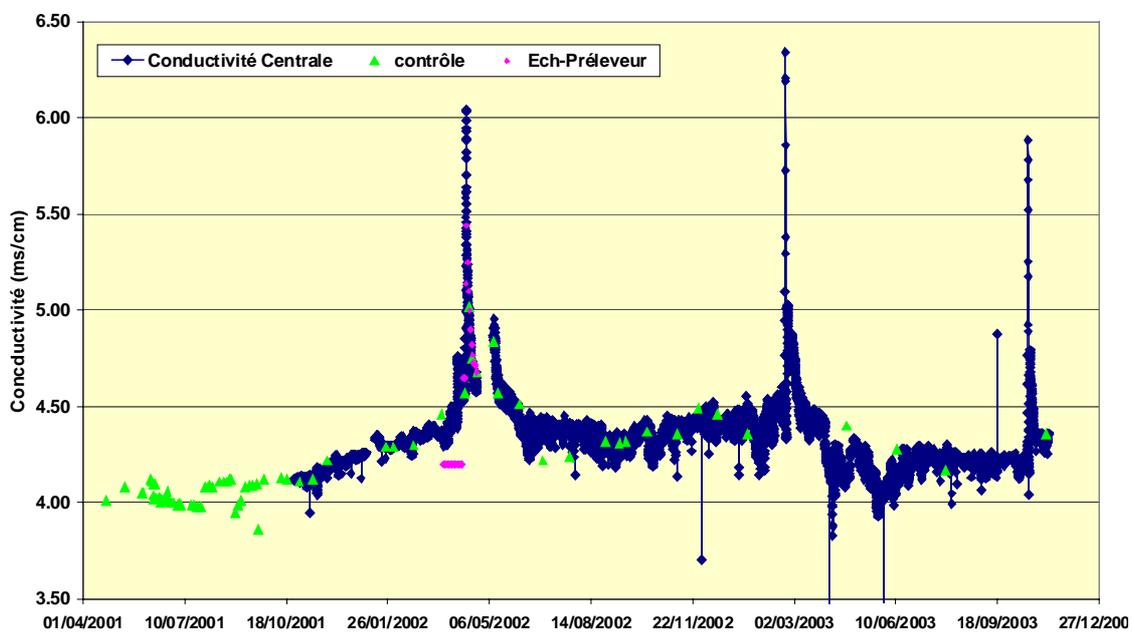


Illustration 12 - Évolution temporelle de la conductivité électrique de l'eau au niveau du ruisseau de Font Dame.

Un piézomètre a été installé sur le site en avril 2002 par la société COLL et fils, Saint-Estève et une sonde de pression (sonde Vanessen jusqu'en juin 2002, puis sonde Maddo-solo (IRIS instruments)) a été installée en mai 2002. Cette sonde permet ainsi le suivi de la totalité de l'amplitude des variations de niveau d'eau de l'aquifère.

Cases de Pène : le forage de Sainte-Colombe (achevé en 1989) à Cases de Pène alimente la commune de Cases de Pène depuis 2002 (débit de 35 m³/h). Il se situe à proximité d'une émergence temporaire, en rive droite de l'Agly, dans les calcaires barrémo-aptiens.

Un piézomètre d'observation situé à une distance de 18 m environ du forage, vers l'ouest, permet de suivre les niveaux de l'aquifère à l'aide d'une sonde de pression. Les variations de niveau étant identiques à celles mesurées à l'aven de Baixas, le suivi de niveau d'eau n'est plus assuré à Cases de Pène depuis début 2003 (fin février).

Le débit d'exploitation actuel de 35 m³/h ne perturbe pas les variations piézométriques enregistrées (ill. 15).

Dénomination	Indice BSS	Coordonnées X (Lambert III Sud [km])	Coordonnées Y (Lambert III Sud [km])	Altitude Z (m NGF)	Mise en service
Forage 102-DDAF- N° 8	10795X0028	648,89	61,43	14,6	23/01/2002
Forage de Cases de Pène	10903X0026	639,69	52,52	55	
Forage Font Dame (artésien – hors utilisation)	10795X0050	649,51	60,98	1	16/01/2003
Forage 104-DDAF – N° 9	10795X0030	647,08	61,1	42,21	23/01/2002
Forage 107 – N°10	10795X0033	649,48	62,19	35	05/06/2002
F-Roboul-N°7	10904X0105/ ROBOUL	642,5	58,3	65	14/06/2002
Forage Ex-AEP Opoul – N° 6	10911X0030	645,1	58,15	41	12/03/2002
Baixas piézomètre aven	10903X0009	640,13	51,94	65	14/05 (Orphimède volé) et 12/06/2002 (sonde pression)
Forage F2 AEP Rivesaltes	10911X0024	644,36	51,25	25	13/02/2003

Illustration 13 - Dénomination et coordonnées des forages équipés pour un suivi des niveaux d'eau.

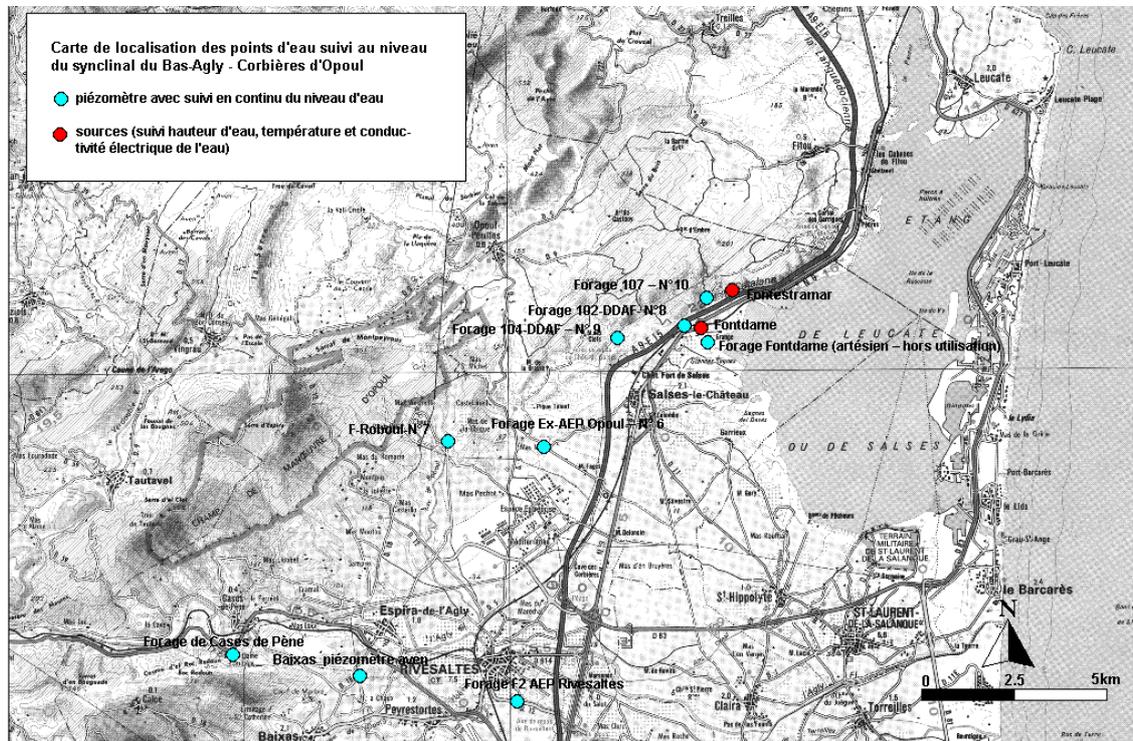


Illustration 14 - Localisation des points d'eau suivis au niveau du synclinal du Bas-Agly.

Sites de Baixas et de Cases-de-Pène

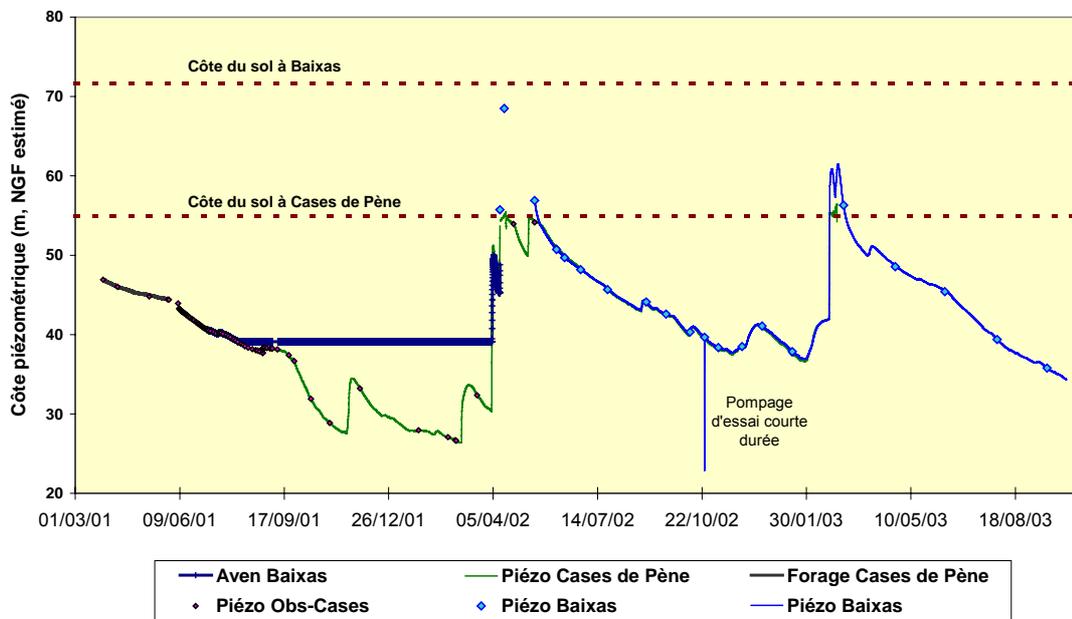


Illustration 15 - Évolution de piézométrie à Baixas et à Cases de Pène depuis le 28/03/2001.

Les **piézomètres 102, 104 et 107** sont des piézomètres appartenant au réseau de piézomètres implantés par la DDAF 66 dans les années 1970 ; ils sont installés dans les calcaires du flanc nord du synclinal du Bas-Agly, à l'ouest (102 et 104) et au nord (107) de la source de Font Dame (ill. 14).

Le piézomètre 107 a été installé dans la Combe Léon en avril 2002, en remplacement de l'ancien piézomètre du même nom qui avait été rebouché dans les années 1980.

Il existe 25 années de chroniques de variation du niveau d'eau pour les piézomètres 102 et 104 (suivi manuel mensuel à hebdomadaire entre 1970 et 1977, puis entre 1981 et 1991, enregistrement papier et puis données enregistrées entre 1991 et 2001).

Le suivi de ces deux piézomètres assuré par les services de la DDAF66 a été repris et les points équipés par le BRGM dans le cadre de ce projet, dès fin janvier 2002.

Le piézomètre 107 a été équipé d'une sonde pression en juin 2002, le niveau piézométrique est enregistré au pas de temps horaire (ill. 16 à 21).

3.2.4. Mesures de contrôle

Des mesures de contrôle ont été effectuées lors des visites de terrain, mensuelles, puis toutes les 6 à 8 semaines dès fin 2002, sur les ouvrages de mesures, aux sources et au sein des forages. Ces mesures sont généralement reportées sur les graphiques d'évolution des paramètres enregistrés.

Trente-quatre mesures de contrôle ont été effectuées sur les sources de Font Estramar et de Font Dame. De plus d'autres mesures ont été prises en dehors des tournées régulières, lors du suivi de la restitution des essais de traçage notamment.

Soixante mesures de contrôle ont été réalisées aux piézomètres 102 et 104 et vingt mesures pour les autres piézomètres.

À signaler que concernant le piézomètre F2 de Rivesaltes, vu que cet ouvrage est artésien, aucune mesure de contrôle n'a pu être effectuée à ce jour (mesure manométrique à prévoir).

Afin d'étudier et de quantifier la contribution des pertes de l'Agly et du Verdoble aux écoulements restitués au niveau des exutoires, Font Estramar et Font Dame, des jaugeages différentiels ont été réalisés au niveau du Verdoble, ce cours d'eau ne disposant pas de stations de mesures (ill. 22).

Concernant les pertes de l'Agly, les hydrogrammes des stations de Planèze et de Mas de Jau ont été essentiellement utilisés.

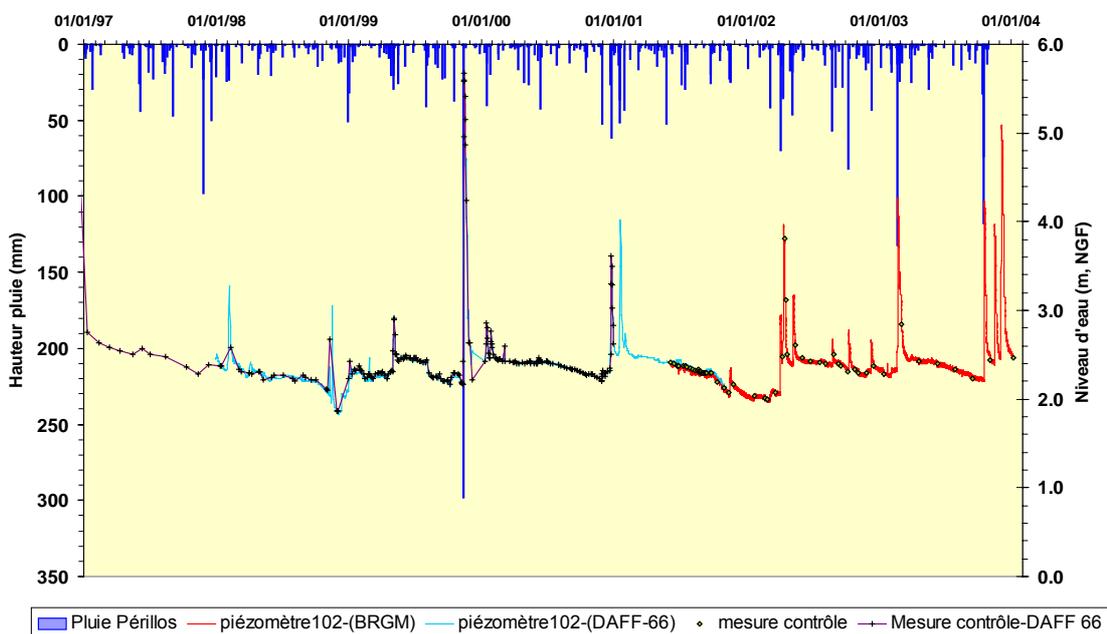


Illustration 16 - Évolution piézométrique au piézomètre 102 et pluviométrie de Périllos.

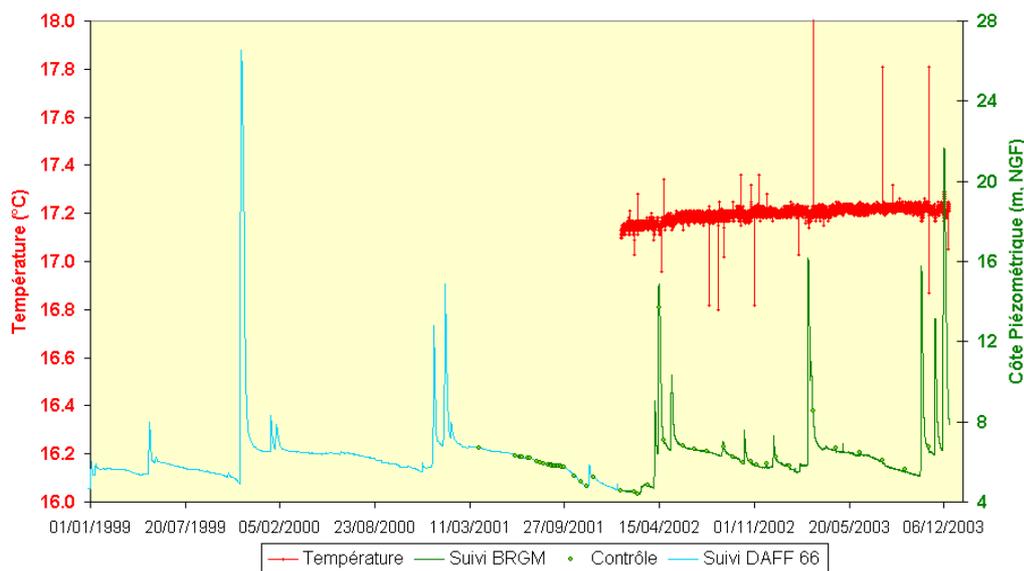


Illustration 17 - Évolution piézométrique et de la température au piézomètre 104.

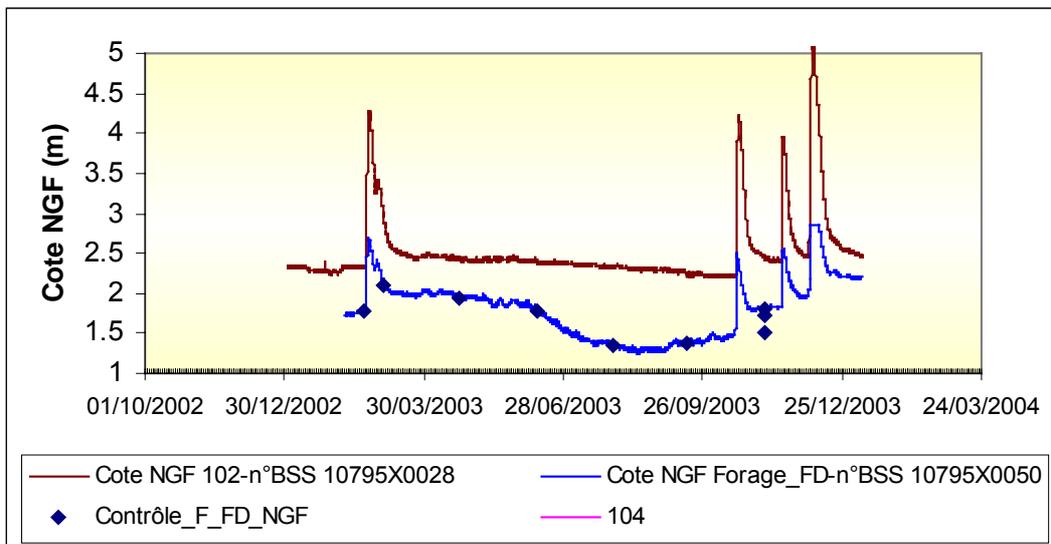


Illustration 18 - Évolution piézométrique aux forages 102 et de Font Dame.

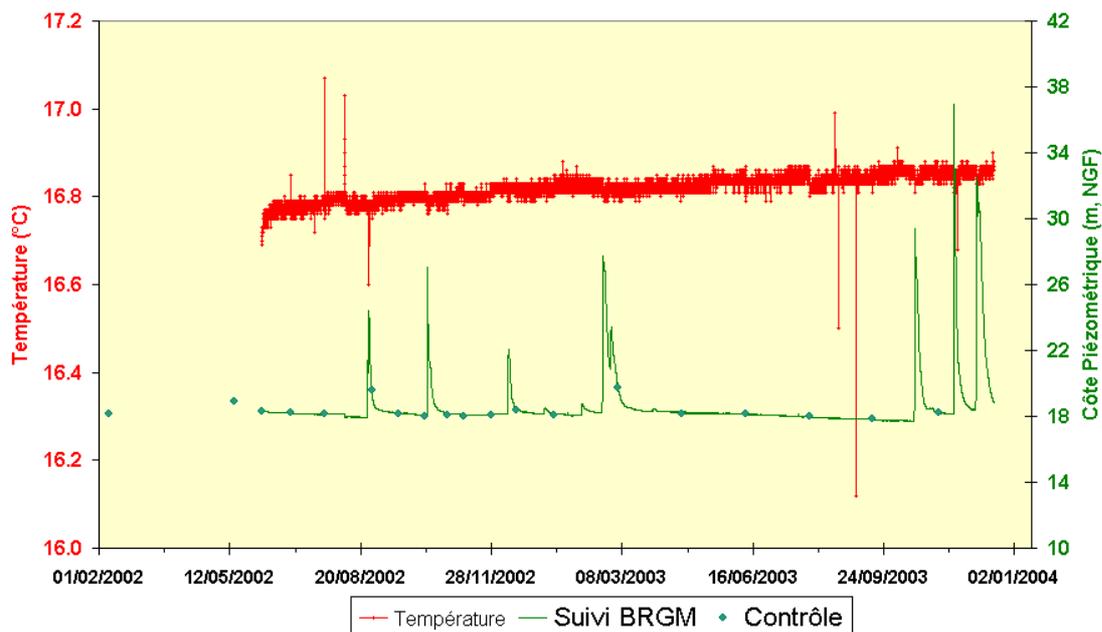


Illustration 19 - Évolution piézométrique et de la température au forage 107 à la Combe Léon.

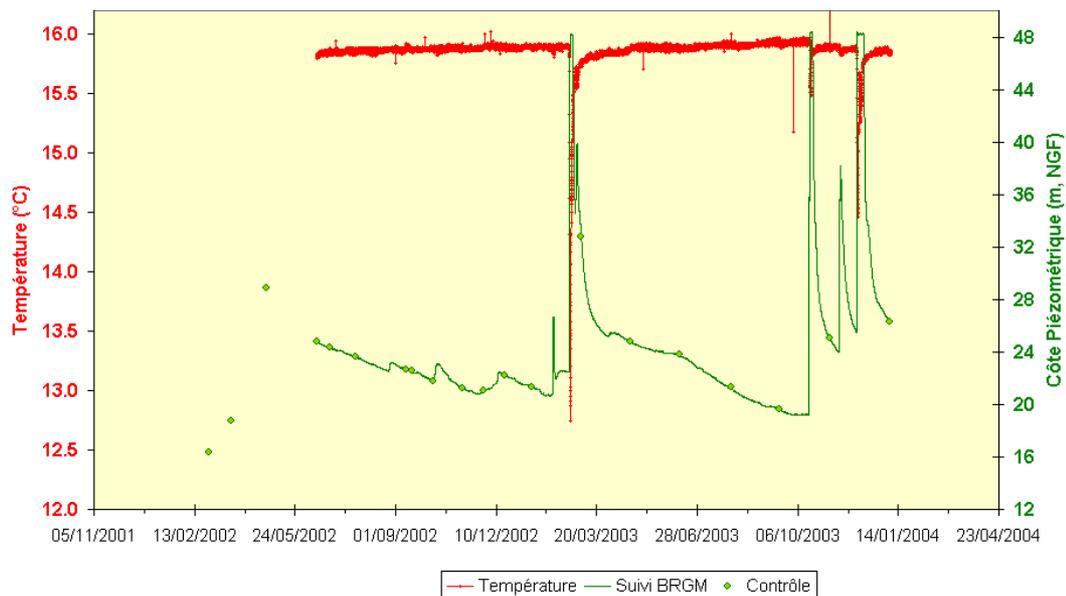


Illustration 20 - Évolution piézométrique et de la température au forage du Roboul.

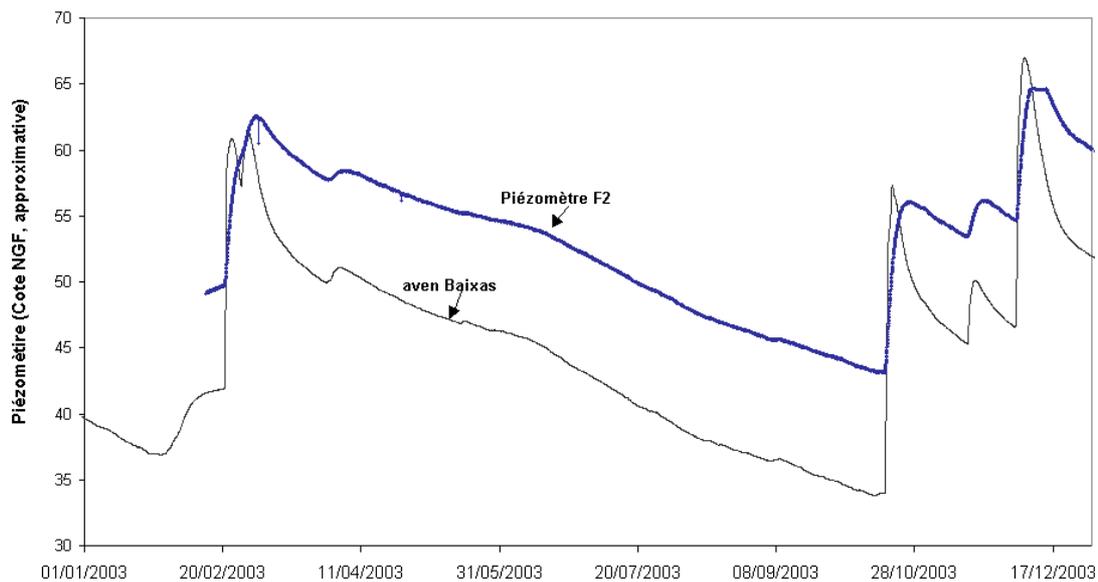


Illustration 21 - Évolution piézométrique au forage artésien F2 de Rivesaltes interceptant les brèches pliocènes et au forage de l'aven de Baixas.

Date	Amont pertes	Aval pertes	Pertes
	(Q (l/s))	Q (l/s)	Q (l/s)
18/07/2001	172		
18/07/2001	172		
23/07/2001	161		
23/07/2001	114		
18/10/2001	113		
25/10/2001	69		
23/01/2002	134		
24/04/2002	2 173	467	1 705
26/06/2002	333	0	333
10/10/2002	427	0	427
08/11/2002	196	0	196
16/01/2002 (03 ?)	225	0	225
12/06/2003	261	0	261
31/07/2003	31	0	31
17/09/2003	51	0	51

Illustration 22 - Jaugeages (micro-moulinet) réalisés sur le Verdoube.

3.2.5. Établissement des courbes de tarage des sources

Les courbes de tarage des sources de Font Estramar et de Font Dame ont été établies à partir de jaugeages réalisés entre 2001 et 2003 et, concernant la source de Font Estramar, en considérant en partie l'historique des jaugeages effectués par les services de la DDAF66 depuis 1997.

Au niveau de la source de Font Estramar, le débit de la source à la sortie de la vasque est fortement influencé par les obstacles végétaux et rocheux. La rugosité introduite par la présence de ces obstacles est variable (développement de végétation saisonnière, nettoyage des obstacles lors de crues, etc.) ; ainsi, la hauteur d'eau mesurée au niveau de la vasque n'est pas une simple fonction du débit de la source.

Des phénomènes tels qu'une augmentation du débit en période sèche d'étiage, ou chute de débit abrupte, n'ayant en toute vraisemblance pas de signification hydrogéologique, peuvent être observés sur les chroniques de débits extraites de la banque HYDRO (MEDD).

L'historique des jaugeages a été étudié afin d'améliorer la vraisemblance des chroniques de débit de Font Estramar. Ce travail a été effectué en considérant les données de jaugeage DDAF 66 et BRGM (ill. 23 et 24). Une fonction optimisée ($R^2 = 0,818$), de type fonction de puissance forcée, peut être établie comme équation de la fonction $Q = f(H)$. La courbe, établie à partir des seules données du BRGM (2001-2003), est caractérisée par un même type de fonction de puissance dont le R^2 est de 0,971.

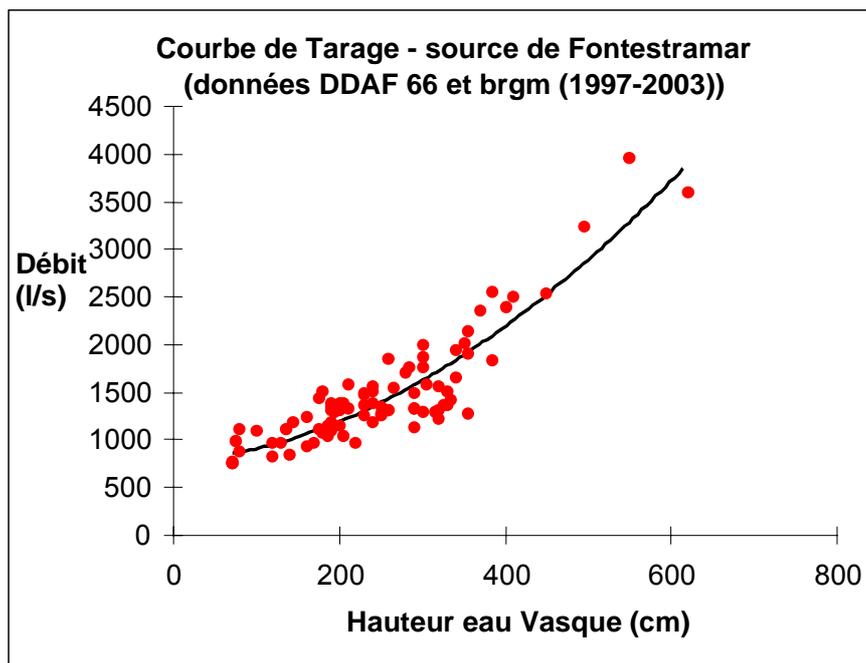


Illustration 23 - Courbe de tarage de la source de Font Estramar (1997-2003).

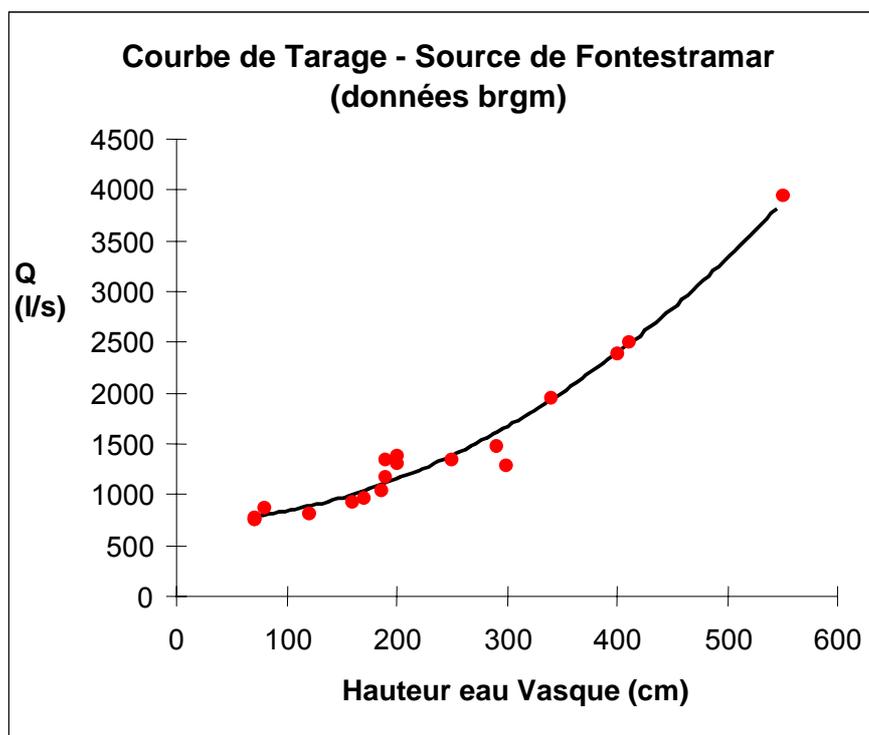


Illustration 24 - Courbe de tarage de la source de Font Estramar à partir des données des jaugeages effectués par le BRGM entre 2001 et 2003.

Les équations de ces deux courbes de tarage sont :

- données du BRGM uniquement (2001-2003) :

$$Q = 740,185 + 0,010 (H*1000) ^ 2,006 \quad (R^2 = 0,971) ;$$

- données BRGM -DDAF (1997-2003) :

$$Q = 800 + 0,026 (H*1000) ^ 1,817 \quad (R^2 = 0,818).$$

L'hydrogramme de la source de Font Estramar peut ainsi être calculé, (i) en ayant recours aux deux équations des courbes de tarage, (ii) en remplaçant les données des jaugeages sur le graphique et en apportant des réductions des erreurs de transcription des hauteurs d'eau afin d'éliminer ainsi les fausses remontées de niveau d'eau associées à la végétation aquatique (ill. 25).

Cette correction a été apportée aux données collectées jusqu'en septembre 2002.

Pour la période postérieure, les corrections des effets de végétation ont été réalisées sur la base des données enregistrées par un capteur de hauteur d'eau situé sous le pont de la N9, les hauteurs d'eau à ce niveau n'étant pas influencées par l'effet de végétation (ill. 26).

À la source de Font Dame, la courbe de tarage a été construite en utilisant les variations du niveau piézométrique du forage 102, le niveau d'eau mesuré au sein du ruisseau à Font Dame étant clairement influencé par le marnage de l'étang.

Les données des jaugeages sont reportées dans le tableau ci-après (ill. 27).

Une relation optimisée entre le débit jaugé et la hauteur d'eau a été recherchée (ill. 28 et 29). La relation débit - cote d'eau au niveau du ruisseau n'est pas du tout satisfaisante. La dispersion des points autour de la courbe de tarage est très grande. Considérant de plus,

- qu'il existe une corrélation faible entre la hauteur du ruisseau et le niveau piézomètre au 102 ;
- la proximité du piézomètre 102 par rapport à la source, laissant supposer l'appartenance au même système ;
- la bonne corrélation entre la restitution du traceur fluorescent (essai de coloration des pertes du Verdoble, Courtois *et al.*, BRGM/RP-52211-FR) à Font Dame ;
- les crues du limnigramme au 102 ;

le débit de la source de Font Dame est obtenu en ayant recours à la relation $Q = f(H)$ du 102. La dispersion des points autour de la courbe de tarage est plus faible que celle obtenue avec le niveau du ruisseau. R^2 est proche de 0,7 (ill. 29).

L'évolution des débits journaliers de la source de Font Dame peut être ainsi représentée. Ces débits varient entre 474 l/s (minimum) et 2 724 l/s (maximum) (ill. 30).

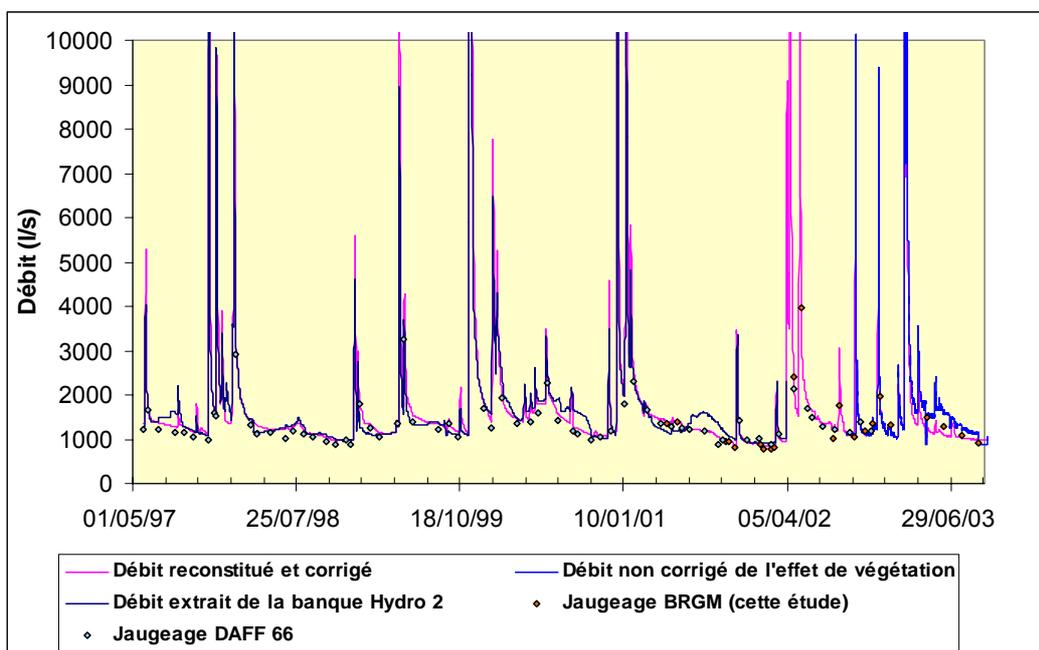


Illustration 25 - Hydrogramme de la source de Font Estramar, à partir des différentes courbes de tarage et des reconstitutions.

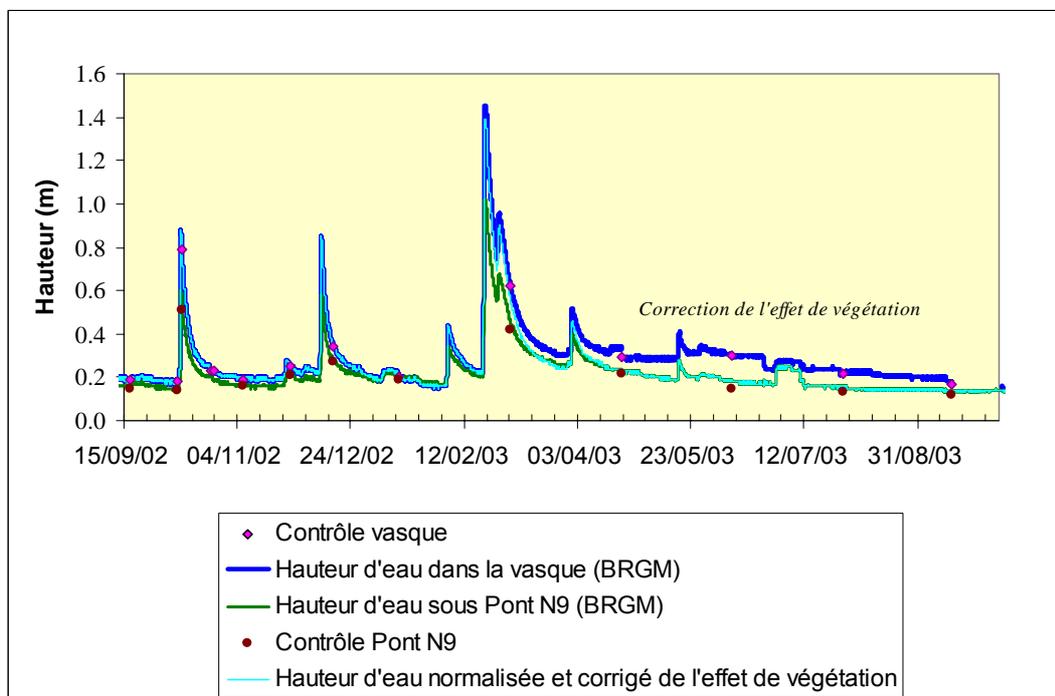


Illustration 26 - Évolution de la hauteur d'eau de la vasque de la source de Font Estramar et sous le pont de la N9 et correction apportée

date	cote à l'échelle ruisseau	débit source	erreur Q (5 %)	H piézo 102
	(mm)	(l/s)	(l/s)	(m NGF)
23/04/2001		848	42	2,45
23/04/2001		874	44	2,45
11/05/2001	245	873	44	2,41
07/06/2001	250	837	42	2,41
18/10/2001	470	630	32	2,18
25/10/2001	375	512	26	2,14
12/11/2001	240	558	28	2,08
23/01/2002	260	509	25	2,03
31/01/2002	270	505	25	2,02
20/02/2002	200	515	26	2,01
18/04/2002	415	892	45	3,12
23/04/2002	310	809	40	2,51
23/04/2002	350	620	31	2,4
08/08/2002	390	887	44	2,51
28/08/2002	360	789	39	2,31
08/10/2002				

Illustration 27 - Jaugeages de la source de Font Dame et niveaux correspondants (ruisseau et piézomètre 102).

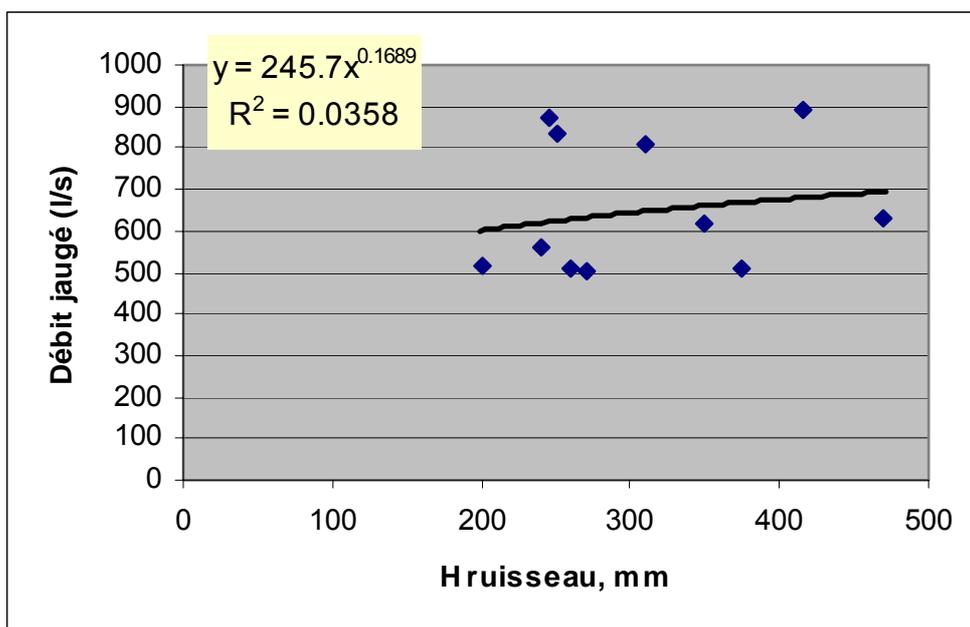


Illustration 28 - Essai de construction de la courbe de tarage de la source de Font Dame, à partir des débits et des hauteurs d'eau du ruisseau.

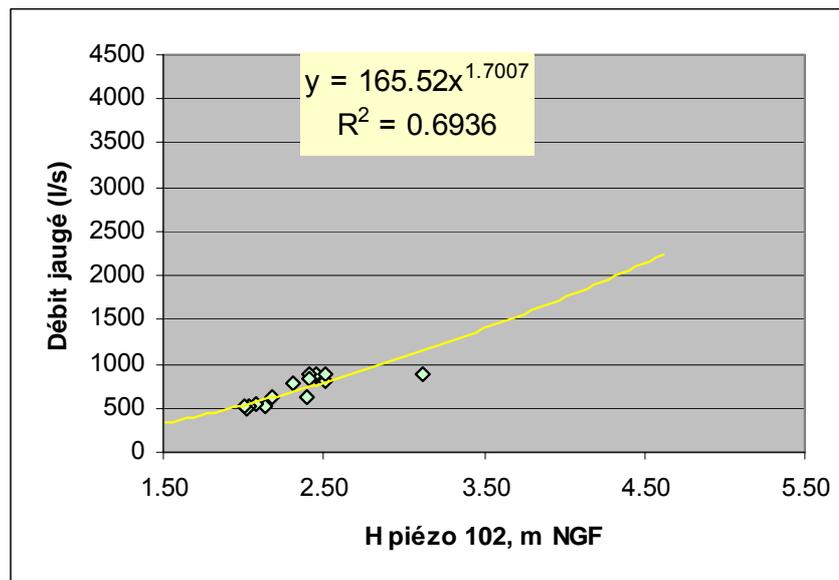


Illustration 29 - Courbe de tarage de la source de Font Dame à partir des hauteurs d'eau au piézomètre 102.

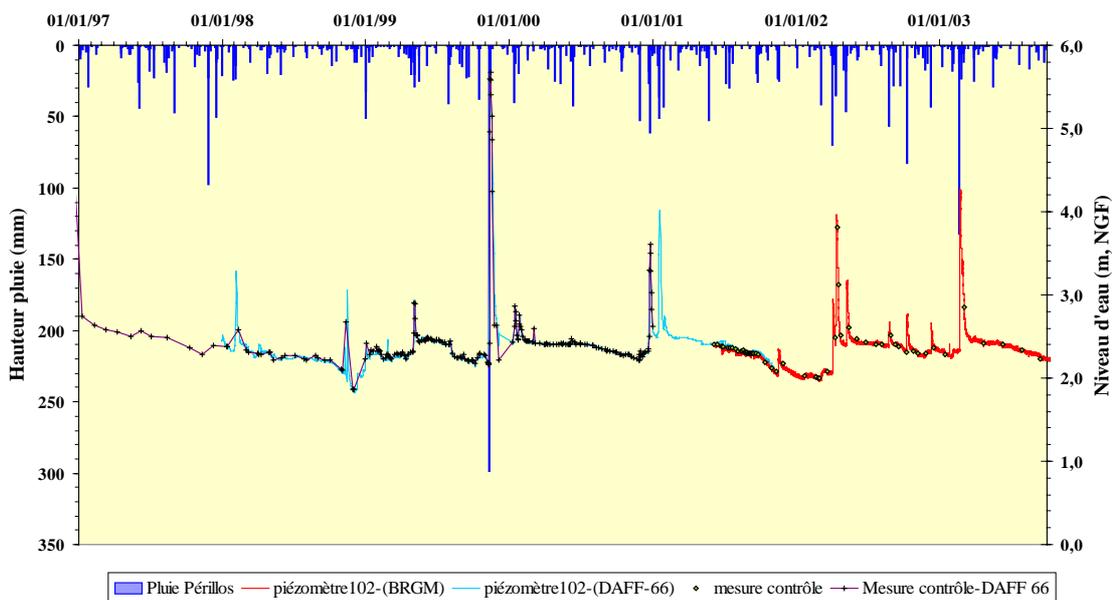


Illustration 30 - Chronique de débit de la source de Font Dame reconstituée à partir de la courbe de tarage établie en considérant les hauteurs d'eau au piézomètre 102.

Nom échantillon	pH	T °C	C mS/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	B mg/l	Br mg/l	Sr mg/l	Al µg/l	Fe µg/l	δ18O ‰	δ2H ‰	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
Font Estramar20/02/02	7,61	17,9	5,21	142	92,2	753	26,4	245	1355	3,4	292	7	0,19	3,63	1,2	<1	4	-6,6	-39,9	0,708445
E24-09/03/02	7,48	17,9	2,96	133	61,1	374	14,4	238	699	4,2	193	7	0,11	1,43	0,73	<1	8	-6,8	-41,0	0,708281
E26-11/03/02	7,45	18,1	3,45	138	70,6	457		242	866	3,3	217	7,2	0,18	2,08	0,89	<1	9			
Font Estramar19/03/02	7,62	17,8	5,35	153	106	818	29,4	250	1421	3,3	296	6,8	0,24	4,02	1,32	<1	4			
E48-03/04/02	7,46	18,2	5,55	163	111	867	31,9	248	1478	4,1	301	6,6	0,28	3,73	1,12	1	10	-6,5	-39,2	0,708467
E49-04/04/02	7,53	17,9	5,03	154	102	779	27	250	1296	2,9	272	6,4	0,24	3,42	1,01	1	9	-6,4	-38,4	0,708478
E50-05/04/02	7,55	17,5	1,366	117	27,1	132	5,3	241	232	3,8	105	6,1	0,06	0,83	0,48	2	11	-6,9	-39,4	0,708169
Font Estramar09/04/02	7,74	17,7	4,26	141	82,7	658	23,6	264	1156	2,6	204	4,8	0,18	2,95	0,87	<1	5			
E57-12/04/02	7,45	17,1	4,85	147	90,9	742	26,7	267	1314	2,3	243	5,1	0,23	3,47	1,01	<1	4			
E58-13/04/02	7,34	16,7	1,275	109	21,7	126	5	258	218	2,1	64	4,3	0,05	0,7	0,28	5	11			
E59-14/04/02	7,32	15,9	2,83	123	41,5	298	11,2	257	553	1,4	111	3,9	0,13	1,46	0,48	12	13	-6,5	-35,1	0,708418
Font Estramar15/04/02	7,67	16,3	3,86	143	71	585	20,4	261	1018	1,8	174	4,2	0,16	2,47	0,72	<1	3			
Font Estramar18/04/02		16,6	5,52	156	88,6	874	31,3	274	1488	1,8	256	5	0,23	3,64	1,04	<1	5			
Font Estramar23/04/02	7,02	17,2	6,73	168	131	1093	40,3	277	1953	2,5	318	5,5	0,35	5,06	1,33	<1	4			
E75-30/04/02		17,6	7,56	188	160	1342	49	277	2332	2,1	379	5,8	0,41	4,89	1,34	<1	11	-6,0	-34,4	0,708622
E79-04/05/02		17,7	7,23	186	154	1254	47,1	272	2279	2,9	374	5,9	0,35	6,29	1,63	2	11	-6,2	-34,5	0,708653
E83-08/05/02		17,8	7,43	186	157	1288	49	271	2310	2,6	384	6,1	0,38	6,28	1,6	2	11	-6,2	-34,9	0,708619
Font Estramar10/05/02	7,02	16,8	1,613	118	29,5	169	6,7	245	297	3,3	104	5,6	0,07	1,13	0,51	<1	3	-6,6	-38,8	0,708201
E86-11/05/02		16,9	2,75	113	50,4	371	13,5	254	700	2,4	154	3	0,15	2,14	0,67	11	11			
E87-12/05/02		16,9	3,87	124	63,4	553	20,4	269	1085	2,4	195	4,5	0,24	3,06	0,81	1	10			
Font Estramar14/05/02	7,06	17	4,92	149	90,4	761	27,1	272	1412	2,1	248	5	0,25	3,34	0,94	<1	4			
Font Estramar04/06/02		18	7,74	186	163	1374	51	271	2500	3	416	6,4	0,52	6,6	1,74	1	4	-6,0	-35,2	0,708593
Font Estramar23/07/02	7,37	18,1	8,73	186	174	1440	50,6	262	2600	2,6	468	7,8	0,575	8,79	1,85	<1	11			
Font Estramar28/08/02	7,23	18,8	5,98	150	118	918	33,2	258	1760	<3	318	6,7	0,375	6,97	1,31	<3	<20	-6,0	-36,1	0,708502
Font Estramar08/10/02	7,08	18,7	8,32	165	171	1370	47,6	261	2460	<3	427	7,3	0,533	12,7	1,58	<3	<20	-6,1	-37,6	0,708604
Font Estramar 15/09/03	7,48	18,1	7,06	160	141	1110	37,4	253	2048	2,9	386,3	7,5	0,412	5,97	1,51	1,4	<20	-6,4		0,708352
Mini=				103	19,8	121	4,8	238	208	1,4	49	3	0,05	0,67	0,22	1	3	-6,9	-41	0,70817
Maxi =				188	174	1440	51	277	2600	4,2	468	7,8	0,575	12,7	1,85	12	13	-6	-34	0,70865
Moyenne =				148,2	95,9	764,0	28,1	258,7	1372	2,7	257,3	5,7	0,257	4,0	1,04	4,0	7,8	-6,4	-37,3	0,708457

Pour l'échantillon Font Estramar du 15/09/2003, une détermination des teneurs en tritium a été réalisée : 3 ± 1 UT.

Illustration 31 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques de la source de Font Estramar (analyses effectuées au laboratoire d'analyses du BRGM Orléans).

3.2.6. Prélèvements pour analyses hydrochimiques

Pour la source de Font Estramar, 120 échantillons ont été prélevés lors des visites de terrain et lors d'événements hydrologiques particuliers¹. Parmi ces échantillons, vingt huit ont été sélectionnés en considérant l'hydrogramme des sources pour des analyses hydrochimiques.

Sur 14 échantillons, des analyses d'isotopes de l'eau ont été réalisées : 14 analyses des isotopes stables de l'eau (¹⁸O, ²H) et 13 analyses ⁸⁷Sr. Au total, quatre crues ont été analysées pour Font Estramar (ill. 31).

Pour Font Dame, 80 échantillons ont été prélevés lors des visites de terrain et lors d'événements hydrologiques particuliers. Parmi ces échantillons, 18 analyses ont été effectuées : neuf analyses des isotopes de l'eau et neuf analyses ⁸⁷Sr. Au total, trois crues ont été analysées pour Font Dame (ill. 32).

Par ailleurs, des prélèvements ont été effectués au niveau des pertes de l'Agly et du Verdoube (38 échantillons au total), en vue d'analyses complémentaires si nécessaires. Onze analyses ont été effectuées sur ces échantillons (ill. 33).

De plus, des prélèvements ont été effectués dans le cadre de deux campagnes spatiales au niveau du Plio-Quaternaire et du karst, pour caractériser les relations entre les deux aquifères ainsi que la variabilité spatiale de la salinité : 27 analyses, 23 analyses Isotopes et 23 analyses ⁸⁷Sr. (ill. 34 et 35). Les analyses effectuées sur des prélèvements en cours de l'essai de pompage à Cases de Pène sont également reportées à l'illustration 36.

3.3. SYSTÈME KARSTIQUE DE LA MOUILLÈRE

3.3.1. Objectifs

L'objectif est de mieux caractériser le fonctionnement et la structure de ce système, ainsi que d'apporter des éléments de réponse concernant l'origine des sulfates de l'eau de la source. Il s'agit de fournir des propositions de recaptage de la ressource et de compléter les données disponibles essentiellement dans la thèse de Faillat (1972), hydrogrammes sur support papier de la source des années 1977, 1978 et 1970, ainsi que quelques données hydrochimiques. Cette source est située dans le ravin de la Mouillère, à 3 km au nord de Maury.

¹ Nous remercions le responsable de la pisciculture d'Extramar qui a assuré un prélèvement quotidien des eaux de la source lors des épisodes de crue d'avril et mai 2002 .

Nom échantillon	pH	T °C	C mS/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	B mg/l	Br mg/l	Sr mg/l	Al µg/l	Fe µg/l	δ18O ‰	δ2H ‰	87Sr/86Sr
Font Dame-19/03/02	7,73	17,4	4,46	153	83,9	621	20,5	241	1140	2,8	280	7,3	0,15	2,51	1,17	<1	2	-6,8	-42	0,708329
FDP-n°16-09/04/02		17,3	4,67	141	86,5	644	22,9	237	1232	2,6	295	6,9	0,23	3,16	1,15	<1	11			
FDP-n°17-09/04/02		17,3	4,69	148	104	770	28,3	237	1242	2,5	298	7,2	0,21	3,15	1,15	<1	13	-6,7	-42	0,708355
Font Dame-09/04/02	7,2	18,4	4,51	152	89,3	637	21,3	241	1183	3	284	7,3	0,16	2,83	1,25	1	3			
Font Dame-11/04/02	7,54	17,1	4,57	154	87,1	631	21,4	243	1181	3	283	7,3	0,22	3,43	1,5	<1	2			
FDP-n°3-23/04/02		17,2	5,14	140	130	720	26,3	173	1359	1,9	321	7	0,24	3,45	1,17	<1	9			
FDP-n°4-23/04/02		17,4	5,44	150	105	777	27,8	236	1448	2,2	329	7,3	0,24	3,55	1,22	<1	9	-6,6	-39	0,708409
Font Dame-15/04/02	7,83	17,9	5,02	160	96,8	721	23,6	244	1288	3	303	7,7	0,2	3,19	1,31	<1	4			
Font Dame-23/04/02	7,26	18,5	4,68	154	91,3	649	21,4	241	1230	3	290	7,1	0,14	2,87	1,2	1	4	-6,7	-41	0,708356
FDP-n°16-14/05/02		17,4	4,35	135	89,4	629	22,7	232	1218	2,7	289	6,7	0,24	3,31	1,17	2	11			
Font Dame-10/05/02	7,22	17,3	4,84	149	87,7	650	22,1	244	1255	3,1	291	7,5	0,23	3,48	1,43	<1	4			
FDP-n°18-14/05/02		17,3	4,58	141	86,4	674	24,0	238	1282	2,2	299	6,7	0,26	3,5	1,19	<1	9	-6,6	-40	0,708373
Font Dame-14/05/02	7,28	17,6	4,57	146	89,7	626	21,2	242	1187	3,1	280	7,1	0,19	3,05	1,26	<1	4			
Font Dame-04/06/02		17,6	4,51	142	85,2	602	20,4	243	1147	3,2	271	7,2	0,14	2,66	1,1	<1	5	-6,7	-41	0,708345
Fondame.23/07/02	7,53	17,6	4,24	147	85	649	21,4	241	1150	3	280	8,2	0,211	4,71	1,22	1	12			
Font Dame-28/08/02	7,48	17,7	4,32	139	84,3	623	22,4	244	1150	<3	279	7,7	0,27	4,59	1,15	<3	<20	-6,7	-41	0,708329
Font Dame-08/10/02	7,35	17,6	4,37	137	85,1	626	22,3	242	1154	<3	283	7,6	0,264	5,54	1,12	<3	<20	-6,7	-42	0,708331
Font Dame 15/09/03	7,63	17,8	4,17	132	82,8	587	20,9	238	1090	2,2	284	7,5	0,194	3,47	1,199	1,1	<20	-6,8	-42	0,708352
Mini=	7,2	17,1	4,17	132	82,8	587	20,4	173	1090	1,9	271	6,7	0,14	2,51	1,1	1	2	-6,8	-42	0,70833
Maxi =	7,83	18,5	5,44	160	130	777	28,3	244	1448	3,2	329	8,2	0,27	5,54	1,5	2	13	-6,6	-39	0,70841
Moyenne =	7,5	17,6	4,6	145,6	91,6	657,6	22,8	236,5	1219	2,7	291,1	7,3	0,21	3,5	1,22	1,2	6,8	-6,7	-41,1	0,708353

Pour l'échantillon Font Dame du 15/09/2003, une détermination des teneurs en tritium a été réalisée : 5 ± 2 UT.

Illustration 32 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques de la source de Font Dame (analyses effectuées au laboratoire d'analyses du BRGM Orléans).

Nom	date	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	NH4 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	B mg/l	Br mg/l	Sr mg/l	δ18O ‰	δ2H ‰	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
Agly_pertes	11/06/2001	8,33	19,2	522	82,3	10,0	6,8	1,4	181	8,1	1,6	<0,1	116	6,7	0,018	0,012	0,513	-7,5	-48,2	0,707928
Agly_pertes	06/08/2001	8,22	23,2	526	92,5	12,0	8,6	1,8	196	9,8	2,3	<0,1	130	8,5	0,019	0,014	0,535	-7,0	-45,7	0,708240
Agly_pertes	21/02/2002	7,48	10,4	711	117	16,1	12,8	2,1	186	13,8	1,6	<0,1	188	5,1	0,028	<0,05	0,785	-6,9		0,708174
Agly_pertes	10/05/2002	7,9	13,4	377	60,3	6,8	6,1	1,8	143	6,5	2,3	<0,1	58	9,1	0,012	<0,05	0,333	-7,5		0,708311
Agly_pertes	26/06/2002	8,27	26	492	82,6	9,3	6,5	1,5	187	8,4	1,2	<0,1	92	8,6	0,013	<0,05	0,509	-7,4		0,708011
Agly_pertes	10/09/2002	8,41	21	508	80,4	10	6,1	1,5	169	6,5	0,1	<0,1	113	7,9	0,013	<0,05	0,553	-7,3		0,707929
Verdoble-pertes	18/10/2001	8,01	18,4	652	94,8	22,3	10,7	2,3	217	16,2	0,6	<0,1	141	4,5	0,031	0,031	0,669	-6,9	-42,7	0,707970
Verdoble-pertes	21/02/2002	7,61	9	669	91,2	23,1	11,5	1,5	204	16,6	0,4	<0,1	147	2,5	0,023	<0,05	0,806	-6,9		0,707988
Verdoble-pertes	24/04/2002	8,06	16,3	665	94	17,8	11,6	1,3	199	17,8	2,7	<0,1	122	4,3	0,027	<0,05	0,679	-6,8		0,708089
Verdoble-pertes	26/06/2002	8,3	27,8	590	76	20	12,3	1,4	179	20,9	<0,1	<0,1	136	3,7	0,03	<0,05	0,704	-6,5		0,708095
Verdoble-pertes	10/09/2002	8,08	22,7	625	83,2	21,6	11,9	2	189	17,2	0,5	<0,1	132	2,9	0,035	<0,05	0,742	-6,5		0,708026

Illustration 33 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques de l'eau de l'Agly et du Verdoble au niveau de leurs pertes (analyses effectuées au laboratoire d'analyses du BRGM Orléans).

Nom	Ca	Mg	Na	K	HCO3-	Cl	NO3	NH4	SO4	SiO2	B	Br	Sr	Al	Fe	δ18O	δ2H	87Sr/86Sr
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	μg/l	μg/l	‰	‰	
Piézo 102 07/08/02	131	76,6	593	19,7	240	1025	4,7	<0,1	254	7,8	0,257	3,270	1,18	3	14	-6,7	-41,6	0,708334
Scé du lavoir (Saises) 23/04/02	91,8	9,9	10,7	1,2	239	17,3	3,8	<0,1	90,2	6,1	0,023	0,065	0,51	1	13			
Mas de la chique 25/04/02	85,6	14,6	12,2	1,5	174	17	5,1	<0,1	139	8,4	<0,02	0,080	0,76	<1	12			
Piézo Roboul 25/04/02	77,5	4	7,8	1,3	227	14,9	3,6	<0,1	31,7	6,3	<0,02	0,053	0,20	2	13			
Piézo 107 12/02/03	73,5	7,6	59,9	2,8	192	117,4	1,1	<0,1	36,5	5,7	0,045	0,570	0,12	<30	<20	-5,3	-30,7	0,708376
Piézo 102 12/02/03	84	44,4	318	11,9	172	621	5,5	<0,1	150	4,5	0,144	4,490	0,59	<30	<20	-6,1	-36,7	0,708329
Piézo 104 12/02/03	66,6	3,9	10	0,9	225	13	4,1	<0,1	14,2	3,7	0,02	0,050	0,13	<30	<20	-10,3	-72	0,708103
Scé du lavoir (Saises) 12/02/03	110	16,2	11,1	1,5	228	16,3	3,2	<0,1	151,3	8,1	0,022	0,060	0,74	<30	<20	-7,2	-44,9	0,707897
Mas de la chique 12/12/03	92,8	15,3	12,4	1,5	186	17,3	5,6	<0,1	142,2	8,7	0,02	0,060	0,71	<30	<20	-7,3	-45,8	0,707846
Piézo Roboul 13/02/03	75,6	3,3	6,9	1	226	11,9	3,8	<0,1	17,2	6	0,02	0,060	0,14	<30	<20	-5,8	-34,6	0,708090
Piézo.102-28/08/2002	106	56,3	403	16,3	240	764	5,3	<0,1	192	6,8	0,199	2,830	0,79	<3	<20	-5,9	-36,1	0,708338
Piézo.102-08/10/2002	127	74,2	549	21	235	1040	8	<0,1	263	7,3	0,238	4,310	1,00	<3	<20	-6,5	-39,8	0,708342
Piézo.104-28/08/2002	63,2	2,7	10,6	1,2	191	13,4	3,6	<0,1	12,2	3,5	0,026	0,050	0,10	3,9	<20	-4,2	-22	0,708199
Piézo.107-28/08/2002	93,4	13,1	106	3,5	214	210	-1	<0,1	49	4,9	0,055	0,880	0,18	<3	<20	-5,6	-32,5	0,708339
Scé du lavoir (Saises) 28/08/02	104	15	11,5	1,5	216	17	1,7	<0,1	136	7,7	0,025	0,050	0,65	<3	<20	-7	-43,3	0,707897
Scé du lavoir (Saises) 08/10/02	110	16,8	11,4	1,6	205	16,2	2,9	<0,1	156	7,9	0,023	0,050	0,71	<3	<20	-7,2	-44,3	0,707892

Illustration 34 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux du réseau de suivi « karst » et des campagnes spatiales « karst/Plio-quaternaire » (analyses effectuées au laboratoire d'analyses du BRGM Orléans).

Étude	Nom	date	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	B mg/l	Br mg/l	Sr mg/l	Al µg/l	Fe µg/l	δ18O ‰	δ2H ‰	3H UT	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
Corbières	Maison Retraite	25/04/2002	103	17,1	72,8	3,3	228	125	5,8	132	9,1	0,052	0,389	0,630	3	13				0,708036
Corbières	MAS LAMER	25/04/2002	53,6	8,1	26,4	1,4	183	20,5	0,3	59,8	22,5	0,025	0,104	0,420	1	13				0,709079
Corbières	MAS PECHOT	25/04/2002	103	9,5	13,7	1,3	236	22,6	20,6	99,2	10,4	<0,02	0,133	0,470	<1	12				0,707931
Corbières	MAS NOU	25/04/2002	118	9,9	20,8	1,2	211	25,8	34	146	9,4	<0,02	0,128	0,450	<1	12				0,707970
Corbières	Piézo Font Dame	23/04/2002	323	52,8	438	4,4	8	1220	<0,1	184	<0,5	<0,02	4,430	3,000	<1	12				0,708210
Corbières	RIVESALTES AEP F3	25/04/2002	52,7	9,9	31,6	1,6	200	27,6	2,6	49,9	26,9	0,024	0,144	0,300	<1	11				0,714870
Corbières	MAS ST MARIE	25/04/2002	113	6,6	30,8	0,8	300	68,3	8,9	9,8	9,8	0,036	0,336	0,140	<1	10				0,709067
Corbières	F Font Dame New	15/05/2002	177	41,4	346	4,3	199	705	3,1	179	15,9	0,123	3,100	1,710	<1	10				0,708312
Corbières	F Font Dame New	29/04/1998	95,8	20,4	175	3,2	210	307	2,3	90,3	13,8	0,111	0,78	0,93			-7,4	-45,6		0,708184
Corbières	MAS LAMER	12/02/2003	56,8	8,6	27,2	1,7	202	21,5	1,1	60,7	23,5	0,026	0,07	0,39	<30	<20	-7,3	-45,6		0,709046
Corbières	Saises AEP F3 village	12/02/2003	96,2	13,7	12,5	1,3	235	16,8	6,6	121,1	12,4	<0,02	0,08	0,66	<30	<20	-7,2	-45,7		0,707840
Corbières	MAS PECHOT	13/02/2003	97,9	11,1	13,5	1,3	253	19,7	15,9	92,3	10,7	<0,02	0,14	0,49	<30	<20	-6,8	-42,2		0,707898
Corbières	MAS ST MARIE	13/02/2003	115	6,8	31,7	0,8	340	69,5	10,2	11,3	10	0,03	0,55	0,13	<30	<20	-6,4	-38,8		0,709060
Corbières	MAS NOU	13/02/2003	132	10	25,9	1,2	220	33,4	59,4	147,9	9,7	<0,02	0,2	0,39	<30	<20	-6,4	-39,3		0,707896
Corbières	FORAGE MONA	13/02/2003	87	11,2	31,6	1,5	196	34,1	29,4	106,9	22	0,027	0,21	0,43	<30	<20	-6,9	-42,6		0,709032
Corbières	RIVESALTES AEP F3	12/02/2003	54,8	10,6	31,3	1,6	202	27,1	3	51	28,1	0,023	0,14	0,27	<30	<20	-7,2	-44,6		0,714831
NO3-Pia	Pia AEP F2	17/10/2002	59,6	12,2	45,6	1,1	196	64,6	11,9	48,7	27,7	0,024	0,218	0,35	2	8	-7,3	-45	<1	0,716516
NO3-Pia	Rivesalte AEP F3	17/10/2002	50,2	10	33,5	1,4	201	28,4	2,9	49,1	27,6	0,021	0,084	0,3	2	10	-7,2	-43,8	<1	0,714854
Leucate 98	F Font Dame New	12/02/2003	130	29,7	227	3,5	228	486	2,3	153,4	16	0,086	2,96	1,11	<30	<20	-6,7	-42,1		0,708310

Étude NO3-Pia : « Détermination de l'origine des nitrates dans l'aquifère du Roussillon par le traçage isotopique des sources d'azote (Commune de Pia, Pyrénées-Orientales) ». (Ladouche et al., 2003, BRGM/RP-52745-FR)

Étude Leucate 98 : « Recherche de l'origine de la contamination bactériologique de l'étang de Saises Leucate » (Ladouche et al., 2000, BRGM/RP-50003-FR)

Illustration 35 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux échantillonnées lors des campagnes spatiales « karst/Plio-quaternaire » (analyses effectuées au laboratoire d'analyses du BRGM Orléans).

Étude	Nom	date	Ca	Mg	Na	K	HCO3-	Cl	NO3	NH4	SO4	SiO2	B	Br	Sr	δ18O	δ2H	187Sr/186Sr
			mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	‰	‰
pompage	CP1	07/06/2001 09:35	91,9	11,7	10,7	1	238	15,3	5,8	<0,1	90,3	7	0,012	0,028	0,322	-7,2	-41,5	
pompage	CP2	07/06/2001 10:00	94,1	11,5	10,2	1,1	237	15,5	5,9	<0,1	89,3	7	0,013	0,031	0,327	-6,9		
pompage	CP3	07/06/2001 10:30	94,7	11,7	10,1	1	238	15,5	5,8	<0,1	89,4	7	0,013	0,034	0,324	-6,9		
pompage	CP4	07/06/2001 11:00	96,2	11,6	10,2	0,9	237	15,8	6	<0,1	89,1	7	0,014	0,033	0,34	-6,8	-41,5	
pompage	CP15	07/06/2001 18:30	94	11,1	10,3	0,9	232	15,7	5,6	<0,1	81,6	7	0,013	0,03	0,289	-7,1		
pompage	CP30	09/06/2001 09:30	94,1	11,1	9,9	0,9	237	15,9	5,5	<0,1	77,7	7,1	0,013	0,032	0,289	-7,0		0,708357
pompage	CP34	10/06/2001 09:30	94,3	11,1	9,9	1	232	15,5	5,6	<0,1	75,8	7,1	0,013	0,031	0,277	-6,7	-41,2	
pompage	CP41	16/06/2001 11:00	96,1	11,3	10,4	0,8	243	16	5,4	<0,1	75,7	7,3	0,013	0,034	0,272			0,708415
pompage	CP49	24/06/2001 10:00	96,8	11,5	10,5	0,9	244	16,3	5,8	<0,1	75,2	7,4	0,014	0,04	0,292	-7,2		
pompage	CP60	05/07/2001 10:30	97,5	11,5	11	0,9	244	16,8	6,4	<0,1	75,9	7,5	0,013	0,044	0,28	-7,2		0,708469
pompage	CP68	13/07/2001 11:00	93,4	11,5	12,4	0,9	244	18,7	6,5	<0,1	76,6	8,2	0,011	0,027	0,299	-7,0		
pompage	CP75	20/07/2001 11:00	92	11,6	12,6	1	250	19	6,5	<0,1	75	8,2	0,012	0,027	0,311	-7,2		0,708501
pompage	CP92	06/08/2001 10:55	92	11,5	12,2	0,9	254	19,2	6,9	<0,1	73,3	8,1	0,014	0,039	0,306	-6,8	-41,4	0,708539
pompage	CP99	13/08/2001 09:45	96,5	12	12,5	1,2	247	19,6	6,6	<0,1	76,1	7,9	0,012	0,054	0,284	-6,8		
pompage	CP106	20/08/2001 13:45	98,6	12,1	12,1	1,3	237	19,7	6,9	<0,1	75,5	8,1	0,011	0,052	0,291	-6,7		
pompage	CP110	24/08/2001 09:50	99,1	12,2	12,5	1,4	250	19,8	6,8	<0,1	75,8	8,2	0,012	0,054	0,287	-7,0		
pompage	CP113	27/08/2001 12:30	98,7	12,1	12,7	1,4	252	19,7	6,8	<0,1	75	8,3	0,012	0,056	0,286	-6,9		0,708558
Corbières_Spatial	Case-Pene	14/05/2002	92,6	11,6	11,2	1,3	231	16,5	4,8	<0,1	99,4	7,8	<0,02	0,105	0,46			
			Mini=	11,1	9,9	0,8	231	15,3	4,8		73,3	7	0,011	0,027	0,272	-7,2	-41,5	0,708357
			Maxi =	12,2	12,7	1,4	254,2	19,8	6,9		99,4	8,3	0,014	0,105	0,46	-6,7	-41,2	0,708558
			Moyenne =	95,1	11,6	11,2	1,0	241,5	17,3	6,1	80,4	7,6	0,0	0,0	0,3	-7,0	-41,4	0,708473

Illustration 36 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux prélevées à Cases de Pène au cours du pompage et lors d'une crue (analyses effectuées au laboratoire d'analyses du BRGM Orléans).

Au XIX^e siècle, ce ravin comportait de multiples petites sources peu importantes. En 1864, la plus importante de ces sources a fait l'objet de travaux de mise à jour en creusant une fouille de 50 m² et de 5 m de profondeur. Depuis ces travaux, les débits s'écoulant de la source sont plus importants.

Cette source constitue une émergence des calcaires crétacés dont les eaux transitent au contact des marnes albo-aptiennes qui affleurent à l'emplacement des sources de la Mouillère.

Les objectifs spécifiques de caractérisation hydrochimique et isotopique sont de déterminer :

- la variabilité temporelle de la signature chimique de la zone noyée et de l'influence éventuelle des marnes ;
- l'importance de la zone noyée et le rôle éventuel d'un épikarst ;
- les conditions d'écoulement au niveau des drains karstiques ;
- l'aire et la localisation de la zone de recharge.

3.3.2. Description du site

La source de la Mouillère, caractérisée par une anomalie thermique positive est située sur la commune de Maury, plus précisément sur le flanc nord du synclinal de Saint-Paul-de-Fenouillet, à proximité de la route reliant Maury au col de Quéribus (ill. 37 et 38).

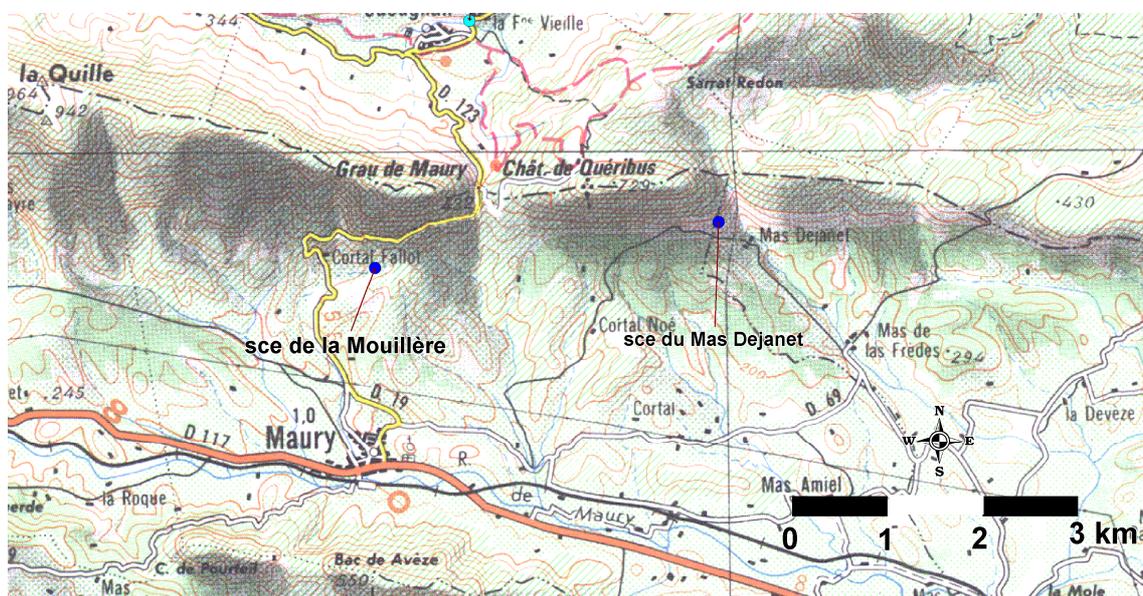


Illustration 37 - Localisation la source de la Mouillère (extrait de la carte IGN à l'échelle 1/100 000).

Les coordonnées de la source et les références, au sein de la Banque de données du Sous-Sol gérée par le BRGM, de la source sont les suivantes :

- n° Banque du Sous-Sol : 1090 1X 0003 ;
- Coordonnées Lambert II/étendu : 621 050 (m) ; 1 758 500 (m), alt. : 275 m.

La source émerge des marnes albiennes, de couleur brune et d'aspect cassant, dans un petit talweg d'orientation E-W.

La prise de la canalisation qui permet l'AEP de la commune de Maury se situe dans la chambre de captage. Sur cette canalisation, un trop-plein fonctionne en continu, il permet de remplir un plan d'eau faisant office de piscine communale en été.

Les volumes annuels prélevés par la commune de Maury sont de l'ordre de 3 à 6 l/s. Le trop-plein possède d'après nos observations un débit de l'ordre de 10 l/s au maximum.



Illustration 38 - Captage de la Mouillère et installation (coffret de mesures et pluviomètre).

3.3.3. Équipement de la source

La source est équipée depuis janvier 2002 et la métrologie fonctionnelle depuis février de la même année. Des problèmes d'humidité liés à la température de la source notamment ont entraîné une adaptation et une réinstallation du coffret comprenant la centrale d'acquisition et les batteries. Un problème de la carte mémoire de la station est apparu en avril 2002 ; son remplacement a été effectué sans perte de données sur la période concernée.

Une centrale OTT de type HYDROSENS enregistre au pas de temps horaire les mesures issues d'un capteur de pression bulle à bulle (Orphimède), de capteurs de conductivité et de température, ainsi que d'un pluviomètre à auget (type R01-AB200/400) installé sur le toit de la chambre de captage. Le pluviomètre a été installé le 12 juin 2002 (ill. 39).



Illustration 39 - Coffret avec centrale d'acquisition pour la source et le pluviomètre, ainsi que batterie à la source de la Mouillère.

De part sa localisation, endroit abrité, la pluviométrie est influencée et non représentative du bassin d'alimentation supposé. Les données fournies peuvent être intégrées dans le calcul de bilan en considérant les pluies d'autres stations tels que Cucugnan, Fourtou et Saint-Paul-de-Fenouillet. Le pluviomètre sert de point d'échantillonnage pour des analyses chimiques.

Les valeurs extrêmes et la moyenne relevées par les capteurs sont présentées ci-dessous (ill. 40 et 41) :

- hauteur d'eau (m) moyenne : 0,164 minimum : 0,07 max. : 0,58 ;
- conductivité (mS/cm) moyenne : 1,479 minimum : 1,1 max. : 1,618 ;
- température (°C) moyenne : 24,3 minimum : 23,8 max. : 25,9.

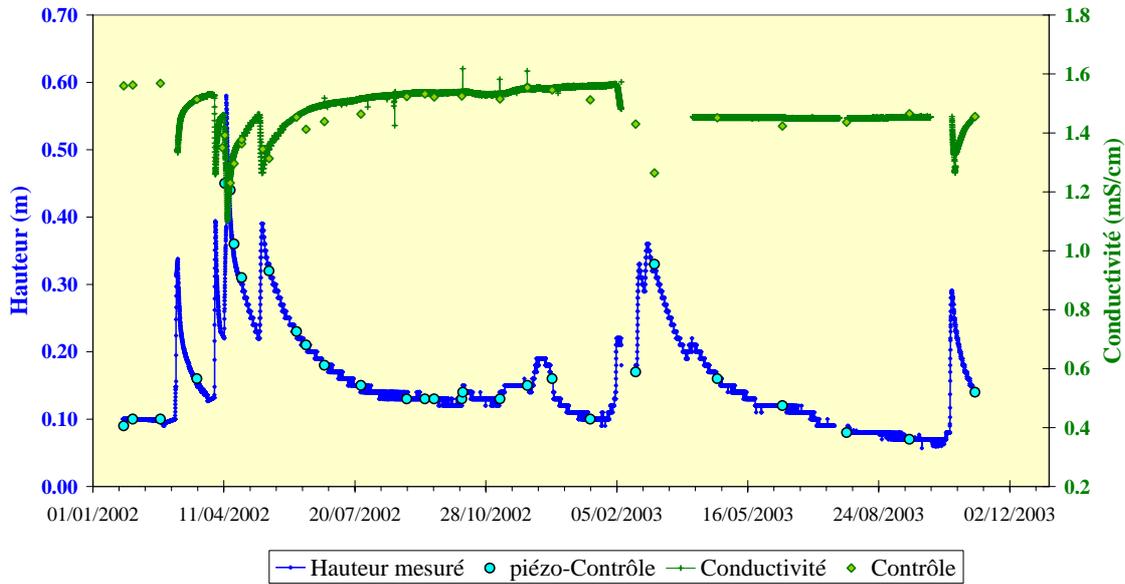


Illustration 40 - Évolution temporelle de la conductivité et de la hauteur d'eau enregistrées à la source de la Mouillère.

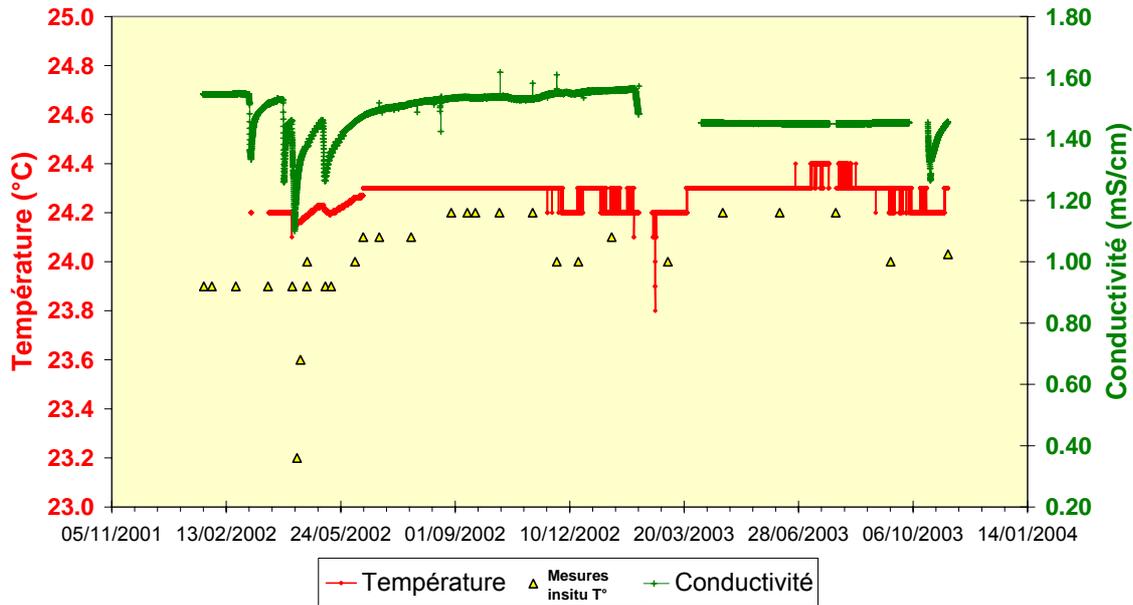


Illustration 41 - Évolution temporelle de la conductivité et de la température enregistrées à la source de la Mouillère.

3.3.4. Mesures de contrôle

Pour les séries de température et de conductivité, les points de contrôle montrent un certain décalage par rapport aux données relevées en continu (ill. 42). On utilisera les valeurs mesurées lors des tournées de terrain et les chroniques de conductivité et température uniquement de manière qualitative.

Les valeurs extrêmes et moyennes de température et de conductivité relevées sur le terrain sont les suivantes :

- Conductivité (mS/cm) moyenne : 1,444 minimum : 1,230 max. : 1,568 ;
- Température (°C) moyenne : 23,9 minimum : 21,1 max. : 24,5.

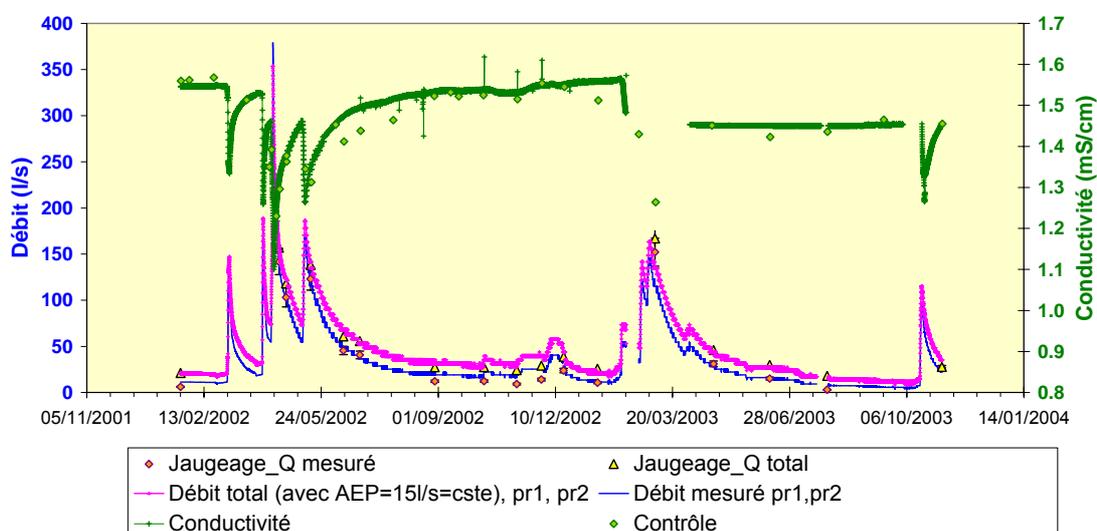


Illustration 42 - Séries temporelles du débit et de la conductivité avec mesures de contrôle, pour la source de la Mouillère.

3.3.5. Établissement des courbes de tarage de la source

Les débits jaugés sur le terrain sous-estiment le débit réel, vu qu'un débit est prélevé au niveau du captage pour l'alimentation en eau potable de la commune de Maury. Une correction de 15 l/s correspondant au prélèvement pour l'AEP (5 l/s en moyenne) et au trop-plein (estimé à 10 l/s, cf. mesures ponctuelles au seuil) est ajoutée aux débits mesurés pour l'établissement de la courbe de tarage (ill. 43).

Les hauteurs d'eaux relevées par la station OTT s'échelonnent de 9 à 58 cm, celles déterminées lors des mesures de jaugeage pour établir les courbes de tarage vont de 8 à 44 cm (la précision est de 1 cm).



Illustration 43 - Trop-plein de la source de la Mouillère après passage de la route reliant Maury au château de Quéribus.

Au total, 18 jaugeages ont été effectués au cours des années 2002 et 2003 (ill. 44). Ces jaugeages ont été effectués pour l'essentiel à l'aide d'un micro-moulinet couplé à une perche intégratrice (C2 OTT). Seul le dernier jaugeage de novembre 2003 a été effectué à l'aide d'un courantomètre électromagnétique (Nautilus OTT). La gamme de débit jaugé se situe entre 3 et 206 l/s. L'erreur sur les valeurs mesurées est estimée à 5 %.

Date	Cote piézométrique ruisseau (m)	Valeur de référence [2,75] - cote piézométrique ruisseau (m)	H ruisseau moyen - profil jaugeage (m)	Débit AEP prélèvement (l/s)	Débit source soustraction AEP(l/s)	Débit source total (l/s)	erreur Q (5%) l/s
24/01/02	2,66	0,09	0,09	15	6,07	21,07	1,05
15/04/02	2,31	0,44	0,40	15	206,33	221,33	11,07
18/04/02	2,39	0,36	0,32	15	141,81	156,81	7,84
24/04/02	2,44	0,31	0,26	15	103,18	118,18	5,91
15/05/02	2,43	0,32	0,30	15	123,20	138,20	6,91
12/06/02	2,54	0,21	0,19	15	45,62	60,62	3,03
26/06/02	2,57	0,18	0,16	15	40,70	55,70	2,78
29/08/02	2,62	0,13	0,10	15	12,17	27,17	1,36
10/10/02	2,61	0,14	0,12	15	12,38	27,38	1,37
07/11/02	2,62	0,13	0,11	15	9,12	24,12	1,21
28/11/02	2,60	0,15	0,13	15	14,04	29,04	1,45
17/12/02	2,59	0,16	0,14	15	23,75	38,75	1,94
15/01/03	2,65	0,10	0,07	15	10,67	25,67	1,28
05/03/03	2,42	0,33	0,33	15	151,99	166,99	8,35
24/04/03	2,59	0,16	0,15	15	31,00	46,00	2,30
11/06/03	2,63	0,12	0,11	15	15,00	30,00	1,50
30/07/03	2,67	0,08	0,03	15	3,00	18,00	0,90
05/11/03	2,61	0,14	0,09	15	26,71	41,71	4,17

Illustration 44 - Synthèse des résultats des jaugeages de la source de la Mouillère.

La courbe de tarage a été établie après différents tests, en considérant l'ajustement d'une formule de type puissance simple sur les données de débits mesurés additionnés des débits de trop-plein et d'AEP (15 l/s) (ill. 45). L'ajustement est satisfaisant avec un coefficient $R^2 = 0,978$; l'équation de la relation entre débit et hauteur d'eau est ainsi la suivante :

$$Q = A \times h^B$$

avec $A = 855,393$ et $B = 1,62177$.

Malgré une incertitude sur la valeur du débit jaugé liée à l'erreur de la mesure et à l'estimation du trop-plein et prélèvement AEP, la courbe de tarage est jugée comme étant de bonne qualité ; les jaugeages réalisés explorent plus de 75 % de la gamme des hauteurs d'eau mesurées. Les données estimées du trop-plein et de l'exploitation pour l'AEP sont satisfaisantes ; des mesures ponctuelles du trop-plein seront effectuées lors de la phase II pour affiner ces estimations. De même, les données relatives à l'exploitation de la source pour l'AEP seront recueillies en cours de la phase II.

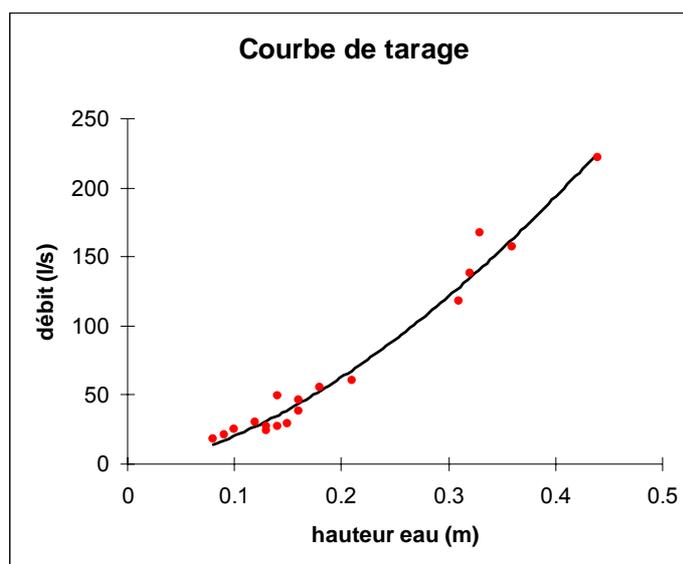


Illustration 45 - Courbe de tarage de la source de la Mouillère.

3.3.6. Prélèvements pour analyses hydrochimiques et isotopiques

Onze échantillons ont été pris entre le 21 février et le 28 novembre 2002 pour analyse des ions majeurs et trois analyses d'isotope du strontium (ill. 46).

date	pH	T	C	Ca	Mg	Na	K	HCO3-	Cl	NO3	NH4	SO4	SiO2	B	Br	Sr	Al	Fe	δ18O	δ2H	87Sr/86Sr
		°C	µS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	‰	‰	
21/02/2002	7,19	23,9	1568	328	48	9,3	1,8	196	9,4	1,1	<0,1	742	15,8	0,064	0,032	3,47	1	12			0,707279
21/03/2002	7,41	23,9	1513	323	46,4	8,9	1,8	197	9,5	1,1	<0,1	705	15,4	0,064	0,034	3,35	<1	11			
09/04/2002	7,12	24,5	1350	289	40,6	8,4	1,6	201	9,3	1,3	<0,1	616	14,3	0,067	0,031	2,96	<1	9			
15/04/2002		23,2	1230	244	33,9	8	1,4	201	9,3	1,2	<0,1	497	12,4	0,057	0,026	2,46	<1	8			0,707271
24/04/2002	6,88	23,9	1363	282	39,5	8,2	1,6	202	9,6	1,2	<0,1	603	14,1	0,066	0,031	2,82	<1	9			
10/05/2002	6,9	23,9	1345	271	38,6	8,5	1,6	202	9,5	1,1	<0,1	579	13,7	0,066	0,029	2,8	<1	7			
15/05/2002	6,9	23,9	1313	266	38,1	8,1	1,7	204	9	1,2	<0,1	555	13,4	0,064	0,027	2,7	<1	5			
26/06/2002	7,15	24,1	1438	315	45,4	8,9	1,8	199	9,2	1,1	<0,1	682	15,5	0,075	0,032	3,24	<1	7			
29/08/2002	7,35	24,2	1523	323	46,5	9	1,9	199	9,6	1,2	<0,1	705	15,7	0,085	0,031	3,36	<1	9			
07/11/2002	6,93	24,2	1515	394	50,6	9,2	1,5	200	9,3	0,8	<0,1	752	16,2	0,064	-0,05	3,26	<3	<20			
28/11/2002	6,98	24	1554	453	53,2	9	1,4	199	9,5	0,9	<0,1	772	17,1	0,065	-0,05	3,29	<3	<20			0,707219
Mini=	6,88	23,2	1230	244	33,9	8	1,4	196	9	0,8		497	12,4	0,057	-0,05	2,46		5			
Maxi =	7,41	24,5	1568	453	53,2	9,3	1,9	204	9,6	1,3		772	17,1	0,085	0,034	3,47		12			
Moyenne =	7,1	24,0	1428	317	43,7	8,7	1,6	200	9,4	1,1		655	14,9	0,1	0,0	3,1		8,6			

Illustration 46 - Principaux résultats des analyses chimiques des échantillons prélevés à la source de la Mouillère en 2002.

3.4. SYSTÈME KARSTIQUE DE LA TIROUNÈRE

3.4.1. Objectifs

La Tirounère est une source importante qui émerge dans le lit de l'Agly en rive droite, à la sortie des gorges de Galamus. Le gouffre qui sert d'exutoire est alimenté par un réseau pénétrable, accessible également par un aven, le Barrenc de la Balme, situé à moins de 100 m de distance de l'exutoire. Du fait de la position de la source, le régime de la Tirounère est mal connu. Des mesures ponctuelles de débit ont été estimées par jaugeage différentiel de l'Agly (amont et aval) par le CERH au début des années 1960 ; le débit d'étiage était compris entre 0,29 et 0,135 m³/s pour les années 1961-1962 et le débit moyen serait de l'ordre de 0,3 m³/s au minimum (Faillat, 1972). Aucune donnée limnimétrique n'existe avant le présent projet. Des variations de température dans la zone d'émergence suggèrent des mélanges d'eau d'origines différentes. Le faciès chimique est bicarbonaté calcique, avec de fortes concentrations en sulfates (env. 120 mg/l).

Ainsi, un des objectifs principaux de ce projet, est de procéder à la caractérisation du fonctionnement et d'évaluer la ressource en eau de ce système. Pour ce faire, il a été nécessaire d'équiper l'aven afin de pouvoir suivre les variations de niveau d'eau. Des jaugeages différentiels ont été effectués au niveau de l'Agly, afin d'établir la courbe de tarage de la source. Des prélèvements d'échantillons ont été effectués selon le protocole d'analyses chimiques, afin de caractériser des périodes d'étiage et de hautes eaux (crues).

Les objectifs spécifiques de la caractérisation chimique de ce système karstique unaire sont de contribuer à la compréhension de la structure et du fonctionnement du système de la Tirounère. Il s'agit en outre de déterminer l'importance de la zone noyée, de déterminer le rôle et l'importance joués par la zone épikarstique dans l'alimentation du système karstique, ainsi que d'estimer des temps de transfert et de séjour des eaux souterraines. De plus, il s'agit aussi de déterminer en terme de flux, l'importance de la participation des eaux de surface -Agly- au système karstique en fonction des conditions hydrologiques.

3.4.2. Description du site

La source de la Tirounère est située au débouché du défilé des gorges de Galamus en rive droite de l'Agly. Ses coordonnées et références dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM sont les suivantes :

- coordonnées Lambert II : X = 611 600 (m) ; Y = 59 275 (m) ; Z = 310 m NGF ;
- code BSS : 1089 4X 0013.

La commune de Saint-Paul-de-Fenouillet, qui compte 1 840 habitants, est alimentée par la source de la Tirounère, captée par un forage réalisé au droit du conduit karstique, environ 20 m à l'aval de l'aven (Barrenc-de-la-Balme) ; le captage est exploité par la SAUR. La source est exploitée à raison de 700 m³ (8 l/s) à 900 m³ (10,5 l/s) par jour, soit un débit moyen de 9 l/s. Avant la réalisation du forage, l'eau était

captée par gravité, ce qui a été facilité par la construction d'un barrage surélevant le niveau de l'Agly de 1 à 2 m. Une retenue d'eau située sur l'Agly en aval de la source permettait la mise en charge d'une première conduite aujourd'hui abandonnée.

3.4.3. Équipement

Accédant au niveau du lac par l'entrée du barrenc située une trentaine de mètres au-dessus du niveau d'émergence de la Tirounère au niveau de l'Agly, une sonde de conductivité – température et une sonde de niveau d'eau (type de sonde, bulle à bulle OTT) ont été installées à la fin février 2002 (22/02/2002) par les techniciens du BRGM, assistés de V. Durand, du bureau d'ingénierie ANTEA (antenne de Montpellier), au niveau du « lac » souterrain (ill. 47 et 48). Le câble, remonté en surface et enterré par protection jusqu'à la cabane du forage de la SAUR, est ainsi relié à la centrale d'acquisition. Cette centrale est équipée d'un système de télétransmission des données acquises au pas de temps horaire. Ces dernières sont ainsi consultables directement par modem à partir des bureaux du BRGM.

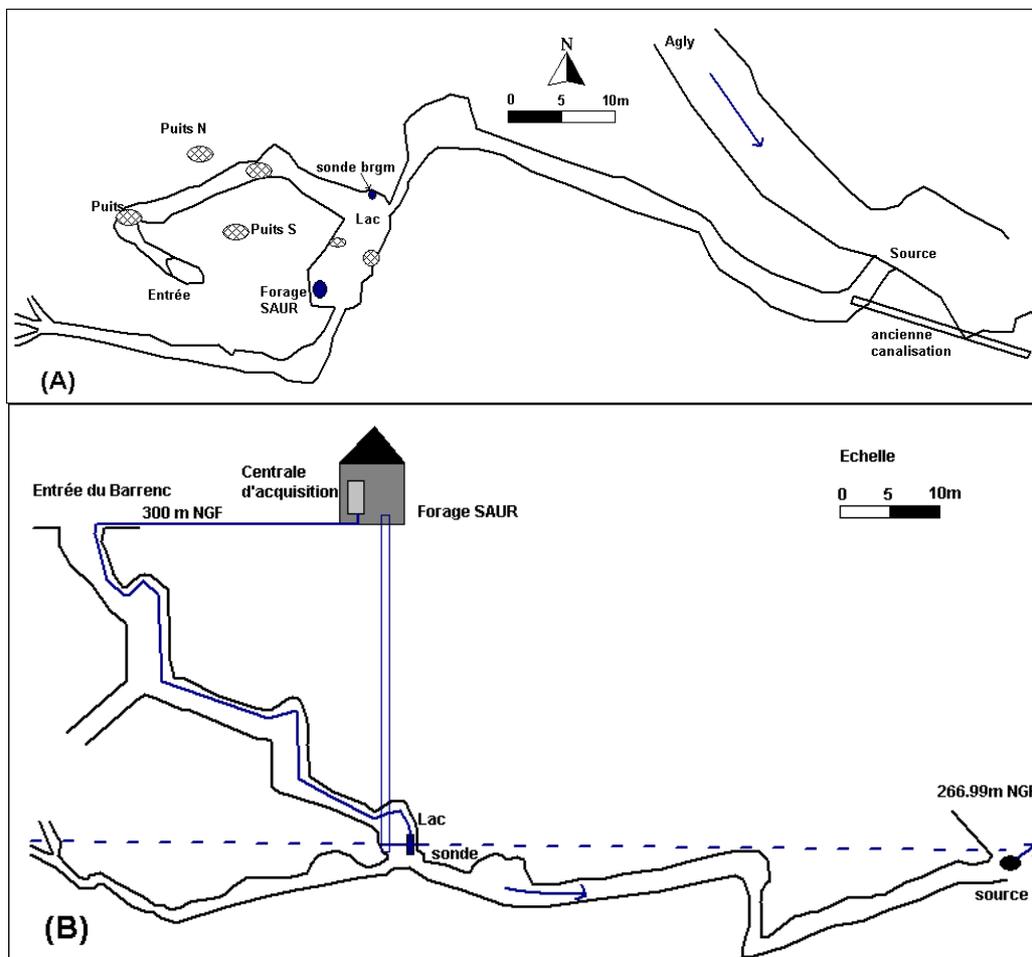


Illustration 47 - Plan (A) et coupe (B) avec positionnement de l'instrumentation de la source de la Tirounère (d'après Faillat, 1972, modifié).



Illustration 48 - Installation du câble dans une gaine de protection, assurant la liaison entre les sondes et la centrale d'acquisition.

3.4.4. Mesures de contrôle

Des mesures de contrôle ont été effectuées lors de tournées de terrain, à une fréquence mensuelle en 2002 et trimestrielle en 2003, soit au total 25 visites entre février 2002 et octobre 2003. Les mesures de contrôle concernent essentiellement des mesures de conductivité et température ainsi que de hauteur d'eau, afin de s'assurer du bon fonctionnement des sondes et enregistreurs de données et de la non-dérive des instruments. Les mesures de contrôle sont reportées sur les graphiques d'évolution des séries temporelles des paramètres suivants : conductivité, température, hauteur d'eau (ill. 50 et 51).

Les valeurs moyennes et extrêmes des chroniques de conductivité, température et de hauteur d'eau et de débit sont les suivantes (ill. 49) :

Paramètre enregistré	Valeur moyenne	Valeur minimum	Valeur maximum
Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	946	479	1041
Température ($^{\circ}\text{C}$)	16	11,8	16,6
Hauteur d'eau (m)	0,62	0,19	3,56
Débit (l/s)	885	188	4492

Illustration 49 - Valeurs caractéristiques des paramètres physiques de la source de la Mouillère.

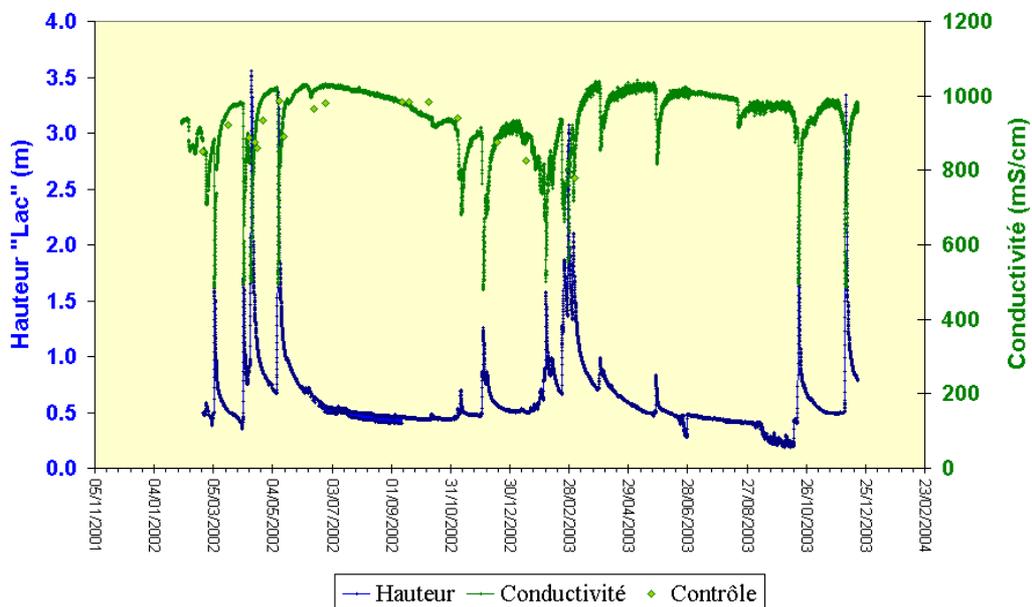


Illustration 50 - Évolution temporelle des données de hauteur d'eau du lac souterrain de la Tirounère et de la conductivité électrique.

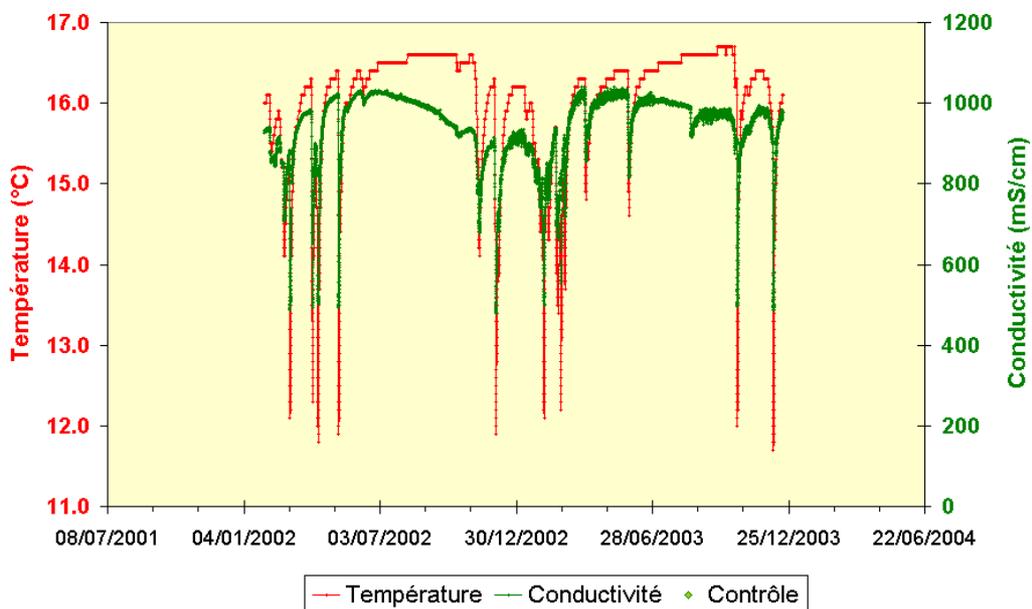


Illustration 51 - Évolution temporelle de la température et de la conductivité électrique de la Tirounère.

3.4.5. Établissement des courbes de tarage de la source

L'émergence de la Tirounère étant située directement au niveau du cours de l'Agly, un jaugeage directement au niveau de l'émergence n'est pas possible. Il est ainsi nécessaire de procéder à des jaugeages différentiels au niveau de l'Agly, à l'amont et à l'aval de la Tirounère. Un point à l'amont accessible et jaugeable au micro-moulinet au niveau d'un seuil a été retenu. Le point à l'aval est situé à l'aval du barrage sur l'Agly à proximité de la Tirounère, sur une section jaugeable de manière aisée (ill. 52). Lors des forts débits de l'Agly, le jaugeage par micro-moulinet n'est pas possible, notamment au niveau du point aval (ill. 53). Ainsi, une méthode de détermination du débit basée sur le transport de masse est appliquée, en utilisant des mesures de conductivité de l'eau à l'amont et à l'aval. La conductivité de l'Agly mesurée à l'aval de la Tirounère est considérée comme résultant d'un mélange entre l'eau de l'Agly et celle de la Tirounère. Connaissant le débit à l'amont ou le débit à l'aval par jaugeage au micro-moulinet, le débit de la source peut être exprimé selon les relations suivantes (loi de conservation de masse) :

$$Q_{\text{source}} = Q_{\text{Agly-aval}} * \frac{(C_{\text{Agly-aval}} - C_{\text{Agly-amont}})}{(C_{\text{source}} - C_{\text{Agly-amont}})}$$

$$Q_{\text{source}} = \left[Q_{\text{Agly-amont}} * \frac{(C_{\text{Agly-amont}} - C_{\text{source}})}{(C_{\text{Agly-aval}} - C_{\text{source}})} \right] - Q_{\text{Agly-amont}}$$

Le débit résultant correspond à l'ensemble des débits issus des gorges de Galamus entre le point de mesure amont et aval ; la contribution de la source de la Soul, source temporaire est prise en compte. Son débit est de l'ordre d'une vingtaine de litres par seconde en moyenne. Cette source est une résurgence alimentée en partie par les pertes de l'Agly (la communication hydraulique a été vérifiée par essai de coloration dans les années 1970 (Faillat, 1972)) ; elle est temporaire. Les jaugeages effectués au niveau du point amont sur l'Agly sont situés en amont ou en aval de l'arrivée d'eau de la Soul au niveau de l'Agly, en fonction des conditions d'accessibilité. Ainsi les débits calculés par jaugeage différentiel sont légèrement surestimés du fait de la prise en compte de venues d'eau d'autres systèmes. Ces débits sont sous-estimés par les effets liés au pompage de la SAUR et de plus liés au débit de la conduite ; le débit de la conduite est ainsi soustrait au système, mais la mesure du débit de l'Agly à l'aval l'intègre.

Ces jaugeages ont permis de définir une courbe de tarage pour la source de la Tirounère (ill. 54). Les hauteurs d'eaux relevées par la station OTT s'échelonnent de 0,19 à 3,56 m, celles déterminées lors des mesures de jaugeage pour établir les courbes de tarage vont de 0,27 à 1,64 m (la précision est de 1 cm).

Au total, 16 jaugeages ont été effectués. Les hauteurs d'eau considérées vis-à-vis des débits calculés, se répartissent entre 0,27 et 1,64 m. Pour cette dernière valeur, le jaugeage différentiel au micro-moulinet n'était pas possible à l'aval au niveau de l'Agly ; la valeur est donc estimée à partir de la conductivité et du débit de l'Agly au niveau du point amont. Dans ce dernier cas, une erreur de l'ordre de 20 % est à prendre en considération sur la mesure.

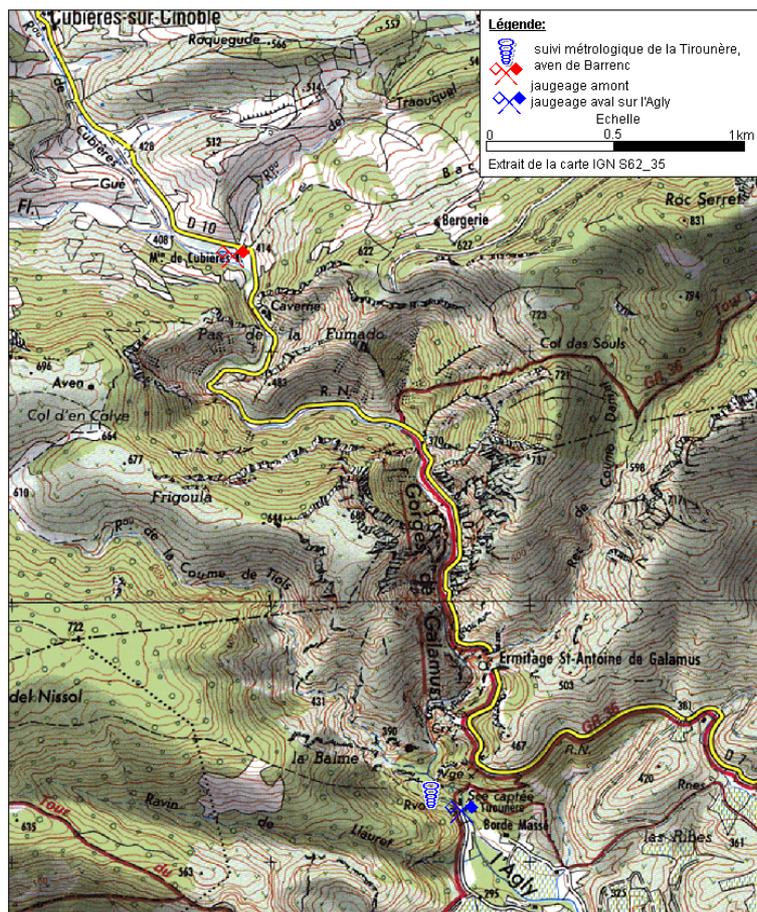


Illustration 52 - Situation géographique des lieux de jaugeage au moulinet et de mesure de la conductivité sur l'Agly à l'amont et l'aval de la source de la Tirounère.



Illustration 53 - Seuil de jaugeage sur l'Agly à l'aval de la source de la Tirounère.

Date	Débit source = Q Agly aval – Q Agly amont [l/s] (i)	Estimation du débit de la source à partir de la conductivité et du débit aval de l'Agly [l/s] (ii)	Estimation du débit de la source à partir de la conductivité et du débit amont de l'Agly [l/s] (iii)	Hauteur d'eau (m) OTT	Débit pour courbe de tarage (moyenne entre (i), (ii) et (iii))
14/06/2002	930	894	1 052	0,59	959
21/06/2002	910	750	281	0,59	830
26/06/2002	826	692	245	0,56	759
24/07/2002	560	512	274	0,5	536
29/08/2002	324	317	304	0,46	315
11/09/2002	320	318	329	0,45	322
09/10/2002	239	239	258	0,43	245
07/11/2002	548	554	918	0,54	673
28/11/2002	412	436	1 627	0,47	424
17/12/2002	753	797	1 302	0,57	775
15/01/2003	539	505	549	0,51	531
04/03/2003	-	-	3 169	1,64	3200
25/04/2003	894	727	509	0,61	1000
11/06/2003	659	535	346	0,48	597
30/07/2003	279	244	170	0,43	231
16/09/2003	179	161	131	0,27	157

Illustration 54 - Valeurs des données de jaugeage différentiel (i) par micro-moulinet et (ii)- (iii) à l'aide de la conductivité et du débit amont ou aval de l'Agly à la source de la Tirounère.

À partir des données de débits calculés et la hauteur d'eau mesurée correspondante, deux courbes ont pu être ajustées sur les données expérimentales selon la valeur de la hauteur d'eau :

- pour $H < 0,69$ m ; fonction théorique : $Y = pr1 + pr2 * x1^{pr3}$
Fonction optimisée : $Y = 138 + 15\,346 * X^{5,516}$; $R^2 = 0,94$;
- pour $H > 0,69$ m ; fonction théorique : $Y = pr1 * x1^{pr2}$
Fonction optimisée : $Y = 12\,829 * X^{1,409}$; $R^2 = 0,85$.

Ces relations sont ainsi utilisées pour transformer la chronique des hauteurs d'eau en hydrogramme de la source de la Tirounère (ill. 55).

La courbe de tarage pour les hauteurs d'eau inférieures à 0,69 m est représentée sur la figure de l'illustration 56.

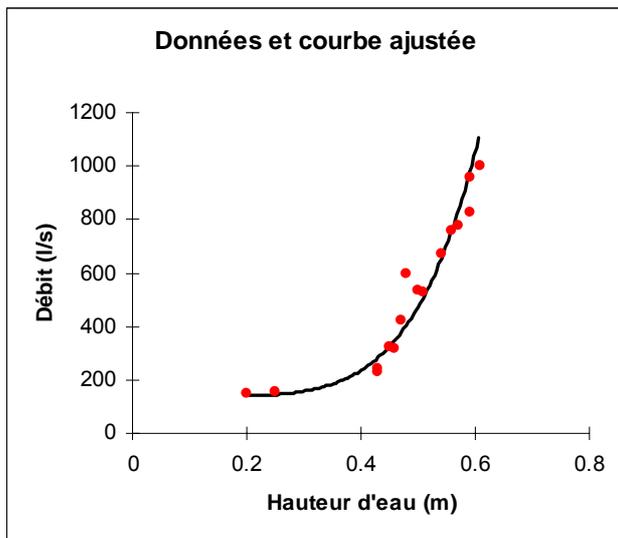


Illustration 55 - Courbe de tarage de la source de la Tirounère.

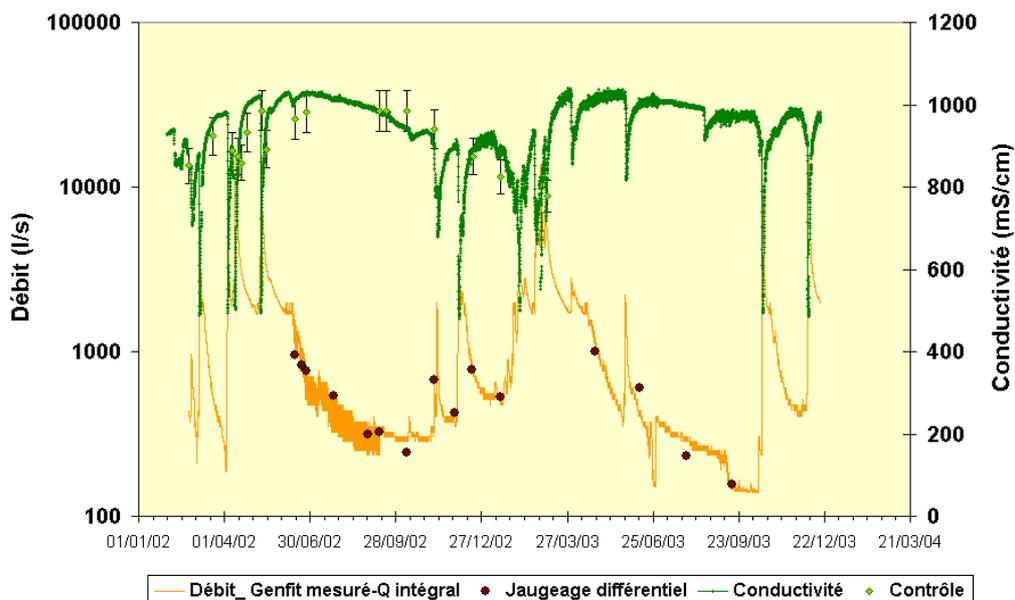


Illustration 56 - Hydrogramme de la source de la Tirounère et mesures de la conductivité électrique de l'eau.

3.4.6. Prélèvements pour analyses hydrochimiques

Des prélèvements ont été effectués au niveau de la source, afin de procéder à l'analyse de huit échantillons. De plus des données issues de base de données de l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse ont été incluses dans le tableau des résultats et prises en compte dans les interprétations (ill. 57).

Étude	date	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	NH4 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	B µg/l	Br µg/l	Sr mg/l	Al µg/l	Fe µg/l	87Sr/86Sr
AE_RMC	08/12/1997	7,7	15,0	900	188	23,3	4,7	< 1	266	4	1	< 0,1	345							
AE_RMC	09/02/1998	7,6	9,4	797	170	19	3,5	< 1	268	4,6	2	< 0,1	250							
AE_RMC	01/04/1998	7,6	15,7	892	178	22,4	2,5	< 1	270	4,1	1	< 0,1	276							
AE_RMC	26/05/1998	7,6	16,4	874	176	23,2	3,3	< 1	267	3,9	1	< 0,1	309							
AE_RMC	20/10/1998	7,5	12,6	633	134	24	3	< 1	272	4	1	< 0,1	230							
AE_RMC	07/04/1999	7,5	14,9	988	184	21,7	3	< 1	265	5,2	< 1	< 0,1	309							
AE_RMC	30/06/1999	7,5	16,3	988	194	24,7	3,4	< 1	262	5,2	1	< 0,1	366							
AE_RMC	21/09/1999	7,6	16,9	977	193	20	3,6	< 1	266	4,8	1	< 0,1	349							
AE_RMC	14/12/1999	7,4	15,4	1000	200	23,3	3	< 1	265	5,6	2	< 0,1	355							
AE_RMC	25/09/2000	7,4	16,9	979	193	23,9	3,6	0,7	268	4,5	1,6	< 0,05	344							
AE_RMC	13/12/2000	7,3	14,6	896	162	19,4	5,1	1,6	272	4,8	1,4	< 0,05	279							
AE_RMC	26/06/2001	7,3	18,4	990	178	26,8	4,3	< 1	272	5,4	33,2	< 0,05	282	7,4	12				< 5	
AE_RMC	07/08/2001	7,2	17,6	985	185	22	1,7	< 1	273	7,6	4,2	< 0,05	309	7,1	10				< 5	
AE_RMC	16/10/2001	7,4	17,3	972	183	24	2,4	1	267	4,5	1,7	< 0,05	322	6,9	6				8	
Corbières	22/02/2002	7,1	15,0	852	155	18	3,2	0,9	241	5,2	1,6	< 0,6	237	6,4	< 20	15	1,01	2	8	0,707381
Corbières	19/03/2002	7,8	14,3	923	173	19,8	3	0,9	236	4,9	1,4	< 0,1	280	7	< 20	16	1,23	< 1	9	
Corbières	09/04/2002	7,1	13,4	887	176	20	3,1	1	264	4,9	1,3	< 0,1	277	7	< 20	14	1,3	1	10	
Corbières	15/04/2002	7,4	14,1	875	166	18,3	3	0,7	245	4,8	0,8	< 0,1	250	6,5	< 20	16	1,17	< 1	10	0,707391
Corbières	10/05/2002	7,5	13,8	983	188	22,1	3,2	1	255	4,9	1	< 0,1	321	7,3	< 20	16	1,52	< 1	10	
Corbières	15/05/2002	7,2	14,9	892	172	18,6	3,3	0,6	275	4,8	0,9	< 0,1	255	6,4	< 20	16	1,15	< 1	12	
Corbières	14/06/2002	7,4	17,7	965	200	23,3	3,4	0,9	271	4,8	1	< 0,1	326	7,5	< 20	18	1,56	1	12	0,707346
Corbières	11/09/2002	7,4	17,0	984	188	23,9	3,7	0,8	205	4,9	1,6	< 0,1	331	7,5	16	< 50	1,37	< 3	< 20	
Corbières	09/10/2002	7,3	16,4	985	210	24,4	3,8	0,8	249	5,2	< 0,4	< 0,1	332	7,7	15	< 51	1,33	< 4	< 21	0,707329
Mini=		7,1	9,4	633	134	18,0	1,7	0,6	205	3,9	0,8		230	6,4	6,0	14,0	1,0	1,0	8,0	
Maxi =		7,8	18,4	1000	210	26,8	5,1	1,6	275	7,6	33,2		366	7,7	16,0	18,0	1,6	2,0	12,0	
Moyenne =		7,4	15,4	922	180	22,0	3,3	0,9	261	4,9	2,9		301	7,1	11,8	15,9	1,3	1,3	9,9	

Illustration 57 - Principaux résultats des analyses chimiques des échantillons prélevés à la source de la Tirounère en 2002, ainsi que données de la base de données de l'AERMC entre 1997 et octobre 2001 (réseau patrimonial).

3.5. SYSTÈME KARSTIQUE DU VERDOUBLE

3.5.1. Objectifs

Les formations karstifiables des terrains secondaires, représentées essentiellement par les calcaires et grès du Crétacé supérieur, au niveau du synclinal de Soulatgé situé en zone sous-pyrénéenne, présentent à première vue peu de potentialités en réserves d'eau, comme on le mentionnait dans le rapport BRGM/RP-51103-FR. Selon Faillat (1972), seuls les calcaires du Dévonien, sous couverture secondaire seraient susceptibles d'abriter des réserves importantes. L'essentiel des débits d'étiage de la source du Verdoble (aussi nommée la Doux) proviendrait du Dévonien, le Crétacé n'abritant que des réseaux karstiques peu profonds, ne pouvant fournir des débits supérieurs aux débits de tarissement naturel. Les écoulements à la source résulteraient en fonction des conditions hydrologiques d'une composante de sub-surface au sein des calcaires crétacés et d'une composante profonde du Dévonien.

La Doux et le Gourg de l'Antre (vaste entonnoir d'une profondeur de 15 m, s'ouvrant dans les marnes du Sénonien, situé en amont hydraulique de la source de la Doux) (ill. 58) présentent un caractère thermal, avec des températures anormalement élevées de l'ordre de 18 °C, résultant de venues d'eau chaude présente dans les calcaires carbonifères sous-jacents (Faillat, 1972 ; Kuhfuss, 1987). La Font de Soulatgé et le captage de Cubières, sans anomalie de température, présentent toutefois des teneurs en CO₂ anormalement élevées qui leur donnent également un caractère thermo-minéral.

Ainsi, les principaux objectifs de ce projet sont de procéder à la caractérisation du fonctionnement et d'évaluer la ressource en eau de ce système : circulations des eaux souterraines, délimitation du bassin d'alimentation, perspectives en terme d'exploitation par forage des calcaires du Dévonien. Pour ce faire, il a été nécessaire d'équiper la source du Verdoble afin de pouvoir suivre les variations de niveau d'eau, de conductivité et de température. Des prélèvements d'échantillons ont été effectués selon le protocole d'analyses chimiques du projet, afin de caractériser des périodes d'étiage et de hautes eaux (crues).

Les objectifs particuliers de la caractérisation hydrochimique et isotopique de ce système sont de déterminer la participation du réservoir dévonien au système du Verdoble, l'importance de la zone noyée et le rôle d'un épikarst, les conditions d'écoulement et de préciser la zone de recharge.

3.5.2. Description du site

La source du Verdoble émerge sur le flanc nord du synclinal de Soulatgé à proximité d'un affleurement de bancs calcaires aux fins interlits argileux. Elle donne naissance en aval au Verdoble, affluent de l'Agly, qui s'écoule vers l'est.

Ses coordonnées et références dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM sont les suivantes (ill. 58) :

- coordonnées Lambert II : X = 612 360 (m) ; Y = 1 763 230 (m) ; Z = 410 m NGF ;
- code BSS : 10778X0005.

La source du Verdoble est captée pour la commune de Soulatgé ; la venue d'eau s'effectue par une galerie noyée horizontale de direction WSW-ENE. Une émergence fonctionne de manière temporaire au niveau du thalweg 30 m au nord du captage. Les dimensions de la galerie sont similaires à celles du Gourg de l'Antre (Faillat, 1972).

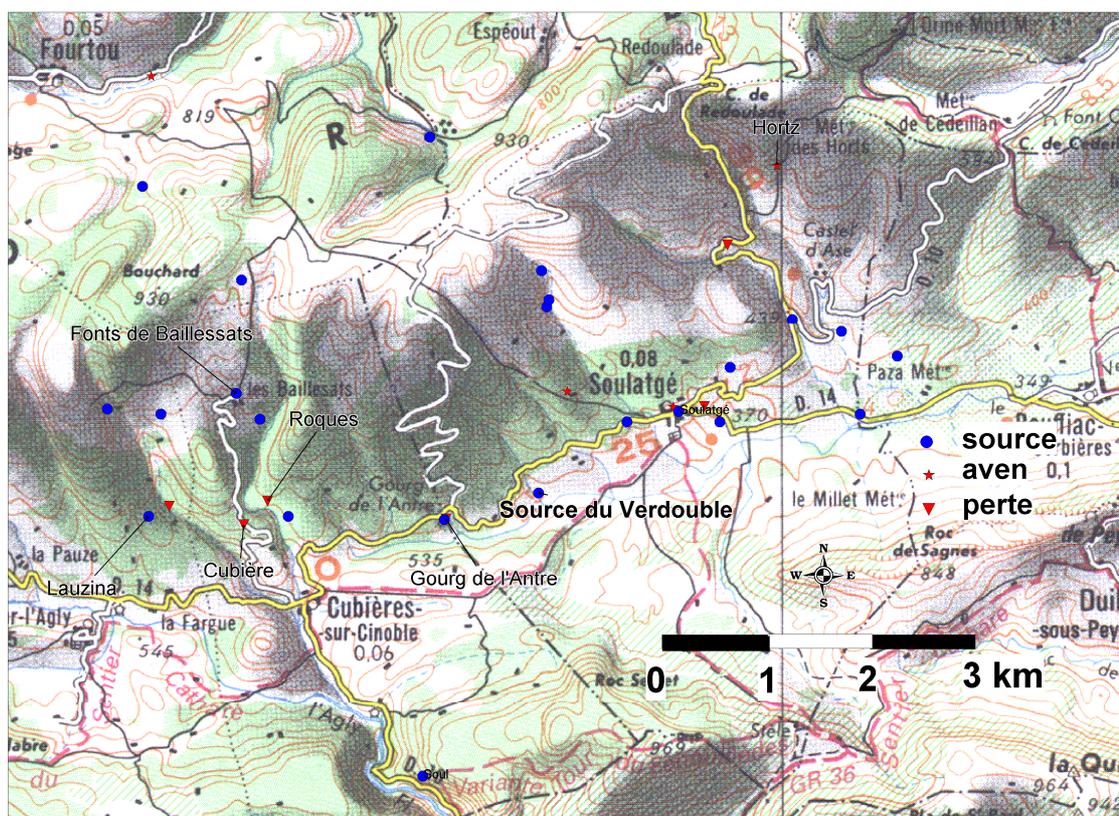


Illustration 58 - Localisation des principales sources du flanc nord du synclinal de Soulatgé, dont le Gourg de l'Antre et la source du Verdoble.

3.5.3. Équipement

Une centrale d'acquisition (OTT) pour les mesures de température, conductivité, hauteur d'eau ainsi que de pluviométrie a été installée. La centrale est installée sur le bord du captage ; elle a été déplacée suite à des dommages subis lors des fortes crues d'avril 2002. Le pluviomètre est situé sur le toit du captage (ill. 59).

Les sondes de température, de conductivité et de hauteur d'eau (de type Orphimède OTT) sont placées au sein de la chambre de captage.

Des problèmes techniques sont survenus à plusieurs reprises, liés soit à des crues importantes endommageant le matériel, soit à des pannes techniques aléatoires. La centrale OTT pour les sondes situées dans le captage a été installée au premier trimestre 2002. Suite aux crues d'avril 2002, l'ensemble de la centrale et des capteurs ont dû être remplacés ; leur réinstallation n'a pu être effectuée qu'en juin 2002. La centrale a de nouveau été hors service en juin et réinstallée en août 2002 (ill. 60). La première année d'acquisition des données a donc été particulièrement perturbée.

Le pluviomètre a été installé en juin 2002.



Illustration 59 - (a) Pluviomètre permettant l'échantillonnage des pluies au niveau du toit du captage de la source du Verdouble et (b) coffret de la centrale d'acquisition des paramètres enregistrés à la source et au pluviomètre.



Illustration 60 - (a) Source du Verdouble en crue (11 avril 2002), et (b) détail à la sortie du captage.

La source du Verdoble est partiellement captée pour l'alimentation en eau potable du village de Soulatgé. Elle s'écoule dans un canal d'un mètre cinquante de large (photo ci-jointe).

Ce canal à fond plat, forme un coude au niveau duquel un tuyau de 26 cm de diamètre permet d'alimenter des canaux d'irrigation (canaux obturés en hiver). Un mètre en aval de ce coude, se trouve un déversoir rectangulaire avec glissière (ill. 61).

Le Verdoble passe alors dans son cours naturel. Des griffons existent quelques dizaines de mètres en aval.



Illustration 61 - Canal en sortie de la chambre de captage de la source du Verdoble.

3.5.4. Mesures de contrôle

Des mesures de contrôle ont été effectuées lors de tournées de terrain, à une fréquence mensuelle en 2002 et trimestrielle en 2003, soit au total 34 visites entre janvier 2002 et novembre 2003. Les mesures de contrôle concernent essentiellement des mesures de conductivité et température ainsi que de hauteur d'eau afin de s'assurer du bon fonctionnement des sondes et enregistreurs de données et de la non-dérive des instruments. Les mesures de contrôle sont reportées sur les graphiques d'évolution des séries temporelles des paramètres suivants : conductivité, température, hauteur d'eau (ill. 63 et 64).

Les valeurs moyennes et extrêmes des chroniques de conductivité, température et de hauteur d'eau et de débit sont les suivantes (ill. 62) :

Paramètre enregistré	Valeur moyenne	Valeur minimum	Valeur maximum
Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	500	394	546
Température ($^{\circ}\text{C}$)	17,7	10,9	19,1
Hauteur d'eau (m)	0,302	0,11	1,86
Débit (l/s)	87	22	6094
Pluviométrie horaire (mm)	0,55	0	27

Illustration 62 - Valeurs caractéristiques des paramètres physiques de la source du Verdoble.

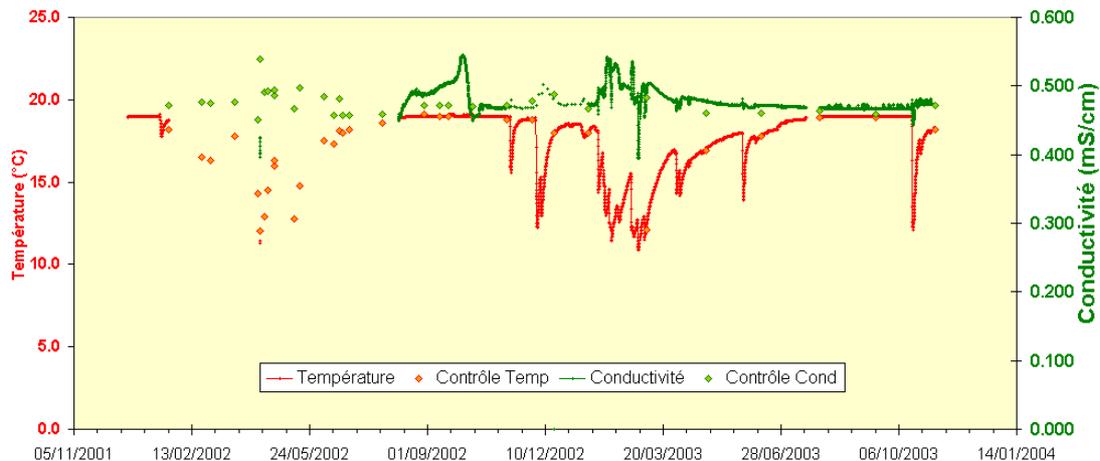


Illustration 63 - Série temporelle de 2002 à 2004 de la température et de la conductivité de la source du Verdoble.

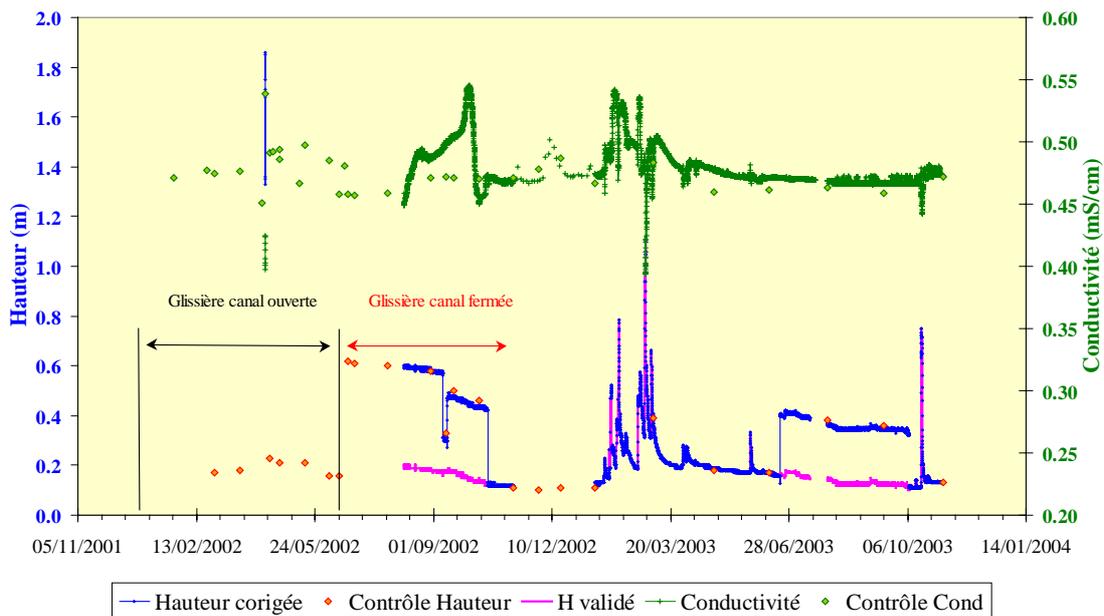


Illustration 64 - Série temporelle de la hauteur d'eau et de la conductivité de la source du Verdoble pour les années 2002 et 2003.

3.5.5. Établissement des courbes de tarage de la source

La courbe de tarage de la source du Verdoble a été établie à partir des hauteurs d'eau mesurées et des mesures de débit au micro-moulinet (perche intégratrice). Des corrections ont été apportées aux données brutes de niveau d'eau enregistrées, afin de retirer l'influence de la glissière au niveau du déversoir sur le canal. Lorsque les jaugeages ont été effectués alors que le canal était en position « ouverte », le débit est sous-estimé ; une correction est alors apportée. Les jaugeages sont réalisés en deux points, (i) dans le canal, à l'aval de la prise d'eau pour l'AEP et (ii) dans le lit naturel du Verdoble, en aval de tous les griffons. La valeur final du débit est ainsi corrigée en additionnant la contribution des griffons et la prise d'eau pour l'AEP de Soulatgé, considérée comme constante et équivalente à 15 l/s (ill. 65).

Date	Cote repère ruisseau (m)	Debit AEP	H ruisseau (m)	H OTT m	H nom OTT	Débit source (l/s)	erreur Q (5%) (l/s)	Remarques	valeur Q sous estimé (l/s)	H validée (m)	Q validé (l/s)	Q total (l/s)
21/03/02		15.0	0.302		0.508	132.5	6.6	canal ouvert	30	0.30	162.51	177.51
15/04/02		15.0	0.227		0.433	75.8	3.8	canal ouvert	10	0.20	85.84	100.84
24/04/02	?	15.0	0.210		0.416	77.2	3.9	canal ouvert	10	0.21	87.22	102.22
15/05/02		15.0	0.248		0.454	79.7	4.0	canal ouvert	40	0.23	119.75	134.75
15/05/02		15.0				118.0	5.9	aval, canal ouvert				
13/06/02		15.0	0.174		0.380	36.6	1.8	canal ouvert	1	0.16	37.55	52.55
13/06/02		15.0				37.8	1.9	aval, canal ouvert				
20/06/02	0.640	15.0	0.173		0.379	34.4	1.7	canal ouvert	10	0.21	44.41	59.41
20/06/02	1.070	15.0	0.170		0.376	44.3	2.2	aval, canal ouvert				
20/06/02	0.200	15.0	0.599		0.805	20.9	1.0	canal fermé	5	0.21	25.87	40.87
20/06/02	1.100	15.0	0.600		0.806	25.6	1.3	aval, canal fermé				
26/06/02	0.200	15.0	0.600		0.806	19.3	1.0	canal fermé	4	0.20	23.29	38.29
26/06/02	1.105	15.0				22.8	1.1	aval, canal fermé				
29/08/02	0.210	15.0	0.586	0.540	0.792	15.5	0.8	canal fermé	4	0.18	19.50	34.50
09/10/02	0.330	15.0	0.374	0.440	0.580	7.2	0.4	canal fermé	2	0.14	9.21	24.21
07/11/02	0.680	15.0	0.044	0.250	0.250	7.1	0.4	canal ouvert	2	0.12	9.15	24.15
28/11/02	0.690	15.0	0.034	0.250		5.5	0.3	canal ouvert	2	0.10	7.49	22.49
17/12/02	0.680	15.0	0.059	0.250		13.6	0.7	canal ouvert	2	0.11	15.60	30.60
15/01/03	0.680	15.0	0.039	0.250	0.250	8.3	0.4	canal ouvert	2	0.13	10.34	25.34
05/03/03	0.400	15.0	0.419	0.510		289.4	14.5	canal ouvert	40	0.38	329.37	344.37
25/04/03	0.610	15.0	0.327	0.320				canal ouvert		0.19	74.51	89.51
25/04/03						74.5	3.7	aval, canal ouvert				
11/06/03	0.620	15.0	0.195	0.300		36.0	1.8	canal ouvert	2	0.16	37.98	52.98
11/06/03						54.7	2.7	aval, canal ouvert				
30/07/03	0.410	15.0	0.416	0.300		14.4	0.7	canal fermé	2	0.14	16.38	31.38
30/07/03						15.0	0.8	aval, canal fermé				
16/09/03	0.430	15.0		0.350		9.2		canal fermé	2	0.12	11.24	26.24
05/11/03	0.660	15.0		0.270		26.7		canal ouvert	2	0.14	28.71	43.71

Illustration 65 - Synthèse des données de hauteur d'eau et de jaugeages relatifs aux 20 mesures effectuées à la source du Verdoble entre le 21/03/2002 et le 05/11/2003.

Les hauteurs d'eau ayant servi à l'étalonnage de la courbe de tarage sont comprises entre 0,12 m et 0,38 m. À partir des données de débits calculés et de la hauteur d'eau mesurée correspondante, une courbe a pu être ajustée sur les données expérimentales ($R^2 = 0,93$) :

$$\text{Fonction théorique : } Y = pr1 + pr2 * x^{pr3}$$

$$\text{Fonction optimisée : } Y = 12,76 + 4\,478,7 * x^{2,70}$$

Cette relation est ainsi utilisée pour transformer la chronique des hauteurs d'eau en hydrogramme de la source du Verdoble. La courbe de tarage résultante est représentée à l'illustration 66, La gamme de hauteur d'eau mesurée à la station atteint plus du mètre (1,8 m lors de la crue d'avril 2002), mais les conditions de terrain (ill. 60) lors des crues ne permettent pas d'effectuer des jaugeages en sécurité.

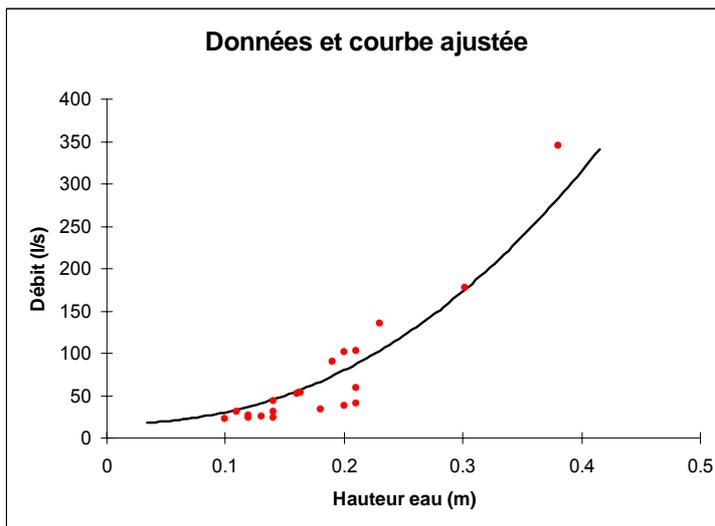


Illustration 66 - Courbe de tarage pour la source du Verdoble.

L'illustration 67 présente les valeurs de débit résultant de la transformation des hauteurs d'eau en débit.

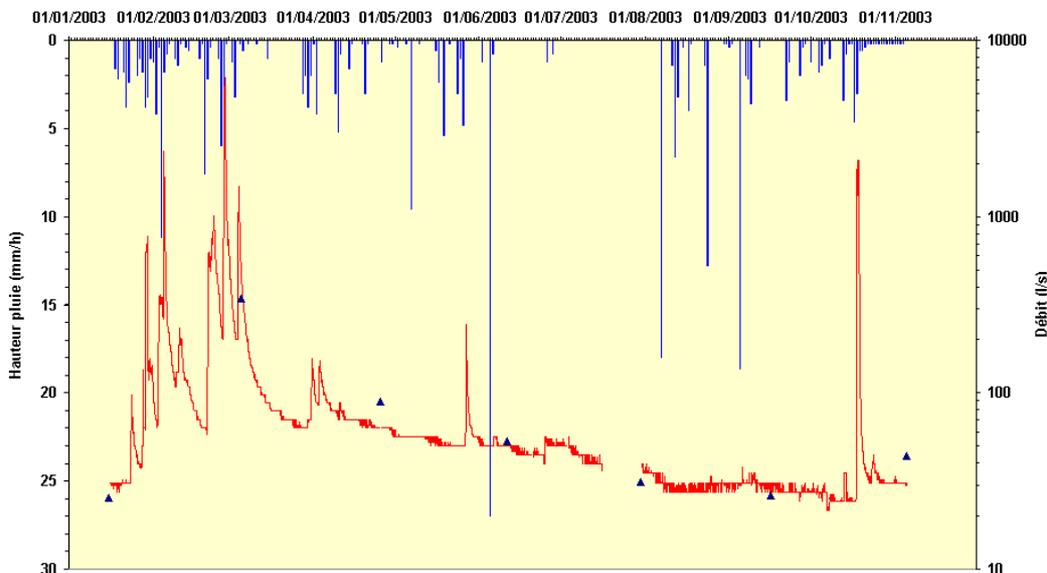


Illustration 67 - Hydrogramme de la source du Verdoble pour l'année 2003.

3.5.6. Prélèvements pour analyses hydrochimiques

L'illustration 68 présente les principaux résultats des analyses chimiques des échantillons prélevés à la source du Verdoble en 2002 et 2003.

3.6. SYSTÈME KARSTIQUE DE LAS BORDES-LES ADOUX

3.6.1. Objectifs

Deux sources captées émergent des calcaires urgoniens créacés sur la commune de Fenouillet : la source « Las Bordes » et la source « des Adoux ». Ces sources représentent une ressource potentielle qui n'a pas encore été caractérisée faute de suivi hydrologique et de caractérisation géologique et hydrochimique.

Ces deux sources sont captées par gravité, la première (Les Bordes) pour la commune de Fenouillet et la seconde, la résurgence des Adoux au lieu-dit « Les Nautes » pour les communes de Caudiès-de-Fenouillèdes, de Prugnanes et de Fenouillet en été. La faisabilité technique de l'installation d'une station hydrométrique en vue de suivre les variations de hauteur d'eau, de la conductivité et de la température a été étudiée, suite à des visites sur le terrain à la fin du premier trimestre 2002 ; il s'agit en particulier de pouvoir effectuer un suivi au niveau des trop-pleins.

- La **source « Les Bordes »** constitue vraisemblablement, compte tenu de sa position et de sa conductivité, une source de débordement du système karstique. La ressource captée ne permet pas de subvenir aux besoins de la commune de Fenouillet en été lorsque la source est presque tarie. La commune utilise alors une partie des eaux de la résurgence des Adoux comme source d'appoint.
- La **résurgence des Adoux au lieu-dit « Les Nautes »** constitue l'exutoire principal de ce système karstique alimenté par les pertes de la Boulzane. La configuration du site de la résurgence des Adoux ne permettait pas avant la présente étude, de suivre les débits de cette source. Dans ce contexte, il est apparu nécessaire de procéder à des aménagements, notamment sur les buses des trop-pleins, pour mesurer les débits non captés. Il a été envisagé d'installer un débitmètre électromagnétique sur une conduite unique récupérant les eaux des deux trop-pleins. Ces aménagements sont nécessaires pour la caractérisation du système karstique en terme de fonctionnement et de ressource.

Les objectifs spécifiques de la caractérisation hydrochimique du système karstique binaire sont les suivants : (i) déterminer l'importance de la zone noyée, le rôle de l'épikarst, (ii) estimer des temps de transfert et de l'âge de l'eau, (iii) déterminer en terme de flux l'importance de la participation des eaux de surface (pertes de la Boulzane) au système karstique en fonction des conditions hydrologiques, (iv) déterminer les conditions d'écoulement au niveau des drains karstiques (en charge ou à l'air libre) et préciser la zone de recharge.

date	pH	T °C	C mS/cm	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	HCO3- mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	NH4 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	B µg/l	Br µg/l	Sr mg/l	Al µg/l	Fe µg/l	87Sr/86Sr
21/03/2002	7,8	17,8	0,476	66	19,3	3,8	0,7	287	5,5	0,9	<0,1	17,8	7,4	<20	28	0,16	<1	9	0,70838
09/04/2002	7,3	14,3	0,451	79,8	7,6	3,5	0,6	282	6,2	1,9	<0,1	13,1	5,3	<20	24	0,15	2	10	0,70811
10/05/2002	7,1	12,8	0,467	86,4	5,6	3,4	0,6	294	5,1	1,3	<0,1	10,7	5,1	<20	23	0,14	5	11	0,70811
24/07/2002	7,7	18,6	0,459	60,2	20,4	3,9	0,8	284	5,4	0,7	<0,1	17,8	7,5	<20	22	0,16	<1	10	
11/09/2002	7,3	19	0,472	75,4	23,8	4	0,8	264	5,6	<0,4	<0,1	18,6	8,3	11	<50	0,16	<3	<20	
07/11/2003	7,3	18,8	0,471	73,8	23,8	4	0,8	284	5,4	0,4	<0,1	18,4	8,2	9	<50	0,15	<3	<20	0,708419
05/03/2002	7,1	12,1	0,483	115	5,3	3,7	0,5	303	6,6	1,4	<0,1	11,8	5,5	<5	<50	0,14	<3	<20	0,707956
Mini=	7,1	12,1	0,451	60,2	5,3	3,4	0,5	264	5,1	0,4		10,7	5,1	9,0	22,0	0,1	2,0	9,0	
Maxi =	7,8	19,0	0,483	115,0	23,8	4,0	0,8	303	6,6	1,9		18,6	8,3	11,0	28,0	0,2	5,0	11,0	
Moyenne =	7,4	16,2	0,468	79,5	15,1	3,8	0,7	285	5,7	1,1		15,5	6,8	10,0	24,3	0,2	3,5	10,0	

Illustration 68 - Principaux résultats des analyses chimiques des échantillons prélevés à la source du Verdouable en 2002 et 2003.

Les travaux réalisés dès la fin 2002 et début 2003 ont été réalisés par Marc Eulry, géologue consultant (FREE.CADRE) pour le compte du BRGM, après appels à devis auprès de trois bureaux d'ingénieurs, dont seuls deux ont répondu. L'ensemble des travaux effectués a été réceptionné par le BRGM en date du 2 avril 2003.

3.6.2. Description du site

La source « *Las Bordes* », située à 560 m d'altitude, est totalement captée à l'aide d'une buse enfoncée dans la roche au niveau du griffon ; l'eau captée est conduite par gravité dans une succession de trois réservoirs. La configuration du site de la source « *Les Bordes* » ne permet pas la réalisation de jaugeage et ne permet pas l'installation d'un capteur de hauteur d'eau. Seul le suivi de la conductivité est possible.

La source des Adoux est située au niveau du lieu-dit « *les Nautes* » à proximité immédiate du ruisseau « *le Noir Rau* » à environ 440 m d'altitude. Ses coordonnées Lambert III sont les suivantes : indice BSS : 10781X0002, X : 615,75 (km) ; Y : 3078,27 (km) (ill. 69).

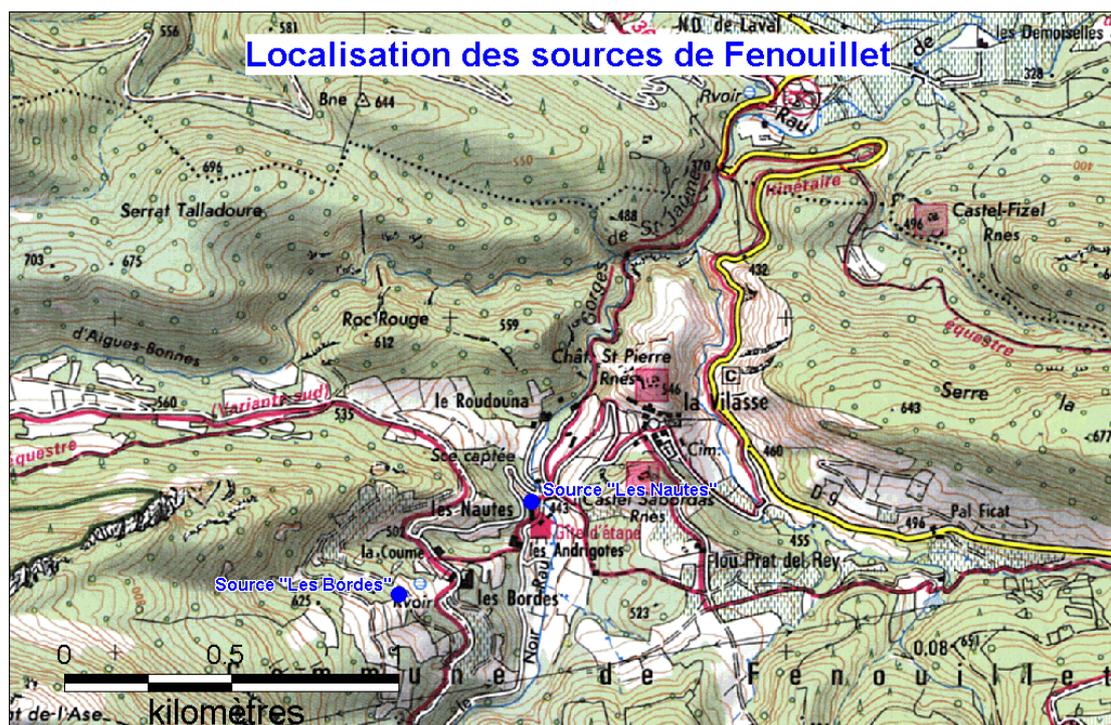


Illustration 69 - Localisation des sources sur la commune de Fenouillet.

La résurgence des Adoux est partiellement captée par gravité, l'eau excédentaire étant rejetée au ruisseau « *le Noir Rau* » par l'intermédiaire de deux buses (ill. 70). Les buses sont situées approximativement à 3 m au-dessus du lit du ruisseau. L'excédent de la source se jette dans le ruisseau par une petite cascade (ill. 70 et 71).

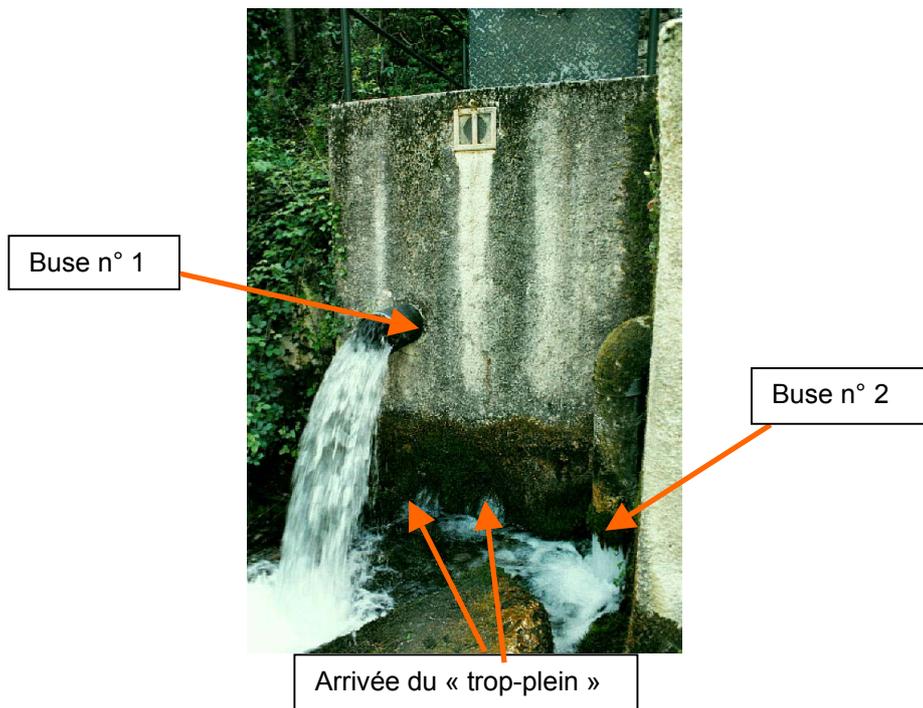


Illustration 70 - Vue extérieure du captage de la résurgence des Adoux au lieu-dit « Les Nautes ».



Illustration 71 - Vues extérieures du captage de la résurgence des Adoux et du ruisseau « Le Rau Noir » au lieu-dit « Les Nautes ».

3.6.3. Descriptif de la chambre du captage

La chambre de captage de la résurgence est en fait composée de deux sous-chambres interconnectées entre elles par une buse (ill. 72 et 73). L'essentiel de l'eau arrive au niveau de la chambre de captage 1.

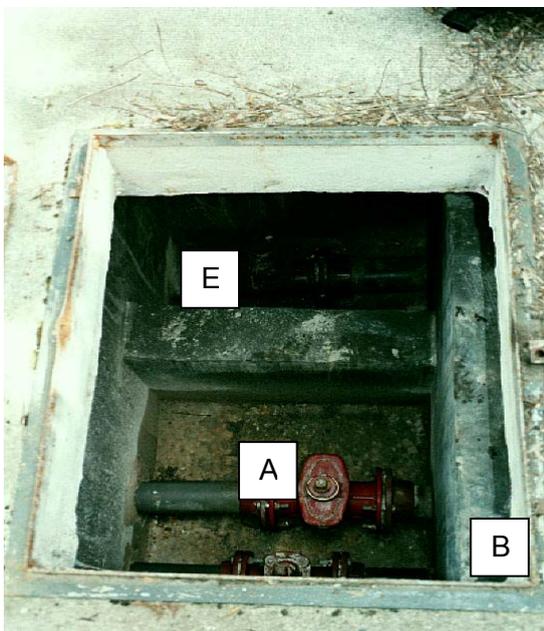


A : Vanne pour la vidange de la chambre de captage

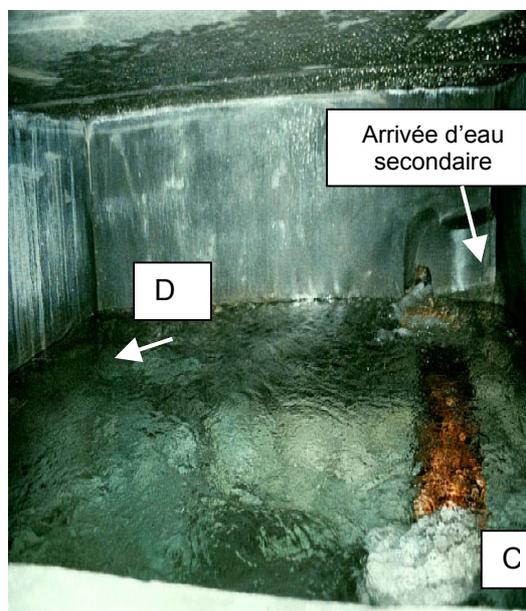


Buse vers chambre 2

Illustration 72 - Détail intérieur de la chambre de captage 1 de la source des Adoux.



A : Prise d'eau de la commune de Caudiès de Fenouillèdes
 B : Prise d'eau de la commune de Prugnanes
 E : Vanne pour la vidange de la chambre de captage



C : Prise d'eau de la commune de Fenouillet
 D : Buse raccordée à la chambre de captage 1

Illustration 73 - Détail intérieur de la chambre de captage 2 de la source des Adoux.

3.6.4. Équipement

Défini à partir des caractéristiques géométriques du site (mesurées sur le terrain), des infrastructures et des installations en place pour le captage, le dispositif proposé comprend les éléments suivants (ill. 74, 75, 77 et 78) :

- un dispositif de captage avec un tube collecteur, en PVC DN 400, raccordé par un avaloir en maçonnerie à un petit bassin collectant l'ensemble des trop-pleins ;
- une cheminée de mise en charge et de dégazage subverticale comprenant à la base un système siphonide équipé d'un tampon de visite pour le nettoyage et l'extraction des éléments grossiers pouvant être entraînés dans l'ouvrage ;
- un tube de mesure en acier DN 323, qui reçoit le dispositif de mesure (débitmètre électromagnétique DWM 2000 (Khrono)) et qui est rectiligne sur au moins 15 DN (ill. 76) ; ce tube, installé horizontalement, comporte à la sortie un double coude destiné à assurer le maintien en charge de la conduite calibrée ;
- le griffon latéral est capté par un petit avaloir en maçonnerie et une conduite PVC DN 200 qui se jette dans la cheminée de mise en charge ; cette conduite est enterrée.

Le dispositif de collecte et la cheminée de mise en charge ont été réalisés en PVC ; ils sont fixés au massif de béton qui supporte la passerelle et les ouvrages de captage par des colliers et des potences scellés dans ce massif.

Le tube de mesure est posé sur des plots en béton après décaissement et mise à niveau du sol en pied du massif ; le dénivelé ainsi obtenu pour la mise en charge, est de l'ordre de 1,50 m.

Les travaux réalisés pour la mise en place de ce dispositif sont les suivants :

- dérivation temporaire des trop-pleins et écoulements pour permettre les travaux de terrassement et de maçonnerie ;
- terrassement au droit du rejet des trop-pleins (pour la mise en place de l'avaloir et du bassin), terrassement et nivellement au pied du massif de béton (pour la pose du tube de mesure et de l'élément de mise en charge) ;
- creusement d'une tranchée pour la pose de la conduite DN 200 pour le captage du griffon latéral ;
- creusement d'une tranchée pour la pose de la gaine TPC pour le cheminement des câbles des capteurs entre le local technique et le captage (environ 45 m) et de la chambre de tirage ;
- réalisation des avaloirs et bassins de captage en maçonnerie, ainsi que des plots et massifs support du tube de mesure ; scellement des colliers de fixation et des potences ;
- préparation et transport des tubes et raccords PVC et acier ;
- assemblage et montage du dispositif, pose du capteur et de son capotage ;
- pose des fourreaux et des regards, mise en place des câbles ; comblement des fouilles et remise en état du sol.

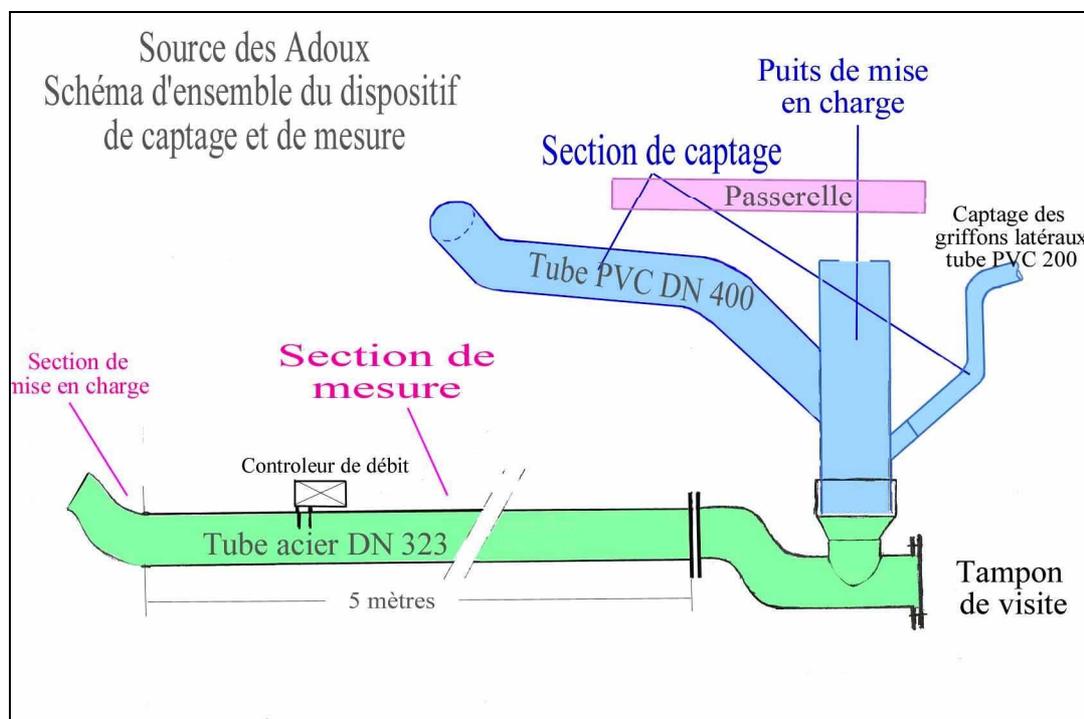


Illustration 74 - Schéma d'ensemble du dispositif de captage et de mesure du trop-plein de la source des Adoux.



Illustration 75 - Report du dispositif de captage des trop-pleins sur le site des Adoux.



Illustration 76 - Débitmètre électromagnétique Krohne, de type DMW2000, installé sur la conduite de mesure du dispositif de captage des trop-pleins à la source des Adoux.



Illustration 77 - Détail du puits de mise en charge et des deux venues de captage, au niveau de la passerelle sur le site de captage de la source des Adoux.



Illustration 78 - Détail de l'exhaure du dispositif de mesure de l'essentiel des trop-pleins au niveau du captage de la source des Adoux.

Une sonde de température et de conductivité a été installée et reliée à une centrale d'acquisition au niveau d'un collecteur après le passage dans les chambres de captage.

Le syndicat d'eau des différentes communes concernées a installé des compteurs sur les buses d'alimentation des différentes communes ainsi que sur le trop-plein du réservoir alimenté par gravité.

L'ensemble de ce dispositif de contrôle des trop-pleins, des paramètres physico-chimiques et de l'alimentation des différentes communes, doit permettre de disposer des informations nécessaires à la caractérisation de la ressource de ce système karstique. Néanmoins, le dispositif complexe de contrôle des trop-pleins mis en place, ne permet pas d'assurer 100 % du contrôle des trop-pleins en période de très hautes-eaux (ill. 79 et 80). Les débits échappant au contrôle sont de l'ordre de 20 à 40 % du débit des trop-pleins.



Illustration 79 - Mise en fonctionnement de trop-pleins échappant au système de contrôle.

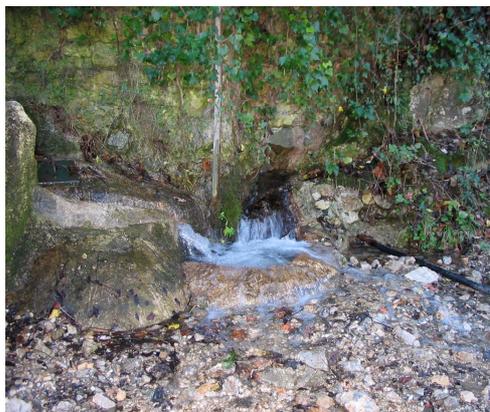


Illustration 80 - Détail de trop-plein échappant au système de contrôle lors de crues.

3.6.5. Mesures de contrôle

Le site a fait l'objet d'une vingtaine de visites de terrain entre 2002 et 2003, dont douze pour des mesures de contrôle. Outre la complexité du site pour réussir à effectuer un suivi des débits de trop-pleins notamment, le système de mesures a souffert de problèmes techniques divers :

- non-fonctionnement du débitmètre électromagnétique dès installation sur le site (problèmes de courant électrique parasite), nécessitant son retour en usine pour vérification et paramétrage (absence de données entre avril et août 2003) ;
- pannes successives du débitmètre liées à des actes de malveillance sur le puits de mesure (remplissage de cailloux) ;
- câble de la sonde de conductivité endommagé suite à l'intervention sur le site par la société METCA pour le compte du syndicat des eaux, début décembre 2003.

Il en ressort des données partielles des différents paramètres enregistrés sur ce site.

L'illustration 81 représente les variations de la conductivité et de la température pour la période 2002-2003, soit en continu depuis mars 2003.

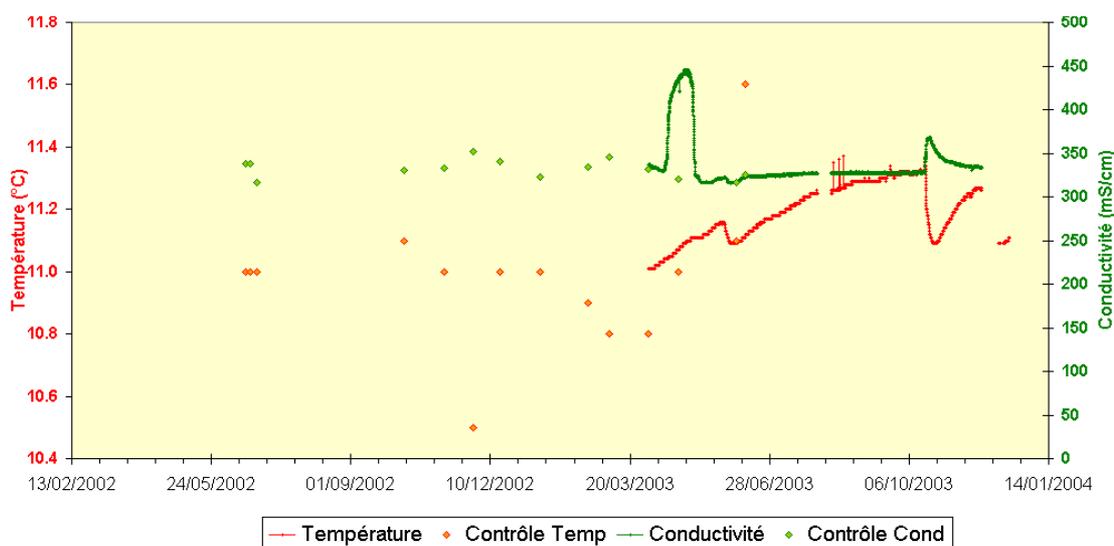


Illustration 81 - Évolution temporelle de la température et de la conductivité enregistrée à la source des Adoux.

3.6.6. Mesures ponctuelles de débits

Des mesures de débits ont été effectuées (ill. 82) au niveau du Rau Noir, afin d'apprécier les débits enregistrés par le système de contrôle des trop-pleins et de quantifier les trop-pleins échappant au système de mesures. Les jaugeages ont été réalisés sur le cours d'eau en amont et en aval du captage des Adoux (ill. 83 et 84).

De plus, des jaugeages ponctuels ont également été effectués au niveau de la Boulzane, afin d'apprécier de manière ponctuelle la variabilité temporelle du débit des pertes de la Boulzane, contribuant à l'alimentation du système karstique des Adoux-Las Bordes, système karstique binaire. À ce jour, une seule campagne de jaugeage a été effective à la mi-février 2003.

L'illustration 85 donne une synthèse des données de débit mesurées ponctuellement ou en continu.

Seuil aval (Las Bordes)					Amont Las Bordes					Q aval-Q amont
Date	Q l/s	Cond	Temp	pH	Date	Q l/s	Cond	Temp	pH	Q Les Adoux l/s
18/06/2002		345	12.3		18/06/2002		351	13		
21/06/2002	250	345	12.3		21/06/2002	63	351	13		187
26/06/2002	189	325	12.3	8.14	26/06/2002	50	337	14.3	8.13	139
09/10/2002	62	339	11.5		09/10/2002	27	375	12.9		36
07/11/2002	77	343	10.6		07/11/2002	36	360	10		41
28/11/2002	74	349	10.2		28/11/2002	57	370	9.6		17
17/12/2002	117	360	10.3		17/12/2002	28	368	9.9		89
15/01/2003	86	331	9.9	7.81	15/01/2003	17	348	8.4	7.72	69
18/02/2003	151	341	9.4		18/02/2003	70	344	9		81
05/03/2003	651	342	9.3		05/03/2003	280	338	7.7		371
02/04/2003	320	334	10.2		02/04/2003	134	339	9		186
24/04/2003	181	332	11		24/04/2003	125	341	11.7		56
04/06/2003	177	339	11.7		04/06/2003	42	376	13.3		135
11/06/2003	140	330	12.4		11/06/2003	34	344	15		106
30/07/2003	69				30/07/2003	54				15
16/09/2003	50	331	11.6		16/09/2003	26	334	11.7		24

Illustration 82 - Débits jaugés à l'amont et à l'aval de la source des Adoux sur le Rau Noir.

Les mesures de débit à venir, dans le cadre de la phase II du projet, permettront de construire une courbe de tarage, intégrant les débits des trop-pleins non pris en compte par le dispositif de mesures.

3.6.7. Prélèvements pour analyses chimiques et isotopiques

Au total entre 2002 et fin 2003, quinze prélèvements ont été effectués en vue d'analyses hydrochimiques et isotopiques. Dans l'attente d'un meilleur suivi des paramètres physiques de la source, d'autres prélèvements devront encore être effectués en 2004 avant de pouvoir sélectionner les échantillons pertinents à analyser.



Illustration 83 - Jaugeage à l'amont de la source des Adoux sur le Rau Noir.

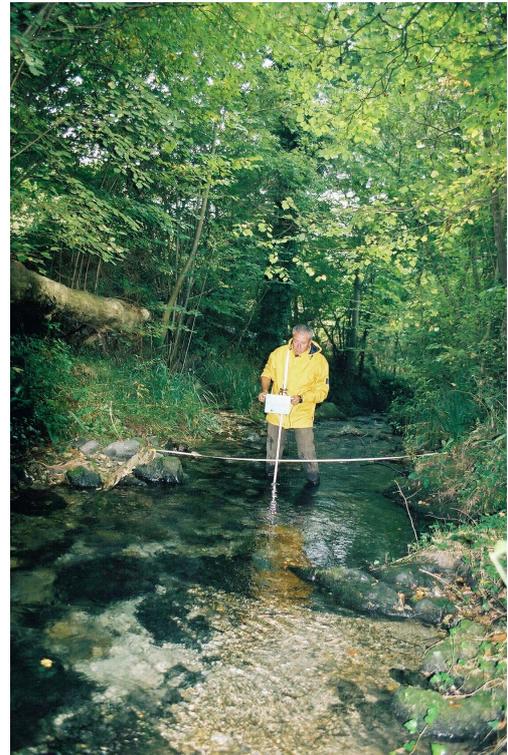


Illustration 84 - Jaugeage à l'aval de la source des Adoux sur le Rau Noir.

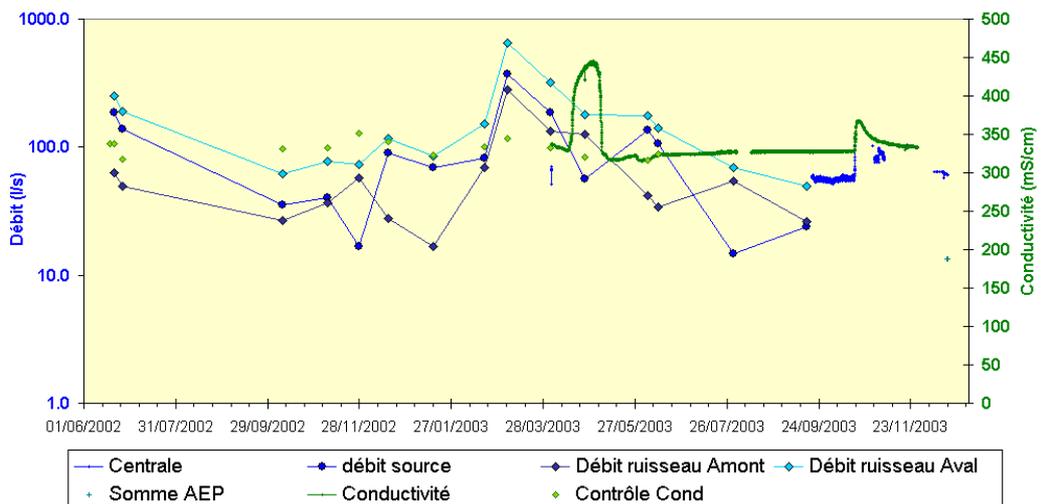


Illustration 85 - Hydrogramme des débits mesurés par jaugeage, calculés et enregistrés à la source des Adoux et évolution de la conductivité électrique.

Les débits de la source résultent de la différence entre le débit amont et le débit aval mesuré au niveau du ruisseau « Rau Noir ». La centrale correspond à la mesure du contrôle des trop-pleins captés.

4. Principales références bibliographiques

Aunay B., Le Strat P., Dörfli N. (2002) - Contribution à l'étude géologique du karst des Corbières (France). BRGM/RP-51595-FR.

Box G.E.P., Jenkins G.M. (1976) - Time series analysis: forecasting and control. Holden Day, San Francisco, 2nd Ed. rev. 575 p.

Castany G. & Margat J. (1977) - Dictionnaire français d'hydrogéologie, BRGM, 249 p.

Duvail C., Le Strat P., Bourguin B. (2001) - Atlas géologique des formations plioquaternaires de la plaine du Roussillon (Pyrénées-Orientales). BRGM/RP-51197-FR, 44 p.

Faillat J.P. (1972) - Contribution à l'étude des circulations souterraines dans les formations carbonatées du Haut-Bassin de l'Agly, (ruissellement souterrain et nappes karstiques). Thèse, CERGH Montpellier, USTL, 219 p.

Grasso D.A. (1998) - Interprétation des réponses couplées hydraulique et chimique des sources karstiques (essai d'inférence de la structure des systèmes karstiques). Thèse Univ. Neuchâtel, 120 p.

Jenkins G.M., Watts D.G. (1968) - Spectral analysis and its applications. Holden Days, San Francisco, 525 p.

Kloppmann W., Girard J.P., Négrel P. (2002) - Exotic stable isotope compositions of saline waters and brines from the crystalline basement. *Chemical Geology*, n° 184, p. 49-70.

Ladouche B., Aquilina L., Bakalowicz M. (2000) - Étude Leucate 98 : « Recherche de l'origine de la contamination bactériologique de l'étang de Salses Leucate ». BRGM/RP-50003-FR.

Ladouche B., Le Strat P., Duvail C., et al. (2003) - Étude NO₃-Pia : « Détermination de l'origine des nitrates dans l'aquifère du Roussillon par le traçage isotopique des sources d'azote (Commune de Pia, Pyrénées-Orientales) ». BRGM/RP-52745-FR.

Mangin A. (1971) - Étude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique. *Ann. Spéléol.*, 26, 2, p. 283-329.

Mangin A. (1975) - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, université de Dijon, thèse de doctorat ès sciences naturelles, 258 p.

Mangin A. (1981) - Utilisation des analyses corrélatrice et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Série III, Paris, t. 293, p. 401-404.

Mangin A. (1982) - L'approche systémique du karst, conséquences conceptuelles et méthodologiques. Proc. Réunion Monographica sobre el karst, Larra, p. 144-157.

Mangin A. (1984) - Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *J. hydrol.*, 67, p. 25-43.

Marsaud B. (1996) - Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux, université Paris XI Orsay, thèse de doctorat, 305 p.

Muet P. (1985) - Structure, fonctionnement et évolution de deux systèmes aquifères karstiques du Nord du causse de Martel (Corrèze), thèse 3^e cycle, université Bordeaux I.

Padilla A., Pudido-Bosch A. (1995) - Study of hydrographs of karst aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. *J. hydrol.*, 168, p. 73-89.

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

Plagnes V. (1997) - Structure et fonctionnement des aquifères karstiques, Caractérisation hydrogéochimique des eaux, université de Montpellier II, thèse de 3^e cycle, 376 p.

Annexe 1

Carte géologique numérique (CD Rom)

Annexe 2

Données hydrogéologiques des suivis des points d'eau (CD-Rom)



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

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

Service eau

1039, rue de Pinville
34000 – Montpellier – France
Tél. : 04 67 15 79 80