

Pompage d'essais sur le système karstique des Cent Fonts (Cne de Causse de la Selle, Hérault) Présentation et interprétation des données recueillies

Rapport final

BRGM/RP-54426-FR
décembre 2005

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service recherche du BRGM 2005 KARSTEAU

B. Ladouche, J.C. Maréchal, N. Dörfliger, P. Lachassagne, S. Lanini, P. Le Strat
Avec la collaboration de
M. Bakalowicz, M.J. Olivier, D. Martin, C. Bou

Vérificateur :

Nom : H. Marchard de Gramont

Date : 04/01/2006

Original signé par H. Marchard de Gramont

Approbateur :

Nom : D. Pennequin

Date : 04/01/2006

Original signé par D. Pennequin

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

Mots clés : Cent Fonts, pompage d'essai, Hérault, système karstique, modèle.

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

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

Synthèse

Le Conseil Général de l'Hérault mène une politique active de prévision des besoins en eau et de développement de nouvelles ressources, pour faire face notamment à l'augmentation de la demande. S'appuyant sur les recommandations du SDAGE RM&C, il s'attache à développer la connaissance sur les ressources en eau des systèmes karstiques de la moyenne vallée de l'Hérault, identifiés dans le SDAGE comme des aquifères d'importance patrimoniale, « à étudier en priorité ».

Pour mener à bien ce projet, le Conseil Général de l'Hérault a notamment sollicité l'assistance scientifique et technique du BRGM, du CNRS et de l'Université de Lyon 1. Ce programme s'inscrit dans le cadre du projet de recherche du BRGM consacré à l'étude de la structure et du fonctionnement des hydrosystèmes karstiques (KARSTEAU).

Les études se sont déroulées en 3 phases successives depuis 1996. Les premières phases ont permis notamment l'identification et la caractérisation de la structure et du fonctionnement des deux principaux aquifères karstiques de la moyenne vallée de l'Hérault, émergeant respectivement aux sources des Fontailles et des Cent Fonts, et la focalisation des recherches sur le plus prometteur des deux en terme de ressource en eau, celui des Cent Fonts (Commune de Causse de la Selle, Hérault). La phase 3 du projet est en cours de mise en œuvre sur la période 2003-2006 ; elle comprend notamment des pompages d'essai sur le principal point d'accès à l'aquifère karstique, le drain qui aboutit à la source des Cent Fonts.

A cet effet, un forage de gros diamètre a été réalisé et a recoupé le drain karstique. Il a été équipé au moyen d'une pompe d'un débit maximal de 500 l/s et a fait l'objet de pompages d'essai du 27 juillet au 30 septembre 2005, accompagnés d'un suivi hydrogéologique, hydrologique, hydrogéochimique et biologique (microfaune souterraine).

Les principaux objectifs de ces pompages d'essai sont les suivants :

- (i) préciser la connaissance du système aquifère et notamment les évaluations des réserves réalisées antérieurement,
- (ii) caractériser l'aptitude de l'ouvrage de captage – le forage de pompage et le drain qu'il recoupe – à mobiliser les réserves de l'aquifère,
- (iii) proposer le cas échéant des scénarios d'exploitation de la ressource en eau,
- (iv) évaluer les éventuels impacts environnementaux d'une exploitation par pompage vis à vis des eaux souterraines (sources, forages), des eaux de surface (Hérault, Buèges), de la faune présente dans le milieu souterrain, etc.

Ces travaux ont été menés par les services techniques du Conseil Général, Maître d'Ouvrage du projet, dans le respect des procédures réglementaires, en lien étroit avec

les Services de l'Etat. A cet égard, un comité de suivi du pompage d'essai a été institué. Il a participé à la définition et a donné son accord à l'ensemble du protocole de mesure et de suivi et à ses modifications en cours d'essai.

Dans ce cadre, le présent rapport de fin de travaux de pompages d'essai sur le site des Cent Fonts répond aux prescriptions établies par l'arrêté de prescriptions complémentaires qui imposaient notamment que les données recueillies lors de cette expérimentation et leur interprétation soient présentées au sein d'un rapport établi dans un délai de 3 mois maximum après la fin des essais (30/09/05)¹. Ce rapport est par ailleurs conforme à l'arrêté ministériel du 11 septembre 2003.

Il se limite volontairement à la présentation et à l'interprétation des données des pompages d'essai ; il ne donne aucune préconisation sur l'exploitation, ceci fera l'objet d'un prochain rapport. Le projet se poursuivra au cours du premier semestre 2006. Il sera plus particulièrement consacré à l'approfondissement de l'interprétation des données et à l'élaboration, en collaboration avec les Services Techniques du Conseil Général, de scénarios d'exploitation et de gestion de la ressource en eau.

Les solutions analytiques ne pouvant rendre compte efficacement du comportement hydrodynamique du système karstique des Cent Fonts lorsqu'il est sollicité par pompage, une approche de modélisation mathématique associant un modèle de type « réservoir », représentant le drain karstique, et une solution analytique d'écoulement, figurant les flux au sein des blocs, a été mise en œuvre pour interpréter les résultats du pompage d'essai. Elle a été conçue de façon à reproduire au mieux la physique des phénomènes telle qu'elle est connue à ce jour au sein du système karstique des Cent Fonts. La solution analytique figurant les flux au sein des blocs qui permet la meilleure reproduction des niveaux piézométriques pendant le pompage d'essai est de type « écoulements transitoires vers une tranchée drainante ». Le calage le plus satisfaisant a été obtenu sur la base des paramètres suivants :

- alimentation du réseau karstique par (1) les pertes de la Buèges, (2) par la contribution naturelle des blocs, à la hauteur des valeurs mesurées ou extrapolées et (3) infiltration d'eau provenant de l'Hérault à un débit de 30 l/s, valeur cohérente avec les estimations déduites des approches hydrogéochimiques (conductivité électrique et chimie des eaux, isotopes du strontium),
- déstockage au sein du réseau de drains karstiques (1 900 m³ par mètre de rabattement) ne dépendant pas de la cote piézométrique au sein de l'aquifère. L'interprétation du pompage d'essai en moyennes eaux suggère néanmoins que les vides karstiques sont plus développés, sur une épaisseur de quelques mètres, aux environs de l'altitude de la source,
- longueur du réseau de drains karstiques : 10 km,
- paramètres hydrodynamiques des blocs (milieu poreux équivalent) :

¹ Le Conseil Général a transmis le présent rapport au Comité de Suivi le 12 janvier 2006. Il a fait l'objet d'une présentation à celui-ci lors d'une réunion le 16 janvier 2006. La présente version finale intègre les remarques formulées, postérieurement à cette réunion par le comité de suivi.

- transmissivité : $1.6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$,
- coefficient d'emmagasinement : 0,7 %,
- les pertes de charges quadratiques sont à l'origine d'un rabattement de 1,2 m au puits de pompage pour un débit de 400 l/s. Elles sont essentiellement générées par les écoulements de type turbulent se produisant au sein du drain karstique, très probablement sur plusieurs centaines de mètres ou quelques kilomètres de distance.

Ce modèle a notamment permis de caractériser les variations temporelles des différents flux au sein de l'aquifère, de simuler plusieurs configurations de pompage, etc.. Hors infiltrations en provenance de l'Hérault, il apparaît que le pompage a contribué à augmenter d'environ 32 % les flux d'eau souterraine en provenance des réserves de l'aquifère (blocs). Le modèle sera prochainement utilisé en simulation afin de tester différentes hypothèses et scénarios d'exploitation de l'aquifère.

Les premières interprétations des analyses hydrogéochimiques disponibles montrent que la signature hydrogéochimique des eaux pompées évolue vers celle du système karstique des Cent Fonts observée en étiage sévère. Cette signature est située dans la gamme d'évolution régionale des eaux issues des formations dolomitiques du Bathonien. Ces résultats sont en cohérence avec l'interprétation hydrodynamique de l'essai, à savoir la sollicitation, par l'intermédiaire du réseau de drains karstiques, d'un réservoir de type poreux et/ou fissuré (ou de systèmes annexes au drainage (SAD)) situé majoritairement dans les dolomies du Bathonien.

Les pompages d'essai ont un impact direct sur les écoulements au niveau des griffons des Cent Fonts. Dans les conditions hydrométéorologiques de l'été 2005 (étiage rencontré tous les 30 ans environ), la totalité des griffons tarit rapidement lorsque le débit de pompage dépasse 200 l/s. La vitesse de reprise des écoulements et leur débit sont fonction de l'état hydrologique de la source et de l'historique des pompages effectués. Le modèle mis au point permet de simuler de manière assez satisfaisante le débit de la source et permettra notamment d'évaluer les impacts des scénarios d'exploitation du système karstique.

Les pompages d'essai à un débit supérieur à 200 l/s ont eu pour conséquence une infiltration d'eau dans le karst en provenance du fleuve Hérault. Le débit moyen d'infiltration est évalué à 30 l/s. L'infiltration se produit dans les environs immédiats de la source (émergences de faible débit situées très probablement au sein du lit mineur de l'Hérault) dès que les rabattements dépassent quelques mètres. Une fois cette phase transitoire passée, le débit d'infiltration se stabilise et ne dépend pas de la différence de charge hydraulique entre le drain karstique et le fleuve.

L'analyse qualitative des données du réseau hydrologique a permis de préciser l'extension spatiale du bassin versant d'alimentation de la source, notamment dans le secteur des piézomètres P5 et P6. Si le drain sur lequel a été effectué le pompage n'est a priori pas en relation directe avec l'ensemble des réserves de la zone noyée de l'aquifère, il sollicite néanmoins une fraction notable de celles-ci, car l'influence du pompage s'exerce sur une partie significative, c'est-à-dire au moins sur 30 à 40 % de la surface du bassin versant d'alimentation de la source.

La source des Fontailles, tout comme celle de la Buèges, ne montre aucun impact lié aux pompages d'essai. Les variations de niveau et de débit observées à la source de la Buèges reflètent uniquement le fonctionnement du système karstique dont les eaux émergent à cet exutoire.

Aucun échantillon n'ayant actuellement été analysé dans sa totalité, il n'est pas possible de délivrer, à la date de rédaction du présent rapport, des résultats précis sur l'impact du pompage sur la faune souterraine. Cependant, quelques observations générales peuvent être énoncées :

- la densité d'organismes stygobies extraits du massif par le pompage est extrêmement faible (moins de 1 individu/m³). Le pompage devrait avoir un faible impact sur l'entraînement des organismes souterrains à l'extérieur du massif,
- les pompages peuvent aussi provoquer un autre type d'impact induit par l'exondation des sédiments meubles présents au sein du système karstique. Il n'est actuellement pas possible de statuer sur la survie de la faune dans de telles conditions d'exondation, qui dépendra notamment de l'importance des « refuges » disponibles au sein du milieu. Les prélèvements post-pompage fourniront quelques éléments de réflexion, mais seul un suivi de crue à *long terme* pourra apporter une réponse définitive à ce second aspect de la question,
- l'apparition, très tôt dans le processus de pompage, d'éléments de la faune des eaux de surface confirme de manière certaine la contribution rapide des eaux en provenance de l'Hérault.

Sommaire

1. Introduction	19
1.1. RAPPEL DU CONTEXTE DU PROJET.....	19
1.2. DEROULEMENT DU PROJET	19
1.3. RAPPEL DES OBJECTIFS DES POMPAGES D'ESSAI.....	20
1.4. OBJET ET CONTENU DU RAPPORT	21
2. Déroulement général du chantier et des pompages d'essai	23
2.1. MISE EN PLACE DU MATERIEL DE POMPAGE (POMPE, CONDUITES D'EXHAURES, ETC.) ET DES APPAREILS DE SUIVI (DEBITMETRE ELECTROMAGNETIQUE, CAPTEURS DE NIVEAU D'EAU, CAPTEURS PHYSICO-CHIMIQUES).....	23
2.2. MODALITES D'EXECUTION DES POMPAGES D'ESSAI SUR L'OUVRAGE A TESTER.....	24
2.2.1. Pompages d'essai par paliers de débit de juillet 2005	24
2.2.2. Pompage d'essai de longue durée	25
2.2.3. Pompages d'essai par paliers de débit de septembre 2005.....	26
3. Présentation du site d'étude et du réseau de suivi	27
3.1. LOCALISATION DES POINTS DU RESEAU DE SUIVI.....	27
3.2. AU NIVEAU DE L'OUVRAGE DE POMPAGE ET A PROXIMITE DE LA ZONE D'EMERGENCE DES SOURCES	35
3.2.1. Niveau d'eau.....	35
3.2.2. Suivi des débits	39
3.2.3. Suivi des paramètres physico-chimiques (conductivité, température, turbidité).....	40
3.2.4. Prélèvements d'eau pour analyses chimiques et isotopiques	41
3.3. SUIVI DES EAUX DE SURFACE	44
3.3.1. Les eaux de l'Hérault (niveau, jaugeages ponctuels, suivi de la conductivité et de la température, prélèvements pour analyses)	44
3.3.2. Les eaux de la Buèges (source de la Buèges, pertes de la Buèges)	46

3.4. SUIVI DES EAUX SOUTERRAINES AU SEIN DU BASSIN D'ALIMENTATION DE LA SOURCE DES CENT FONTS ET DE SES ENVIRONS.....	47
3.5. SUIVI DES PRECIPITATIONS.....	48
3.6. SUIVI HYDROBIOLOGIQUE DE LA FAUNE CAVERNICOLE DES EAUX SOUTERRAINES KARSTIQUES : LA FAUNE STYGOBIE.....	48
3.6.1. Présentation du protocole	48
3.6.2. Méthodologie, prélèvements, analyses.....	51
4. Présentation et description des données de pompage d'essai.....	53
4.1. SUIVI DE LA SOURCE DES CENT FONTS (GRIFFONS).....	53
4.1.1. Suivi du débit des sources avant les essais (juillet 2005).....	53
4.1.2. Suivi des niveaux d'eau pendant les essais par paliers de débit de juillet 2005	54
4.1.3. Suivi du débit des sources en septembre 2005	61
4.2. SUIVI DES NIVEAUX D'EAU AU FORAGE F3 (CF) (QUI FAIT L'OBJET DU POMPAGE D'ESSAI), DU PIEZOMETRE DE RECONNAISSANCE (F2) ET DU FORAGE DE LA CGE	62
4.2.1. Evolutions pendant les essais par paliers de débit de juillet 2005	63
4.2.2. Evolutions pendant les essais de longue durée (du 1er août au 6 septembre 2005).....	65
4.2.3. Evolution pendant l'épisode pluvio-orageux de septembre 2005 (6-9 septembre).....	67
4.2.4. Evolution pendant les essais par paliers de débit de septembre 2005	68
4.2.5. Volumes pompés au cours des différentes phases du pompage	68
4.3. SUIVI DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES (CONDUCTIVITE, TEMPERATURE, TURBIDITE) DES EAUX POMPEES	69
4.3.1. Evolution de la conductivité des eaux pompées	69
4.3.2. Evolution de la température des eaux pompées.....	72
4.3.3. Evolution de la turbidité des eaux pompées	74
4.4. SUIVI DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES (CONDUCTIVITE, TEMPERATURE, TURBIDITE) AU FORAGE CGE	76
4.4.1. Evolution de la conductivité des eaux au forage de la CGE	76
4.4.2. Evolution de la température des eaux au forage de la CGE.....	78
4.4.3. Evolution de la turbidité des eaux au forage de la CGE	80
4.5. SUIVI DE L'HERAULT (HAUTEUR, DEBIT, CONDUCTIVITE ET TEMPERATURE	82
4.5.1. Suivi des hauteurs d'eau de l'Hérault.....	82

4.5.2. Suivi des débits de l'Hérault	84
4.5.3. Suivi de la conductivité et de la température des eaux de l'Hérault	89
4.6. SUIVI DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES AUX AUTRES POINTS D'EAU SOUTERRAINE	91
4.6.1. Suivi des hauteurs d'eau et des débits de la source des Fontailles	91
4.6.2. Suivi des niveaux piézométriques au forage AEP du Mas d'Embougette	93
4.6.3. Suivi des niveaux piézométriques au forage AEP de St-André-de-Buèges	93
4.6.4. Suivi des niveaux piézométriques aux ouvrages situés dans le bassin d'alimentation du système karstique des Cent Fonts	94
4.7. SUIVI DE LA SOURCE DE LA BUEGES ET DES PERTES DE LA BUEGES	100
4.7.1. Suivi des niveaux d'eau de la source de la Buèges et de la rivière de la Buèges (en amont et en aval des pertes).....	100
4.7.2. Suivi des débits de la rivière de la Buèges (en amont et en aval des pertes) et des pertes de la Buèges.....	104
4.7.3. Suivi de la conductivité et de la température de la rivière de la Buèges en amont de la zone des pertes	106
4.8. SUIVI DES PRECIPITATIONS	107
4.9. SUIVI HYDROGEOCHIMIQUE DES EAUX PRELEVEES (HERAULT, SOURCE ET PIQUAGE DES CENT FONTS, BUEGES)	110
4.10. SUIVI HYDROBIOLOGIQUE DE LA FAUNE CAVERNICOLE DES EAUX SOUTERRAINES KARSTIQUES : LA FAUNE STYGOBIE	110
4.10.1. Principaux résultats	110
5. Interprétation des données recueillies au cours des pompages d'essai.....	113
5.1. ELEMENTS GEOLOGIQUES.....	113
5.2. DEBIT DE LA SOURCE DES CENT FONTS	116
5.2.1. Statistiques descriptives des débits de la source des Cent Fonts.....	116
5.2.2. Les débits de la source des Cent Fonts en 2005	118
5.2.3. Estimation du débit qu'aurait eu la source des Cent Fonts en août 2005 en l'absence de pompage d'essai	118
5.2.4. Estimation du débit qu'aurait eu la source en septembre 2005 en l'absence de pompage d'essai	119
5.2.5. Discussion	120
5.3. DEBIT DES PERTES DE LA BUEGES	122
5.3.1. Statistiques descriptives des débits des pertes de la Buèges.....	122
5.3.2. Evolution du débit de la rivière de la Buèges (seuil amont) comme témoin du fonctionnement de la source de la Buèges	124

5.4. INTERPRETATION DES DONNEES HYDROGEOCHIMIQUES.....	129
5.4.1. Bilan des connaissances hydrogéochimiques acquises avant le pompage d'essai	129
5.4.2. Quantification de la part d'eau en provenance de l'Hérault dans les eaux pompées au forage F3 (CF).....	132
5.5. INTERPRETATION HYDRODYNAMIQUE DU POMPAGE D'ESSAI	144
5.5.1. Estimation des pertes de charge quadratiques.....	144
5.5.2. Caractérisation du régime des écoulements au sein du drain karstique principal.....	147
5.5.3. Interprétation du pompage d'essai de longue durée au moyen de solutions analytiques.....	150
5.6. MODELISATION DU POMPAGE D'ESSAI	157
5.6.1. Principe	157
5.6.2. Description du modèle	157
5.6.3. Hydraulique du réservoir « drain karstique »	159
5.6.4. Hydraulique du réservoir « blocs ».....	162
5.6.5. Résultats des modélisations	163
5.7. INTERPRETATION DU SUIVI HYDROBIOLOGIQUE DE LA FAUNE STYGOBIE	185
6. Conclusion.....	187
6.1. APPORT DES POMPAGES D'ESSAI POUR LA CONNAISSANCE DU MODELE CONCEPTUEL DE LA STRUCTURE ET DU FONCTIONNEMENT DE L'AQUIFERE	187
6.2. IMPACTS DU POMPAGE	191
6.3. PERSPECTIVES.....	192
7. Références bibliographiques	195

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation du réseau de suivi. L'aire d'alimentation des Cent Fonts est également reportée (pointillés rouges).....	28
Illustration 2 : Localisation du réseau de suivi à proximité de la zone d'émergence des sources des Cent Fonts.....	29

Illustration 3 : Localisation des stations de mesure des débits de la Buèges.....	30
Illustration 4 : Position des griffons des Cent Fonts en rive droite de l'Hérault (d'après Bardoux modifié, Schoen et al, 1999).....	37
Illustration 5 : Seuil calibré de jaugeage installé au niveau du griffon N°4 des Cent Fonts en rive droite de l'Hérault.....	38
Illustration 6 : Système de jalons avec scotch en couleur pour le suivi du tarissement et de la reprise des écoulements au niveau des griffons des Cent Fonts.....	38
Illustration 7 : Chronologie de l'échantillonnage de la faune stygobie du système karstique des Cent Fonts.....	50
Illustration 8 : Débit moyen horaire de la source des Cent Fonts entre le 01/01/05 et le 06/10/05.....	53
Illustration 9 : Débit moyen horaire de la source des Cent Fonts entre le 01/07/05 et le 31/07/05.....	54
Illustration 10 : Conditions de reprise des écoulements au niveau du griffon N° 4 des Cent Fonts après l'arrêt de chaque palier de pompage.....	60
Illustration 11 : Observation du tarissement au niveau du griffon N° 4 des Cent Fonts lors des pompages par paliers et du démarrage du pompage de longue durée (LD).....	61
Illustration 12 : Débit moyen horaire de la source des Cent Fonts entre le 01/09/05 et le 06/10/05.....	62
Illustration 13 : Piézométrie mesurée (au pas de temps de 5 mn) dans les ouvrages F3 (CF) (pompage), F2 et CGE depuis le 01/07/05. Le débit de pompage est également reporté.....	64
Illustration 14 : Evolution du rabattement au cours de pompage d'essai de longue durée dans les ouvrages F3 (CF)(pompage), F2 et CGE. L'évolution des débits de pompage est également reportée.....	66
Illustration 15 : Evolution de la conductivité des eaux pompées au forage F3 (CF) (mesurée au piquage) au cours de pompage d'essai. L'évolution de la piézométrie dans le drain karstique est également reportée.....	71
Illustration 16 : Evolution de la conductivité des eaux pompées (mesurée au piquage) au cours de pompage d'essai. La charge hydraulique dans le drain karstique est également reportée.....	73
Illustration 17 : Evolution de la turbidité des eaux pompées au cours de pompage d'essai. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain karstique est également reportée.....	75
Illustration 18 : Evolution de la conductivité des eaux du drain karstique au forage de la CGE sur la période du 07/07/05 au 15/10/05. Les niveaux piézométriques dans le drain karstique sont également reportés.....	77
Illustration 19 : Evolution de la température des eaux du drain karstique au forage de la CGE sur la période du 07/07/05 au 15/10/05. L'évolution des niveaux piézométriques dans le drain karstique est également reportée.....	79
Illustration 20 : Evolution de la turbidité des eaux du drain karstique au forage CGE sur la période du 26/06/05 au 15/10/05. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain est également reportée.....	81

Illustration 21 : Evolution des niveaux d'eau de l'Hérault mesurés aux stations Hérault 1, Hérault 2 et Hérault 3 sur la période du 01/06/05 au 14/10/05. Report des jaugeages de l'Hérault effectués à proximité de la station n°1	82
Illustration 22 : Evolution des niveaux d'eau de l'Hérault mesurés aux stations Hérault 1, Hérault 2 et Hérault 3 avant, pendant et après l'arrêt programmé de pompage du 02/09/05 (01/09/05-05/09/05)	83
Illustration 23 : Courbe de tarage de la station Hérault 1	86
Illustration 24 : Débit du fleuve Hérault estimé à la station Hérault 1	87
Illustration 25 : Evolution comparée des niveaux d'eau exprimés en cote NGF (Hérault et drain karstique au forage CGE) sur la période du 27/07/05 au 04/08/05	88
Illustration 26 : Evolution comparée des niveaux d'eau exprimés en cote NGF (Hérault et drain karstique au forage CGE) sur la période du 03/09/05 au 01/10/05	89
Illustration 27 : Evolution de la conductivité des eaux de l'Hérault (station Hérault 1) au cours de la période du 01/07/05 au 15/10/05. L'évolution des niveaux piézométriques dans le drain est également reportée	90
Illustration 28 : Evolution de la température des eaux de l'Hérault (station Hérault 1) au cours de la période du 01/07/05 au 15/10/05. L'évolution des niveaux piézométriques dans le drain est également reportée	91
Illustration 29 : Evolution des hauteurs d'eau à la source des Fontanilles sur la période du 30/06/05 au 01/10/05. L'évolution des niveaux piézométriques dans le drain des Cent Fonts est également reportée	92
Illustration 30 : Evolution des hauteurs d'eau et des débits de la source des Fontanilles sur la période du 29/01/05 au 08/11/05	92
Illustration 31 : Evolution des niveaux piézométriques au forage d'Embougette sur la période du 30/06/05 au 23/08/05. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée	93
Illustration 32 : Evolution des niveaux piézométriques au forage AEP de St-André-de-Buèges sur la période du 30/06/05 au 01/10/05. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée	94
Illustration 33 : Evolution des niveaux piézométriques au piézomètre P3 sur la période du 30/06/05 au 21/11/05. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée	95
Illustration 34 : Evolution des niveaux piézométriques au piézomètre P5 sur la période du 30/06/05 au 21/11/05. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée	96
Illustration 35 : Evolution des niveaux piézométriques au piézomètre P6 sur la période du 30/06/05 au 21/11/05. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée	98
Illustration 36 : Evolution des niveaux piézométriques au piézomètre P7 sur la période du 30/06/05 au 21/11/05. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée	99
Illustration 37 : Evolution de la température et de la conductivité des eaux du piézomètre P7 sur la période du 01/06/05 au 18/10/05	100

Illustration 38 : Evolution des niveaux de la source et de la rivière de la Buèges (seuils en amont et en aval de la zone des pertes) sur la période du 20/02/05 au 10/10/05. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée	101
Illustration 39 : Evolution des niveaux de la source et de la rivière de la Buèges (seuils en amont et en aval de la zone des pertes) et du débit de la rivière de Buèges (seuil en amont de la zone des pertes) sur la période du 20/02/05 au 10/10/05	103
Illustration 40 : Evolution des débits de la rivière de la Buèges en amont et en aval de la zone de pertes sur la période du 20/02/05 au 15/10/05. Le débit des pertes de la Buèges est également présenté	105
Illustration 41 : Evolution de la conductivité de l'eau de la rivière Buèges (seuil en amont des pertes) et de la conductivité de l'eau de l'ouvrage P7 (piézomètre des gorges de la Buèges situé en aval des pertes) au cours de la période du 01/07/05 au 01/10/05. L'évolution du niveau piézométrique du drain des Cent Fonts est également présentée	106
Illustration 42 : Evolution de la température de l'eau de la rivière Buèges (seuil amont) et de la température de l'eau de l'ouvrage P7 (piézomètre des gorges de la Buèges en aval des pertes) au cours de la période du 01/07/05 au 01/10/05. L'évolution du niveau piézométrique au drain des Cent Fonts est également présentée	107
Illustration 43 : Evolution temporelle des paramètres statistiques (minimum, quartiles, médiane et moyenne) du débit interannuel journalier de la source des Cent Fonts calculé pour la période juin 1997-juillet 2005 inclus. Les débits mesurés en 2005 sont également reportés	118
Illustration 44 : Récession du débit de la source des Cent Fonts (du 15/06/05 au 06/09/05)	119
Illustration 45 : Récession du débit de la source des Cent Fonts (du 09/09/05 au 01/10/05)	120
Illustration 46 : Evolution de la pluviométrie précipitée sur l'impluvium du système karstique des Cent Fonts depuis 1971. La pluie efficace qui contribue à la recharge du karst est également reportée. L'estimation de la pluie efficace est réalisée au moyen du modèle de transfert des Cent Fonts précédemment développé (Modèle Tempo, Ladouche et al., 2004)	121
Illustration 47 : Evolution temporelle des paramètres statistiques (minimum, quartiles, médiane et moyenne) du débit interannuel journalier des pertes de la Buèges calculé pour la période mars 2000-septembre 2005 inclus. Les débits mesurés en 2005 sont également reportés	123
Illustration 48 : Evolution temporelle des niveaux d'eau de la source de la Buèges et des débits de la rivière de la Buèges mesurés au seuil amont (St-Jean de Buèges). Les débits des pertes de la Buèges sont également reportés.....	124
Illustration 49 : Evolution des débits journaliers de la Buèges (seuil amont) mesurés en 2000, 2001 et 2002 (représentation dans une année calendaire, période du 10 avril au 25 octobre)	125
Illustration 50 : Evolution des débits journalier de la Buèges (seuil amont) mesurés en 2003, 2004 et 2005 (représentation dans une année calendaire, période du 10 avril au 25 octobre)	125

Illustration 51 : Analyse de la courbe de récession des débits journaliers de la rivière de la Buèges au seuil amont : période 25/04/05-05/09/05.....	128
Illustration 52 : Evolution de la contribution d'eau en provenance de l'Hérault au cours de l'pompage d'essai de longue durée. L'évolution de la conductivité de l'eau pompée est également reportée.....	131
Illustration 53 : Evolution de la contribution de l'eau en provenance de l'Hérault au cours des essais par paliers de débit de septembre 2005. L'évolution de la conductivité de l'eau pompée est également reportée.....	134
Illustration 54 : Evolution du rapport isotopique du strontium des eaux analysées en fonction du rapport Cl/Sr (concentrations exprimées en meq/l).....	136
Illustration 55 : Evolution du rapport isotopique du strontium et du rapport Cl/Sr des eaux pompées dans le contexte hydrogéochimique connu du système des Cent Fonts.....	140
Illustration 56 : Evolution des proportions de mélange dans les eaux pompées au cours de pompage d'essai de longue durée.....	143
Illustration 57 : Rabattements mesurés au forage F3 (CF) lors des quatre essais par paliers de juillet 2005 (sur la base des mesures manuelles de contrôle).....	144
Illustration 58 : Rabattements mesurés à l'ouvrage de reconnaissance (F2) lors des trois essais par paliers de septembre 2005.....	145
Illustration 59 : Comparaison des niveaux piézométriques au forage CF (F3) et au piézomètre de reconnaissance F2 durant les trois essais de septembre 2005.....	146
Illustration 60 : Comparaison des rabattements obtenus lors des différents paliers de pompages réalisés en juillet et septembre 2005 au forage de reconnaissance (F2) et au forage CF (F3).....	147
Illustration 61 : Comparaison des rabattements observés au Forage CF (CF=F3) et au piézomètre de reconnaissance (F2) durant l'essai de longue durée en août 2005.....	148
Illustration 62 : Interprétation du pompage d'essai de longue durée au moyen de la solution de Theis.....	151
Illustration 63 : Evolution du rabattement au Forage F3 (CF) en fonction de la racine carrée du temps.....	152
Illustration 64 : Diagramme bi-logarithmique des rabattements mesurés au forage F3 (CF) en fonction du temps lors du pompage de longue durée de juillet-août 2005.....	153
Illustration 65 : Ajustement des rabattements observés (corrigés des pertes de charge quadratiques) par la solution analytique de Barker.....	155
Illustration 66 : Dérivées des rabattements.....	156
Illustration 67 : Schéma de fonctionnement du système karstique des Cent Fonts au cours de la période de pompage.....	158
Illustration 68 : Schématisation du modèle mathématique (* échanges blocs-drains que ce soit avant le pompage ou en pompage). H _b : charge hydraulique dans les blocs ; H _d : charge hydraulique dans le drain.....	159
Illustration 69 : Comparaison des niveaux d'eau observés et simulés (Modèle 1, jeu 1) au forage F3 (CF).....	165
Illustration 70 : Comparaison des niveaux d'eau observés et simulés (Modèle 1, jeu 2) au forage F3 (CF).....	166

Illustration 71 : Comparaison des niveaux d'eau observés et simulés (Modèle 2) au forage F3 (CF).....	168
Illustration 72 : Schéma d'un écoulement transitoire vers une tranchée drainante située en $x = 0$, dont le potentiel, initialement à H_0 , est instantanément imposé à h_0 (le niveau piézométrique dans l'aquifère évolue au cours du temps t_1, t_2, t_3)	169
Illustration 73 : Modèle conceptuel de l'aquifère karstique des Cent Fonts et paramètres utilisés pour le calage du modèle 3.....	173
Illustration 74 : Comparaison des niveaux d'eau simulés et observés au forage F3 (CF) et dans le piézomètre F6 (modèle 3)	174
Illustration 75 : Comparaison des débits observés et simulés à la source entre le 27 juillet et le 3 août 2005	175
Illustration 76 : Niveaux d'eau simulés au forage F3 (CF) dans l'hypothèse d'un long palier à 300 l/s (jusqu'au 31 décembre 2005).....	176
Illustration 77 : Evolution temporelle des différents flux simulés par le modèle au cours du pompage d'essai	177
Illustration 78 : Origine des volumes d'eau pompés lors du pompage d'essai de juillet-août 2005	179
Illustration 79 : Volumes pompés en continu avant d'atteindre le rabattement limite de 54 m (la durée de pompage est indiquée pour chaque valeur du débit)	180
Illustration 80 : Simulation du comportement du système karstique dans l'hypothèse où, après l'arrêt du 2 septembre 2005 à la fin du long palier à 400 l/s, la pompe n'aurait pas été remise en marche	181
Illustration 81 : Comparaison des niveaux piézométriques simulés et observés au forage F3 (CF) lors du pompage de septembre 2005. Le terme « débit des pertes » correspond à la somme de l'alimentation du système karstique par les pertes de la Buèges et par l'épikarst.....	183
Illustration 82 : Comparaison des niveaux piézométriques observés et simulés (Modèle 4) au Forage F3 (CF)	185

Liste des tableaux

Tableau 1 : Modalités d'exécution des pompages d'essai par paliers de débit de juillet 2005 (heure d'été).....	25
Tableau 2 : Modalités d'exécution des pompages par paliers de débit de septembre 2005	26
Tableau 3 : Ouvrages et points de suivi des eaux souterraines dans l'environnement immédiat (< 500 m) du forage de pompage (F3).....	31
Tableau 4 : Points de suivi des eau de surface dans l'environnement immédiat (< 1000 m) du forage de pompage.....	32
Tableau 5 : Points d'eau et ouvrages de suivi des eaux souterraines dans l'environnement éloigné du forage de pompage.....	33

Tableau 6 : Points de suivi des eaux de surface dans l'environnement éloigné (>1000 m) du forage de pompage	34
Tableau 7 : Système aquifère voisin de celui des Cent Fonts	34
Tableau 8 : Type d'analyses hydrogéochimiques effectuées sur les eaux prélevées à la source n°4 des Cent Fonts	42
Tableau 9 : Type d'analyse hydrogéochimique effectuée sur les eaux prélevées au piquage du forage des Cent Fonts	43
Tableau 10 : Type d'analyse hydrogéochimique effectuée sur les eaux prélevées dans la galerie dénoyée des Cent Fonts	43
Tableau 11 : Type d'analyse hydrogéochimique effectuée sur les eaux prélevées dans l'Hérault.....	46
Tableau 12 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts lors du pompage du palier de débit n°1 (200 l/s).....	55
Tableau 13 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts après l'arrêt du pompage du palier de débit n°1 (200 l/s)	56
Tableau 14 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts lors du pompage du palier de débit n°2 (300 l/s).....	56
Tableau 15 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts après l'arrêt du pompage du palier de débit n° 2 (300 l/s)	57
Tableau 16 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts lors du pompage du palier de débit n° 3 (500 l/s).....	58
Tableau 17 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts après l'arrêt du pompage du palier de débit n°3 (500 l/s)	58
Tableau 18 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts lors du pompage du palier de débit n°4 (400 l/s).....	59
Tableau 19 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts après l'arrêt du pompage du palier de débit n° 4 (400 l/s)	59
Tableau 20 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts lors du démarrage du pompage de longue durée à 400 l/s.....	60
Tableau 21 : Principales caractéristiques des essais par paliers de débit de juillet 2005	63
Tableau 22 : Rabattement moyen journalier (F2, reconnaissance) au cours des 8 premiers jours de pompage (du 01/08/05 au 09/08/05)	65
Tableau 23 : Rabattement moyen journalier (F3, pompage) au cours des 24 jours de pompage suivant l'arrêt programmé du 09/08/05.....	65
Tableau 24 : Chronologie des événements intervenus le 06/09/05	68
Tableau 25 : Principales caractéristiques des essais par paliers de débit de septembre 2005	68
Tableau 26 : Récapitulatif des volumes pompés par période de pompage.	69
Tableau 27 : Jaugeages ponctuels de l'Hérault effectués au cours des pompages d'essai.....	85

Tableau 28 : Eléments d'information concernant les périodes au cours desquelles la cote de l'Hérault (NGF) est supérieure au niveau piézométrique au sein du karst (forage CGE).....	88
Tableau 29 : Précipitations sur le secteur d'étude au cours de la période du 01/06/05 au 30/09/05	109
Tableau 30 : Eléments d'information géologiques déduits de l'analyse des sédiments prélevés dans le réseau karstique des Cent Fonts et dans le lit du fleuve Hérault.....	115
Tableau 31 : Statistiques descriptives des débits de la source karstique des Cent Fonts. L'analyse a notamment porté sur l'ensemble des valeurs journalières des mois considérés (période étudiée : juin 1997 à juillet 2005)	117
Tableau 32 : Statistiques descriptives des débits des pertes de la Buèges. L'analyse a notamment porté sur l'ensemble des valeurs journalières des mois considérés (période étudiée : mars 2000 à septembre 2005 inclus).....	122
Tableau 33 : Contribution de l'eau en provenance de l'Hérault aux dates de prélèvement des échantillons d'eau au piquage du forage F3 (CF).....	142
Tableau 34 : Données des quatre paliers de juillet 2005 après 5 heures 30 minutes de pompage au forage F3 (CF).....	145
Tableau 35 : Données des trois paliers de septembre 2005 après 5 h 30 min de pompage, mesurés au forage de reconnaissance F2 (Q = débit; s= rabattement).....	146
Tableau 36 : Calcul du nombre de Reynolds en différentes sections du drain karstique à l'amont du pompage.....	150
Tableau 37 : Paramètres d'ajustement de la solution analytique de Barker	154
Tableau 38 : Paramètres du réservoir « drain karstique ».....	161
Tableau 39 : Paramètres du réservoir « blocs »	163
Tableau 40 : Paramètres du modèle 1 (en gris, paramètres d'ajustement)	164
Tableau 41 : Paramètres du modèle 2 (en gris, paramètres d'ajustement)	167
Tableau 42 : Paramètres du modèle 3 (en gris, paramètres d'ajustement)	171
Tableau 43 : Calcul, au sein des blocs, du rayon d'action R du pompage et de la distance maximale d en deça de laquelle les effets d'une limite hydraulique seraient perceptibles au cours d'un pompage de durée t (valeurs données à titre indicatif étant données les équivalences possibles sur les caractéristiques hydrodynamiques des blocs).....	177
Tableau 44 : Origine des volumes d'eau pompés lors de l'essai de pompage de juillet-août 2005 à partir des résultats du modèle.....	178
Tableau 45 : Paramètres du modèle 4 (en gris, paramètres d'ajustement)	184

Liste des annexes

Annexe 1 Présentation du protocole prévisionnel de pompage tel que mentionné dans « Dossier relatif aux procédures de déclaration prévues par l'arrêté interministériel du 11/09/03 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau »	199
Annexe 2 Coupes techniques et géologique des ouvrages F2 (piézomètre de reconnaissance) et F3 (Forage)	209
Annexe 3 Courbes de tarage des seuils amont et aval de la rivière de la Buèges	219
Annexe 4 Eléments topographiques du drain karstique au voisinage de la zone d'émergence des sources des Cent Fonts	221
Annexe 5 Résultats des analyses géochimiques effectuées sur les échantillons sélectionnés	225
Annexe 6 Faune Stygobie : éléments sur les travaux en cours	231
Annexe 7 Eléments de statistiques descriptives sur la pluie et la pluie efficace de l'impluvium karstique du système des Cent Fonts calculée à l'aide du modèle de transfert des Cent Fonts (Ladouche et al., 2004)	235
Annexe 8 Evaluation des pertes de charge quadratiques	239
Annexe 9 Simulation de pertes de charge quadratiques dans un drain karstique	243

1. Introduction

1.1. RAPPEL DU CONTEXTE DU PROJET

L'augmentation démographique à laquelle est soumis le département de l'Hérault conduit à la prévision, à l'horizon 2015 (cf. Schéma Départemental d'Alimentation en Eau Potable (AEP) du département, en cours de révision), d'un déficit important en eau potable, au moins à l'échelle d'une grosse moitié Est du département (littoral, agglomération montpelliéraine et sa périphérie, basse et moyenne vallée de l'Hérault). Compte tenu de ces perspectives, le Conseil Général de l'Hérault s'est investi dans une politique active de prévision des besoins et de développement de nouvelles ressources en eau : adduction d'eau brute à partir des eaux du Bas-Rhône-Languedoc, diversification des sources d'approvisionnement, etc.

Dans ce dernier cadre, le Département s'est appuyé sur les recommandations du SDAGE RM&C (1996) qui préconisaient, notamment, de développer les connaissances sur les eaux souterraines, de réserver cette ressource aux usages nobles (Alimentation en Eau Potable (AEP)) et d'accroître le recours à la ressource en eau des aquifères karstiques, encore sous-exploités à l'échelle du bassin. Le SDAGE identifiait aussi les aquifères karstiques de la moyenne vallée de l'Hérault comme des aquifères d'importance patrimoniale, « à étudier en priorité ».

1.2. DEROULEMENT DU PROJET

Le Conseil Général de l'Hérault a donc lancé, en 1997, avec l'appui scientifique et technique du BRGM et du CNRS, un projet portant sur l'évaluation de la ressource en eau exploitable au sein des aquifères karstiques de la moyenne vallée de l'Hérault. Ce projet a comporté plusieurs étapes successives, dont le phasage a été calqué sur la méthodologie d'étude des aquifères karstiques, mise au point conjointement par le BRGM et le CNRS :

- de 1997 à 2002 : Phases 1 et 2 d'identification et de caractérisation de la structure et du fonctionnement des deux principaux aquifères karstiques de la moyenne vallée de l'Hérault (émergeant respectivement aux sources des Cent Fonts et des Fontanilles). L'interprétation des données acquises (géologie et développement de la karstification, instrumentation et jaugeage des sources et des pertes, suivis hydrologiques et hydrochimiques, traçages, traitement du signal, etc.) a permis de proposer un modèle conceptuel de la structure et du fonctionnement de chacun de ces deux systèmes karstiques et, notamment, d'évaluer leurs réserves, la superficie et les contours d' bassin d'alimentation, etc..

Le système karstique de la source des Cent Fonts, d'un débit moyen de 1 090 l/s, doté de réserves mobilisables évaluées à 9,3 (+/- 1,6) millions de m³ sur la base de l'estimation du volume dynamique (analyse des courbes de récession de la source des Cent Fonts) et disposant d'un bassin versant de 60 km², peu vulnérable vis-à-vis des risques de pollution, a été retenu pour la suite des études ; le système des

Fontanilles présente de moindres potentialités (réserves évaluées entre 0,2 et 0,5 millions de m³ en particulier) ;

- de 2003 à 2005 : Phase 3, dite de démonstration, destinée à déterminer la part des réserves mobilisables, par pompage sur le principal point d'accès à l'aquifère karstique, le drain qui aboutit à la source des Cent Fonts, ainsi que les impacts éventuels de ce pompage. Cette phase d'étude a principalement compris la poursuite de la métrologie de l'aquifère, la réalisation de piézomètres d'observation, l'implantation, la réalisation et l'équipement d'un forage de gros diamètre, situé à quelques centaines de mètres en amont de la source et recoupant le drain karstique entre 120 et 125 m de profondeur, et la réalisation, au cours des mois de juillet à septembre 2005, de pompages d'essai sur ce puits, dont un pompage de longue durée à 400 l/s. L'analyse de l'impact du pompage sur la faune aquatique souterraine a été réalisée par l'Université de Lyon 1 ;
- la fin de l'année 2005 et le premier trimestre 2006 (fin de cette partie du projet : juin 2006) sont consacrés à la Phase 4, dite d'évaluation, destinée à l'interprétation de l'ensemble des données recueillies au cours du projet.

Ces travaux ont été menés sous la Maîtrise d'Ouvrage du Conseil Général de l'Hérault qui, outre le BRGM et le CNRS pour l'assistance scientifique et technique, s'est appuyé sur plusieurs prestataires, parmi lesquels : ANTEA (maîtrise d'œuvre des travaux de forage et de pompage), Bardot (topographie de la galerie noyée et report en surface pour l'implantation du forage), AMEC-SPIE (installation et fonctionnement de la pompe), des prestataires de travaux de génie civil, d'alimentation du site en électricité, etc.

Ces travaux ont été menés par les services techniques du Conseil Général avec un souci constant du respect des procédures réglementaires, en lien étroit avec les Services de l'Etat. A cet égard, un comité de suivi du pompage d'essai, comprenant des représentants des services de l'Etat, du Conseil Général, le BRGM, ANTEA, etc. a été institué et s'est réuni très régulièrement préalablement, au cours et à l'issue des travaux. Il a participé à la définition et a donné son accord à l'ensemble du protocole de mesure et de suivi et à ses modifications en cours d'essai.

1.3. RAPPEL DES OBJECTIFS DES POMPAGES D'ESSAI

Comme cela a été indiqué ci-dessus, les pompages d'essai constituent l'une des phases ultimes des travaux de caractérisation de la ressource en eau exploitable au sein d'aquifère karstique. Les principaux objectifs des pompages d'essai sont les suivants :

- préciser les évaluations des réserves de l'aquifère (zone noyée du karst) établies lors des phases précédentes du projet et surtout déterminer la part de ces réserves qui est mobilisable au moyen du dispositif de pompage testé (forage – drain),
- caractériser en détail l'aptitude de l'ouvrage de captage (le forage faisant l'objet du pompage) à mobiliser les réserves de l'aquifère : pertes de charge au forage et dans son voisinage, évaluation du volume du drain capté, détermination de la nature des structures capacitatives situées en zone noyée (systèmes annexes au drainage,

matrice poreuse et/ou fissurée), relations hydrauliques entre le drain et ces structures capacitatives, relations éventuelles avec les eaux de surface, relation entre le débit de pompage et le tarissement des sources, etc.,

- évaluer les impacts éventuels des pompages d'essai,
- proposer, sur cette base, des scénarios d'exploitation de la ressource et évaluer notamment l'aptitude du système « forage d'exploitation - aquifère » vis-à-vis de la gestion active de la ressource en eau souterraine,
- évaluer les impacts éventuels de ces scénarios d'exploitation.

Ceci est réalisé à l'aide d'un pompage à fort débit afin de solliciter de façon significative les réserves du système. Pour que l'expérience conduise à une interprétation acceptable, plusieurs conditions sont requises :

- les pompages d'essai doivent être réalisés sur un site dont l'historique des débits et des paramètres physico-chimiques est bien maîtrisé. Ces conditions sont satisfaites pour le site des Cent Fonts (chroniques depuis 1997),
- l'ouvrage de pompage doit recouper le réseau de drains ou un système annexe au drainage. La localisation prévue du site de forage satisfait à la première de ces deux conditions,
- l'expérience doit être conduite à un débit de pompage du même ordre de grandeur ou significativement supérieur au débit naturel de la source. En pratique, elle doit donc être mise en oeuvre en étiage. Le débit de pompage envisagé (400 l/s) est significativement supérieur au débit moyen d'étiage (300 l/s).

1.4. OBJET ET CONTENU DU RAPPORT

Le présent rapport de fin de travaux des pompages d'essai sur le site des Cent Fonts (Commune de Causse de la Selle, Hérault) répond aux prescriptions établies par le Comité de Suivi des pompages d'essai qui imposaient notamment que les données recueillies lors de cette expérimentation et leur interprétation soient présentées au sein d'un rapport établi dans un délai de 3 mois maximum après la fin des essais (30/09/05). Ce rapport suit par ailleurs les prescriptions de l'arrêté ministériel du 11 septembre 2003. Il a été précédé par un dossier de déclaration, déposé à la Préfecture de l'Hérault par le Conseil Général de l'Hérault, Direction de l'Aménagement et des Ressources en eau, en mars 2005, pour les pompages d'essai des Cent Fonts. Ce dossier de déclaration a fait l'objet de prescriptions complémentaires (arrêté N° 2005-I-1440 en date du 20-06-2005).

Le numéro de récépissé de déclaration est le suivant :

Pompages d'essai des Cent Fonts N° 2004/217bis (01/03/2005).

Nom et adresse du demandeur

Nom du demandeur : Conseil Général de l'Hérault

Représenté par : André Vézinhet

Adresse : Hôtel du département
1000 rue d'Alco
34087 Montpellier Cedex 4

Téléphone : 04 67 67 65 01

Télécopie : 04 67 67 60 10

Ce rapport présente, dans le chapitre 2, le déroulement des principales phases du chantier de pompage et le protocole qui a été adopté au cours des essais. Le chapitre 3 décrit le site d'étude et propose une description détaillée des moyens mis en œuvre pour le réseau de suivi. Le Chapitre 4 présente et décrit les données acquises dans le cadre du pompage d'essai. Le chapitre 5 est consacré à l'interprétation de ces données. Le dernier chapitre - chapitre 6 - propose une première synthèse des apports de ces essais à la connaissance de la structure et du fonctionnement de l'aquifère karstique des Cent Fonts. Des éléments sur l'impact du pompage sont également présentés.

Compte tenu de ses objectifs rappelés ci-dessus, le présent rapport se limite volontairement à la présentation et à l'interprétation des données des pompages d'essai telles que prévues dans le cadre réglementaire décrit précédemment. Il n'abordera pas les aspects liés à l'exploitation du système, qui fera l'objet d'un prochain rapport. Le projet se poursuit au cours du premier semestre 2006. Il sera plus particulièrement consacré à l'approfondissement de l'interprétation des données et à l'élaboration, en collaboration avec les Services Techniques du Conseil Général, de scénarios d'exploitation et de gestion de la ressource en eau.

2. Déroulement général du chantier et des pompages d'essai

Le chantier de pompage a comporté les différentes phases suivantes :

- I. Mise en place du matériel de pompage (pompe, conduites d'exhaures, etc.) et des appareils de suivi (débitmètre électromagnétique, capteurs de niveau d'eau, capteurs physico-chimiques) ;
- II. Réalisation des pompages d'essai ;
- III. Repli des canalisations de refoulement (conduites d'exhaure) ;
- IV. Protection du site de pompage.

2.1. MISE EN PLACE DU MATERIEL DE POMPAGE (POMPE, CONDUITES D'EXHAURES, ETC.) ET DES APPAREILS DE SUIVI (DEBITMETRE ELECTROMAGNETIQUE, CAPTEURS DE NIVEAU D'EAU, CAPTEURS PHYSICO-CHIMIQUES)

Le dispositif de pompage a été dimensionné par le Maître d'Oeuvre du projet (ANTEA) et son installation et sa mise en oeuvre ont été confiées à la société AMEC-SPIE. Les principales caractéristiques de ce matériel sont rappelées ci-dessous. Le Maître d'Oeuvre a prévu de remettre un rapport détaillé de son intervention au Conseil Général dans le courant du mois de janvier 2006.

Caractéristiques du matériel de pompage :

- pompe Flowserve type KN357-3A équipée d'un moteur immergé de 675 kW sous 690 V avec variateur de fréquence permettant un débit de 1865 m³/h (518 l/s) sous 130 m de hauteur manométrique (HMT) ;
- conduite d'exhaure en inox 304L DN 400 mm avec raccords rapides ; longueur prévisionnelle 115 m ;
- paramètres suivants enregistrés et retransmis par GSM :
 - niveau dans le forage faisant l'objet du pompage,
 - débit d'exhaure,
 - pression de refoulement,
 - turbidité,
 - paramètres électriques.

Caractéristiques de la conduite de refoulement :

- conduite de refoulement provisoire en acier [3 x DN] de diamètre 250 mm et d'une longueur prévisionnelle de 300 m ;
- rejet des eaux souterraines dans le fleuve Hérault en aval de la dernière émergence des Cent Fonts et du seuil naturel traversant la rivière ;
- les extrémités des canalisations de rejet ont été fixées sur la berge rocheuse afin d'éviter tout mouvement lié au débit d'exhaure. Les canalisations ont été positionnées parallèlement à la rive afin de permettre à l'eau de ruisseler sur la berge rocheuse avant de rejoindre l'Hérault (perte de vitesse).

2.2. MODALITES D'EXECUTION DES POMPAGES D'ESSAI SUR L'OUVRAGE A TESTER

Les pompages d'essai ont été précédés d'une période de quelques jours (19 au 22 juillet) pendant laquelle la pompe a été mise en route de manière temporaire afin de tester son bon fonctionnement ainsi que l'efficacité des dispositifs de métrologie. La toute première mise en route de la pompe a eu lieu le 19/07/2005 à 13h10.

Les pompages d'essai ont débuté le 27 juillet 2005. Ils se sont déroulés globalement selon le protocole décrit dans le dossier de déclaration déposé en Préfecture (le protocole initial est rappelé en Annexe 1). Conformément à l'arrêté de prescription complémentaire, les modifications qui ont été apportées au protocole initial ont été faites en concertation avec les membres du comité de suivi. Le comité de suivi s'est réuni à 4 reprises au cours et à l'issue du chantier de pompage. Le chantier de pompage s'est terminé le 30/09/2005 conformément à l'arrêté de prescription.

Le déroulement général du chantier de pompage d'essai est décrit ci-dessous. Des essais par paliers de débit et des essais de longue durée ont été réalisés entre le 27/07/05 et le 30/09/05. Le protocole a consisté dans un premier temps à réaliser des essais par paliers de débit, puis à engager un essai de longue durée d'un mois environ, interrompu volontairement à plusieurs reprises afin de disposer de données de remontée des niveaux piézométriques pour différents états de rabattement de l'aquifère et afin de disposer aussi de données au cas où la remontée serait perturbée par des précipitations significatives. Ces expérimentations ont été réalisées dans un contexte de très basses eaux et en absence de pluie.

Les épisodes pluvio-orageux de début septembre ont contraint à arrêter temporairement les essais. Fin septembre, une nouvelle expérimentation a été conduite dans un contexte hydrologique différent (contexte de moyennes eaux). La description des différents protocoles est présentée ci-après.

2.2.1. Pompages d'essai par paliers de débit de juillet 2005

La première phase d'essai par paliers de débit a été réalisée fin juillet 2005 dans un contexte de très basses eaux.

Quatre paliers de débit à 200 l/s, 300 l/s, 500 l/s et 400 l/s, d'une durée de 6 heures environ chacun, avec attente de la récupération initiale du niveau d'eau, ont été réalisés. Ces essais se sont déroulés entre le 27/07/05 et le 01/08/2005. Les caractéristiques des essais du mois de juillet 2005 sont présentées dans le Tableau 1.

Palier	Date	Durée pompage	Suivi de la remontée
N°1 : 200 l/s (juillet 2005)	27/07/05 de 9h24 à 15h25	6 heures et 1 minute	16 heures et 43 minutes
N°2 : 300 l/s (juillet 2005)	28/07/05 de 8h08 à 14h00	5 heures et 52 minutes	18 heures et 15 minutes
N°3 : 500 l/s (juillet 2005)	29/07/05 de 8h15 à 14h20	6 heures et 6 minutes	18 heures et 10 minutes
N°4 : 400 l/s (juillet 2005)	30/07/05 de 8h30 à 14h35	6 heures et 5 minutes	42 heures et 28 minutes

Tableau 1 : Modalités d'exécution des pompages d'essai par paliers de débit de juillet 2005 (heure d'été)

2.2.2. Pompage d'essai de longue durée

Le pompage d'essai de longue durée au débit de 400 l/s a débuté le 1^{er} août 2005 à 09h06 (heure d'été). Au cours de cet essai de plus d'un mois (du 01/08/05 au 06/09/05), deux arrêts volontaires ont été programmés (09/08/05 et 02/09/05) et deux arrêts non programmés sont survenus le 22/08/05, (d'une durée de moins d'une heure) et le 06/09/05 en raison d'un épisode pluvio-orageux.

1^{er} arrêt temporaire, volontaire, le 9/08/2005, d'une durée de six heures ;

2^{ème} arrêt temporaire, non volontaire, le 22/08/2005, d'une durée de 50 minutes environ ;

3^{ème} arrêt temporaire, volontaire de 24h, le vendredi 2/09/2005 à 11h25 avec reprise le 3/09/2005 à 11h50 avec un débit de pompage différent égal à 300 l/s. Le pompage à 300 l/s a été mené jusqu'au 06/09/05 ;

4^{ème} arrêt, non volontaire, lié aux précipitations orageuses : le 6/09/2005 à 11h30 suite à coupure de courant électrique (coupure secteur), reprise vers 17h00 pendant 4 heures environ, puis arrêt au moment du plus fort de l'orage.

Les fortes précipitations du début du mois de septembre ont engendré des crues à la source des Cent Fonts, ce qui a conduit à arrêter temporairement les tests de pompage.

Cette phase d'arrêt d'expérimentation a été mise à profit pour procéder à des réglages du système de pompage : dans la journée du 07/09/2005, des modifications ont été

apportées au variateur de la pompe afin que puissent être mis en oeuvre des essais de débit à rabattement constant. Deux phases de test de pompage d'une durée de deux heures chacune ont été réalisées ce jour là.

Les pompages d'essai ont repris le 20/09/05 (cf. ci-après).

2.2.3. Pompages d'essai par paliers de débit de septembre 2005

La seconde phase d'essais par paliers de débit a été réalisée dans un contexte de moyennes eaux à la fin du mois de septembre.

Trois paliers de débit (300 l/s, 500 l/s et 400 l/s) de durées différentes ont été réalisés entre le 20/09/05 et le 29/09/05. Le 29/09/05, un pompage d'essai à rabattement constant a été tenté sans succès ; le dispositif de régulation n'ayant pas fonctionné correctement, les niveaux d'eau se sont mis à remonter dans la nuit du 29/09/05 au 30/09/05. Le dispositif de pompage a été arrêté définitivement le 30/09/05 à 09h00. Les caractéristiques des essais du mois de septembre 2005 sont présentées dans le Tableau 2.

Palier	Date	Durée pompage	Suivi de la remontée
N°1 : 300 l/s (Septembre 2005)	20/09/05 au 21/09/05	27 heures et 15 minutes	3 heures
N°2 : 500 l/s (Septembre 2005)	21/09/05 au 23/09/05	25 heures et 15 minutes	14 heures et 45 minutes
N°3 : 400 l/s (Septembre 2005)	23/09/05 au 30/09/05	146 heures et 25 minutes	Arrêt du pompage le 30/09/05 à 09h00

Tableau 2 : Modalités d'exécution des pompages par paliers de débit de septembre 2005

3. Présentation du site d'étude et du réseau de suivi

Le système karstique de la source des Cent Fonts est situé à 30 kilomètres au nord-ouest de Montpellier. Il s'inscrit dans la partie ouest des garrigues nord montpelliéraines, formées par les massifs calcaires et dolomitiques situés entre Montpellier et les Cévennes.

Le forage des Cent Fonts est implanté à proximité des émergences des Cent Fonts sur le territoire de la commune de Causse-de-la-Selle (lieu-dit : les Cent Fonts, référence cadastrale : parcelle 65, section E).

Le site est inclus à l'intérieur des périmètres suivants :

- ZNIEFF de type II : « Gorges de l'Hérault et du Lamalou »,
- ZPS « hautes Garrigues du Montpelliérais »,
- Site classé des Gorges de l'Hérault,
- Projet de site Natura 2000 « Gorges de l'Hérault ».

Par ailleurs, il est situé à proximité de :

- ZNIEFF de type I « Les Cent Fonts »,
- ZNIEFF de type I « Le Roc Blanc »,
- Arrêté Préfectoral de Protection de Biotope « Aigle de Bonelli ».

Le site des Cent Fonts est inclus dans la zone de protection spéciale "Hautes garrigues du Montpelliérais" ainsi que dans la zone spéciale de conservation des gorges de l'Hérault, l'ensemble de ces 2 zones étant appelé à constituer le futur "site Natura 2000" des Gorges de l'Hérault (en instance de validation par l'Union européenne).

3.1. LOCALISATION DES POINTS DU RESEAU DE SUIVI

Les illustrations 1, 2 et 3 positionnent dans l'espace les différents points du réseau de suivi.

Les tableaux 2, 3, 4, 5, 6 et 7 présentent de manière récapitulative les principales caractéristiques des points d'eau surveillés avant, pendant et après le chantier de pompage. Une description plus détaillée des points d'eau et des moyens mis en œuvre est réalisée dans la suite de ce chapitre.

Nota : à l'exception des instruments de mesure relatifs au système de pompage du forage de pompage F3 (piézométrie, débit pompé et turbidité des eaux pompées²), les appareils de mesure du réseau de suivi ont été mis en place et suivis par le BRGM.

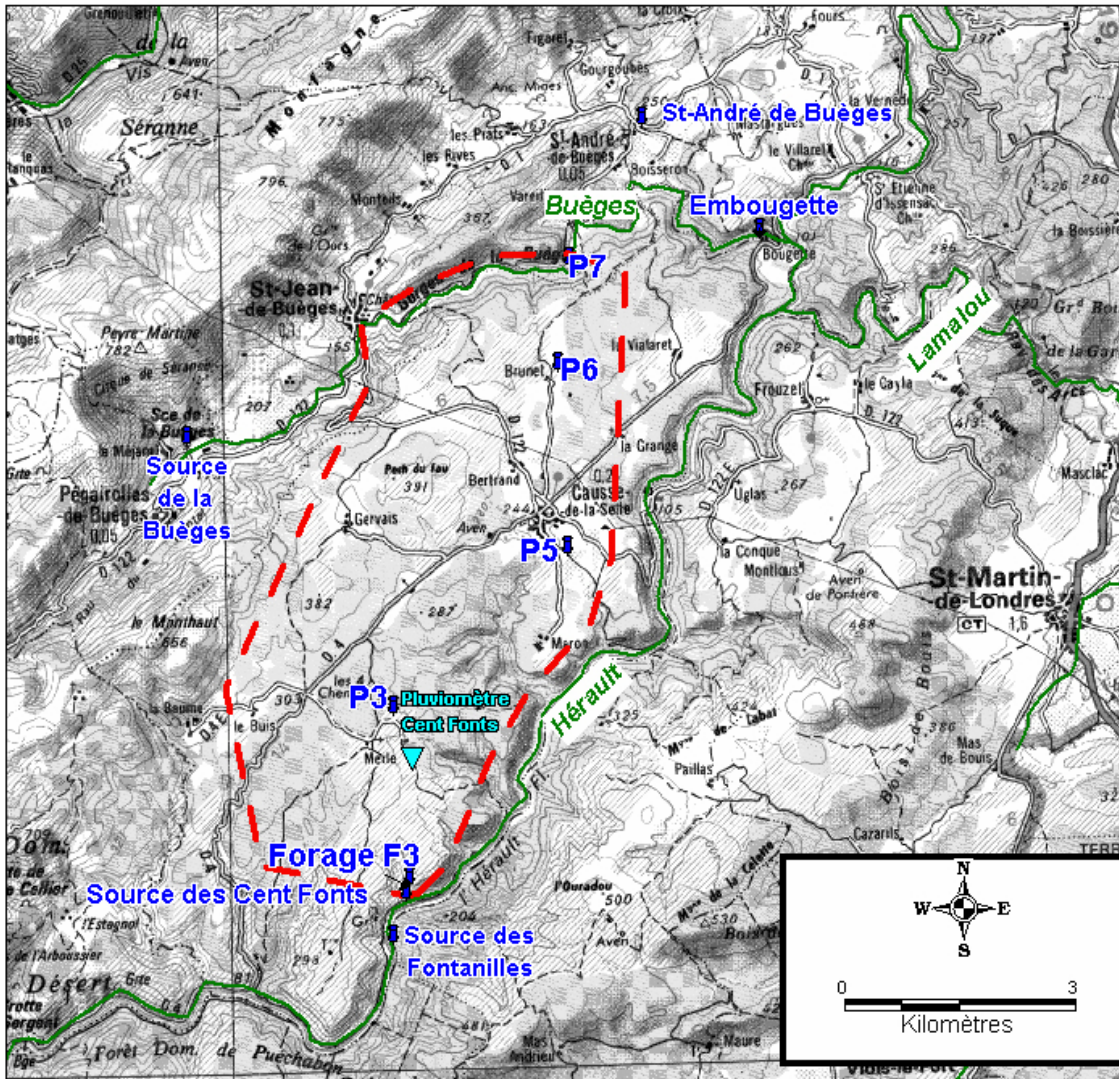


Illustration 1 : Localisation du réseau de suivi. L'aire d'alimentation des Cent Fonts est également reportée (pointillés rouges)

² Appareils installés par la société AMEC SPIE sous maîtrise d'œuvre d'ANTEA

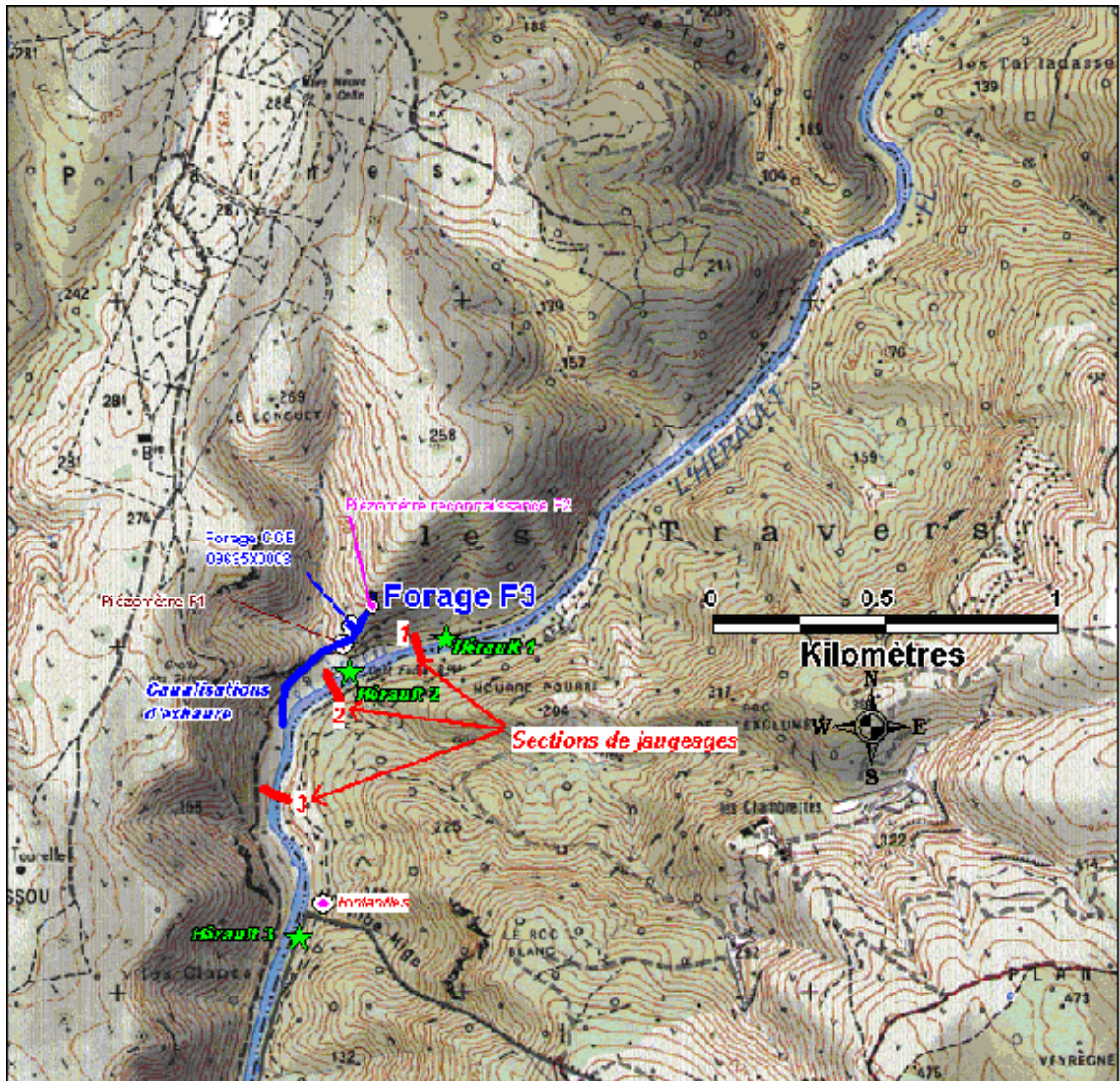


Illustration 2 : Localisation du réseau de suivi à proximité de la zone d'émergence des sources des Cent Fonts

Le piézomètre P1 (Illustration 2) n'a pas été suivi car il est obstrué, vraisemblablement par des pierres, vers 10 m de profondeur.

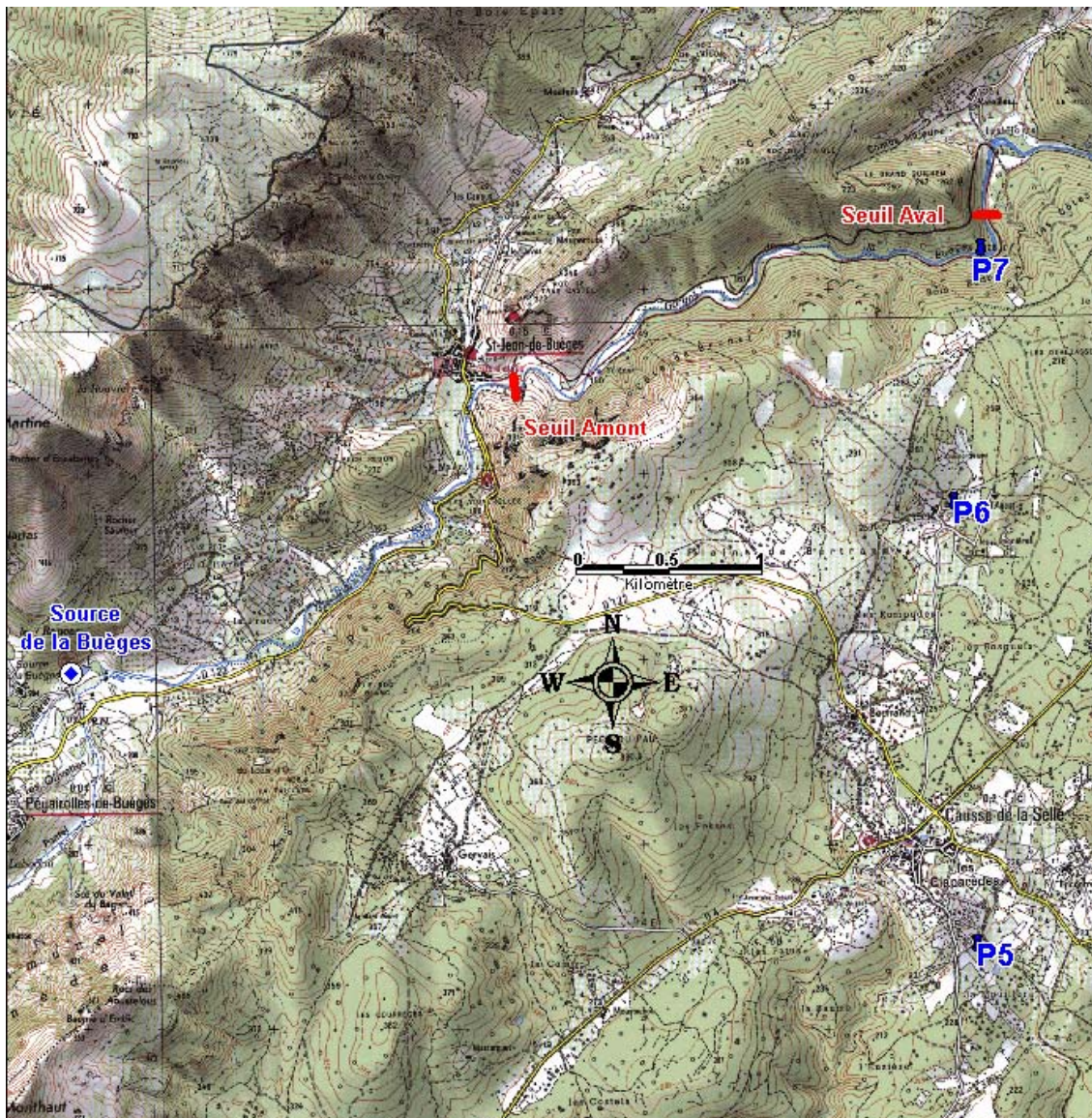


Illustration 3 : Localisation des stations de mesure des débits de la Buèges

Intitulé (coordonnées Lambert 3)	Paramètres suivis	Type de suivi	Remarques
Forage CGE BSS : 09635X0003 X = 703.666 Y = 163.019 Z = 104.64 m (tête d'ouvrage)	Hauteur d'eau, conductivité, température, turbidité ³	En continu (toutes les 5 mn, 20mn pour la turbidité), Centrale d'acquisition autonome	Ouvrage sur lequel la CGE a effectué son pompage d'essai en 1991 Installation : juin 1997 pour la hauteur d'eau
Forage F3 (CF) [pompage] BSS : 09635X0279 X : 703 743.08 Y : 163 101.17 Z sol : 133.54	Débit pompé, Hauteur d'eau, Conductivité, Température, Turbidité ⁴	En continu (toutes les 5 mn), Centrale d'acquisition télétransmise, récupération des données en temps réel	Ouvrage réalisé dans le cadre du projet, coupe géologique présentée en annexe Installation : 26/07/05
Forage F2 [reconnaissance] BSS : 09635X0278 X = 703 738.66 m Y = 163 100.35 m Z sol = 133.50 m	Hauteur d'eau ⁵	En continu (toutes les 5 mn), Centrale d'acquisition autonome,	Ouvrage réalisé dans le cadre du projet, coupe géologique présentée en annexe Installation : 25/07/05
Emergences des Cent Fonts	Débit, hauteur ⁶	Mesures ponctuelle du débit et des hauteurs d'eau	Le débit de l'ensemble des émergences est obtenu à partir du suivi de hauteur d'eau réalisé au forage CGE.

Tableau 3 : Ouvrages et points de suivi des eaux souterraines dans l'environnement immédiat (< 500 m) du forage de pompage (F3)

³ Caractéristiques des mesures : capteur de pression 1 bar (résolution et précision = 1 cm) ; conductivité (résolution et précision = 1µS/cm), température (résolution et précision = 0.1°C), Turbidité (résolution = 0.01 NTU et précision = 0.05 NTU).

⁴ Caractéristiques des mesures : précision débit pompé (1 %), capteur de pression 12 bars (résolution = 1 cm et précision = 12 cm) , Turbidité (résolution = 0.01 NTU et précision = 0.05 NTU), conductivité (résolution et précision = 1µS/cm), température (résolution et précision = 0.1°C)

⁵ Caractéristiques des mesures : capteur de pression 1 bar (résolution et précision = 1 cm)

⁶ Cf. texte.

Intitulé	Paramètres suivis	Type de suivi	Remarques
Hérault 1	Hauteur d'eau, conductivité, température ⁷	En continu (toutes les 15 mn) Centrale d'acquisition autonome	Installation : 31/05/05 Désinstallation : 06/10/05
Section de jaugeage n°1 de l'Hérault	Débit	Mesure ponctuelle du débit à l'aide d'une perche intégratrice munie d'un micromoulinet	Section de jaugeage située à 50 m en aval de la station Hérault 1
Hérault 2	Hauteur d'eau ⁶	En continu (toutes les 5 mn) Centrale d'acquisition autonome	Installation : 1997
Section de jaugeage n°2 de l'Hérault	Débit	Mesure ponctuelle du débit à l'aide d'une perche intégratrice munie d'un micromoulinet	Section de jaugeage située à 30 m en aval de la station Hérault 2
Section de jaugeage n°2	Débit	Mesure ponctuelle du débit à l'aide d'une perche intégratrice munie d'un micromoulinet	Section de jaugeage située à 30 m en aval de la station Hérault 2
Section de jaugeage n°3	Débit	Mesure ponctuelle du débit à l'aide d'une perche intégratrice munie d'un micromoulinet	Section de jaugeage située à 50 m en aval du point de rejet des eaux pompées
Hérault 3 (au niveau des Fontanilles)	Hauteur d'eau ⁶	En continu (toutes les 5 mn), Centrale d'acquisition autonome	Installation : 1996 Station située en aval (50 m) des émergences de la source des Fontanilles

Tableau 4 : Points de suivi des eau de surface dans l'environnement immédiat (< 1000 m) du forage de pompage

⁷ Caractéristiques des mesures : capteur de pression 1 bar (résolution et précision = 1 cm) ; conductivité (résolution et précision = 1µS/cm), température (résolution et précision = 0.1°C)

Intitulé (coordonnées Lambert 3)	Paramètres suivis	Type de suivi	Remarques
Piézomètre P3 (situé à proximité du Mas de la Celle) BSS : 09635X0257 X = 703522 m ; Y = 165321 ; Z sol = 292 m	Hauteur d'eau ⁸	En continu (toutes les 5 mn) Centrale d'acquisition autonome	Installation : mai 2001
Pluviomètre CF X = 703799 m ; Y = 164855 m ; Z sol = 270 m	Hauteur de pluie ⁹	Hauteur de pluie (toutes les heures)	Installation : juillet 2003
Piézomètre P5 (situé à Causse de la Selle). BSS : 09635X0255 X = 705800 ; Y = 167400 m ; Z sol = 225 m	Hauteur d'eau ⁷	En continu (toutes les 15 mn) Centrale d'acquisition autonome	Installation : mai 2001 0-55m : dolomies marneuses sombres, 55-220m : dolomies beiges, venue d'eau à 194m
Piézomètre P6 (situé à Proximité du mas Brunet) BSS : 09635X0254 X = 705675 m ; Y = 169798 m ; Z sol = 263 m ;	Hauteur d'eau ⁷	En continu (toutes les 15 mn) Centrale d'acquisition autonome	Installation : mai 2001
Piézomètre P7 (situé dans les gorges de la Buèges) BSS : 09631X080 X = 705821 m ; Y = 171163 m ; Z sol = 135 m ;	Hauteur d'eau, température, conductivité ¹⁰	En continu (toutes les 5 mn), Centrale d'acquisition autonome	Installation : juin 2004
Forage Mas d'Embougette BSS : 09631X0105 X = 708300 m ; Y = 171550m ; Zsol = 130 m	Hauteur d'eau ¹¹	En continu (toutes les 5 mn), Centrale d'acquisition autonome	Installation : octobre 2004
Forage AEP de St-André-de-Buèges BSS : 09631X0097 X = 706770 m ; Y = 173020m ; Z sol = 150 m	Hauteur d'eau ¹⁰	En continu (toutes les 30 mn), Centrale d'acquisition autonome	Installation : 30 mai 2005 Désinstallation : 06/10/05 50m de prof., calcaires de l'Oxfordien

Tableau 5 : Points d'eau et ouvrages de suivi des eaux souterraines dans l'environnement éloigné du forage de pompage

⁸ Caractéristiques des mesures : capteur de pression 3 bars (résolution = 1cm et précision = 3 cm)

⁹ Caractéristiques des mesures : pluviomètre (400 cm²) à augets basculeurs, résolution 0.2 mm de pluie

¹⁰ Caractéristiques des mesures : capteur de pression 10 bars (résolution = 1cm et précision = 10 cm), conductivité (résolution et précision = 1µS/cm), température (résolution et précision = 0.1°C)

¹¹ Caractéristiques des mesures : capteur de pression 1 bar (résolution et précision = 1 cm)

Intitulé	Paramètres suivis	Type de suivi	Remarques
Buèges Amont X : 703.810 ; Y : 170.330	Hauteur d'eau, Conductivité, Température ¹²	En continu (toutes les 30 mn), Centrale d'acquisition autonome	Installation : 01-02-2000
Buèges Aval X : 705.875 ; Y : 171.375	Hauteur d'eau ¹³	En continu (toutes les 30 mn), Centrale d'acquisition autonome	Installation : 01-02-2000

Tableau 6 : Points de suivi des eaux de surface dans l'environnement éloigné (>1000 m) du forage de pompage

Intitulé	Paramètres suivis	Type de suivi	Remarques
Source de la Buèges (Commune de Pégaïrolles-de-Buèges) BSS 09628X043 ; X : 700.910 ; Y : 168.930 ; Z : 175	Hauteur d'eau ¹²	En continu (toutes les heures) Centrale d'acquisition autonome	Installation : 15/02/2002 (réseau piézométrique départemental suivi par le BRGM pour le compte du CG34 depuis octobre 2003)
Source des Fontanilles (Commune de Puéchabon) BSS 09635X009 ; X : 703.63 ; Y : 162.21 ; Z : 80	Hauteur d'eau ¹²	En continu (toutes les 30 mn) Centrale d'acquisition autonome	Installation : 20/11/1996

Tableau 7 : Système aquifère voisin de celui des Cent Fonts

¹² Caractéristiques des mesures : capteur de pression 1 bar (résolution et précision = 1 cm), conductivité (résolution et précision = 1µS/cm), température (résolution et précision = 0.1°C)

¹³ Caractéristiques des mesures : capteur de pression 1 bar (résolution et précision = 1 cm).

3.2. AU NIVEAU DE L'OUVRAGE DE POMPAGE ET A PROXIMITE DE LA ZONE D'EMERGENCE DES SOURCES

3.2.1. Niveau d'eau

a) Piézomètre de reconnaissance (F2)

Cet ouvrage référencé avec le code BSS (09635X0278) se situe à 3 m du forage sur lequel ont été effectués les pompages. La coupe géologique de cet ouvrage est présentée en Annexe 2.

Le niveau piézométrique de cet ouvrage a été suivi en continu à l'aide d'un capteur de pression. Les enregistrements au pas de temps de 5 minutes ont débuté le 25 juillet 2005, les dernières données disponibles datent du 08/11/2005. Les données manquantes sur cette période sont dues à des défaillances du capteur. Des mesures de contrôle manuelles ont régulièrement été réalisées au cours de la période de pompage.

b) Forage qui fait l'objet du pompage d'essai (F3 (CF))

La coupe géologique de cet ouvrage est présentée en Annexe 2. Ce forage a été référencé avec le code BSS (09635X0279). Les niveaux piézométriques de cet ouvrage ont été suivis en continu à l'aide d'un capteur de pression. Les enregistrements au pas de temps de 5 minutes ont débuté le 26 juillet 2005, les dernières données disponibles datent du 02/10/2005. Des mesures de contrôle manuelles ont régulièrement été réalisées au cours de la période de pompage.

c) Forage CGE (09635X0003)

Les niveaux piézométriques de cet ouvrage sont suivis en continu à l'aide d'un capteur de pression depuis juin 1997. Les suivis ont été réalisés au pas de temps de 30 minutes jusqu'au 25 juin 2005. Depuis cette date, les données sont acquises au pas de temps de 5 minutes. Les dernières données disponibles datent du 21/11/2005. Les données manquantes sur la période du 25/06/05 au 21/11/05 sont dues à des défaillances du capteur. Entre le 09/08/05 et le 06/09/05, le capteur était « hors d'eau », aucune mesure automatique n'est disponible sur cette période. Des mesures de contrôle manuelles ont régulièrement été réalisées au cours de la période de pompage.

d) Suivi des niveaux d'eau aux émergences

Plusieurs émergences ou griffons sont situés en rive droite de l'Hérault au lieu-dit des Cent Fonts ; dix principales émergences ont été identifiées et reportées sur un plan (selon Bardoux, 1998 modifié (Schoen *et al*, 1999) ; Illustration 4). Ces émergences

sont situées à une cote comprise entre 78.17 m pour le point le plus à l'amont et 77.26 m NGF pour le point le plus à l'aval. Des clous (spits) implantés sur des rochers ont été nivelés à proximité des griffons ; l'altitude exacte des griffons est connue à plus ou moins 50 cm. L'émergence la plus importante en termes de débit est située en position médiane (N° 4) en aval d'une ravine empruntée par les eaux de débordement en période de crue. Le point de débordement situé au départ de la ravine est situé à la cote 87 m NGF. Ce point de débordement ne fonctionne que lors des périodes de hautes eaux ; il n'était pas fonctionnel pendant la période des pompages d'essai.

Sur les dix émergences, neuf ont été suivies selon le protocole décrit ci-dessous au cours des pompages d'essai par paliers de débit (descente et remontée) et lors des premières heures du pompage d'essai de longue durée à 400 l/s. Il s'agit d'un suivi qualitatif de la descente des niveaux d'eau aux griffons et de la remontée lors de la reprise des écoulements, une fois le pompage arrêté.

Afin de mieux apprécier les variations du débit au principal griffon (N°4), un seuil jaugeur calibré a été installé (Illustration 5). Ce seuil ne permet néanmoins pas de collecter l'ensemble des arrivées d'eau de ce griffon ; environ 25 % de l'écoulement échappe à la station de mesure.

Pour les autres griffons, dont l'aménagement temporaire n'était pas possible, le suivi de la diminution du niveau d'eau jusqu'à tarissement et de la reprise des écoulements après arrêt des pompages par paliers de débit a été réalisé à l'aide de jalons. Lors de la descente du niveau d'eau au cours des 4 paliers de pompage, des observations visuelles ont été faites pour chaque griffon, en posant des jalons avec des repères de couleur (Illustration 6). Ces repères ont permis d'apprécier de manière qualitative le tarissement et la reprise de l'écoulement au niveau des griffons : durée de tarissement et de reprise d'écoulement. Ces repères n'ont pas été installés de manière définitive et aucun jaugeage n'a pu être effectué pour établir une courbe de tarage des griffons ; la configuration morphologique ne le permettant pas.

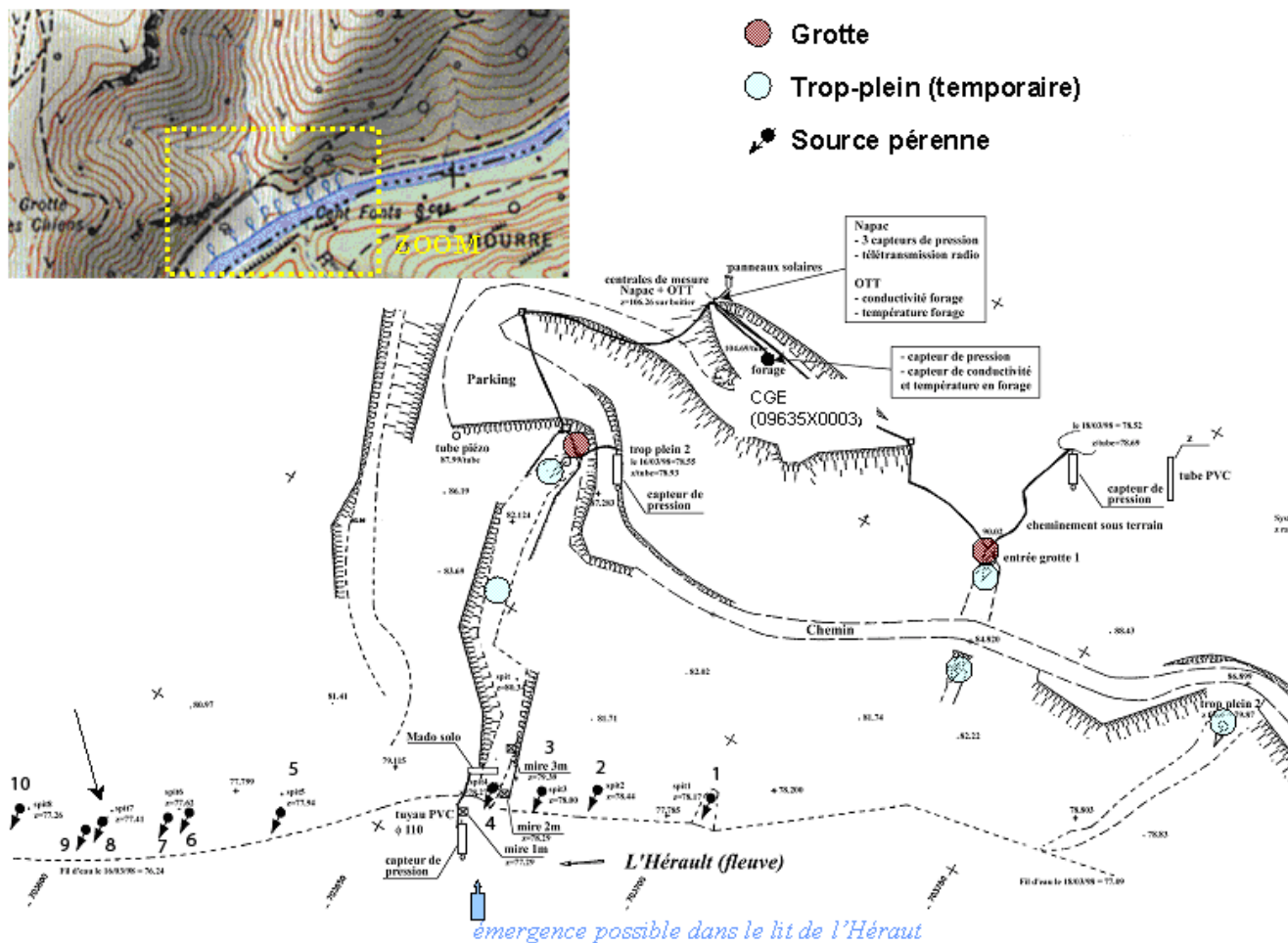


Illustration 4 : Position des griffons des Cent Fonts en rive droite de l'Hérault (d'après Bardoux modifié, Schoen et al, 1999)



Illustration 5 : Seuil calibré de jaugeage installé au niveau du griffon N°4 des Cent Fonts en rive droite de l'Hérault



Illustration 6 : Système de jalons avec scotch en couleur pour le suivi du tarissement et de la reprise des écoulements au niveau des griffons des Cent Fonts

3.2.2. Suivi des débits

a) Débit des émergences de la source

Le débit de l'ensemble des émergences a été mesuré à plusieurs reprises au cours de la phase préparatoire du pompage d'essai. Ces différentes campagnes de mesures ont été utilisées afin de construire une courbe de tarage qui permette la transformation des niveaux piézométriques mesurés dans le forage CGE (09635X0003) en chronique de débit (Schoen *et al*, 1999). Au cours des mois qui ont précédé la phase des pompages d'essai, 2 campagnes de jaugeages ont été réalisées sur l'ensemble des griffons (émergences) afin de réactualiser la courbe de tarage existante. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'une perche intégratrice équipée d'un micro-moulinet. Il est couramment admis que la détermination des débits par jaugeage au moulinet est, au mieux, connue avec une précision absolue de 5 %. D'une manière générale, on admet que la précision absolue sur le débit calculé par cette méthode est de 10 %. Dans le cas des émergences des Cent Fonts, la précision est jugée moins bonne (20 %) en raison de la configuration « accidentée » des sites de mesure.

Le débit des sources le 19/04/05 et le 02/05/05 était respectivement de 345 l/s (± 50 l/s) et de 590 l/s (± 100 l/s), la charge piézométrique au forage de la CGE étant respectivement de 77,98 m NGF et 78,70 m NGF. A l'aide de ces données complémentaires, la courbe de tarage a été révisée et permet une estimation plus précise des débits en période de basses eaux. La nouvelle courbe de tarage des Cent Fonts a pour équation :

$$\text{Débit} = 17057 * ((H_{CF_CGE})/100)^{42.766}$$

Avec H_{CF_CGE} = côte piézométrique (en m, NGF) mesurée dans le forage de la CGE.

La courbe de tarage n'est valide que pour les hauteurs d'eau (H_{CF_CGE}) supérieures ou égales à la cote 76.5 m NGF.

Les débits estimés à partir de la courbe de tarage sont entachés d'une incertitude évaluée à 20 % dans la gamme des débits inférieurs à 10 m³/s et d'une incertitude évaluée à 40 % au-delà de 10 m³/s. La configuration du site ne permet pas d'effectuer des jaugeages pour ces forts débits. Le volume des pics de débit supérieur à 10 m³/s représente environ 5 % du volume annuel écoulé à la source des Cent Fonts.

b) Débit de pompage

La mesure du débit de pompage est réalisée à l'aide du débitmètre électromagnétique Krone de 400mm de diamètre ; cet appareil a été calibré en usine. La mesure du débit est assurée par AMEC SPIE sous le contrôle d'ANTEA en tant que maître d'œuvre du pompage d'essai pour le compte du Conseil Général de l'Hérault.

c) Mesure, dans la cavité dénoyée, du débit en provenance de l'Hérault

Des mesures ponctuelles de débit ont été effectuées par ANTEA dans la cavité dénoyée au cours du pompage d'essai (jaugeage capacitif à l'aide d'un bidon de 80 litres et d'un chronomètre¹⁴), les 9, 11 et 25/08/2005. Les débits mesurés sont les suivants (valeur moyenne obtenue après 4 répétitions) :

- 50 l/s (± 20 l/s) le 9/8/2005, mesure effectuée au niveau du point 657 (topographie Bardot) ;
- 44 l/s (± 18 l/s) le 11/08/2005, mesure effectuée au niveau du point 657 ;
- 42 l/s (± 17 l/s) le 25/08/2005, mesure effectuée au niveau du point 657. Une partie du flux (20 l/s) s'infiltré immédiatement après la cascade et semble ressortir au voisinage de plan d'eau situé vers les repères 663/669. L'autre partie du flux (22 l/s) s'écoule dans la galerie. Le plan d'eau (663/669) est déconnecté du niveau d'eau mesuré dans le forage F3.

3.2.3. Suivi des paramètres physico-chimiques (conductivité, température, turbidité)

a) Des eaux pompées, à l'aide d'un « piquage » sur conduite d'exhaure

Un piquage mis en place sur la conduite d'exhaure a permis le suivi de la conductivité et de la température des eaux pompées au cours des pompages d'essais. Le dispositif était constitué d'un tuyau flexible dont l'une des extrémités était fixée au piquage et l'autre raccordée à un bac réservoir d'une contenance de 5 litres. Une sonde de conductivité et de température était immergée dans le bac et permettait de suivre en continu (au pas de temps de 1 minute) l'évolution des paramètres. Une valeur moyennée au pas de temps de 5 minutes était enregistrée par la centrale d'acquisition raccordée aux capteurs.

Le dispositif ne fonctionnait que lors des périodes de pompage, le débit du piquage, constant quelque soit la valeur du débit de pompage, était de 1.5 l/mn. Le dispositif de mesure a été opérationnel le 01/08/2005. Les dernières données disponibles datent du 30/09/2005. Le dispositif, bien qu'isolé, n'était pas parfaitement adiabatique. En conséquence, la température de l'eau mesurée par le système a été influencée par les variations de la température de l'air ambiant. Les mesures de température ne sont donc pas représentatives des eaux pompées.

¹⁴ L'incertitude de mesure sur le temps mesuré est évaluée au mieux à 0.5 secondes, l'incertitude sur le volume mesuré est évaluée au mieux à 10 litres. Le débit ($Q=(V/t)$) est donc estimé avec une incertitude de 40 % au minimum ($\Delta Q/Q = \Delta t/t + \Delta V/V$).

b) Des eaux du karst au forage CGE (09635X0003)

Les paramètres physico-chimiques (conductivité, température) des eaux du karst des Cent Fonts sont suivis depuis 1997 et enregistrés en continu depuis 1999 à l'aide d'une sonde multi-paramètre installée dans le forage de la CGE. Le dispositif expérimental a été renforcé en octobre 2003 et permet depuis de mesurer également la turbidité des eaux de la source des Cent Fonts.

Les suivis de la conductivité et de la température des eaux ont été réalisés au pas de temps de 15 minutes au cours de la période précédent le pompage d'essai. Depuis le 01/07/05, les données sont acquises au pas de temps de 5 minutes. Les dernières données disponibles datent du 06/10/2005. Les données manquantes sur cette période sont dues à un dénoyage du capteur au cours du pompage d'essai.

Le suivi de la turbidité est réalisé au pas de temps de 20 minutes depuis 2003. Les données manquantes sur la période octobre 2003-28/07/2005 sont dues à des défaillances de capteur. Les données manquantes sur la période du 28/07/05 au 06/10/05 sont dues à un dénoyage du capteur au cours le pompage d'essai.

3.2.4. Prélèvements d'eau pour analyses chimiques et isotopiques

Les différents échantillons d'eau prélevés au cours des pompages d'essai ont été conditionnés et analysés conformément à la procédure décrite dans les modes opératoires validés dans le cadre de la norme qualité du BRGM (norme ISO9001 : 2000 et norme NF EN ISO/CEI 17025 pour les laboratoires).

Les paramètres pH, Eh, température, conductivité, concentration en oxygène dissous ont été mesurés directement sur des échantillons d'eau brute sur le terrain. Les analyses des isotopes de l'eau (^{18}O , ^2H) ont été réalisées sur un échantillon d'eau brute, les prélèvements réalisés pour l'analyse des cations, des traces, des terres rares et des isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) ont été filtrés sur le terrain sur membrane de $\varnothing 0,45 \mu\text{m}$ et acidifiés (HNO_3 suprapur, pH = 2). Les prélèvements réalisés pour l'analyse des anions ont été filtrés sur le terrain sur membrane de $\varnothing 0,45 \mu\text{m}$.

Les analyses des éléments majeurs, traces et terres rares, des isotopes du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), de l'oxygène 18 et du deutérium ont été réalisées au laboratoire du BRGM. Les anions ont été analysés par chromatographie ionique, les cations, les traces et les terres rares par ICP-MS, les isotopes (^2H , ^{18}O , ^{87}Sr) par spectrométrie de masse. Les incertitudes des résultats concernant les majeurs et les traces sont respectivement de 5 % et 10 %. L'incertitude des résultats concernant les isotopes de l'eau est de 0,8 ‰ pour le deutérium et de 0,1 ‰ pour l'oxygène 18.

a) Prélèvements d'eau aux émergences des Cent Fonts

Les prélèvements d'eau de la source des Cent Fonts en vue d'analyse hydrogéochimique ont été réalisés au niveau de l'émergence n°4 (Illustration 4 et Illustration 5)

Au cours de la période qui a précédé le pompage d'essai de longue durée, l'eau des Cent Fonts a été échantillonnée à 5 reprises au niveau de l'émergence n° 5: 31/05/05 ; 23/06/05 ; 19/07/05 ; 20/07/05 ; 26/07/05. L'échantillon prélevé le 19/07/05 (11h10) a été sélectionné en vue d'analyse car il permet de caractériser l'état hydrogéochimique initial du système karstique avant tout pompage. Rappelons en effet que les premiers essais de la pompe ont débuté le 19/07/05 en début d'après midi (13h10), cf. § 2.2.

Nom échantillon	date	Anion, cation	Eléments traces	isotope du strontium	Isotopes de l'eau	Terres rares après concentration
Source n°5 CF	19/07/2005	oui	oui	oui	oui	oui
Anions, cations : CO ₃ , HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , SO ₄ ⁼ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , F ⁻ , PO ₄ ⁼ ;Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ ,K ⁺ , NH ₄ ⁺ ,SiO ₂ , Fe tot,						
Eléments traces : Br, B, Ba, Li, Sr en infratraces						

Tableau 8 : Type d'analyses hydrogéochimiques effectuées sur les eaux prélevées à la source n°4 des Cent Fonts

b) Prélèvements d'eau au piquage du forage F3 (CF)

Le dispositif de piquage sur la conduite décrit précédemment (§ 3.2.3.a) permettait en outre de prélever des échantillons d'eau en vue d'analyses chimiques et isotopiques.

Sur la période du 27/07/05 au 06/09/2005, 16 échantillons d'eau ont été prélevés au piquage au cours des phases d'essais par paliers de débits et de longue durée :

Paliers de débit : prélèvement à t + 5 heures : 27/07/05 ; 28/09/05 ; 29/07/05 et 30/07/05 ;

Longue durée : 01/08/05 ; 03/08/05 ; 05/08/05 ; 09/08/05 avant l'arrêt programmé ; 09/08/05 1 heure après le redémarrage du pompage ; 11/08/05 ; 17/08/05 ; 23/08/05 ; 25/08/05 ; 31/08/05 ; 02/09/05 avant l'arrêt programmé ; 03/09/05 6 heures après le redémarrage du pompage.

Sur la base de l'étude de l'évolution temporelle de la conductivité électrique des eaux pompées enregistrée sur cette période, un certain nombre d'échantillons ont été sélectionnés en vue d'analyse. Le Tableau 9 détaille le type d'analyses effectuées sur les échantillons sélectionnés.

Nom d'échantillon	date	Anion,Cation	Eléments traces	Isotopes du Strontium	Isotopes de l'eau	Terres rares après concentration
CF piquage P1=200	27/07/2005	oui	oui	oui	oui	oui
CF piquage LD=400	01/08/2005	oui	oui	oui		
CF piquage LD=400	03/08/2005	oui	oui	oui	oui	oui
CF piquage LD=400	05/08/2005	oui	oui	oui		
CF piquage LD=400	09/08/2005	oui	oui	oui		
CF piquage LD=400	09/08/2005	oui	oui	oui		
CF piquage LD=400	11/08/2005	oui	oui	oui	oui	oui
CF piquage LD=400	17/08/2005	oui	oui	oui		
CF piquage LD=400	23/08/2005	oui	oui	oui	oui	oui
CF piquage LD=400	25/08/2005	oui	oui	oui		
CF piquage LD=400	31/08/2005	oui	oui	oui	oui	oui
CF piquage LD=400	02/09/2005	oui	oui	oui		
CF piquage LD=300	03/09/2005	oui	oui	oui		
Anions, cations: CO ₃ , HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , So ₄ ⁼ , NO ₃ ⁻ , No ₂ ⁻ , F ⁻ , PO ₄ ⁼ ; Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , BNH ₄ ⁺ , SiO ₂ , Fe tot						
Eléments traces: Br, B, Ba, Li, Sr en infratracés						

Tableau 9 : Type d'analyse hydrogéochimique effectuée sur les eaux prélevées au piquage du forage des Cent Fonts

Sur la période du 20/09/05 au 30/09/05, 2 échantillons ont été prélevés. Aucune analyse n'a été effectuée à ce jour sur ces prélèvements.

c) Prélèvements d'eau dans la galerie dénoyée

Trois échantillons d'eau ont été prélevés dans la galerie au cours de pompage d'essai de longue durée du mois d'août (11/08/05 et 25/08/05).

L'échantillon du 11/08/05 caractérise l'arrivée d'eau en provenance de l'Hérault. Il a été prélevé environ 1 m au dessus du plan d'eau de la grotte, qui se trouvait au niveau des repères 658 et 659 de Bardot à cette date.

L'échantillon « Arrivée cascade » du 25/08/05 caractérise l'arrivée d'eau en provenance de l'Hérault, a été prélevé au niveau de l'arrivée d'eau qui cascadaient dans la grotte (repère 657).

L'échantillon « Galerie pts 660/661 » du 25/08/05 a été prélevé à environ 1 m au dessus du plan d'eau de la grotte qui se trouvait à cette date entre les repères Bardot N° 663 et 669.

Nom d'échantillon	date	Anion,Cation	Eléments traces	Isotopes du Strontium	Isotopes de l'eau	Terres rares après concentration
Galerie	11/08/2005	Type A2005	oui	oui		
Galerie pts 660/661	25/08/2005	Type A2005	oui	oui	oui	oui
Arrivée cascade	25/08/2005	Type A2005	oui	oui		
Anions, cations: CO ₃ , HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , So ₄ ⁼ , NO ₃ ⁻ , No ₂ ⁻ , F ⁻ , PO ₄ ⁼ ; Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , BNH ₄ ⁺ , SiO ₂ , Fe tot						
Eléments traces: Br, B, Ba, Li, Sr en infratracés						

Tableau 10 : Type d'analyse hydrogéochimique effectuée sur les eaux prélevées dans la galerie dénoyée des Cent Fonts

3.3. SUIVI DES EAUX DE SURFACE

3.3.1. Les eaux de l'Hérault (niveau, jaugeages ponctuels, suivi de la conductivité et de la température, prélèvements pour analyses)

a) Suivi des hauteurs d'eau

Les hauteurs d'eau du fleuve Hérault ont été suivies en trois points au cours de pompage d'essai. La localisation des sites de mesure est reportée sur l'illustration 2.

La station Hérault 1, située à l'amont des sources des Cent Fonts, a été installée le 30 mai 2005. Cette station a permis le suivi de l'évolution des hauteurs d'eau au pas de temps de 15 minutes jusqu'au 06/10/05 (date de déséquipement du site). Des mesures de contrôle manuelles ont régulièrement été réalisées au cours de la période de pompage.

La station Hérault 2 est située dans le prolongement du talweg du trop plein n°1 appelé également « gouffre » (Illustration 4). Le site est équipé d'une échelle limnimétrique géo-référencée. Les hauteurs d'eau peuvent ainsi être exprimées en cote altimétrique (NGF). Les niveaux du fleuve Hérault sont suivis depuis 1997. La chronique de données horaires présente des lacunes d'enregistrement en raison de pannes répétées de capteur sur la période 1997-2005. Depuis le 4 mai 2005, les données sont enregistrées au pas de temps de 5 minutes. Les dernières données disponibles datent du 20/10/2005. Des mesures de contrôle manuelles ont régulièrement été réalisées au cours de la période de pompage.

La station Hérault 3 est située à l'aval de la source des Fontanilles. Les hauteurs d'eau ont été suivies au pas de temps de 5 minutes depuis le 08/04/2005. Les dernières données disponibles datent du 26/09/2005. Depuis cette date le capteur est défaillant. Des mesures de contrôle manuelles ont régulièrement été réalisées au cours de la période de pompage.

b) Suivi des débits

Des jaugeages ponctuels ont été réalisés au cours des mois de juillet et août 2005 à l'aide d'une perche intégratrice munie d'un micro-moulinet. Chacune des campagnes de jaugeage a consisté à mesurer le débit du fleuve en amont et en aval¹⁵ des émergences de la source des Cent Fonts. Les campagnes de jaugeages ont été effectués les 20/07/05 ; 29/07/05 ; 01/08/05 ; 05/08/05 et 12/08/05. Au cours d'une des campagnes de mesure, un jaugeage supplémentaire a été réalisé à l'aval immédiat de la station Hérault n° 2. La localisation des sections de jaugeage est reportée sur l'illustration 2

¹⁵ La section de jaugeage aval était par ailleurs située à l'aval des canalisations d'exhaure du pompage (cf. Illustration 2).

Il est couramment admis que la détermination des débits par jaugeage au moulinet est au mieux connue avec une précision absolue de 5 %. D'une manière générale, on admet que la précision absolue sur le débit calculé par cette méthode est de 10 %.

c) Suivi de la conductivité et de la température de l'Hérault

La station Hérault 1 située à l'amont des sources des Cent Fonts a également permis le suivi de l'évolution de la conductivité et de la température des eaux de l'Hérault (du 30/05/05 au 06/10/05). Les capteurs sont situés à 1 mètre de profondeur dans l'Hérault. Le suivi des paramètres physico-chimiques a été réalisé au pas de temps de 15 minutes. Les données manquantes sur cette période sont dues à des défaillances de capteur. Des mesures de contrôle manuelles ont régulièrement été réalisées au cours de la période de pompage.

Les prélèvements hydrogéochimiques réalisés sur le fleuve Hérault ont été effectués au niveau de la section amont de jaugeage de l'Hérault.

d) Prélèvement d'eau dans l'Hérault

Les prélèvements d'eau de l'Hérault effectués en vue d'analyses hydrogéochimiques ont été réalisés au niveau de la section de jaugeage située à l'aval immédiat de la station Hérault n° 1 (cf. Illustration 2). Les protocoles utilisés sont identiques à ceux décrits dans le paragraphe 3.2.4.

Sur la période du 19/07/05 au 03/09/2005, 12 échantillons d'eau de l'Hérault ont été prélevés au niveau de la section de jaugeage située à l'aval immédiat de la station Hérault n° 1 : 20/07/05 ; 26/07/05 ; 27/05/05 ; 28/07/05 ; 29/07/05 ; 01/08/05 ; 03/08/05 ; 11/08/05 ; 17/08/05 ; 23/08/05 ; 31/08/05 ; 03/09/05.

Le 31/08/05, un prélèvement d'eau complémentaire a été réalisé sur le fleuve Hérault à l'amont immédiat de la source des Fontailles.

Sur la base de l'étude de l'évolution temporelle de la conductivité électrique des eaux de l'Hérault mesurée à la station Hérault 1 (amont de la zone d'émergence des sources), un certain nombre d'échantillons ont été sélectionnés en vue de l'analyse de l'eau. Le tableau ci-dessous détaille le type d'analyses effectuées sur les échantillons sélectionnés.

Nom d'échantillon	date	Anion,Cation	Eléments traces	Isotopes du Strontium	Isotopes de l'eau	Terres rares après concentration
Hérault amont	19/07/2005	oui	oui	oui	oui	oui
Hérault amont	26/07/2005	oui	oui	oui	oui	oui
Hérault amont	03/08/2005	oui	oui	oui	oui	oui
Hérault amont	23/08/2005	oui	oui	oui		
Hérault amont	31/08/2005	oui	oui	oui	oui	oui
Hérault amont Fontanilles	31/08/2005	oui	oui	oui	oui	oui
Anions, cations: CO ₃ , HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , So ₄ ⁼ , NO ₃ ⁻ , No ₂ ⁻ , F ⁻ , PO ₄ ⁼ ; Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , BNH ₄ ⁺ , SIO ₂ , Fe tot						
Eléments traces: Br, B, Ba, Li, Sr en infratraces						

Tableau 11 : Type d'analyse hydrogéochimique effectuée sur les eaux prélevées dans l'Hérault

3.3.2. Les eaux de la Buèges (source de la Buèges, pertes de la Buèges)

a) Source de la Buèges (BSS : 09628X0043)

Les hauteurs d'eau de la source de la Buèges à Pégairolles-de-Buèges sont suivies par l'intermédiaire d'un capteur de pression raccordé à une centrale d'acquisition. Le dispositif est installé dans le forage AEP qui permet l'exploitation de cette ressource. Les enregistrements au pas de temps horaire ont débuté en février 2002, les dernières données disponibles datent du 05/10/2005. Les données manquantes sur cette période sont dues à des défaillances du capteur. Des mesures de contrôle manuelles sont régulièrement réalisées. Ces dernières permettent la validation de la donnée enregistrée par le dispositif de mesure.

b) Rivière de la Buèges (amont et aval de la zone des pertes)

Les hauteurs d'eau de la rivière de la Buèges en amont et en aval de la zone des pertes sont suivies depuis le 15 mars 2000. Les pertes de la rivière de la Buèges se produisent lorsque le cours d'eau pénètre au sein des formations dolomitiques du Bathonien qui sont présentes à l'affleurement dans ce secteur. La conductivité et la température de l'eau de la rivière de la Buèges sont également suivies à la station amont. La description détaillée des stations hydrométriques est présentée dans le rapport A 19775/A. La localisation des sites de mesure est reportée sur l'illustration 3.

Les suivis ont été réalisés au pas de temps horaire au cours de la période comprise entre le 15 mars 2000 et le 15 janvier 2004. Depuis cette date, les données sont acquises au pas de temps de 30 minutes. Les dernières données disponibles datent du 21/11/2005. Les données manquantes sur ces périodes sont dues à des défaillances de capteur. Des mesures de contrôle manuelles ont régulièrement été réalisées au cours de la période de pompage.

Des courbes de tarage ont été établies pour les stations amont et aval (Ladouche *et al.*, 2002). Elles permettent la transformation des suivis limnimétriques en chroniques de débit. Des campagnes de jaugeages supplémentaires ont été réalisées entre 2002 et 2005. Ces informations complémentaires ont permis de préciser les courbes de tarage établies précédemment. Les nouvelles courbes de tarage utilisées pour

déterminer les débits en amont et en aval des pertes sont présentées en Annexe 3. L'incertitude absolue sur les débits amont et aval est évaluée à 10 % ($\Delta Q_{\text{amont}} = \Delta Q_{\text{aval}} = 10 \%$).

Le débit des pertes est calculé en retranchant au débit amont la valeur du débit mesuré à l'aval des pertes ($Q_{\text{pertes}} = Q_{\text{amont}} - Q_{\text{aval}}$). L'incertitude absolue sur le débit des pertes est évaluée à 20 % ($\Delta Q_{\text{pertes}} = 20 \%$).

Les eaux de la rivière de la Buèges ont été échantillonnées le 23/08/05 en vue d'analyses chimiques et isotopiques.

3.4. SUIVI DES EAUX SOUTERRAINES AU SEIN DU BASSIN D'ALIMENTATION DE LA SOURCE DES CENT FONTS ET DE SES ENVIRONS

Il existe peu d'ouvrage de suivi des eaux souterraines (4 piézomètres au total) sur le bassin d'alimentation du système karstique des Cent Fonts (Illustration 1). Tous ces ouvrages ont été équipés de capteur de pression afin de suivre les variations du niveau piézométrique de l'aquifère.

Sur les ouvrages F3, F5 et F6, le suivi a débuté en mai 2001 et l'acquisition des données a été réalisée au pas de temps horaire. En juin 2005, l'intervalle d'acquisition des données a été porté à 5 mn (ouvrage F3, BSS n° 09635X0257) et 15 mn [ouvrage F5 (BSS n° 09635X0255) et F6 BSS n° 09635X0254] afin d'obtenir une meilleure résolution temporelle au cours de la période de pompage d'essai.

L'ouvrage F7 (BSS : 09631X080), situé dans la partie aval des gorges de la Buèges, est destiné à compléter la métrologie des pertes de la Buèges. Il est suivi depuis le mois de juin 2004, date de sa réalisation. Il a été équipé d'un capteur de hauteur d'eau et de température et les données ont été enregistrées au pas de temps de 30 mn jusqu'au mois de mai 2005. A cette date, le dispositif a été renforcé et permet depuis de mesurer également la conductivité des eaux. L'acquisition des données (piézométrie, température et conductivité) a été réalisée au pas de temps de 5 mn entre le 2 mai 2005 et le 6 octobre 2005.

Le forage du mas d'Embougette (BSS : 09631X0105), situé en dehors du bassin d'alimentation présumé des Cent Fonts (Illustration 1) a été équipé d'un capteur de pression en octobre 2004. Depuis cette date, le suivi a été réalisé au pas de temps horaire. Le 24 août 2005, l'enregistreur de données est tombé en panne ; aucune donnée n'est disponible depuis cette date.

Le forage AEP de Saint-André-de-Buèges (BSS : 09631X0097), situé en dehors du bassin d'alimentation présumé des Cent Fonts (Illustration 1), a été équipé d'un capteur de pression le 30 mai 2005. Depuis cette date, le suivi a été réalisé au pas de temps horaire.

Le niveau d'eau de la source des Fontanilles (BSS : 09635X0009), située sur la commune de Puéchabon (Illustration 1), est suivi au pas de temps de 30 mn depuis le

mois de janvier 2005. Avant cette date, un suivi a été réalisé au pas de temps horaire entre le 20/11/1996 et le 26/07/2001, date à partir de laquelle l'acquisition a été stoppée en raison d'un problème de centrale d'acquisition. Une courbe de tarage a été établie (Schoen et al, 1999) et permet une estimation des débits de la source.

3.5. SUIVI DES PRECIPITATIONS

Le suivi des pluies précipitées sur l'impluvium du système karstique des Cent Fonts est réalisé à l'aide d'un pluviomètre à auget basculeur raccordé à une centrale d'acquisition. Le pluviomètre est localisé à 200 m environ au sud de la ferme de la Selle, sur la commune du Causse de la Selle (Illustration 1). L'acquisition des données a débuté en 2000 au pas de temps horaire. Les lacunes d'enregistrement sont liées à des problèmes d'acquisition par la centrale de mesure. Aucune donnée n'a été enregistrée entre le 01/07/05 et le 31/08/05 en raison d'un problème de centrale d'acquisition. Les données enregistrées au cours des épisodes pluvieux du début du mois de septembre sont erronées car le pluviomètre était bouché (feuilles et poussières).

Ce pluviomètre est utilisé pour permettre une vérification de l'estimation de la quantité d'eau de pluie précipitée sur le bassin d'alimentation calculée à l'aide des stations météorologiques MétéoFrance de St-Martin-de-Londres, Aniane et Saint-Maurice-de-Navacelles (Bourg). L'estimation de la quantité d'eau précipitée sur le bassin d'alimentation est réalisée à l'aide de la formulation suivante¹⁶ établie sur la période juin 1997-juin 2005 :

- pluie Bassin d'alimentation = 0.3 Aniane+ 0.27 St-Martin de Londres + 0.43 St-Maurice de Navacelles (bourg)

3.6. SUIVI HYDROBIOLOGIQUE DE LA FAUNE CAVERNICOLE DES EAUX SOUTERRAINES KARSTIQUES : LA FAUNE STYGOBIE

Nota : cette partie du rapport correspond aux éléments fournis par M.J. Olivier, D. Martin et C. Bou.

3.6.1. Présentation du protocole

Le protocole d'échantillonnage du suivi de la faune stygobie comporte chronologiquement trois phases :

¹⁶ Cette analyse pour le système karstique des Cent Fonts a été menée à l'aide de l'option de « pondération des chroniques de pluie » du logiciel TEMPO (Pinault 2001, rapport BRGM/RP-51459-FR) qui consiste à établir le corrélogramme croisé « pluie-débit » à partir d'une optimisation d'une combinaison linéaire des poids associés aux chroniques de pluie. La procédure détaillée est présentée en annexe au rapport BRGM/RP-53595-FR, Ladouche *et al.*, 2004.

- i. un inventaire faunistique du massif avant pompage,
- ii. une évaluation qualitative et quantitative de la faune extraite du massif au cours des pompages,
- iii. un inventaire faunistique du massif après pompage.

Les inventaires faunistiques avant et après pompage comprennent chacun :

- un inventaire de la faune des sources et des cavités pénétrables,
- un suivi de crue,
- un inventaire de la faune hyporhéique (communautés d'organismes colonisant le sous-écoulement des cours d'eau) qui a été rajouté au protocole en raison des contacts potentiels entre l'aquifère des Cent Fonts et le lit de l'Hérault. Ces échantillons permettront également de savoir si la zone hyporhéique du cours d'eau abrite certaines espèces du karst et/ou des espèces propres.

En raison de l'absence totale de précipitations sur le massif, au cours d'une période allant de début mai (date du début de l'intervention de l'Université Lyon 1) jusqu'à début septembre, le suivi de crue antérieur aux pompages d'essais n'a pas pu être envisagé.

L'évaluation qualitative et quantitative de la faune extraite du massif a été réalisée en parallèle avec le protocole de pompage proposé par le BRGM :

- 1 échantillon lors de chaque essai par paliers de débit (soit un à 200 l/s, un à 300 l/s, un à 500 l/s et un à 400 l/s). Les prélèvements sont collectés par sous échantillonnage d'un débit de 4-5 l/s ;
- filtrage pratiquement ininterrompu des eaux issues du pompage en continu de 400 l/s. Lors de ce pompage, deux types d'échantillons ont été réalisés simultanément, l'un filtrant un débit de sous-échantillonnage de 4 l/s et le second filtrant un débit de sous-échantillonnage de 60 l/s.

Une interruption dans ce protocole de filtrage est à noter du 1er au 4 août en raison d'un acte de vandalisme qui a provoqué la mise à sec des filets.

Un diagramme récapitulatif de ce protocole est présenté sur l'illustration 7.

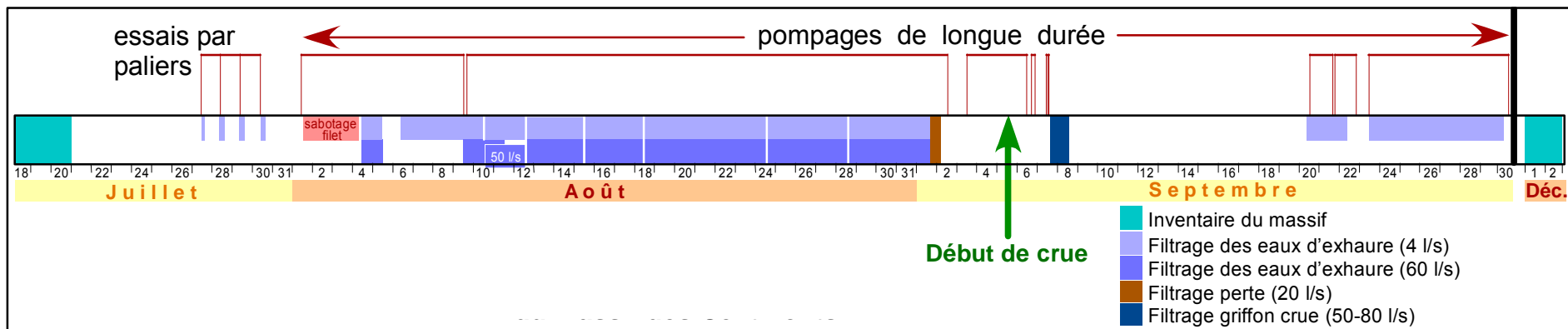


Illustration 7 : Chronologie de l'échantillonnage de la faune stygobie du système karstique des Cent Fonts

L'inventaire faunistique du massif après pompage a été réalisé du 1 au 2 décembre 2005 pour ce qui concerne les cavités pénétrables et les sources (débit de l'Hérault proche de celui d'étiage). Le suivi de crue postérieur aux pompages d'essai n'a pas encore été réalisé. Il se déroulera lors du prochain épisode pluvieux significatif, c'est-à-dire en début d'année 2006 (janvier, février ou mars, selon les événements climatiques). Il a en effet été proposé de ne pas échantillonner trop rapidement à la suite des pompages d'essai et de la crue de septembre, afin de respecter le temps de résilience des communautés après ces perturbations.

3.6.2. Méthodologie, prélèvements, analyses

a) Inventaire

Par principe un inventaire cherche à recenser le plus grand nombre d'espèces présentes. Plusieurs techniques ont donc été utilisées simultanément : pompages Bou-Rouch, surbers, et filtrages dans les sources; appâts (balances), chasse à vue, surber et Bou-Rouch dans les cavités pénétrables. Pour les Mollusques, des prélèvements supplémentaires de sédiments ont été effectués dans les sources et directement en milieu souterrain. L'échantillonnage de la zone hyporhéique de l'Hérault est réalisé par pompage manuel après insertion d'une sonde inox à 50 cm sous la surface des sédiments. Deux stations situées en aval de chacun des seuils qui encadrent le secteur d'étude ont été sélectionnées. Le positionnement en aval des seuils correspond en général à une zone plus riche en espèces stygobies que la zone amont ou les zones profondes du chenal (mouilles). Dans chaque station trois replicats (= trois points de pompage) ont été effectués. Ils correspondent chacun à l'aspiration d'un volume de 10 litres et permettent de prendre en compte l'hétérogénéité locale.

La maille des filets utilisés varie de 100 à 150 µm, les filets à 100 µm n'étant en général pas utilisables pour les filtrages à cause de problèmes de colmatage.

b) Filtrages en continu

Deux dérivations ont été mises en place sur l'un des trois conduits des eaux d'exhaure, l'une permettant de filtrer un débit de 4 l/s et le second un débit de 60 l/s. Ce double échantillonnage permet de palier d'éventuels aléas techniques.

c) Analyse des échantillons

Le dépouillement des échantillons est un processus qui peut être assez long et fastidieux. L'échantillon doit être fractionné en très petites quantités et entièrement observé sous stéréo-microscope, de manière à extraire un à un et classer tous les organismes présents. La taille des spécimens peut être supérieure au cm (*Niphargus*, *Troglocaris*), mais elle est plus fréquemment de quelques millimètres (*Proasellus*, *Salentinella*), voire inférieure au mm (genres *Parastenocaris* ou *Pseudectinosoma*). Certains genres sont directement identifiés à l'espèce au laboratoire (Isopodes,

Amphipodes), d'autres font l'objet d'envois dans d'autres universités, en France ou à l'étranger (ex., Cyclopoides, Harpacticoides, Ostracodes), toutes les compétences taxonomiques n'étant actuellement plus disponibles dans un seul laboratoire. La plupart des identifications nécessite une dissection des spécimens et une observation des pièces disséquées au microscope, ce qui rajoute à la lenteur d'acquisition des données.

Les prélèvements de sédiments pour les Mollusques ont été traités par séchage, immersion et récolte du surnageant, puis tri sous la loupe binoculaire. Certains taxons difficiles ont bénéficié d'une analyse morphométrique.

4. Présentation et description des données de pompage d'essai

4.1. SUIVI DE LA SOURCE DES CENT FONTS (GRIFFONS)

L'évolution des débits mesurés en 2005 à la source des Cent Fonts, calculés à partir de la courbe de tarage (cf. § 3.2.2.), est présentée sur les Illustration 8, Illustration 9 et Illustration 12. L'évolution des débits au cours du mois de juillet 2005 (avant l'essai de longue durée) est présentée au paragraphe 4.1.1., l'évolution des débits au cours du mois de septembre est présentée au paragraphe 4.1.3.

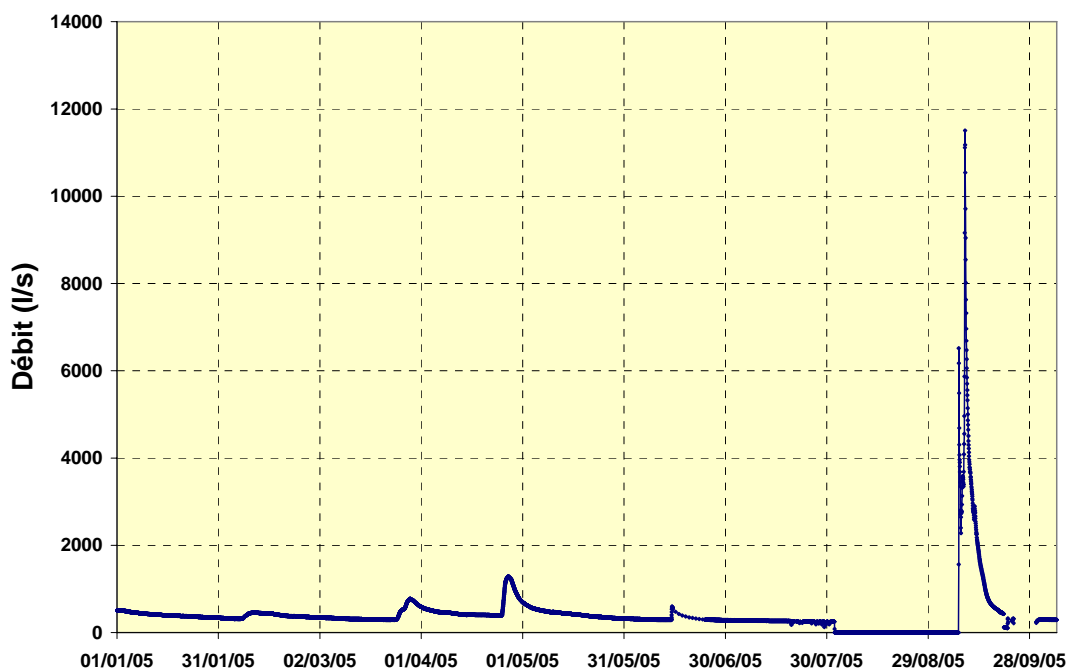


Illustration 8 : Débit moyen horaire de la source des Cent Fonts entre le 01/01/05 et le 06/10/05

4.1.1. Suivi du débit des sources avant les essais (juillet 2005)

L'évolution des débits de la source des Cent Fonts est présentée à l'illustration 9. Le débit de la source évolue entre 282 l/s (± 56 l/s) et 254 l/s (± 51 l/s) entre le 01/07/05 et le 01/08/05, date du démarrage de l'essai de longue durée.



Illustration 9 : Débit moyen horaire de la source des Cent Fonts entre le 01/07/05 et le 31/07/05

4.1.2. Suivi des niveaux d'eau pendant les essais par paliers de débit de juillet 2005

Les observations réalisées au moyen des jalons posés avec des repères de couleur au cours du tarissement et de la reprise des écoulements ont permis de caractériser la durée de diminution du débit des griffons et du tarissement complet pour chacun des paliers.

Les résultats sont présentés par palier de débit.

a) Palier 1 – 27 juillet 2005 – 200l/s

- pompage d'une durée de 6 heures et 1 minute au débit de 200 l/s suivi de 17 heures et 8 minutes de remontée ; niveau piézométrique au forage avant pompage (09h24, heure été) : -56.96 m ; à l'arrêt du pompage (15h25, heure été) : -57.53 m.

Griffon N°	Heure (été) ½ débit du griffon	Heure (été) Tarisement complet	Observations
1		11h50	Début de pompage à 09h24 (heure d'été)
2	10 :30	13h15	
3	11 :47	13h00	
4	10 :25		Tarisement dans le canal Pas de tarisement de l'écoulement non collecté par le canal
5		10h30	
6	10 :40	13h15	
7	10 :45		Pas de tarisement
8	10 :45		Pas de tarisement
9	10 :48		Pas de tarisement

Tableau 12 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts lors du pompage du palier de débit n°1 (200 l/s)

La première source qui tarit est le griffon N° 5 (Tableau 12), dont l'altitude d'émergence est proche de 77,5 m NGF, après 66 minutes de pompage. Puis viennent les sources situées à l'amont, avec dans l'ordre les griffons N° 1, 3, 2. Le griffon N° 6 tarit après 3h50' de pompage. Le griffon principal N° 4 ainsi que les griffons situés le plus à l'aval ne tarissent pas (N° 7, 8 et 9).

Reprise des écoulements (arrêt du pompage à 15h25, heure été)

Les écoulements ont repris rapidement suite à l'arrêt du pompage, soit dix minutes après pour la majorité des griffons. L'écoulement du griffon situé le plus en amont (griffon N° 1), à une altitude proche de 78,17 m NGF, et les griffons N°5 et N°6, situés respectivement à une altitude de 77,7 et 77,5 m NGF, a repris respectivement après 43 minutes et après 108 minutes et 53 minutes (Tableau 13).

Griffon N°	Heure (été) de reprise d'écoulement
1	16h08
2	15h35
3	15h35
4	15h35, heure de reprise d'écoulement dans le canal
5	17h23
6	16h18
7	15h35, heure où le débit de l'écoulement commence à augmenter

Griffon N°	Heure (été) de reprise d'écoulement
8	15h35, heure où le débit de l'écoulement commence à augmenter
9	15h35, heure où le débit de l'écoulement commence à augmenter

Tableau 13 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts après l'arrêt du pompage du palier de débit n°1 (200 l/s)

La courbe de reprise des écoulements au griffon N°4 est présentée sur Illustration 10. Le débit initial de ce griffon est récupéré à plus de 90 % 214 minutes après l'arrêt du pompage.

b) Palier 2 – 28 juillet 2005 – 300l/s

- pompage d'une durée de 5 heures et 32 minutes au débit de 300 l/s, suivi de 18 heures et 11 minutes de remontée. Niveau piézométrique au forage avant pompage (08h30, heure été) : -56.875 m ; à l'arrêt du pompage (14h00, heure été) : -58.07 m.

Griffon N°	Heure ½ débit du griffon	Heure (été) Tariessement complet	Observations Début de pompage à 08h30 (été)
1	09h08	11 :50	
2	09h55	13h15	
3	09h29	13h00	
4	08h57 10h28	09h55 --	Tariessement dans le canal Pas de tariessement de l'écoulement non collecté par le canal
5	Pas observé	09h00	
6	09h00	09h59	
7	Pas observé	Pas observé	
8	10h45	12h11	
9	10h48	12h12	

Tableau 14 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts lors du pompage du palier de débit n°2 (300 l/s)

La première source qui tarit est le griffon N° 5 (Tableau 14), dont l'altitude d'émergence est proche de 77,5 m NGF, après 30 minutes de pompage. Le griffon N° 6 est le deuxième qui tarit après 89 minutes de pompage. Puis viennent ensuite les sources situées à l'amont, avec, dans l'ordre, les griffons N° 1, 8, 9, 3, 2. Le griffon principal N° 4 est le seul à ne pas tarir.

Reprise des écoulements (arrêt du pompage à 14h00, heure été)

Griffon N°	Heure (été) de reprise d'écoulement
1	16h00
2	14h40
3	14h52
4	14h38, heure de reprise d'écoulement dans le canal
5	17h45
6	16h02
7	17h30
8	14h40
9	14h40

Tableau 15 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts après l'arrêt du pompage du palier de débit n° 2 (300 l/s)

La courbe de reprise des écoulements du griffon N° 4 est présentée en illustration 10. Le débit initial de ce griffon est retrouvé à 80 % 4 heures et 15 minutes après l'arrêt du pompage.

c) Palier 3 – 29 juillet 2005 – 500l/s

- pompage d'une durée de 6 heures et 6 minutes au débit de 500 l/s, suivi de 18 heures et 5 minutes de remontée ; sources tariées au niveau des griffons après 45 minutes. Niveau piézométrique au forage avant pompage (8h15, heure été) : -56,88 m ; à l'arrêt du pompage (14h20, heure été) : -59,6 m.

Griffon N°	Heure (été) ½ débit du griffon	Heure (été) Tariement complet	Observations [Conductivité ¹⁷ et température]
1	Pas observé	08h30 ou avant	
2	08h30	08h58	462 µS/cm ; 13,8 °C
3	08h31	08h55	467-460 µS/cm ; 13,9 °C
4	08h45	09h00	460-459 µS/cm ; 13,9 °C
5	Pas observé	08h25 ou avant	

¹⁷ La conductivité mesurée présente une différence systématique de + 6 µS/cm par rapport aux valeurs mesurées à l'ouvrage de la CGE et au piquage du forage F3 (CF) en raison d'une mauvaise calibration de l'appareil portatif (précision de l'appareil de mesure : ± 1 µS/cm pour la conductivité, ±0.1°C pour la température).

Griffon N°	Heure (été) ½ débit du griffon	Heure (été) Tariissement complet	Observations [Conductivité ¹⁷ et température]
6	08h20	08h47	460-462µS/cm ; 13.9 °C
7	Pas observé	08h50	
8	Pas observé	09h00	459-460µS/cm ; 13.9 °C
9	Pas observé	09h00	

Tableau 16 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts lors du pompage du palier de débit n° 3 (500 l/s)

La première source qui tarit est le griffon N° 5 (Tableau 16), dont l'altitude d'émergence est proche de 77.5 m NGF, après moins de 10 minutes de pompage. Les autres griffons tariissent en l'espace de 30 à 45 minutes de pompage, avec, en premier, ceux dont l'altitude est la plus élevée.

Reprise des écoulements (arrêt du pompage à 14h20 , heure été)

Griffon N°	Heure (été) de reprise d'écoulement
1	Pas de reprise à 19h04
2	17h40
3	17h35
4	17h30
5	Pas de reprise à 19h04
6	Pas de reprise à 19h04
7	Pas de reprise à 19h04
8	17h45
9	17 h45

Tableau 17 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts après l'arrêt du pompage du palier de débit n°3 (500 l/s)

La reprise des premiers écoulements se fait 190 minutes après l'arrêt du pompage. Les écoulements n'avaient pas repris plus de 300 minutes après l'arrêt de pompage au niveau des griffons situés les plus en amont et ceux situés aux altitudes les plus élevées.

c) Palier 4 – 30 juillet 2005 – 400 l/s

pompage d'une durée de 6h au débit de 400 l/s suivi de 18h de remontée ; sources tariées au niveau des griffons après 85 minutes. Niveau piézométrique au forage avant pompage (08h30, heure été) : -56,92 m ; à l'arrêt du pompage (14h35, heure été) : -58,94 m.

Griffon N°	Heure (été) ½ débit du griffon	Heure (été) Tariement complet	Observations [Conductivité et température]
1	08h25	08h48	350 avant pompage, puis 458 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 13,8°C
2	08h25	09h23	354 puis 457 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 13,8°C
3	08h43	09h22	358 puis 458 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 13,8°C
4	08h40	09h30	460-459 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 13,9°C
5	Pas observé	08h35	
6	08h40	09h13	460-462 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 13,9°C
7	08h40	09h30	
8	09h15	09h52	459-460 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 13,9°C
9	09h16	09h53	

Tableau 18 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts lors du pompage du palier de débit n°4 (400 l/s)

Tous les griffons tariement. Le premier griffon (N° 5) tarit après moins de cinq minutes de pompage. Le griffon à l'amont (N° 1) tarit après moins de 20 minutes de pompage. Les autres griffons tariement entre 50 minutes et 1 heure et 25 minutes après le début du pompage.

Reprise des écoulements (arrêt du pompage à 14h35, heure d'été)

Griffon N°	Heure (été) de reprise d'écoulement
1	18h40
2	17h12
3	16h50
4	16h40
5	Pas de reprise à 18h40
6	18h30
7	Pas de reprise à 18h40
8	16h55
9	16h55

Tableau 19 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts après l'arrêt du pompage du palier de débit n° 4 (400 l/s)

La courbe de reprise des écoulements au griffon N° 4 est présentée sur l'illustration 10, représentant l'ensemble des courbes pour les 4 paliers. Le débit initial de ce griffon est retrouvé à 30 % 4 heures et 20 minutes après l'arrêt du pompage.

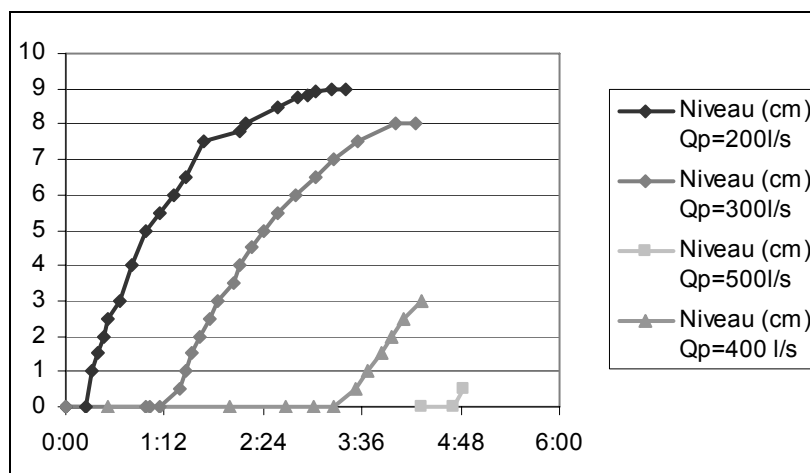


Illustration 10 : Conditions de reprise des écoulements au niveau du griffon N° 4 des Cent Fonts après l'arrêt de chaque palier de pompage

e) Lancement du pompage de longue durée – 400 l/s

Début du pompage le 1^{er} août 2005 à 09h06 (heure d'été)

Griffon N°	Heure (été) ½ débit du griffon	Heure (été) Tarissement complet	Observations [Conductivité et température]
1	09h10	09h30	460 µS/cm ; 13,8°C
2	09h20	10h10	460 µS/cm ; 13,8°C
3	09h34	10h10	459 µS/cm ; 13,8°C
4	09h22	10h15	459 µS/cm ; 13,8°C
5	09h10	09h16	460 µS/cm ; 13,8°C
6	09h28	09h52	460 µS/cm ; 13,8°C
7	09h29	09h52	460 µS/cm ; 14,0°C
8	09h54	10h30	459 µS/cm ; 13,8°C
9	09h56	10h30	460 µS/cm ; 13,8°C

Tableau 20 : Informations sur le suivi des émergences des Cent Fonts lors du démarrage du pompage de longue durée à 400 l/s

Tous les griffons tarissent. Le premier griffon tarit après moins de dix minutes (N° 5) de pompage. Le griffon à l'amont (N° 1) tarit après environ 20 minutes de pompage. Les autres griffons tarissent entre 45 et 1h25 de pompage. Les observations sont similaires à celles réalisées lors de pompage d'essai à 400 l/s effectué le jour précédent.

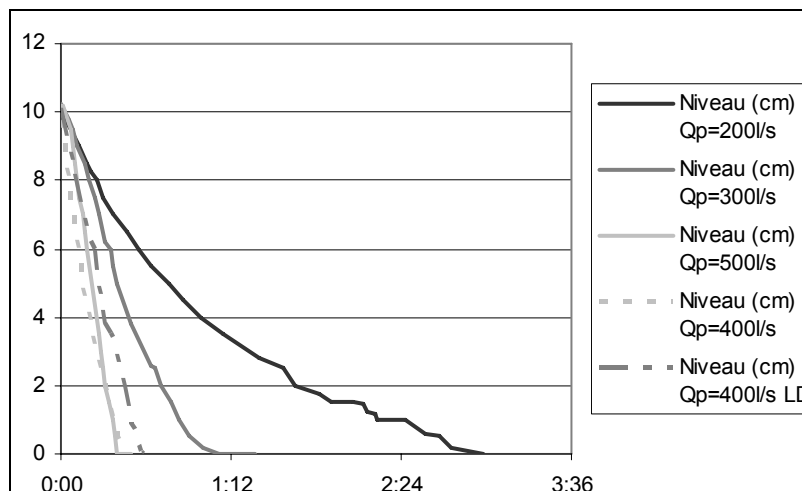


Illustration 11 : Observation du tarissement au niveau du griffon N° 4 des Cent Fonts lors des pompages par paliers et du démarrage du pompage de longue durée (LD)

Lors de l'essai de pompage de longue durée à 400 l/s, les émergences des Cent Fonts ont tari 1 heure après le début de l'essai. Ce tarissement des sources était attendu puisque le débit des sources (250 l/s) était très nettement inférieur au débit de pompage (400 l/s).

4.1.3. Suivi du débit des sources en septembre 2005

L'évolution des débits des Cent Fonts en septembre 2005 est présentée sur Illustration 12.

Au cours de l'épisode pluvio-orageux du 06/09/05, les émergences des Cent Fonts se sont remises à couler dans la nuit du 06 au 07/09/05, vers 23h25 (heure TU). Le pic de crue s'est produit le 07/09/05 à 01h00 (heure TU). Le débit estimé de pic de crue est de 6,5 m³/s.

Le 08/09/05, un second épisode pluvio-orageux s'est produit, générant une seconde crue (pic de crue = 11,5 m³/s le 08/09/05 à 21h00 TU).

Le débit a ensuite diminué pour atteindre le 20/09/05 (date de reprise des pompages par paliers de débit) la valeur de 430 l/s (± 86 l/s). Le contexte hydrologique au démarrage de la seconde phase des essais par paliers de débit est qualifié de moyennes eaux.

L'essai de paliers de débit à 300 l/s n'a pas tari les émergences des Cent Fonts.

Au cours de l'essai de paliers à 500 l/s, le tarissement des sources a été observé le 22/09/05 vers 00h15 (TU), soit 09 heures et 10 minutes après le début de l'essai. Les émergences ont recoulé le 22/09/05 à 16h50 soit 30 minutes après l'arrêt de l'essai à 500 l/s.

Lors de l'essai à 400 l/s, le tarissement a été observé le 24/09/05 vers 05h00 (TU) soit près de 22 heures après le démarrage de l'essai. Les émergences ont reculé le 29/09/05 vers 21h00 pendant la tentative d'essai à rabattement constant.

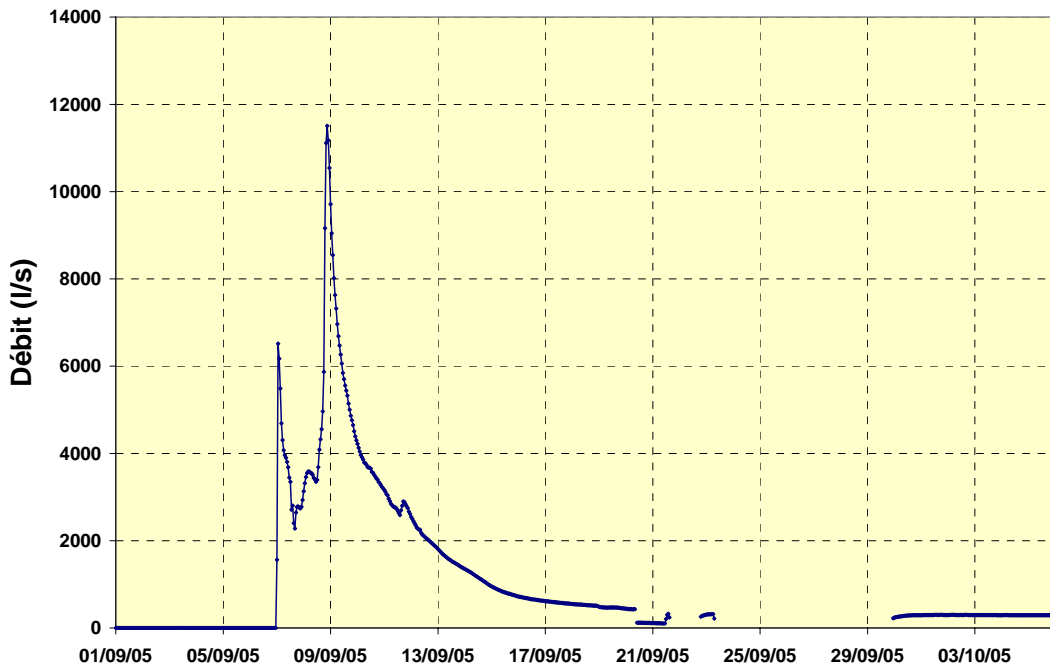


Illustration 12 : Débit moyen horaire de la source des Cent Fonts entre le 01/09/05 et le 06/10/05

4.2. SUIVI DES NIVEAUX D'EAU AU FORAGE F3 (CF) (QUI FAIT L'OBJET DU POMPAGE D'ESSAI), DU PIEZOMETRE DE RECONNAISSANCE (F2) ET DU FORAGE DE LA CGE

Les évolutions temporelles de la piézométrie mesurée dans les différents ouvrages situés dans l'environnement immédiat des sources des Cent Fonts sont présentées sur l'illustration 13.

Sur les périodes de suivi où les données sont disponibles pour tous les forages, on observe une évolution identique de la piézométrie sur chacun des ouvrages instrumentés. Les perturbations induites par le pompage sont instantanément transmises et enregistrées par les capteurs, sans aucun décalage temporel. Ce résultat attendu s'explique par le fait que les 3 ouvrages sont situés sur le drain karstique en charge (situé en dessous du niveau des émergences) sur lequel est effectué le pompage. La transmission est ainsi quasi immédiate.

La phase de tests du dispositif de pompage a débuté le 19/07/05 à 13h15 et s'est terminée le 26/07/05. Sur cette période, 5 phases de pompage de plusieurs heures chacune ont été réalisées afin de procéder aux différents réglages du dispositif

expérimental. Les variations du niveau piézométrique de l'aquifère au cours de cette période ont été enregistrées par le capteur du forage de la CGE, les capteurs des ouvrages F2 et F3 n'étant pas opérationnels entre le 19/07/05 et le 25/07/05.

4.2.1. Evolutions pendant les essais par paliers de débit de juillet 2005

Au cours des paliers de débit de juillet, le rabattement maximal observé concerne l'essai à 500 l/s (rabattement F2 = 2,68 m). Les principales caractéristiques des paliers de débits sont présentées dans le Tableau 21.

	Palier 1_durée 06h01mn Qpompage moyen = 202,9 l/s			Palier 2_durée 05h32mn Q pompage moyen = 301,5 l/s			Palier 3_durée 06h05mn Q pompage moyen = 504,6 l/s		
	F3	F2	CGE	F3	F2	CGE	F3	F2	CGE
Piézo initiale (m)	56,96	56,86	27,53	56,95	56,87	27,52	56,95	56,88	27,53
Piézo finale (m)	57,66	57,53	28,21	58,2	58,06	28,72	19,83	59,56	30,23
Rabattement(m)	0,7	0,67	0,68	1,25	1,19	1,2	2,88	2,68	2,7
	Palier 4_durée 06h11mn Qpompage moyen = 402,1l/s								
	F3	F2	CGE						
Piézo initiale (m)	56,98	56,92	27,56						
Piézo finale (m)	59,11	58,91	29,57						
Rabattement(m)	2,03	1,99	2,01						

Tableau 21 : Principales caractéristiques des essais par paliers de débit de juillet 2005

Les rabattements observés dans les ouvrages F2 et CGE sont similaires aux incertitudes de mesure près (± 1 cm). Les rabattements observés dans le forage de pompage sont plus importants que ceux des deux autres ouvrages (de +3 cm à 203 l/s jusqu'à +20 cm à 504,6 l/s). Ces différences sont attribuées aux pertes de charges quadratiques qui apparaissent au sein de la partie captante de l'ouvrage de pompage.

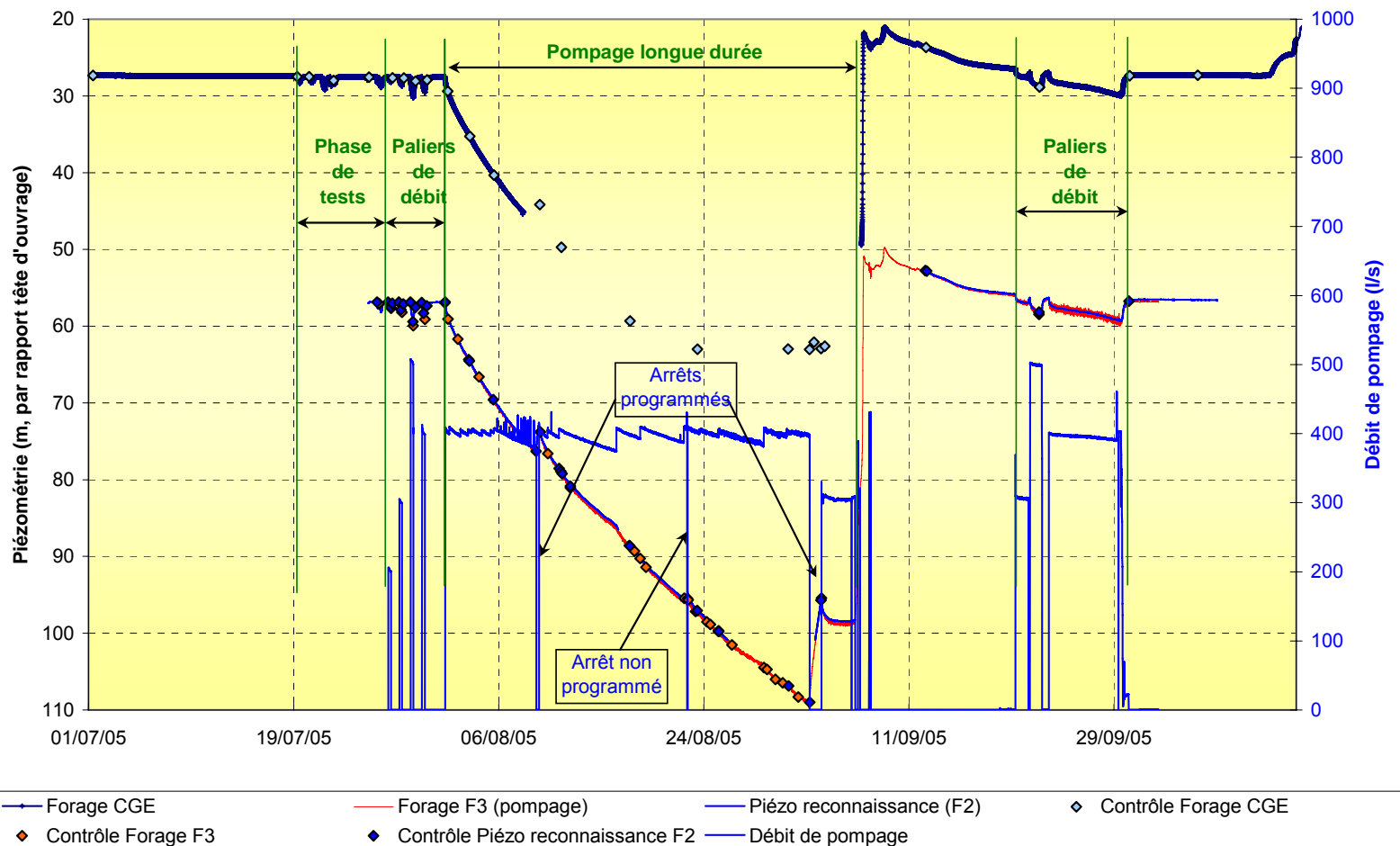


Illustration 13 : Piézométrie mesurée (au pas de temps de 5 mn) dans les ouvrages F3 (CF) (pompage), F2 et CGE depuis le 01/07/05. Le débit de pompage est également reporté

4.2.2. Evolutions pendant les essais de longue durée (du 1er août au 6 septembre 2005)

Le pompage de longue durée à 400 l/s a débuté le 01/08/05 à 07h05 (TU). Le niveau piézométrique dans le drain karstique a diminué de 19,11 m (F2, reconnaissance) jusqu'au 09/08/05 07:25, date du premier arrêt programmé. L'évolution des rabattements journaliers sur cette période de pompage est présentée dans le Tableau 22.

	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour	5 ^{ème} jour	6 ^{ème} jour	7 ^{ème} jour	8 ^{ème} jour
Rabattement par jour (m/j)	4.59	2.65	2.62	2.22	2.18	1.95	1.64	1.50

Tableau 22 : Rabattement moyen journalier (F2, reconnaissance) au cours des 8 premiers jours de pompage (du 01/08/05 au 09/08/05)

Lors du 1^{er} arrêt programmé de pompage d'essai de longue durée à 400 l/s (09/08/05), le niveau est remonté dans le forage de 3,43 m en 6 heures.

Le pompage de longue durée à 400 l/s a repris le 09/08/05 à 13h16 (TU). Le niveau piézométrique dans le drain karstique s'est remis à diminuer jusqu'au 02/09/05 07:25, date du second arrêt programmé. Le rabattement maximal atteint à cette date était de 52,12 m dans l'ouvrage F2. L'évolution des rabattements journaliers sur cette période de pompage est présentée dans le Tableau 23.

Reprise du pompage longue durée : 09/08/05 13:11 (TU)

Rabattement moyen journalier du	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour	5 ^{ème} jour	6 ^{ème} jour	7 ^{ème} jour	8 ^{ème} jour
m/j	4.27	2.35	2.06	1.29	1.49	1.18	1.62	1.89
date	10/08/05	11/08/05	12/08/05	13/08/05	14/08/05	15/08/05	16/08/05	17/08/05

Rabattement moyen journalier du	9 ^{ème} jour	10 ^{ème} jour	11 ^{ème} jour	12 ^{ème} jour	13 ^{ème} jour	14 ^{ème} jour	15 ^{ème} jour	16 ^{ème} jour
m/j	1.67	1.72	1.35	1.39	1.08	1.44	1.29	1.59
date	18/08/05	19/08/05	20/08/05	21/08/05	22/08/05	23/08/05	24/08/05	25/08/05

Rabattement moyen journalier du	17 ^{ème} jour	18 ^{ème} jour	19 ^{ème} jour	20 ^{ème} jour	21 ^{ème} jour	22 ^{ème} jour	23 ^{ème} jour	24 ^{ème} jour
m/j	1.26	0.99	1.06	1.23	1.15	1.15	1.10	1.09
date	26/08/05	27/08/05	28/08/05	29/08/05	30/08/05	31/08/05	01/09/05	02/09/05

Tableau 23 : Rabattement moyen journalier (F3, pompage) au cours des 24 jours de pompage suivant l'arrêt programmé du 09/08/05

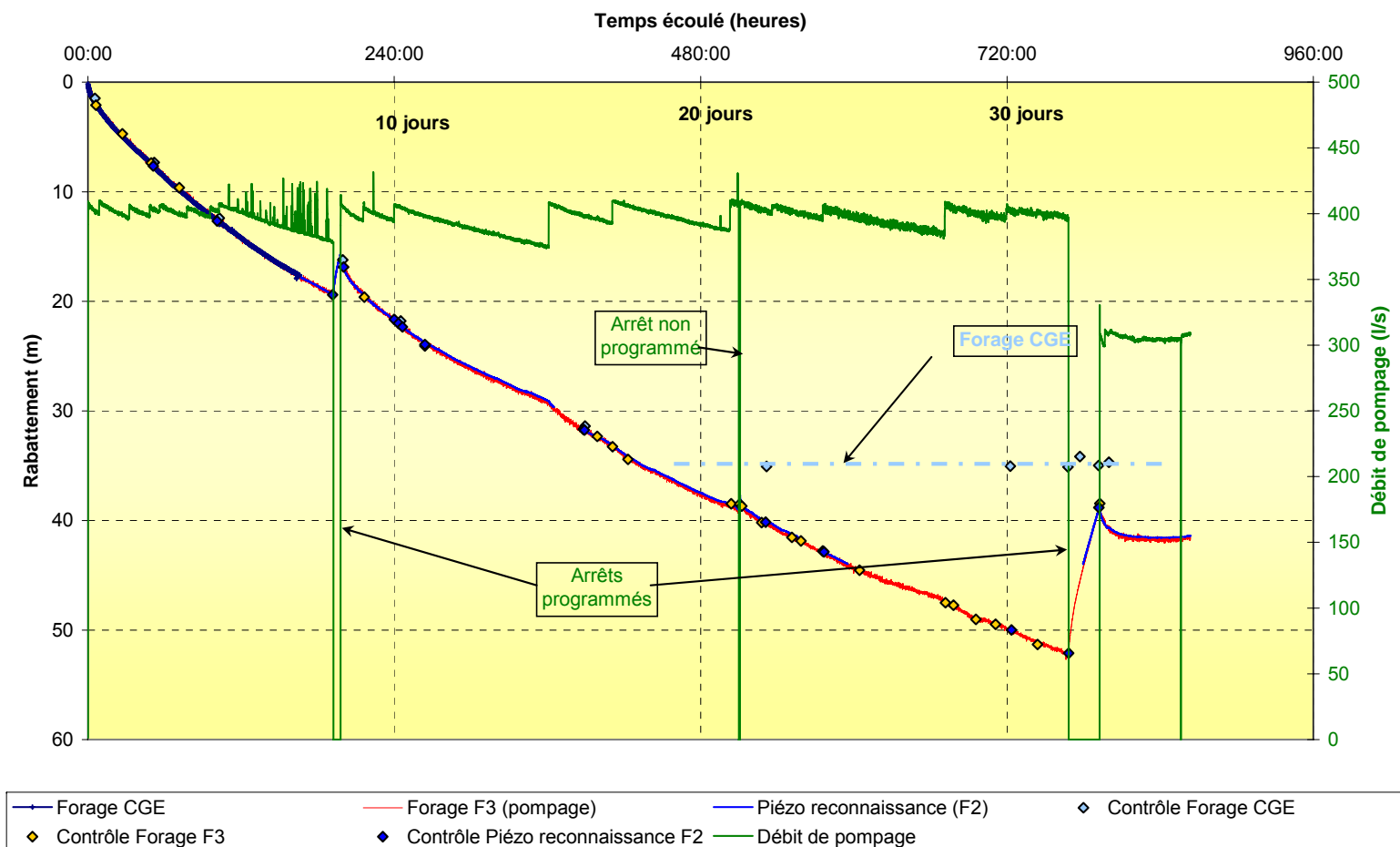


Illustration 14 : Evolution du rabattement au cours de pompage d'essai de longue durée dans les ouvrages F3 (CF)(pompage), F2 et CGE. L'évolution des débits de pompage est également reportée

L'évolution du rabattement au forage pompé (F3 (CF)), au piézomètre de reconnaissance (F2) et au forage CGE est présentée à l'illustration 14. Pour l'ouvrage de pompage F3 (CF), un rabattement de 22 m est observé au cours des 10 premiers jours de pompage, puis de 16 m entre le 10^{ème} et le 20^{ème} jour et de 12 m entre le 20 et le 32^{ème} jour de pompage à un débit de 400 l/s. Le rabattement ne suit pas une décroissance linéaire, mais selon une fonction puissance de type $y = 4.5744 X^{0.7026}$. Le rabattement maximal atteint est de 52 mètres après 32 jours de pompage de longue durée. Les faibles variations de pente observées notamment entre le 10^{ème} et le 30^{ème} jour de pompage sont à associer aux variations du débit de pompage. Le débit a varié entre 370 et 420 l/s au cours de l'essai, notamment entre le 10^{ème} et le 30^{ème} jour de pompage.

Au cours de la période du 01/08/05 au 18/08/05, les niveaux d'eau mesurés dans les 3 ouvrages (F3 (CF)_pompage, F2_reconnaissance et CGE) ont évolué de la même manière. A partir du 18/08/05, les niveaux d'eau mesurés au forage de la CGE ont cessé de diminuer et se sont stabilisés autour de la cote 41,6 m NGF, soit à 63 m de profondeur (= rabattement de 35 m environ). Ce phénomène traduit une déconnexion hydraulique entre le drain amont (où est réalisé le pompage) et le drain aval (où est implanté le forage de la CGE). Cette déconnexion hydraulique peut s'expliquer par la configuration géométrique du drain karstique qui présente, entre le forage CGE et le forage F3 (CF), un point « haut » situé, d'après les données topographiques Bardot, entre les repères 581 et 692 (Illustrations en annexe 4) ; il s'agit ainsi d'un seuil hydraulique. Au cours de cette période, les apports par infiltration d'eau en provenance de l'Hérault y équilibraient les fuites vers la zone de pompage.

Lors du 2^{ème} arrêt programmé de pompage d'essai (après 32 jours de pompage), le niveau est remonté de 13,49 m en 24 heures et 25 minutes (du 02/09/05 au 03/09/05).

Lors du pompage à 300 l/s (03/09/05), le rabattement relatif obtenu est de 2 m, avec une stabilisation du niveau d'eau à la profondeur de 98.4 m après 30 heures de pompage.

4.2.3. Evolution pendant l'épisode pluvio-orageux de septembre 2005 (6-9 septembre)

Le Tableau 24 présente la chronologie des évènements de pompage de la journée du 06/09/05.

Date Heure TU	Piézométrie F3 (m)	Etat du pompage	Observations
06/09/05 00h15	98,65 m	en marche, 300 l/s	Niveau stable depuis le 04/08/05
06/09/05 06h55	98,63 m	Arrêt inopiné du pompage suite à une coupure électrique (secteur)	Coupure électrique en raison des orages

Date Heure TU	Piézométrie F3 (m)	Etat du pompage	Observations
06/09/05 12h50	87,84 m	Reprise du pompage à 300 l/s	Remontée de 9 m environ des niveaux d'eau pendant l'arrêt
06/09/05 16h55	82,53 m	Arrêt inopiné du pompage suite à une coupure électrique (secteur)	Bien que le pompage ait repris, les niveaux d'eau ont continué à remonter (+ 5 m) en 4 heures environ de pompage (début de la crue)

Tableau 24 : Chronologie des événements intervenus le 06/09/05

Les variations du niveau d'eau au sein du forage de pompage ont été fortement perturbées par les précipitations de début septembre ; le niveau d'eau est remonté très rapidement : 47 m en 20 heures (Illustration 13).

4.2.4. Evolution pendant les essais par paliers de débit de septembre 2005

Les pompages d'essai par paliers de débit effectués fin septembre 2005 se sont déroulés dans un contexte hydrologique de moyennes eaux (le débit des sources le 22/09/05 était de 400 l/s contre 250 l/s le 01/08/05). Les variations de niveau d'eau dans les différents ouvrages (F3 (CF), F2 et CGE) sont bien plus faibles en ampleur que celles observées en juillet 2005. Par exemple, pour l'essai à 300 l/s, le rabattement observé dans les ouvrages est de 1.15 m au bout de 27 heures et 15 minutes de pompage, alors qu'en juillet ce rabattement a été atteint au bout de 5 heures et 30 minutes de pompage à 300 l/s. Les principales caractéristiques des paliers de débit de septembre 2005 sont présentées dans le Tableau 25.

	Palier 6_durée 27h15min Qpompage moyen=309l/s			Palier 7_durée 25h15min Qpompage moyen=500,8l/s			Palier 8_durée 146h25min Qpompage moyen=399,2l/s		
	F3	F2	CGE	F3	F2	CGE	F3	F2	CGE
Piézo initiale (m)	55,95	55,82	26,48	56,45	56,29	26,93	56,55	56,32	27,02
Piézo finale (m)	57,12	56,97	27,61	58,56	58,27	28,94	59,62	59,34	30,01
Rabattement(m)	1,17	1,15	1,13	2,11	1,98	2,01	3,07	3,02	2,99

Tableau 25 : Principales caractéristiques des essais par paliers de débit de septembre 2005

En fin d'essai à 400 l/s (durée = 146 h environ), le rabattement atteint a été de 3 m environ.

4.2.5. Volumes pompés au cours des différentes phases du pompage

Les volumes pompés au cours des différentes phases des pompages d'essai sont présentés dans le Tableau 26.

Sur l'ensemble de l'expérimentation, du 26/07/05 au 30/09/05, le volume total pompé comptabilisé est de 1 493 496 m³, soit 1 500 000 m³ environ.

	Date	Q moyen pompage (l/s)	Volume Pompé (m ³)	Volume Pompé cumulé (million de m ³)
pallier 1	27/07/2005	202.7	4318.5	0.004
pallier 2	28/07/2005	301.5	5969.8	0.010
pallier 3	29/07/2005	500.3	10956.3	0.021
pallier 4	30/07/2005	401.8	8919.2	0.030
Longue durée	01/08/05 au 02/09/05	397.0	1088725.7	1.119
Longue durée	03/09/05 au 06/09/06	305.3	78215.1	1.197
pallier 5	20/09/05 au 21/09/05	306.8	30189.0	1.227
pallier 6	21/09/05 au 22/09/05	498.4	45505.6	1.273
pallier 7	23/08/05 au 29/09/05	395.4	215752.2	1.489
essai rabattement constant	29/09/2005	84.1	4945.0	1.493

Tableau 26 : Récapitulatif des volumes pompés par période de pompage.

4.3. SUIVI DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES (CONDUCTIVITE, TEMPERATURE, TURBIDITE) DES EAUX POMPEES

4.3.1. Evolution de la conductivité des eaux pompées

L'évolution temporelle de la conductivité des eaux pompées et des niveaux d'eau « normalisés » au sein du drain karstique est présentée sur Illustration 15. Le niveau d'eau « normalisé » au sein du drain karstique a été établi dans un souci de simplification des représentations graphiques à partir des valeurs mesurées au sein des 3 ouvrages suivis (F3 (CF), F2 et CGE), dans le but de disposer d'une seule chronique continue de niveau piézométrique. Les valeurs de la charge hydraulique du drain au niveau du forage F3 (CF) au cours de la période comprise entre le 01/07/05 au 26/07/05 ont donc été déduites des valeurs mesurées au forage de la CGE.

La conductivité des eaux pompées au début de pompage d'essai (01/08/05 7 :10 TU) présente une valeur identique ($C = 454 \mu\text{S/cm}$) à celle mesurée au niveau de l'ouvrage de la CGE (cf. § 4.4.1).

La conductivité est restée stable ($C = 454 \mu\text{S/cm}$) pendant 30 heures et 25 minutes, puis elle s'est mise à augmenter pour atteindre un maximum de $565 \mu\text{S/cm}$ au bout de 40 heures et 20 minutes de pompage ($t + 40\text{h}20\text{mn}$). La conductivité a ensuite diminué pour atteindre une valeur de $446 \mu\text{S/cm}$ ($t + 62\text{h}25\text{mn}$). A cet instant, la conductivité des eaux pompées était plus faible de $8 \mu\text{S/cm}$ ($\pm 1 \mu\text{S/cm}$) par rapport à la valeur

initiale. Cette diminution de $8 \mu\text{S/cm}$ est à attribuer aux infiltrations d'eau en provenance de l'Hérault. La procédure de quantification des proportions de mélange est présentée et discutée dans le paragraphe 5.4.2. L'évolution enregistrée entre la 30^{ème} heure et la 60^{ème} heure apparaît difficilement corrélable à un phénomène naturel et doit plutôt être rattachée à un problème de mesure.

Entre t+62h25mn et t+192h10mn (correspondant à la date du premier arrêt du 09/08/05), la conductivité a faiblement augmenté (de 446 à 449 $\mu\text{S/cm}$). A la reprise du pompage le 09/08/05 à 13h05 TU (t+198h10mn), la conductivité des eaux pompées présentait une valeur faible, de 363 $\mu\text{S/cm}$. La conductivité a ensuite très rapidement augmenté (en moins d'une heure) pour atteindre la valeur de 449 $\mu\text{S/cm}$ (t+199h05mn).

La conductivité des eaux pompées a ensuite continué à augmenter et à dépassé la valeur observée en début de pompage ($C = 454 \mu\text{S/cm}$) le 16/08/05 (soit à t+369h45mn). Après cette date, la conductivité a continué à augmenter et a atteint la valeur de 460 $\mu\text{S/cm}$ le 25/08/05 (soit à t+577h35mn). La conductivité des eaux s'est ensuite stabilisée autour de 458 $\mu\text{S/cm}$ ($\pm 2 \mu\text{S/cm}$) jusqu'à la date du second arrêt programmé le 02/09/05 (soit à t+768h10mn).

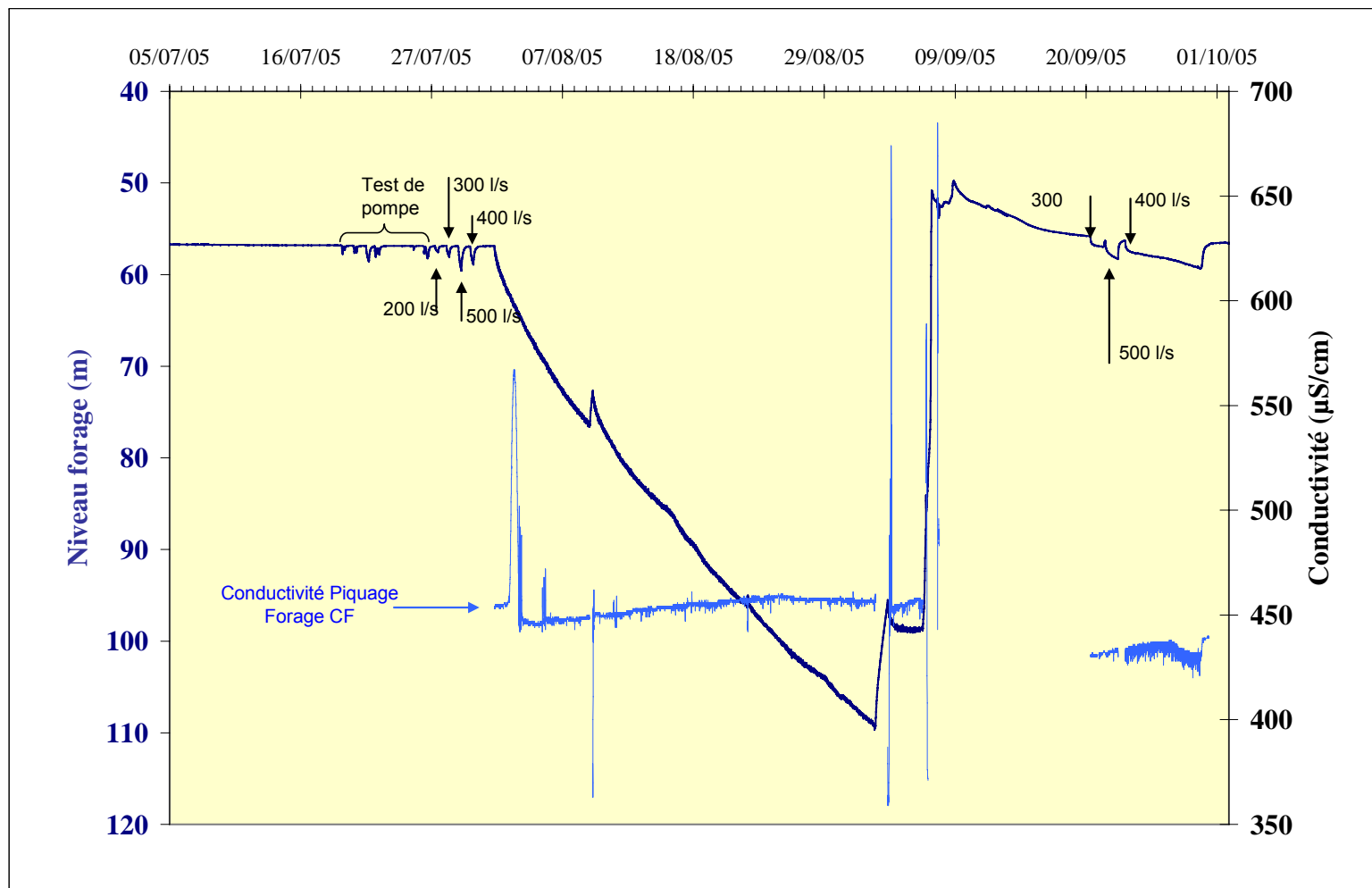


Illustration 15 : Evolution de la conductivité des eaux pompées au forage F3 (CF) (mesurée au piquage) au cours de pompage d'essai. L'évolution de la piézométrie dans le drain karstique est également reportée

A la reprise du pompage le 03/09/05 (t+792h40mn), un phénomène identique a celui observé lors de la reprise du pompage du 09/08/05 s'est produit. La conductivité des eaux pompées au cours des deux premières heures suivant la reprise du pompage (2 heures et 25 minutes exactement) a présenté une valeur faible autour de 362 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La conductivité a ensuite rapidement augmenté pour atteindre une valeur comparable, mais légèrement plus faible ($C = 454 \mu\text{S}/\text{cm}$), à celle observée avant l'arrêt ($C = 458 \mu\text{S}/\text{cm}$). La conductivité a ensuite continué à augmenter jusqu'à atteindre la valeur de 458 $\mu\text{S}/\text{cm}$ le 06/09/05, date de l'arrêt provoqué par l'épisode pluvio-orageux.

Au cours de la période non pompée qui précédait les essais par paliers de débit de fin septembre, la conductivité des eaux du drain karstique présentait une tendance à l'augmentation (cf. évolution enregistrée au forage de la CGE, cf. § 4.4.1).

Lors des essais par paliers de débit de fin septembre, la conductivité des eaux pompées a augmenté, évoluant de 431 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (20/09/05) jusqu'à 438 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (27/09/05 10h00 TU). A partir de cette date, qui coïncide environ avec la 99^{ème} heure de pompage du palier à 400 l/s, la conductivité des eaux pompées a commencé à légèrement diminuer pour atteindre une valeur stabilisée autour de 431 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Au cours de la tentative d'essai à rabattement constant, le 29/09/05 à partir de 14h35 TU, la conductivité s'est mise à augmenter pour atteindre une valeur quasi stabilisée autour de 439 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

4.3.2. Evolution de la température des eaux pompées

L'évolution temporelle de la température des eaux pompées et des niveaux d'eau du drain karstique est présentée sur l'illustration 16.

La chronique de température des eaux pompées présente dans son ensemble des variations journalières qui sont à mettre en relation directe avec les variations journalières de la température de l'air. Ce phénomène est dû au dispositif de mesure qui a été mis en place au piquage de la conduite (cf. § 3.2.3).

Abstraction faite de ces variations journalières de température, l'évolution générale de la température des eaux pompées est la suivante.

Jusqu'au 03/08/05, la température est restée globalement stable autour de 14,2°C. La température des eaux pompées apparaît significativement supérieure à celle mesurée à la source en début de pompage ($T = 13,7^\circ\text{C}$) ou dans le forage de la CGE (13,8°C) aux précisions instrumentales près (0,1°C). Ces résultats suggèrent que la pompe réchauffe de 0,2 à 0,3°C les eaux pompées.

A partir du 03/08/05, la température des eaux pompées présente une tendance à l'augmentation et se stabilise ensuite autour de 15°C vers le 06/08/05.

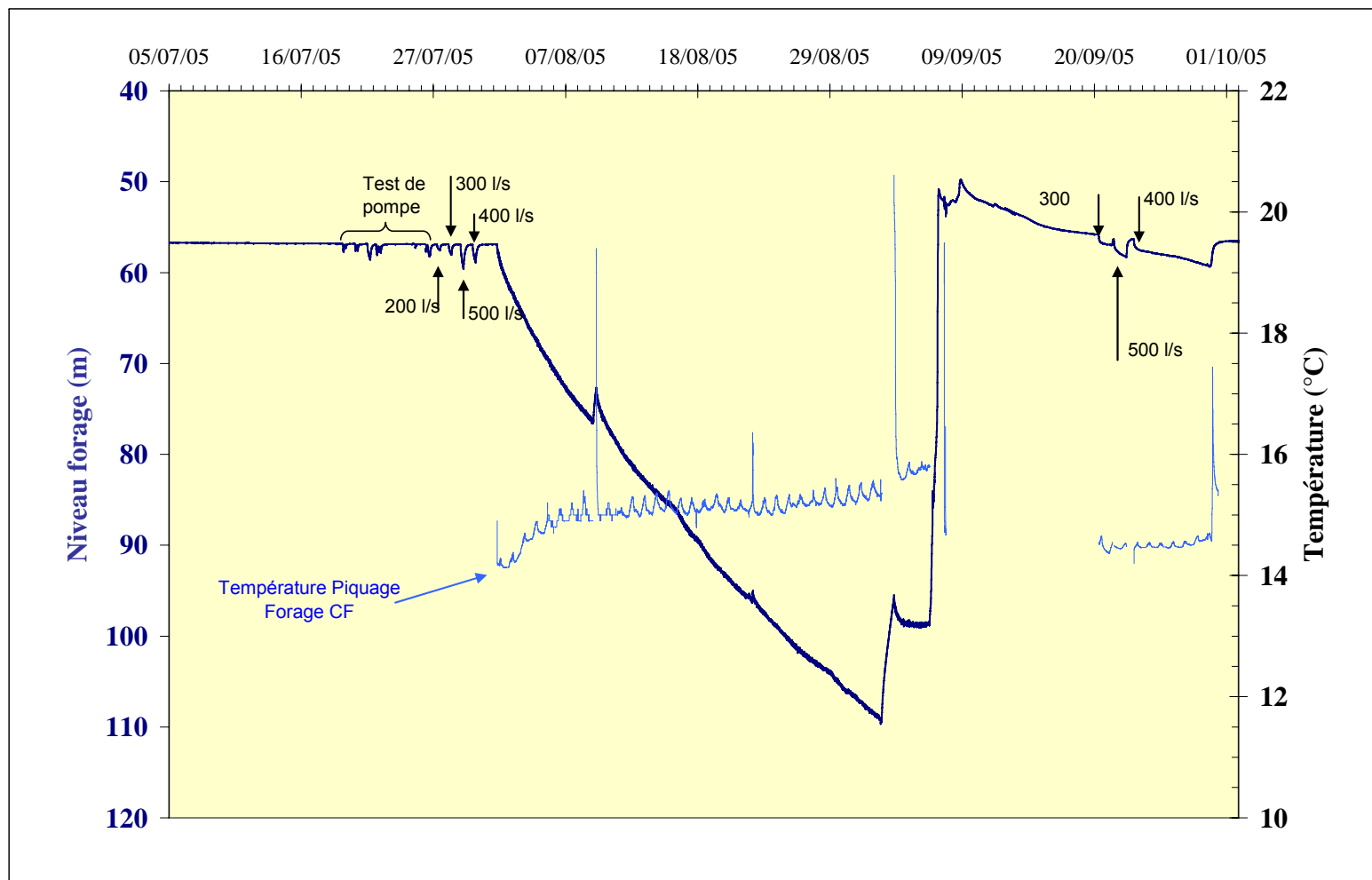


Illustration 16 : Evolution de la conductivité des eaux pompées (mesurée au piquage) au cours de pompage d'essai. La charge hydraulique dans le drain karstique est également reportée

Le 09/08/05, lors de la reprise de pompage d'essai à 400 l/s, la température des eaux pompées a évolué de 18,6°C à 15°C au cours de la première heure de pompage. A la reprise du pompage le 03/09/05, un phénomène identique a été observé. La température des eaux pompées au cours des deux premières heures suivant la reprise du pompage a évolué de 20,6°C à 15,7°C. La température est ensuite restée globalement stable autour de cette valeur.

Lors des essais par paliers de débit de fin septembre, la température des eaux pompées est restée globalement stable autour de 14,5°C, exception faite de l'augmentation observée au cours de la tentative d'essai à rabattement constant, le 29/09/05 à partir de 14h35 TU.

Les phénomènes d'évolution de la température des eaux pompées au cours des pompages d'essai sont à mettre en relation avec les infiltrations d'eau en provenance de l'Hérault. Les incertitudes et imprécisions qui pèsent sur la température sont trop importantes pour que soit entrepris un calcul de quantification de proportion de mélange à l'aide de ce paramètre.

4.3.3. Evolution de la turbidité des eaux pompées

L'évolution temporelle de la turbidité des eaux pompées dans le drain karstique est présentée sur l'illustration 17.

La chronique de turbidité des eaux pompées est, dans son ensemble, très « parasitée » en raison des interférences électromagnétiques liées au variateur de fréquence de la pompe.

Abstraction faite des parasites, l'évolution générale de la turbidité au cours du pompage, est la suivante.

La turbidité des eaux pompées est restée faible (valeur autour de 2 NTU) jusqu'au 14/08/05.

Le 15/08/05, un petit pic à 6,5 NTU s'est produit, suivi d'une diminution jusqu'à 2 NTU. La turbidité est ensuite restée stable autour de cette valeur jusqu'au 18/08/05. A partir de cette date, la turbidité s'est mise à augmenter progressivement jusqu'à 10 NTU (valeur observée à partir du 21/08/05).

Dans la journée du 24/08/05, un pic de turbidité supérieur à 100 NTU s'est produit. La valeur précise du pic n'est pas connue car, en raison du réglage de la centrale d'acquisition, les valeurs supérieures à 100 NTU ne pouvaient pas être enregistrées. Le pic supérieur à 100 NTU a duré 3 heures et 15 minutes. Après cet épisode, la turbidité des eaux pompées est retombée autour de 10 NTU, valeur qui a été observée jusqu'au 26/08/05.

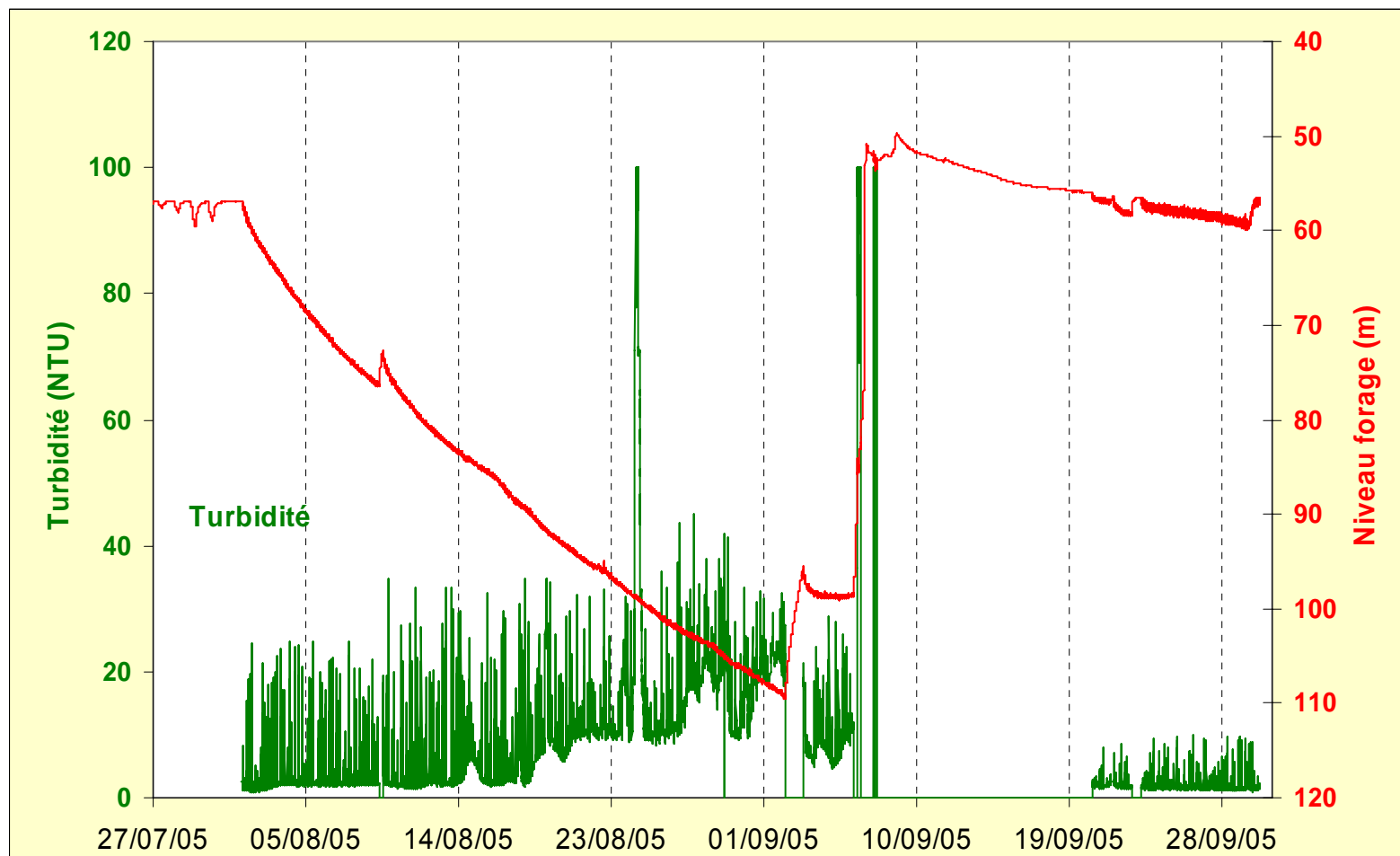


Illustration 17 : Evolution de la turbidité des eaux pompées au cours de pompage d'essai. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain karstique est également reportée

A partir du 26/08/05, la turbidité des eaux pompées s'est mise à augmenter jusqu'à 20 NTU (le 28/08/05). Du 28/08/05 au 02/09/05, date du second arrêt programmé, la turbidité a fluctué autour de 20 NTU à 5 NTU près.

A la reprise du pompage (le 03/09/05) et jusqu'au 06/09/05, la turbidité a fluctué autour de 8 NTU, à 3 NTU près.

Lors de l'épisode pluvio-orageux du 06/09/05, des pics de turbidité supérieurs à 100 NTU ont été observés, notamment dans la journée du 07/09/05 au cours d'une phase de réglage du système de pompage (cf. § 2.2.2.). La turbidité relevée par l'opérateur sur l'afficheur du turbidimètre lors de ces essais était de l'ordre de 1500 NTU.

Au cours des pompages d'essai de fin septembre, la turbidité des eaux pompées est restée faible et a fluctué autour de 1.5 NTU.

4.4. SUIVI DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES (CONDUCTIVITE, TEMPERATURE, TURBIDITE) AU FORAGE CGE

4.4.1. Evolution de la conductivité des eaux au forage de la CGE

L'évolution temporelle de la conductivité des eaux du drain karstique au forage de la CGE est présentée sur l'illustration 18.

Au cours de la période précédant le pompage d'essai de longue durée à 400 l/s (juillet 2005), la conductivité des eaux du karst présente une tendance à l'augmentation [de 448 (± 1) $\mu\text{S/cm}$ à 455 (± 1) $\mu\text{S/cm}$].

Lors du palier de débit à 500 l/s réalisé le 29/07/05, la conductivité a commencé à diminuer au bout de 3 heures de pompage pour atteindre, en fin de pompage (t+6h06mn), la valeur de 420 $\mu\text{S/cm}$. Cette diminution de la conductivité s'est produite lorsque le rabattement dans le drain a atteint la valeur de 1,85 m.

Dès l'arrêt du palier de pompage à 500 l/s, la conductivité de l'eau s'est mise à remonter, la valeur initiale ($C = 455 \pm 1 \mu\text{S/cm}$) a été atteinte près de 3 heures et 30 minutes après l'arrêt de pompage.

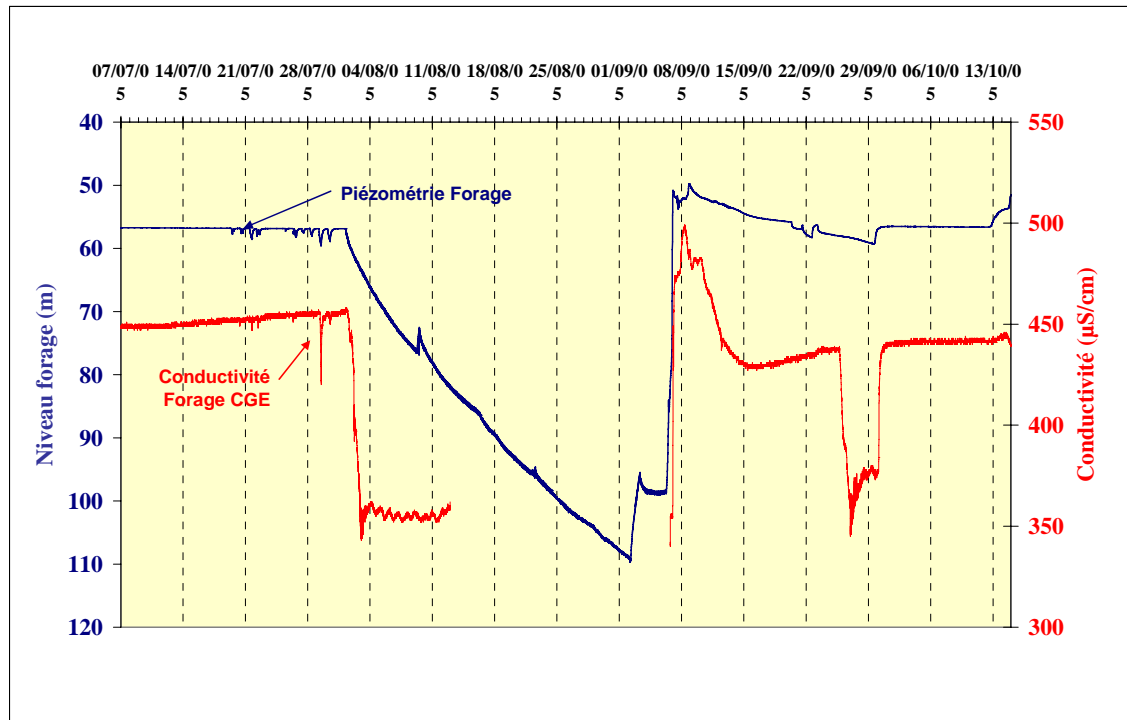


Illustration 18 : Evolution de la conductivité des eaux du drain karstique au forage de la CGE sur la période du 07/07/05 au 15/10/05. Les niveaux piézométriques dans le drain karstique sont également reportés

Lors du pompage d'essai de longue durée (début 01/08/05 à 07h05 TU), la conductivité des eaux au forage de la CGE a commencé à diminuer vers 12h40 TU, soit au bout de 5 heures et 35 minutes de pompage. A ce moment là, le rabattement dans le drain est de 1,89 m, valeur comparable (1,85 m) à celle mise en évidence lors de l'essai de palier de débit à 500 l/s.

La conductivité a continué à diminuer jusqu'à atteindre le 03/08/05 à 11h35 TU (au bout de 53 heures et 30 minutes de pompage) une valeur proche de 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La conductivité a ensuite fluctué autour de 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (à 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ près) jusqu'au 13/08/05, date à laquelle le capteur s'est trouvé « hors d'eau ».

Lors de la crue qui s'est produite suite à l'épisode pluvio-orageux du 06/09/05, l'acquisition des données a pu reprendre lorsque le niveau piézométrique a atteint la valeur de 82,22 m (forage F3 (CF)). Au cours de la montée de crue, la conductivité a rapidement augmenté (de 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 474 $\mu\text{S}/\text{cm}$), cette dernière valeur étant observée le 07/09/05 vers 13h20 TU, près de 14 heures après que les émergences des Cent Fonts se soient remises à couler.

Lors de la décrue, un pic de conductivité à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ s'est produit le 08/09/05 vers 10h00 TU. Au cours de la crue et de la décrue du 09/09/05, la conductivité des eaux a globalement diminué pour atteindre une valeur proche de 430 $\mu\text{S}/\text{cm}$ le 16/09/05.

Sur la période du 16/09/05 au 20/09/05, date de reprise des pompages d'essai, la conductivité des eaux du karst présente une tendance à l'augmentation [de 430 (± 1) $\mu\text{S/cm}$ à 434 (± 1) $\mu\text{S/cm}$]. Au cours des essais par paliers de débit à 300 l/s et 500 l/s, la conductivité des eaux continue à augmenter jusqu'à 437 $\mu\text{S/cm}$.

Lors de l'essai de débit à 400 l/s (début le 23/09/05 à 07h00 TU), la conductivité des eaux est restée stable autour de 437 $\mu\text{S/cm}$ jusqu'au 25/09/05 18h55 TU, soit pendant les 60 premières heures du pompage. Le 25/09/05 à 19h00 TU, la conductivité des eaux au forage a commencé à diminuer. A cette heure, le rabattement du niveau d'eau dans le drain lié au pompage est de 1,75 m, valeur du même ordre de grandeur que celles mises en évidence précédemment (1,85 m lors de l'essai de palier de débit à 500 l/s de juillet 2005 ; 1,89 m lors de l'essai de longue durée (400 l/s) du mois d'août 2005).

La conductivité a continué à diminuer jusqu'à atteindre le 27/09/05 vers 07h00 TU (au bout de 53 heures et 30 minutes de pompage) une valeur proche de 350 $\mu\text{S/cm}$. La conductivité a ensuite légèrement augmenté (jusqu'à 370 $\mu\text{S/cm}$) et fluctué autour de cette valeur à 10 $\mu\text{S/cm}$ près) jusqu'au 30/09/05 03h30 TU, date et heure à partir de laquelle la conductivité s'est mise à augmenter.

En fin de pompage le 30/09/05, la conductivité des eaux a atteint la valeur de 441 $\mu\text{S/cm}$, valeur sensiblement supérieure à la valeur initiale (437 $\mu\text{S/cm}$), ce qui illustre que les eaux du karst présentaient toujours, à cette période, une tendance à l'augmentation.

Les différentes phases de diminution de la conductivité des eaux au forage de la CGE sont à mettre en relation avec les infiltrations d'eau en provenance de l'Hérault.

4.4.2. Evolution de la température des eaux au forage de la CGE

L'évolution temporelle de la température des eaux du drain karstique au forage de la CGE est présentée sur l'illustration 19.

Au cours de la période précédant le pompage d'essai de longue durée à 400 l/s (juillet 2005), la température des eaux du karst présente une très légère tendance à l'augmentation [de 13,5°C ($\pm 0,1$) à 13,7°C ($\pm 0,1$)]. Contrairement à ce qui a été observé pour la conductivité, la température de l'eau n'évolue pas au cours de l'essai de palier de débit à 500 l/s réalisé le 29/07/05.

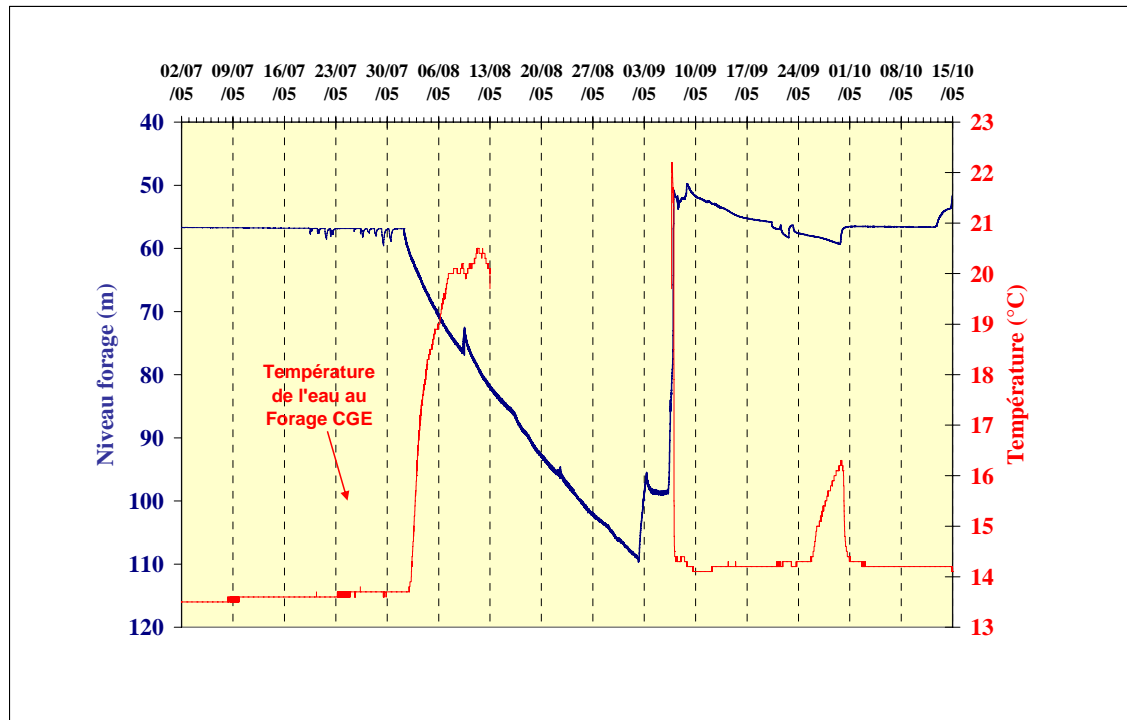


Illustration 19 : Evolution de la température des eaux du drain karstique au forage de la CGE sur la période du 07/07/05 au 15/10/05. L'évolution des niveaux piézométriques dans le drain karstique est également reportée

Lors du pompage d'essai de longue durée (début 01/08/05 à 07h05 TU), la température des eaux au forage de la CGE a commencé à augmenter le 02/08/05 vers 00h30 TU, soit au bout de 17 heures et 25 minutes de pompage. La température de l'eau évolue donc en retard par rapport à la conductivité (décalage de près de 12 heures).

A partir du 02/08/05 vers 00h30 TU, la température de l'eau s'est mise à augmenter jusqu'à atteindre le 08/08/05 (au bout de 161 heures de pompage) une valeur proche de 20°C. La température de l'eau a ensuite légèrement augmenté jusqu'à atteindre une valeur proche de 20,3°C et a ensuite fluctué autour de cette valeur (à 0,3°C près) jusqu'au 13/08/05, date à partir de laquelle le capteur s'est trouvé « hors d'eau ».

Lors de la crue qui s'est produite suite à l'épisode pluvio-orageux du 06/09/05, l'acquisition des données a pu reprendre lorsque le niveau piézométrique a atteint la valeur de 82,22 m (forage F3 (CF)). Au cours de la montée de crue, la température a augmenté (de 19,8°C à 22,2°C), cette dernière valeur étant observée le 06/09/05 vers 19h15 TU, soit près de 4 heures avant que les émergences des Cent Fonts se remettent à couler.

Entre le 06/09/05 19h15 TU et le 07/09/05 12h20 TU, la température de l'eau a fortement chuté (de 22,2°C à 14,4°C). Au cours de la crue du 09/09/05, la température de l'eau a légèrement diminué pour atteindre une valeur proche de 14,1°C le 10/09/05

vers 07h00 TU. A partir de cette date, la température est restée quasi stable ($14,2 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$) jusqu'au 25/09/05 18h35 TU qui correspond à 59 heures et 35 minutes de pompage du palier à 400 l/s. La température a ensuite commencé à augmenter jusqu'à $16,3^{\circ}\text{C}$, valeur atteinte le 29/09/05 22h15 TU. A partir de cette date, la température a commencé à diminuer pour atteindre la valeur de $14,3 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ le 01/10/05 11h30 TU, soit 28 heures et 40 minutes après l'arrêt du pompage.

Les phases d'augmentation de la température des eaux du drain karstique au forage de la CGE sont à mettre en relation avec les infiltrations d'eau en provenance de l'Hérault. L'évolution de la température de l'eau au forage de la CGE n'est pas synchrone avec celle de la conductivité. La réponse thermique du système est retardée par rapport à la réponse chimique qu'illustre le suivi de conductivité, cette dernière traduisant les échanges de type flux de matière.

Le retard de réponse de la température par rapport à la conductivité est lié aux échanges thermiques qui se produisent dans le drain et les fissures du système karstique dans sa zone aval (entre le forage CGE et la rive droite de l'Hérault). Les caractéristiques de « l'échangeur thermique » ne sont pas connues (capacité calorifique et conductivité thermique du karst notamment). Dans ce contexte, on ne peut pas utiliser le paramètre « température » (variable intensive) pour quantifier de manière simple et fiable les proportions de mélange entre l'eau du karst et l'eau de l'Hérault.

4.4.3. Evolution de la turbidité des eaux au forage de la CGE

L'évolution temporelle de la turbidité des eaux du drain karstique au forage de la CGE est présentée sur l'illustration 20.

Au cours de la période précédant le pompage d'essai de longue durée à 400 l/s (du 28 juillet 2005 au 01/08/05), la turbidité des eaux du karst au forage CGE présente une valeur faible, voisine de 0,5 NTU.

L'évolution générale de la turbidité au cours du pompage de longue durée (400 l/s), abstraction faite des parasites, est la suivante.

La turbidité des eaux au forage CGE est restée faible (valeur autour de $0,5 \pm 0,1$ NTU) jusqu'au 01/08/05 16h00 TU.

A partir du 01/08/05 vers 16h00 TU (au bout de 9 heures de pompage), la turbidité des eaux au forage CGE a commencé à augmenter pour atteindre, le 03/08/05 vers 13h20 TU, la valeur de 33 NTU (valeur du premier pic). La turbidité des eaux a ensuite diminué jusqu'à la valeur de 17 NTU environ. Un second pic (28 NTU) a été observé le 04/08/05 vers 21h40 TU, suivi de 4 autres (34 NTU le 08/08/05 vers 06h20 TU ; 33 NTU le 09/08/05 vers 04h00 TU ; 31 NTU le 11/08/05 vers 20h20 TU ; 25 NTU le 13/08/05 vers 06h00 TU). Au cours de la période du 03 au 13/08/05, date à laquelle le capteur s'est trouvé « hors d'eau », la turbidité des eaux est toujours restée supérieure à 5.7 NTU. Au cours de cette période, aucune corrélation de cause à effet n'est mise en évidence entre les chroniques de turbidité mesurées au forage de pompage (F3) et

au forage CGE. De même, aucune corrélation ne peut être établie entre la turbidité et le débit de pompage ou entre la turbidité et la charge hydraulique dans le drain, ou entre la turbidité et la conductivité des eaux.

L'évolution de la turbidité observée durant cette première partie du pompage d'essai est très vraisemblablement à mettre en relation avec les infiltrations d'eau en provenance de l'Hérault (débouillage probable de fissures). En milieu karstique, les pompages tout comme les crues sont susceptibles de provoquer des mises en suspension de sédiments intrakarstiques, pouvant aller jusqu'au décolmatage de fractures ou de cavités. Dans le cas présent, ces mises en suspension et/ou décolmatage paraissent limitées, malgré l'importance du rabattement.

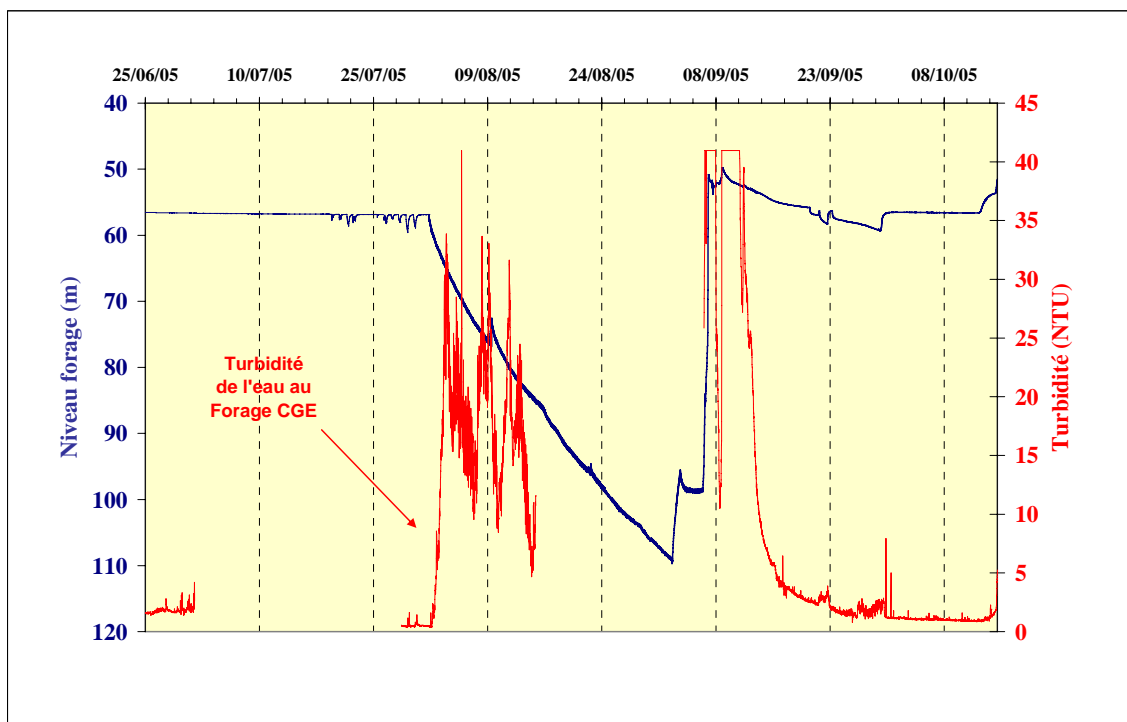


Illustration 20 : Evolution de la turbidité des eaux du drain karstique au forage CGE sur la période du 26/06/05 au 15/10/05. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain est également reportée

Lors de l'épisode pluvio-orageux du 06/09/05 et du 09/09/05, des pics de turbidité supérieurs à 40 NTU ont été observés (la valeur précise des pics n'est pas connue car, en raison du réglage de la centrale d'acquisition, les valeurs supérieures à 40 NTU ne peuvent pas être enregistrées). Le premier épisode de turbidité importante (> 40 NTU) a duré près de 34 heures lors de la première crue du 06/09/05.

Lors du second épisode de crue (09/09/05), le second épisode de turbidité importante (> 40 NTU) a duré près de 56 heures et 20 minutes, soit jusqu'au 11/09/05 03h20 TU. A partir de cette date, la turbidité a régulièrement diminué jusqu'à atteindre des valeurs proche de 2,5 NTU le 20/09/05, date de reprise des pompages d'essai.

Au cours des essais de débit par paliers de débit à 300 l/s et 500 l/s, la turbidité de l'eau a très légèrement augmenté (jusqu'à 3,5 NTU, valeur observée le 23/09/05 vers 19 h20 TU, soit près de 3 heures après l'arrêt du palier à 500 l/s).

Au cours de l'essai à 400 l/s, la turbidité est resté globalement stable ($1,5 \pm 0,4$ NTU) au cours des 7 premières heures de l'essai puis à augmenté subitement jusqu'à 2,2 NTU et a ensuite fluctué autour de cette valeur (à 0.4 NTU près) jusqu'au 30/09/05 2h40 TU. A partir de cette date, la turbidité à diminué pour atteindre la valeur de 1.1 NTU près de 3 heures après l'arrêt du pompage.

4.5. SUIVI DE L'HERAULT (HAUTEUR, DEBIT, CONDUCTIVITE ET TEMPERATURE

4.5.1. Suivi des hauteurs d'eau de l'Hérault

L'évolution temporelle des hauteurs d'eau de l'Hérault mesurées aux 3 sites de suivi est présentée sur l'illustration 21. Les hauteurs sont exprimées en mètres par rapport à chacun des repères de mesure (ceux-ci n'ont pas fait l'objet d'un nivellement). Elles ne peuvent donc être comparées entre elles que de manière relative.

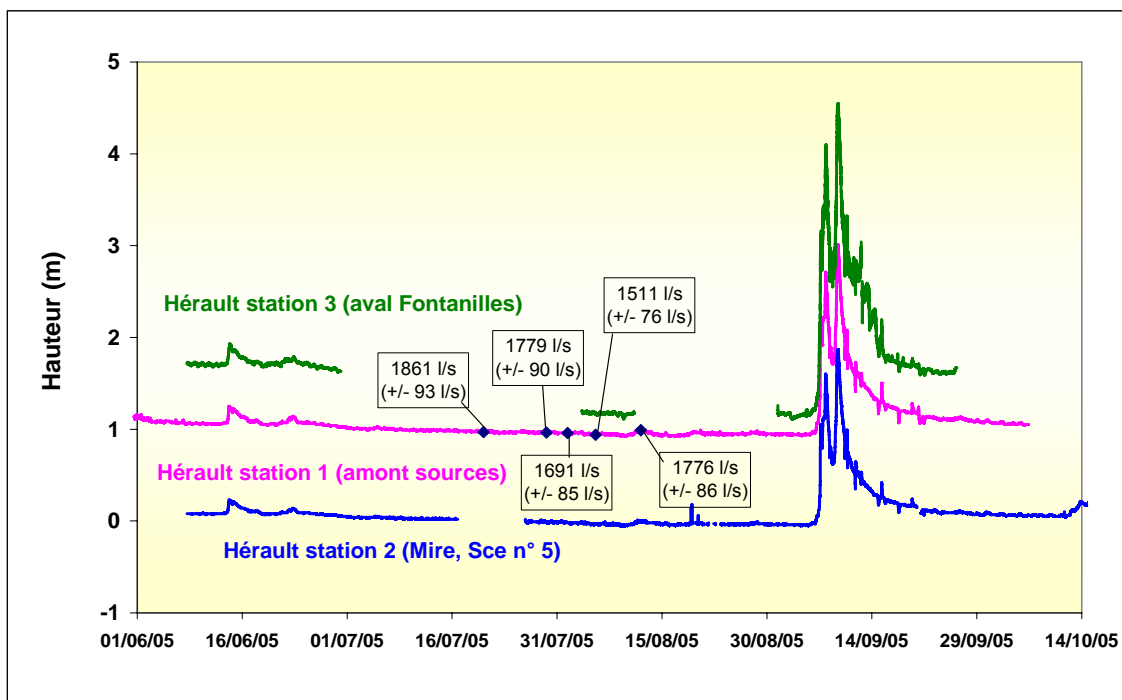


Illustration 21 : Evolution des niveaux d'eau de l'Hérault mesurés aux stations Héroult 1, Héroult 2 et Héroult 3 sur la période du 01/06/05 au 14/10/05. Report de jaugeages de l'Hérault effectués à proximité de la station n° 1

Les niveaux d'eau de l'Hérault aux sites 1 et 2 ont présenté une tendance à la diminution au cours des mois de juillet, août et début septembre (période du 01/07/05

au 05/09/09). Une évolution similaire a été enregistrée à la station 3, néanmoins les nombreuses lacunes de données ne permettent pas de détailler les évolutions enregistrées.

Aux sites Hérault 1 et 2, les niveaux d'eau ont baissé respectivement de 8 cm (± 1 cm) et 9 cm (± 1 cm) sur la période 01/07/05-05/09/05. Ces diminutions sont à mettre en relation directe avec la diminution naturelle du débit de l'Hérault au cours de cette période. Les jaugeages du débit du fleuve effectués au cours de cette période permettent de vérifier cette interprétation (cf. § 4.5.2).

Sur la période 01/07/05-05/09/05, seul l'arrêt programmé de pompage du 02/09/05 peut être mis à profit pour étudier l'effet sur le fleuve, en aval des sources, d'un arrêt total des écoulements aux Cent Fonts. Les résultats sont présentés sur l'illustration 22.

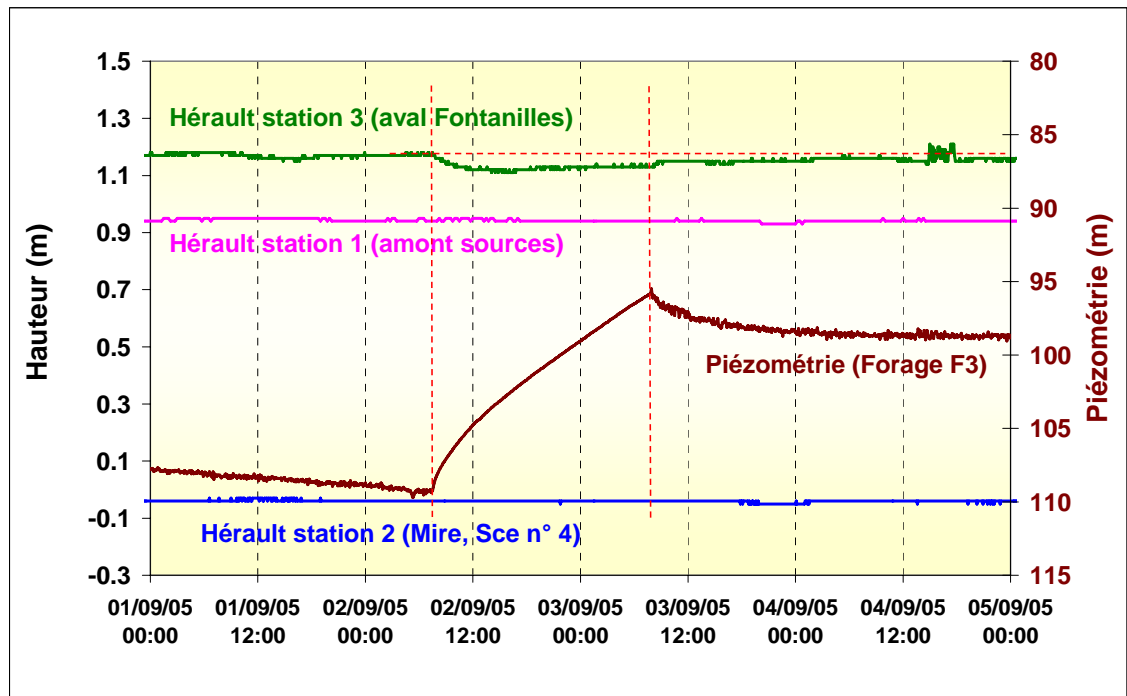


Illustration 22 : Evolution des niveaux d'eau de l'Hérault mesurés aux stations Hérault 1, Hérault 2 et Hérault 3 avant, pendant et après l'arrêt programmé de pompage du 02/09/05 (01/09/05-05/09/05)

Durant les 2-3 jours qui précèdent l'arrêt programmé du pompage de longue durée (le 02/09/05 à 07h20 TU), les niveaux d'eau de l'Hérault aux 3 sites suivis présentaient des valeurs stabilisées, respectivement de $0,94 \pm 0,01$ m (Hérault 1), $-0,04 \pm 0,01$ m (Hérault 2), et $1,17 \pm 0,01$ m (Hérault 3). La valeur négative du site Hérault 2 traduit seulement le fait que le niveau du fleuve se situait sous le « zéro » de la mire limnimétrique.

Au cours de l'arrêt du pompage à 400 l/s, qui s'est accompagné d'un arrêt des rejets aux conduites d'exhaure, et à la suite de la reprise du pompage le 03/09/05 à 07h45, le

niveau de l'Hérault n'a pas évolué sur les sites Hérault 1 et Hérault 2 : Hérault_1 = $0,94 \pm 0,01$ m ; Hérault_2 = $-0,04 \pm 0,01$ m.

Lors de l'arrêt du pompage le 02/09/05, le niveau de l'Hérault au site aval (Hérault 3) a commencé à évoluer avec un retard de 30 minutes. Le niveau a progressivement diminué jusqu'à atteindre la valeur de $1,12 \pm 0,01$ m (atteinte à partir du 02/09/05 10h15 TU, soit 2 heures et 55 minutes après l'arrêt). Le niveau du fleuve est resté à cette valeur ($1,13 \pm 0,01$ m) jusqu'au 03/09/05 08h30 TU, instant à partir duquel les niveaux ont commencé à augmenter, soit 45 minutes après la reprise du pompage à 300 l/s. Les niveaux d'eau se sont ensuite stabilisés autour de la valeur de $1,15 \pm 0,01$ m.

Les résultats permettent de montrer qu'en contexte de très basses eaux (débit du fleuve de l'ordre de 2000 l/s en aval de l'exhaure), une diminution de 400 l/s du débit du fleuve se traduit à l'aval (moins de 1 km) par une baisse du niveau d'eau de $5 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$. La diminution de 100 l/s (lorsqu'on passe de 400 l/s à 300 l/s) se traduit à l'aval par une baisse du niveau d'eau de $2 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$.

Ces résultats sont uniquement valables (1) pour la section considérée (site Hérault 3) et (2) pour le débit de l'Hérault lors de cet essai. Il est notable que la section de l'Hérault au niveau du site Hérault 3 est plus étroite que celles des sections des stations 1 et 2. Les variations de débit se traduisent ainsi par des variations de hauteur d'eau plus grandes qu'aux autres stations.

Lors des épisodes de crue de début septembre, les niveaux d'eau de l'Hérault ont fortement varié, de près de 2 m aux stations Hérault 1 et 2 et de près de 3,2 m à la station Hérault 3. L'amplitude des variations à la station Hérault 3 est plus importante en raison d'une part de l'apport des débits des sources des Fontanilles et des Cent Fonts ($4,5 \text{ m}^3/\text{s}$ et $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivement au pic de crue du 09/09/05) et également en raison du fait que la section de l'Hérault au niveau du site Hérault 3 est plus petite que celles des sections des stations 1 et 2.

4.5.2. Suivi des débits de l'Hérault

Cinq jaugeages différentiels ont été effectués entre le 20/07/05 et le 12/08/2005 au niveau des sections 1 et 3 de jaugeage reportées sur l'illustration 2 (respectivement à l'amont des émergences et à l'aval du rejet). A deux reprises, un jaugeage complémentaire a été effectué au niveau d'une section intermédiaire (section 2) située avant le rejet des eaux d'exhaure du pompage.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 27.

Le débit de l'Hérault à l'amont des émergences a varié entre 1861 l/s (± 93 l/s) et 1511 l/s (± 76 l/s) au cours de la période du 20/07/05 au 12/08/05. Sur cette même période, le débit à l'aval du rejet a varié entre 1927 l/s (± 96 l/s) et 2235 l/s (± 76 l/s). La différence entre le débit à l'amont et à l'aval est sensiblement égale (aux incertitudes de mesure près) à la valeur du débit pompé le jour de la mesure. Les jaugeages différentiels effectués ne sont pas suffisamment précis pour permettre de quantifier le

débit des pertes de l'Hérault qui alimentent le karst des Cent Fonts lors des pompages d'essai, les incertitudes de mesure étant nettement supérieures au débit de ces pertes.

Date	Remarques	Q pompé production (l/s)	Section 1	Section 2	Section 3	Q sources (l/s)	Q pompé calculé (l/s)
			Q Hérault amont sources (l/s)	Q Hérault avant rejet (l/s)	Q Hérault aval rejet (l/s)		
20/07/2005	état initial	0	1861 ± 93	---	2123 ± 106	262 ± 26	---
29/07/2005	pallier 500 l/s	500	1779 ± 90	---	2234 ± 112	0	464 ± 47
01/08/2005	longue durée	403	1691 ± 85	1858 ± 93	2038 ± 102	0	346 ± 35
05/08/2005	longue durée	398	1511 ± 76	1478 ± 74	1927 ± 96	0	416 ± 42
12/08/2005	longue durée	399	1776 ± 89	---	2235 ± 112	0	460 ± 46

$$Q_{\text{pompé calculé}} = (Q_{\text{Hérault amont}} - Q_{\text{Hérault aval rejet}})$$

Tableau 27 : Jaugeages ponctuels de l'Hérault effectués au cours des pompages d'essai

Une courbe de tarage (Illustration 23) a pu être établie pour le site amont. Elle permet d'estimer le débit du fleuve à l'amont à partir des données de hauteur d'eau enregistrées à la station Hérault 1. L'extrapolation de la courbe de tarage permet une estimation du débit amont lorsque les hauteurs d'eau mesurées sont supérieures à 1,5 m. Les débits estimés lorsque la hauteur d'eau est comprise entre 1,5 m et 3 m sont entachés d'une incertitude de 30 %. L'extrapolation a ses limites ; les débits de crues importantes sont ainsi entachés d'une forte incertitude. Au-delà de 3 m, la courbe de tarage n'a plus de validité. Les valeurs utilisées pour les conditions de l'essai sont situées dans la partie des hauteurs d'eau inférieures à 1,5m.

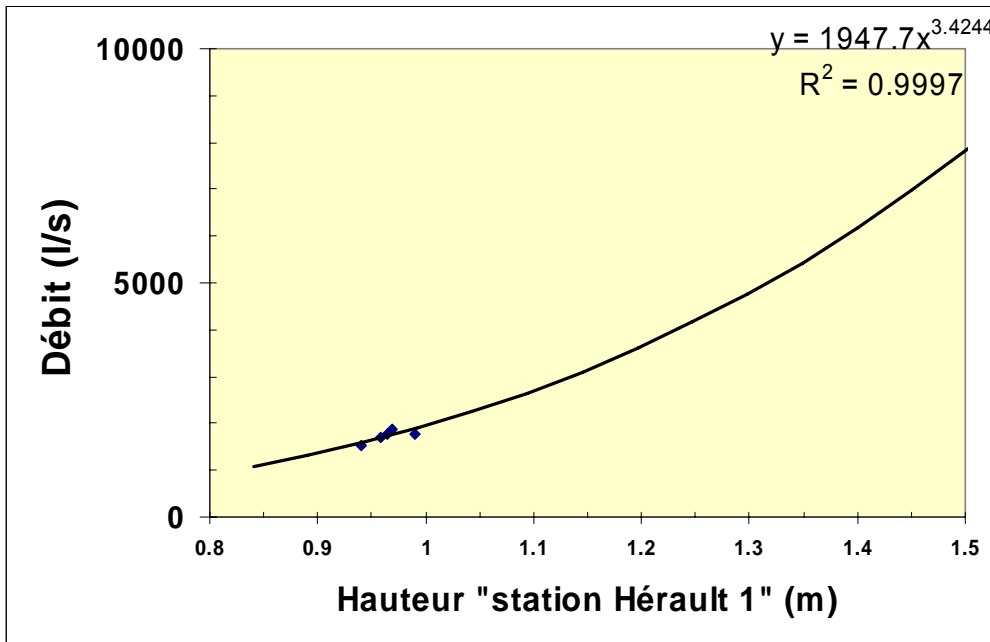


Illustration 23 : Courbe de tarage de la station Hérault 1

L'évolution des débits de l'Hérault sur la période du 01/06/05 au 15/10/05 déterminée au moyen de cette courbe de tarage est présentée sur l'illustration 24.

Le débit du fleuve Hérault à l'amont des Cent Fonts (station Hérault 1) a évolué entre 1690 l/s et 1570 l/s entre le 01/08/05 et le 05/09/05, les valeurs minimale et maximale mesurées sur cette période étant respectivement de 1460 l/s (18/08/05) et 1880 l/s (12/08/05). L'augmentation du débit observée aux alentours du 10 août correspond bien à une période perturbée (orages).

Lors des crues de septembre, le débit maximal estimé au site Hérault 1 (amont de la source des Cent Fonts) est de 80 m³/s. Les données déduites de cette courbe de tarage seront comparées aux données de débit disponibles mesurées au barrage du Moulin de Bertrand dans une phase ultérieure (rapport final du projet, fin mai 2006).

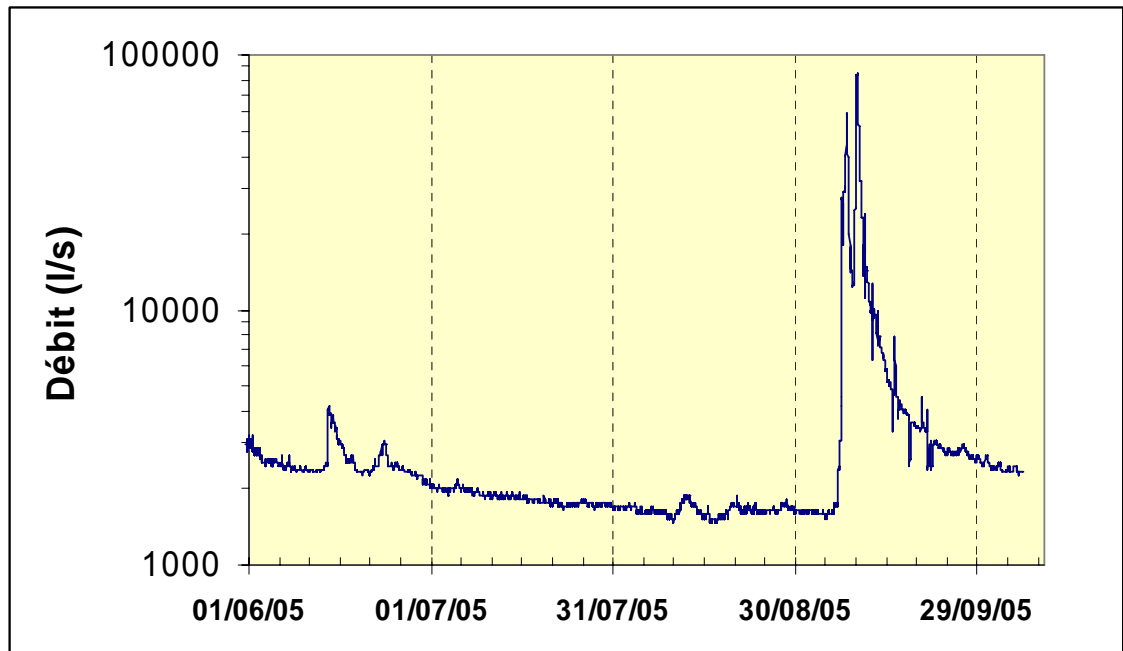


Illustration 24 : Débit du fleuve Hérault estimé à la station Hérault 1

Le site Hérault 2, qui a fait l'objet d'un nivellement, permet de calculer la cote NGF du niveau d'eau de l'Hérault, ce qui permet une comparaison avec le niveau piézométrique mesuré dans le drain, lui-même exprimé en cote NGF¹⁸ (Illustration 25).

Les infiltrations d'eau en provenance de l'Hérault ne peuvent se produire que lorsque la cote piézométrique dans le système karstique est inférieure à celle du plan d'eau de l'Hérault. Sur la base des résultats de la station Hérault 2, on constate que ces situations se sont produites à plusieurs reprises lors des pompages d'essai (Illustration 25 et Illustration 26). Le Tableau 28 permet de synthétiser les informations disponibles.

¹⁸ A la date de rédaction du rapport, seul l'ouvrage de la CGE est géoréférencé en altitude avec une précision suffisante (cote de la tête d'ouvrage : 104.64 ±0.01 m).

	Q pompage l/s	H Hérault > H Karst	date heure Début	tps écoulé (h, mn) depuis le début pompage	date heure fin	Durée (h,mn) H Hérault > H Karst
pallier 1_27/07/05	200	non	--	--	--	--
pallier 2_28/07/05	300	oui	28/07/05 09:10	02:35	28/07/05 12:25	03:15
pallier 3_29/07/05	500	oui	29/07/05 07:05	00:55	29/07/05 15:25	08:20
pallier 4_30/07/05	400	oui	30/07/05 07:35	01:15	30/07/05 14:35	07:00
LD_01/08/05	400	oui	01/08/05 08:20	01:20	07/09/05 02:40	882:20
pallier 5_20/09/05	300	non	--	--	--	--
pallier 6_21/09/05	500	oui	21/09/05 20:35	05:30	22/09/05 17:00	20:25
pallier 7_23/09/05	400	oui	23/09/05 21:05	14:05	29/09/05 20:50	143:45

Tableau 28 : Eléments d'information concernant les périodes au cours desquelles la cote de l'Hérault (NGF) est supérieure au niveau piézométrique au sein du karst (forage CGE)

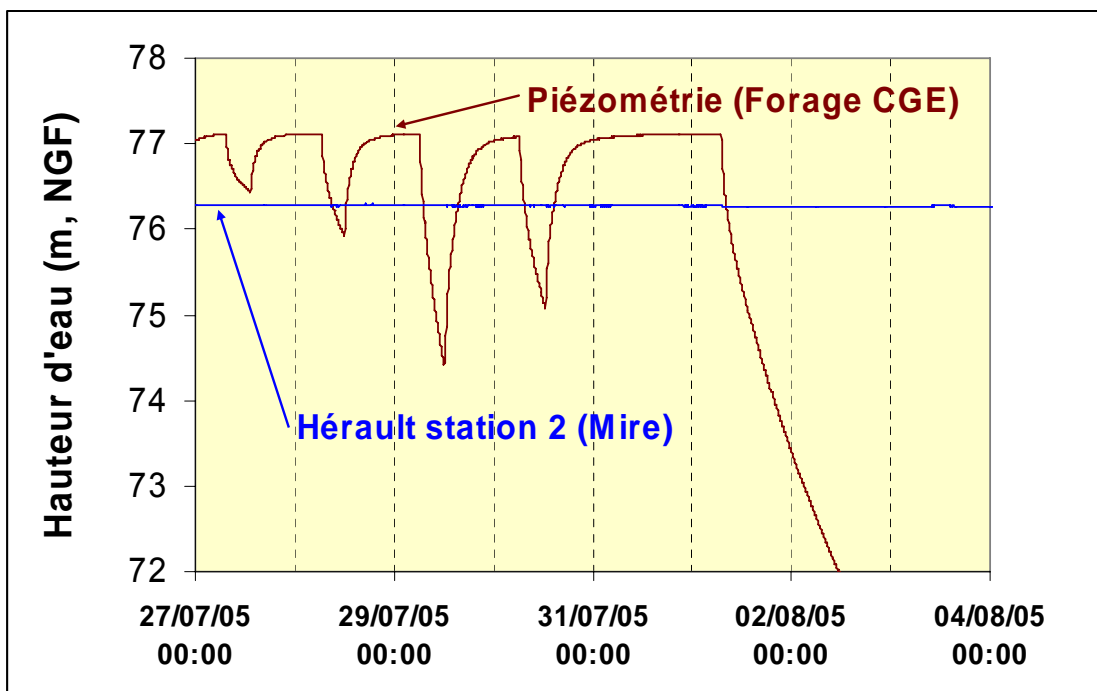


Illustration 25 : Evolution comparée des niveaux d'eau exprimés en cote NGF (Hérault et drain karstique au forage CGE) sur la période du 27/07/05 au 04/08/05

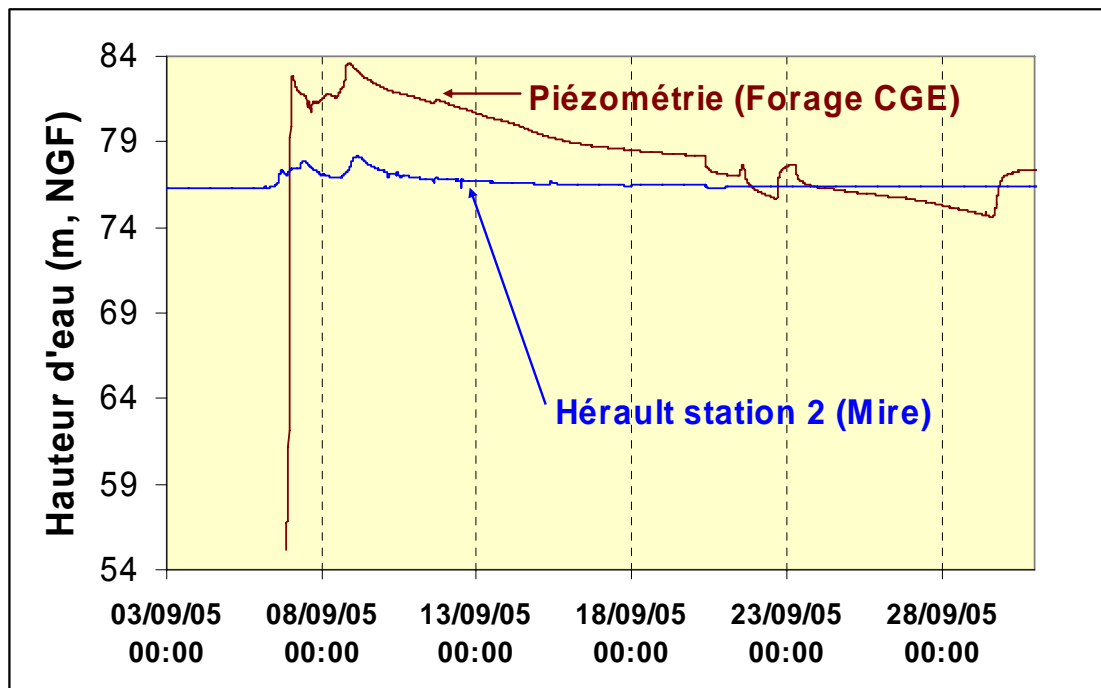


Illustration 26 : Evolution comparée des niveaux d'eau exprimés en cote NGF (Hérault et drain karstique au forage CGE) sur la période du 03/09/05 au 01/10/05

Lors de la crue du 06/09/05, on constate (Illustration 26) que le niveau de l'Hérault a commencé à monter (de 76,34 m NGF à 77,30 m NGF) alors que les sources ne s'étaient pas encore remises à couler (les émergences ont reculé le 06/09/05 vers 23h25 TU). La cote atteinte, 77,3 m NGF, au cours de la période qui précède la reprise d'écoulement aux sources est supérieure à la cote des sources observée le 01/08/05 (77,11 m NGF) avant le lancement de l'essai de longue durée. Dans ce contexte, on ne peut pas exclure qu'une infiltration d'eau de l'Hérault par les griffons se soit produite en début de crue de l'Hérault.

4.5.3. Suivi de la conductivité et de la température des eaux de l'Hérault

L'évolution temporelle de la conductivité des eaux de l'Hérault à l'amont des émergences (station Hérault 1) est présentée sur l'illustration 27.

Au cours des mois de juillet et août, la conductivité des eaux est restée globalement stable autour de 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ($2\sigma = 10 \mu\text{S}/\text{cm}$).

La conductivité des eaux de l'Hérault présente des variations journalières de l'ordre de 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ d'amplitude, l'amplitude maximale étant observée à 12h00 TU. Ces variations sont vraisemblablement à mettre en relation avec des variations de la minéralisation des eaux, elles même à mettre en rapport avec les variations journalières de la température de l'air et les processus physico-chimiques qui se produisent dans l'eau lorsque la température augmente. La minéralisation de l'eau

évolue en fonction de la concentration de CO₂ produit par l'activité végétale et la fermentation favorisant la dissolution du carbonate de calcium.

Lors de la crue du 06/09/05, la conductivité des eaux de l'Hérault a brutalement chuté, jusqu'à 300 µS/cm. A la fin du mois de septembre, la conductivité des eaux de l'Hérault a présenté des valeurs (370 µS/cm $2\sigma = 10 \mu\text{S/cm}$) supérieurs à celles mesurées en juillet et août 2005.

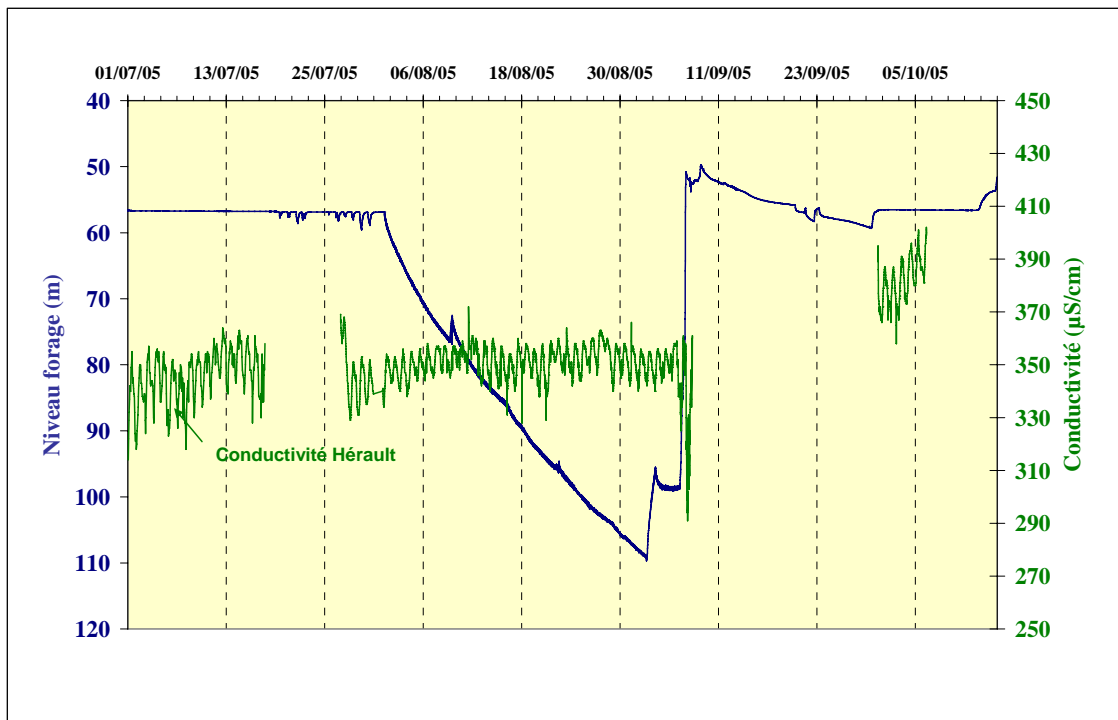


Illustration 27 : Evolution de la conductivité des eaux de l'Hérault (station Hérault 1) au cours de la période du 01/07/05 au 15/10/05. L'évolution des niveaux piézométriques dans le drain est également reportée

L'évolution temporelle de la température des eaux de l'Hérault à l'amont des émergences (station Hérault 1) est présentée sur l'illustration 28.

Les eaux de l'Hérault subissent les variations journalières de la température de l'air. L'évolution générale de la température de l'eau au cours du mois de juillet 2005 est la suivante. Les températures moyennes journalières sont comprises entre 22,9°C (le 10/07/05) et 27,3°C (le 29/07/05), les températures minimale et maximale sur la période sont respectivement de 21,6°C et 28,6°C. La température moyenne des eaux de l'Hérault au mois de juillet 2005 est de 25,2°C.

Les températures de l'eau au cours du mois d'août 2005 apparaissent globalement plus basses que celles du mois de juillet. Les températures moyennes journalières sont comprises entre 21°C (le 22/08/05) et 25,3°C (le 06/08/05), les températures minimale et maximale sur la période sont respectivement de 20,2°C et 26,3°C. La température

moyenne des eaux de l'Hérault au mois d'août 2005 est de 23,6°C. Par comparaison, les eaux du karst sont de l'ordre de 14°C.

Lors de la crue du 06/09/05, les températures de l'Hérault ont brutalement chuté, la température était de l'ordre de 16,4°C le 09/09/05. Lors de la seconde moitié du mois de septembre, la température moyenne journalière de l'Hérault a fluctué autour de 18,2°C ($2\sigma = 0,3^\circ\text{C}$).

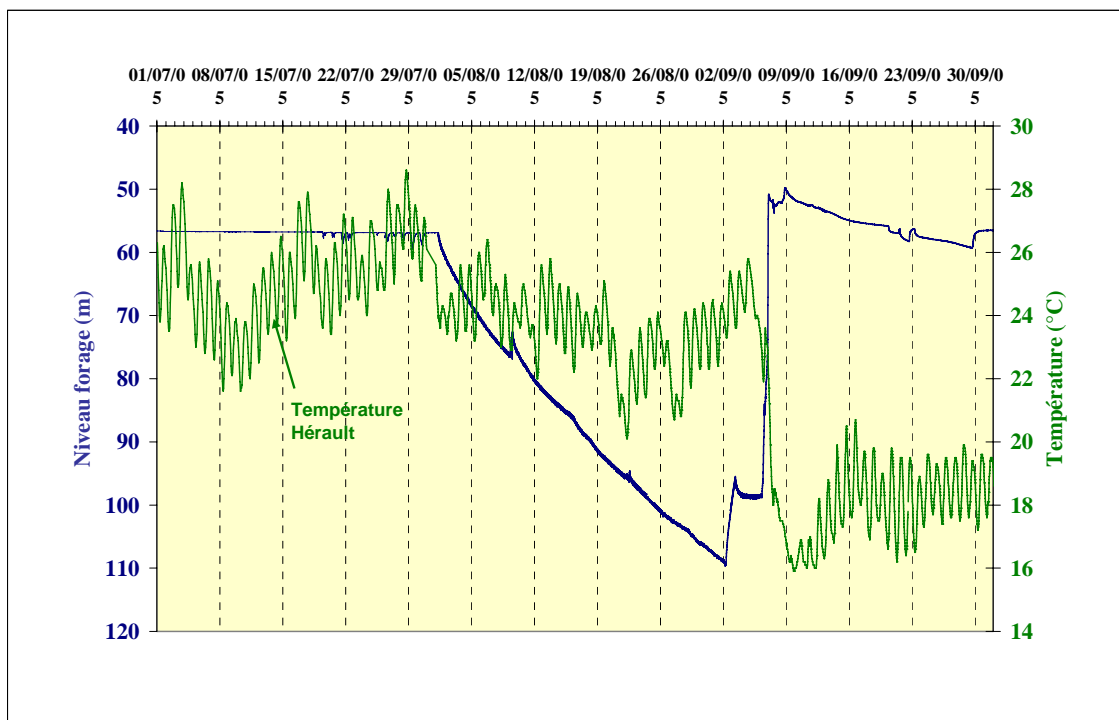


Illustration 28 : Evolution de la température des eaux de l'Hérault (station Hérault 1) au cours de la période du 01/07/05 au 15/10/05. L'évolution des niveaux piézométriques dans le drain est également reportée

4.6. SUIVI DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES AUX AUTRES POINTS D'EAU SOUTERRAINE

4.6.1. Suivi des hauteurs d'eau et des débits de la source des Fontanilles

L'évolution temporelle des hauteurs d'eau de la source des Fontanilles est présentée Illustration 29. Les hauteurs d'eau de la source des Fontanilles ne sont pas affectées par les pompages aux Cent Fonts. La décroissance observée en juillet et août 2005 est naturelle et traduit la lente vidange des réserves de ce système karstique. Sur la période considérée (avant les crues de septembre), les débits évoluent de 20 l/s à près de 10 l/s en fin d'été (Illustration 30).

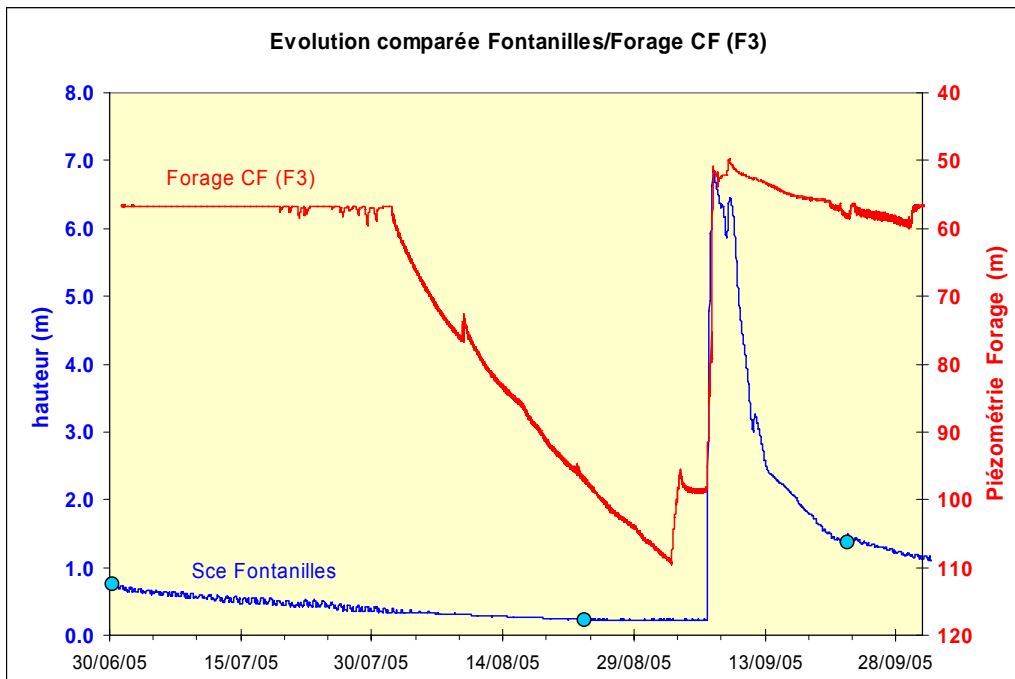


Illustration 29 : Evolution des hauteurs d'eau à la source des Fontanilles sur la période du 30/06/05 au 01/10/05. L'évolution des niveaux piézométriques dans le drain des Cent Fonts est également reportée

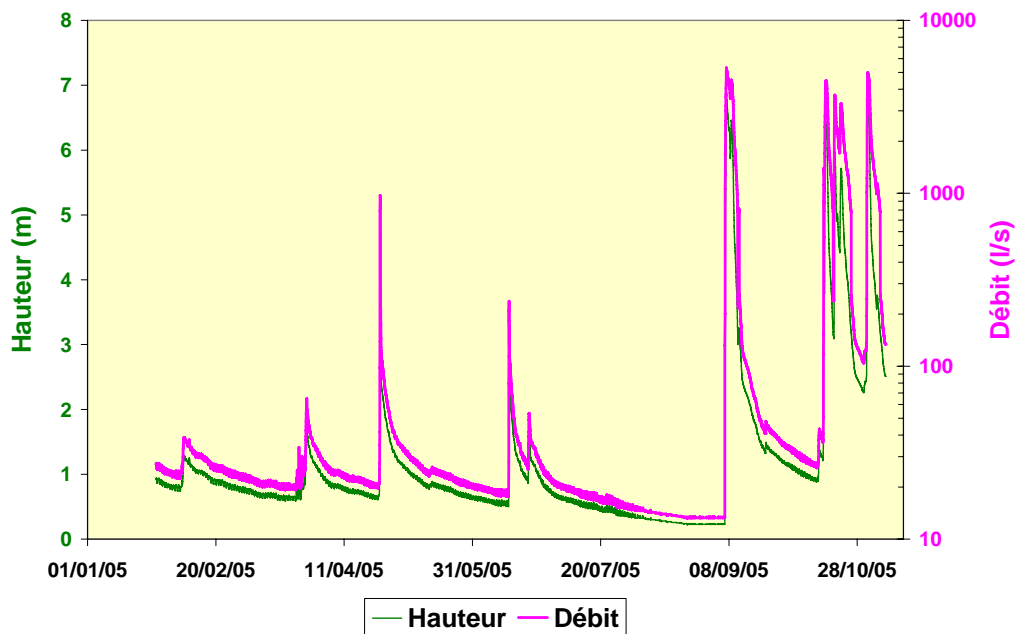


Illustration 30 : Evolution des hauteurs d'eau et des débits de la source des Fontanilles sur la période du 29/01/05 au 08/11/05

4.6.2. Suivi des niveaux piézométriques au forage AEP du Mas d'Embougette

L'évolution temporelle des niveaux piézométriques au forage du Mas d'Embougette est présentée sur l'illustration 31. Sur la période concomitante de suivi (jusqu'au 23/08/05), les niveaux piézométriques au forage d'Embougette présentent une très faible décroissance naturelle. Les variations d'amplitude de 20 cm en moyenne sont dues au prélèvement d'eau effectué par le dispositif de pompage qui équipe ce forage.

Les niveaux piézométriques au forage AEP du Mas d'Embougette ne sont pas affectés par les pompages qui se sont déroulés au forage des Cent Fonts.

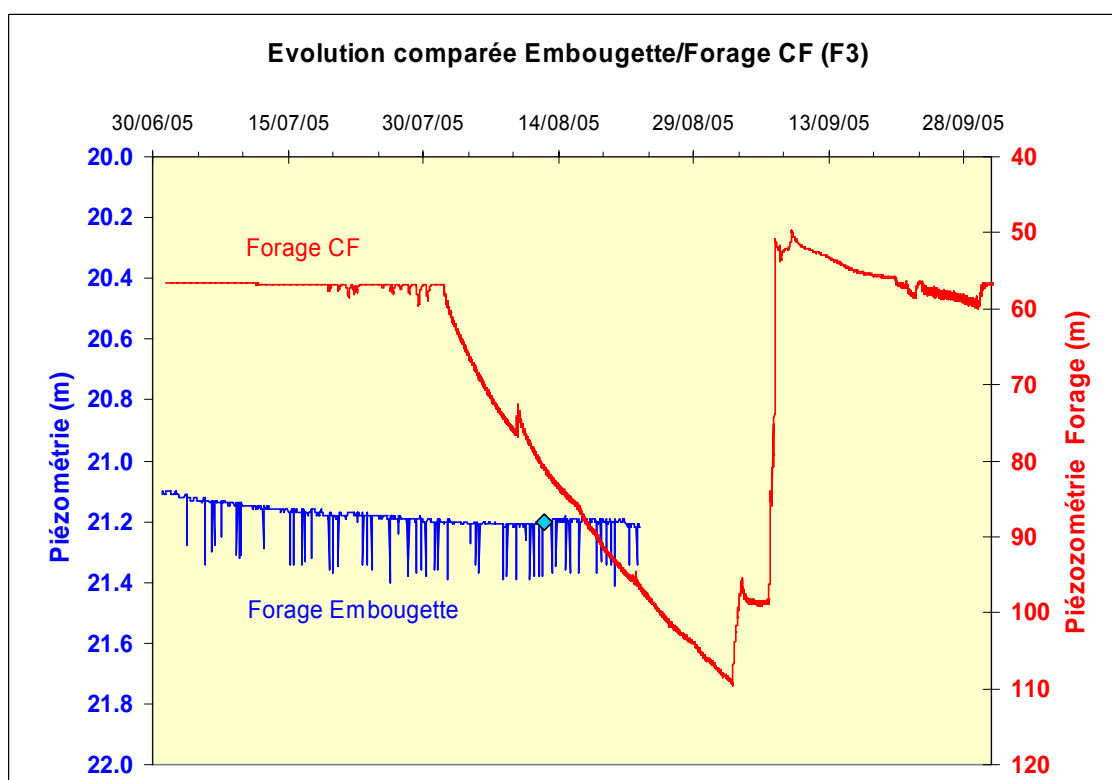


Illustration 31 : Evolution des niveaux piézométriques au forage d'Embougette sur la période du 30/06/05 au 23/08/05. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée

4.6.3. Suivi des niveaux piézométriques au forage AEP de St-André-de-Buèges

L'évolution temporelle des niveaux piézométriques au forage AEP de St-André-de-Buèges est présentée sur l'illustration 32. Le niveau d'eau présente une quasi absence de variation au cours de la période d'été qui précède crues de septembre. Les

variations d'amplitude de 5 cm en moyenne sont dues au prélèvement d'eau effectué par le dispositif de pompage qui équipe ce forage.

Le niveau piézométrique du forage AEP de St-André-de-Buèges n'est pas affecté par les pompages qui se sont déroulés au forage des Cent Fonts.

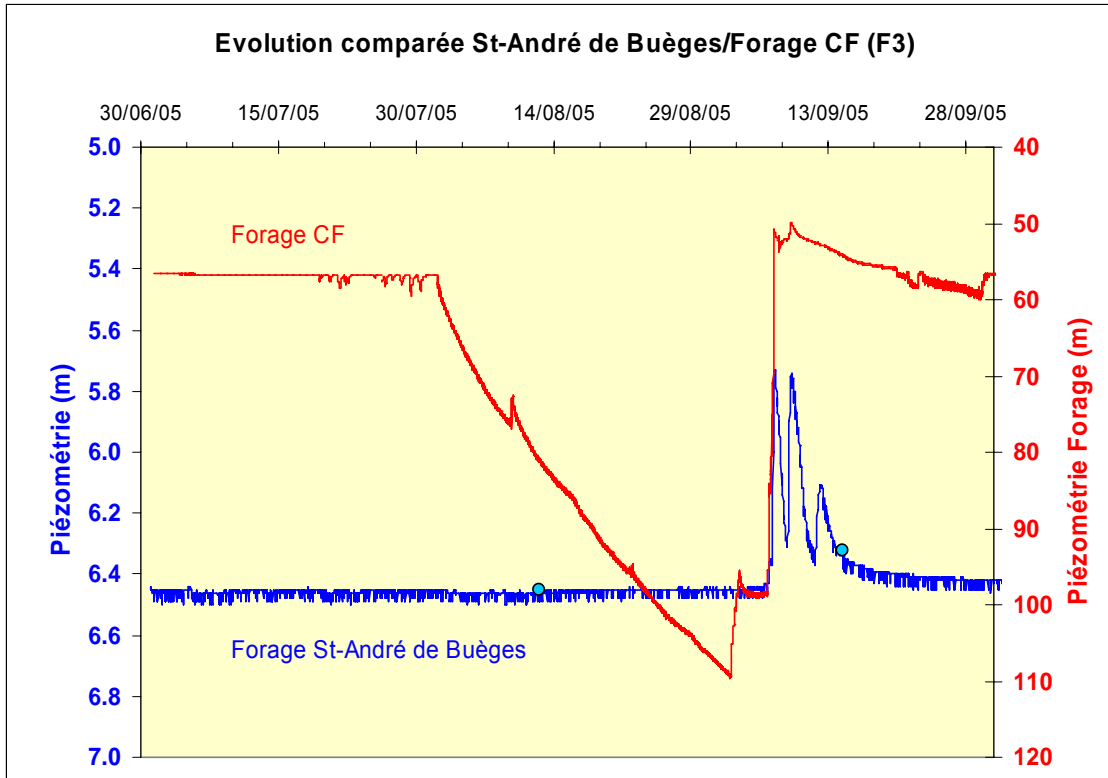


Illustration 32 : Evolution des niveaux piézométriques au forage AEP de St-André-de-Buèges sur la période du 30/06/05 au 01/10/05. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée

4.6.4. Suivi des niveaux piézométriques aux ouvrages situés dans le bassin d'alimentation du système karstique des Cent Fonts

Piézomètre P3

L'évolution temporelle des niveaux piézométriques au piézomètre P3 est présentée sur l'illustration 33.

Le taux de diminution de la piézométrie à l'ouvrage P3 est faible, de l'ordre de 4 cm/mois au cours de la période qui précèdent les pompages d'essai. Le taux de diminution de la piézométrie augmente vers le 04/08/05, soit 65 heures après le démarrage de l'essai de longue durée à 400 l/s. Du 04/08/05 au 05/09/05, la piézométrie évolue de 206,95 m à 207,08 m, à un rythme évalué à 13 cm/mois environ.

Lors des épisodes de crue de septembre 2005, la piézométrie de l'ouvrage augmente rapidement de plus de 3 m. La réponse du piézomètre apparaît synchrone de celle enregistrée au forage de pompage. Néanmoins, la remontée mesurée au forage de pompage suite au second arrêt programmé et au pompage à 300 l/s qui l'a suivi ne se traduit pas par une évolution piézométrique au forage P3.

Lors des phases d'essai par paliers de débit de fin septembre, la charge piézométrique au sein de l'ouvrage P3 est supérieure de 50 cm environ à celle mesurée au début du mois d'août (206,94 m début août contre 206,44 m le 20/09/05). Ce résultat illustre la différence de contexte hydrologique entre des essais de fin septembre et ceux de juillet-août.

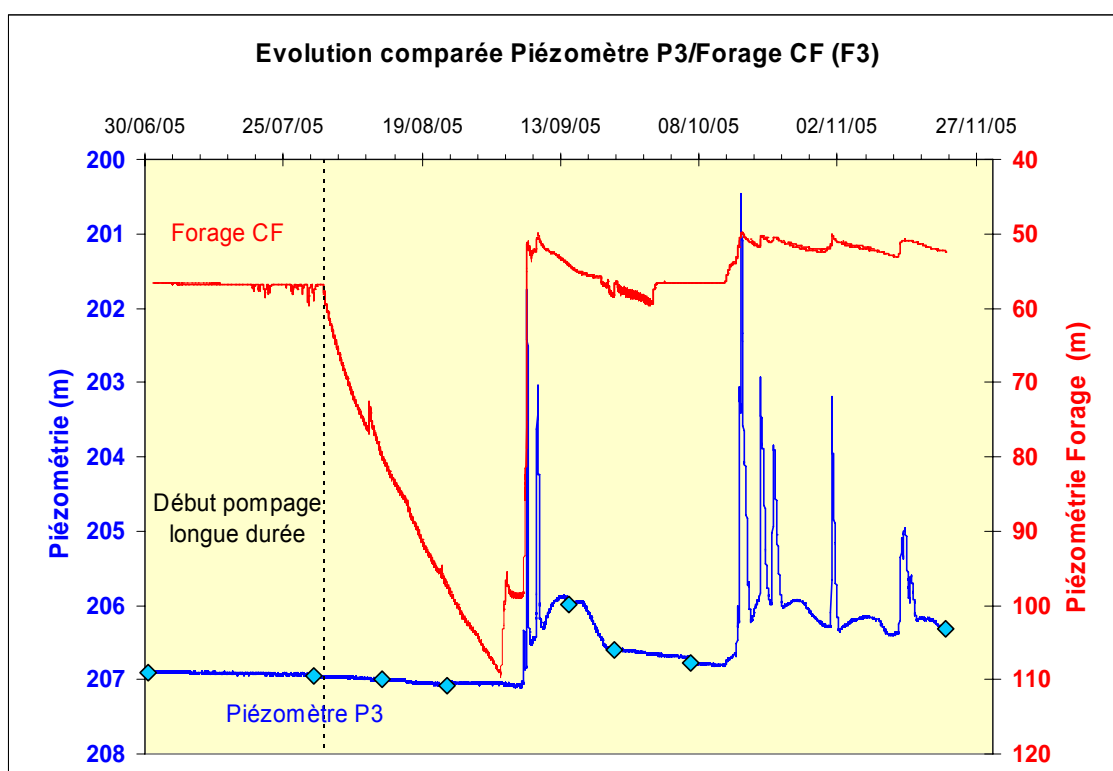


Illustration 33 : Evolution des niveaux piézométriques au piézomètre P3 sur la période du 30/06/05 au 21/11/05. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée

Le pompage effectué au forage des Cent Fonts influence peu les niveaux piézométriques de l'ouvrage P3.

b) Piézomètre P5

L'évolution temporelle des niveaux piézométriques au piézomètre P5 est présentée sur l'illustration 34.

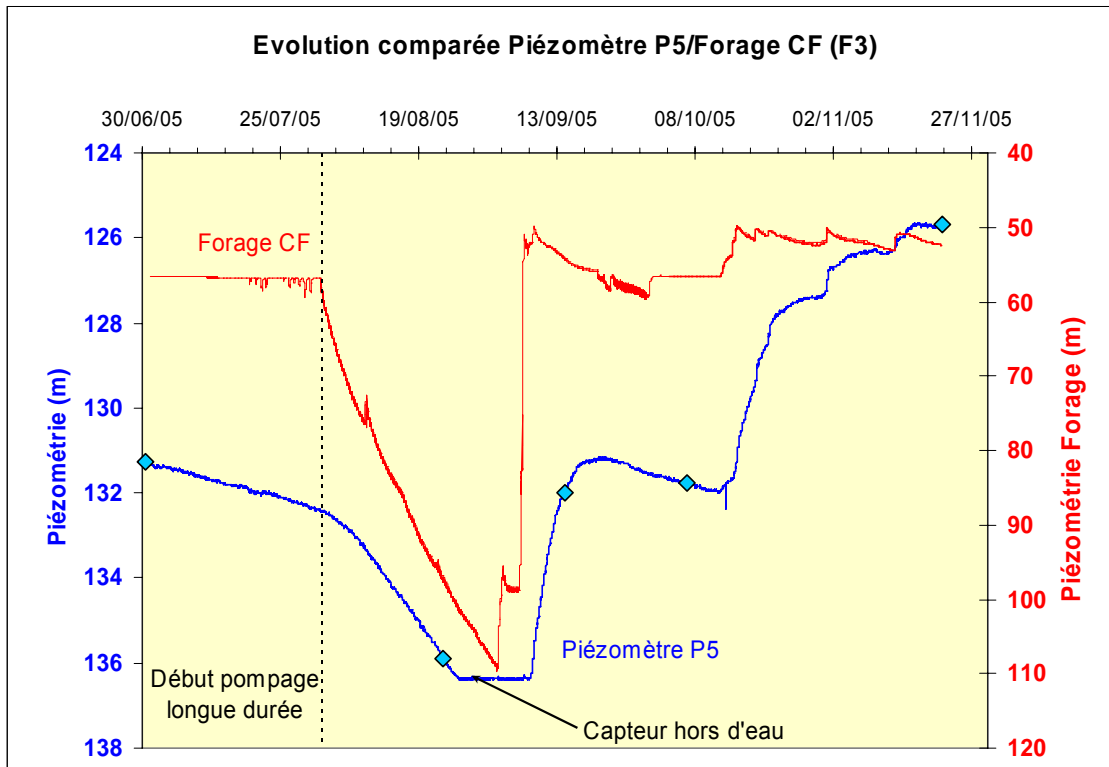


Illustration 34 : Evolution des niveaux piézométriques au piézomètre P5 sur la période du 30/06/05 au 21/11/05. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée

La baisse du niveau piézométrique est assez forte, de l'ordre de 108 cm/mois, au cours de la période qui précède les pompages d'essai. Cette baisse s'apparente à un coefficient de tarissement important, traduisant une bonne connexion du forage à un conduit karstique.

Ce taux de diminution augmente le 02/08/05 vers 12h00 TU, soit 29 heures après le démarrage de l'essai de longue durée à 400 l/s. Du 02/08/05 au 26/08/05 (date des dernières données disponibles du mois d'août pour cause de dénoyage du capteur), la piézométrie au P5 évolue de 132,5 m à 136,37 m, la baisse moyenne de la piézométrie sur cette période est d'environ 16 cm/jour (soit 4,8 m par mois).

Lors des épisodes de crue de septembre 2005, la piézométrie de l'ouvrage P5 semble avoir augmenté de manière non synchrone par rapport à la réponse enregistrée à l'ouvrage de pompage (F3). Le pic de piézométrie qui fait suite aux épisodes pluvio-orageux des 6 et 9 septembre se produit vers le 21/09/05, soit plus de 12 jours après le dernier épisode de crue de la source des Cent Fonts. Ce comportement indique que le piézomètre P5 est probablement situé à proximité d'un drain karstique au vu de son tarissement mais que ce dernier n'est pas bien connecté à un axe de recharge rapide.

Le niveau d'eau au sein de l'ouvrage P5 au début de la seconde phase d'essais par paliers de débit (131,18 m, le 20/09/05) est comparable à celui observé début juillet 2005 (131,33 m). Les épisodes pluvio-orageux de début septembre y ont donc largement permis de reconstituer les réserves sollicitées par les prélèvements d'eau liés au pompage.

Le pompage effectué au forage des Cent Fonts influence de manière notable la piézométrie de l'ouvrage P5.

c) Piézomètre P6

L'évolution temporelle des niveaux piézométriques au piézomètre P6 est présentée sur l'illustration 35.

De manière similaire à ce qui a été observé à l'ouvrage P5, la baisse de la piézométrie à l'ouvrage P6 est forte, de l'ordre de 280 cm/mois au cours de la période qui précèdent les pompages d'essai.

Ce taux de diminution de la piézométrie augmente le 03/08/05 vers 06h00 TU, soit 47 heures après le démarrage de l'essai de longue durée à 400 l/s. Du 02/08/05 au 15/08/05 04h00 TU, la piézométrie au P6 évolue de 143,15 m à 146,13 m, la baisse moyenne de la piézométrie sur cette période étant évaluée à 25 cm/jour environ (soit 7,5 m/mois).

A partir du 15/08/05, le niveau piézométrique n'évolue quasiment plus et reste stable (146,15 m environ) jusqu'au 29/08/05. Cet effet de seuil observé est probablement lié à l'existence d'un niveau bien karstifié et plus capacitif. Dans le détail, les niveaux piézométriques fluctuent légèrement au cours de cette période et montrent même une légère tendance à remonter, entre 146,2 (en début de période) et 146,0 m (le 26/08), le niveau étant voisin de 146,13 m le 28/08.

A compter du 29/08/05, la piézométrie diminue à nouveau avec une dynamique forte mais non linéaire jusqu'au 02/09/05 03h00 TU. A partir de cette date, le niveau d'eau retrouve, jusqu'au 06/09/05 7h00 TU, une dynamique de diminution linéaire de l'ordre de 25 cm/jour, similaire à celle observée en première période.

La remontée des niveaux piézométriques débute le 6/09/05 à 19h30 TU (niveau piézométrique le plus bas atteint : 148,44 m).

Au cours de la remontée, une stabilisation est de nouveau observée, du 9/09 21h30 au 11/09 16h TU, aux environs de 146,15 m, ce qui correspond à la même profondeur que précédemment observé, entre le 15/08/05 et le 29/08/05. De faibles fluctuations piézométriques (5 cm d'amplitude environ), à la limite de la précision du capteur, sont observées au cours de cette période (effets barométriques ou de marée ?).

Le niveau d'eau atteint ensuite, le 26/09/05, sa valeur maximale (139,69 m) de la période du 01/07/05 au 01/10/05.

De manière similaire à ce qui est observé à l'ouvrage P5, la piézométrie en P6 n'a pas augmenté de manière synchrone avec la réponse enregistrée à l'ouvrage de pompage (F3) lors des épisodes de crue de septembre 2005. Le pic de piézométrie qui fait suite aux épisodes pluvio-orageux des 6 et 9 septembre se produit vers le 26/09/05, soit plus de 18 jours après le dernier épisode de crue de la source des Cent Fonts. Là encore, ce comportement indique que le piézomètre P6 est probablement situé à proximité d'un drain karstique capacitif raccordé à un système annexe de drainage ; ce dernier point demande néanmoins à être étudié dans le détail.

Le pompage effectué au forage des Cent Fonts influence de manière notable la piézométrie de l'ouvrage P6

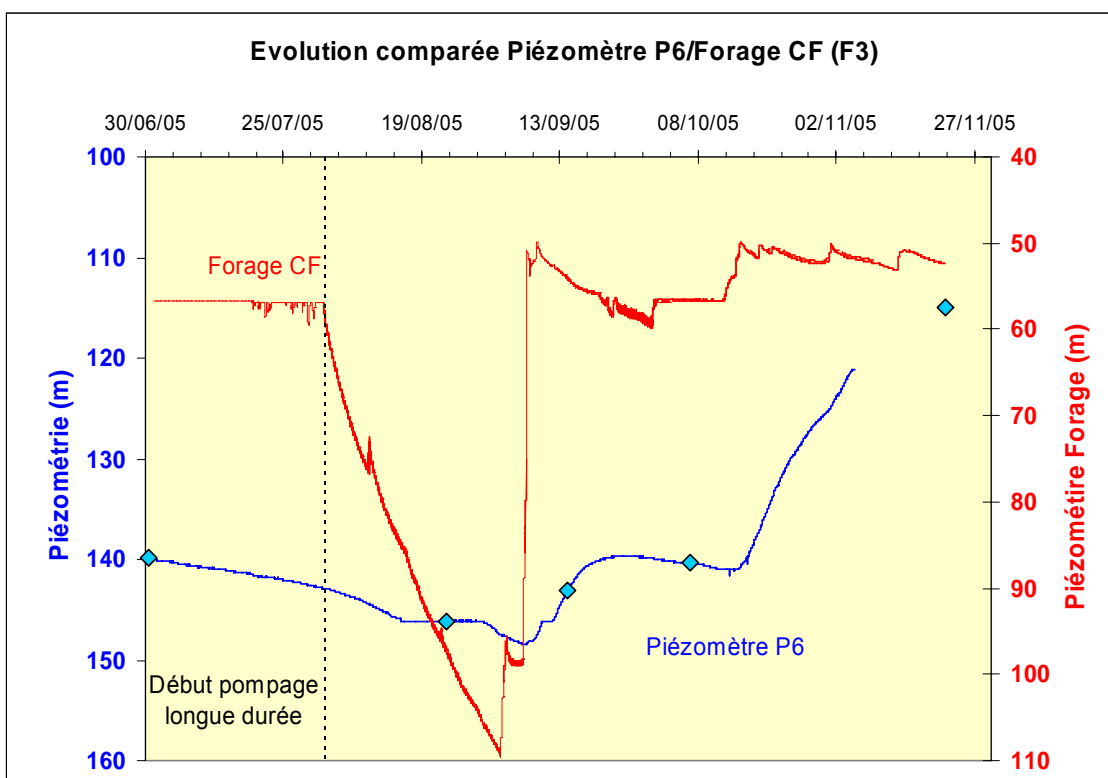


Illustration 35 : Evolution des niveaux piézométriques au piézomètre P6 sur la période du 30/06/05 au 21/11/05. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée

d) Piézomètre P7

L'évolution temporelle des niveaux piézométriques au piézomètre P7, qui se situe au niveau des pertes de la Buèges, est présentée sur l'illustration 36.

Au cours de la période qui précède les pompages d'essai, la baisse de la piézométrie à l'ouvrage P7 est de l'ordre de 8.5 cm/jour. Cette dynamique de diminution de la piézométrie présente une tendance à l'augmentation à partir 05/08/05, soit 89 heures

après le démarrage de l'essai de longue durée à 400 l/s. Du 05/08/05 au 05/09/05, la piézométrie au P7 évolue de 31,17 m à 36,28 m, la dynamique moyenne de diminution de la piézométrie sur cette période étant évaluée à 16 cm/jour environ. Ces évolutions ne montrent aucune corrélation évidente (Illustration 39) avec le débit de la Buèges en amont des pertes (et donc avec le débit des pertes), qui se stabilise à partir du 10/08.

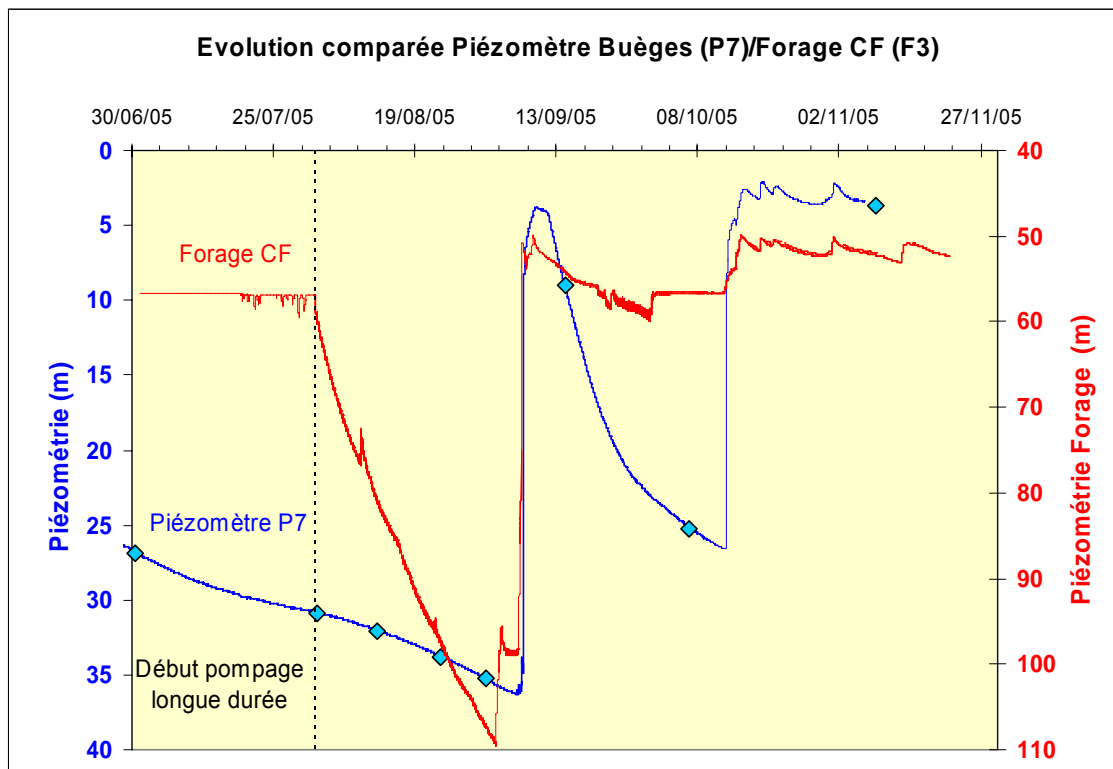


Illustration 36 : Evolution des niveaux piézométriques au piézomètre P7 sur la période du 30/06/05 au 21/11/05. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée

Lors de l'épisode de crue du 06/09/05, la piézométrie de l'ouvrage P7 a augmenté rapidement, avec un retard de 4 heures environ par rapport au niveau d'eau de la rivière en amont de la zone des pertes (seuil amont, St-Jean-de-Buèges ; Illustration 39). Un retard similaire de 4 heures est observé avec la réponse enregistrée au forage de pompage (F3). L'évolution observée suggère que l'ouvrage est situé dans des blocs poreux et/ou fissurés, se trouvant à proximité d'un drain karstique.

Le pompage effectué au forage des Cent Fonts influence faiblement les niveaux piézométriques de l'ouvrage P7

L'évolution de la température et de la conductivité des eaux de l'ouvrage P7 est présentée sur l'illustration 37.

Au cours de la période des pompages d'essai des mois de juillet, août et début septembre (27/07/05 au 06/09/05), la conductivité et la température des eaux n'ont pas

présenté d'évolution notable : $C = 385 \mu\text{S/cm}$ ($2\sigma = 3 \mu\text{S/cm}$) et $T = 12,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ($2\sigma = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$). Lors des périodes pluvio-orageux de début septembre, la température des eaux a augmenté (jusqu'à $13,7^\circ\text{C}$). La conductivité des eaux a également présenté une augmentation lors de ces épisodes de crue.

Les conditions de température et de conductivité des eaux du piézomètre P7 ont changé suite aux crues de septembre. Au cours de la seconde phase des essais par paliers de débit réalisés aux Cent Fonts, la conductivité et la température de l'eau n'ont pas présenté d'évolution notable : respectivement de $398 \mu\text{S/cm}$ ($2\sigma = 3 \mu\text{S/cm}$) et $12,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ($2\sigma = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$).

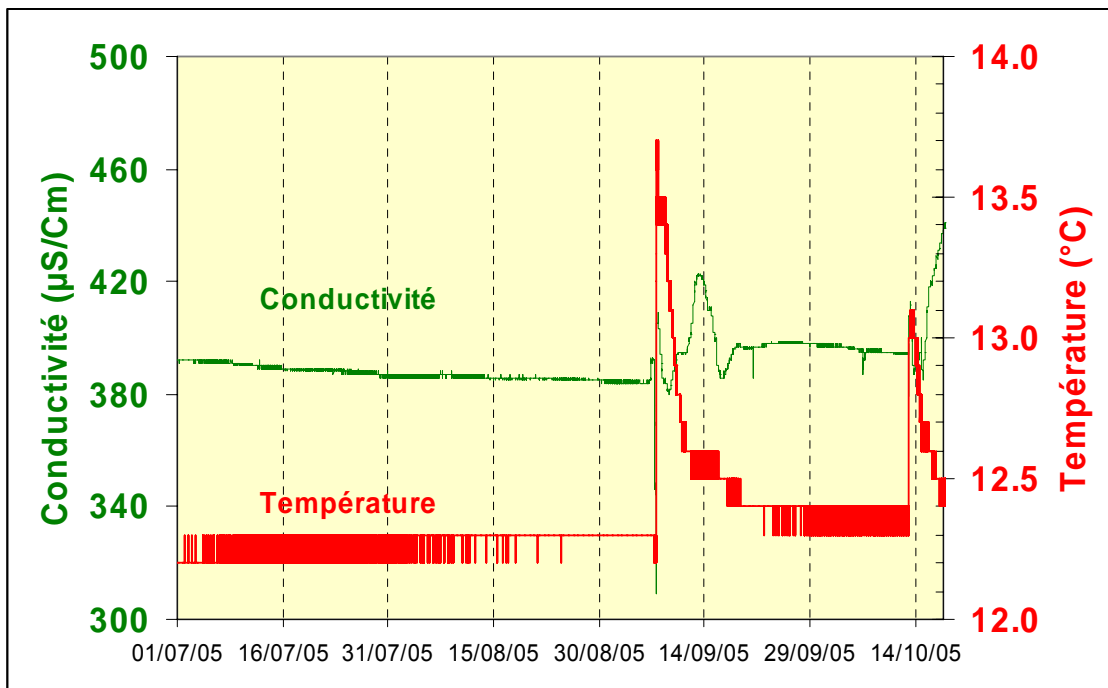


Illustration 37 : Evolution de la température et de la conductivité des eaux du piézomètre P7 sur la période du 01/06/05 au 18/10/05

4.7. SUIVI DE LA SOURCE DE LA BUEGES ET DES PERTES DE LA BUEGES

4.7.1. Suivi des niveaux d'eau de la source de la Buèges et de la rivière de la Buèges (en amont et en aval des pertes)

L'évolution temporelle des niveaux d'eau de la Buèges aux 3 sites suivis (source de la Buèges, rivière de la Buèges aux seuils amont et aval de la zone des pertes de la Buèges) est présentée sur l'illustration 38.

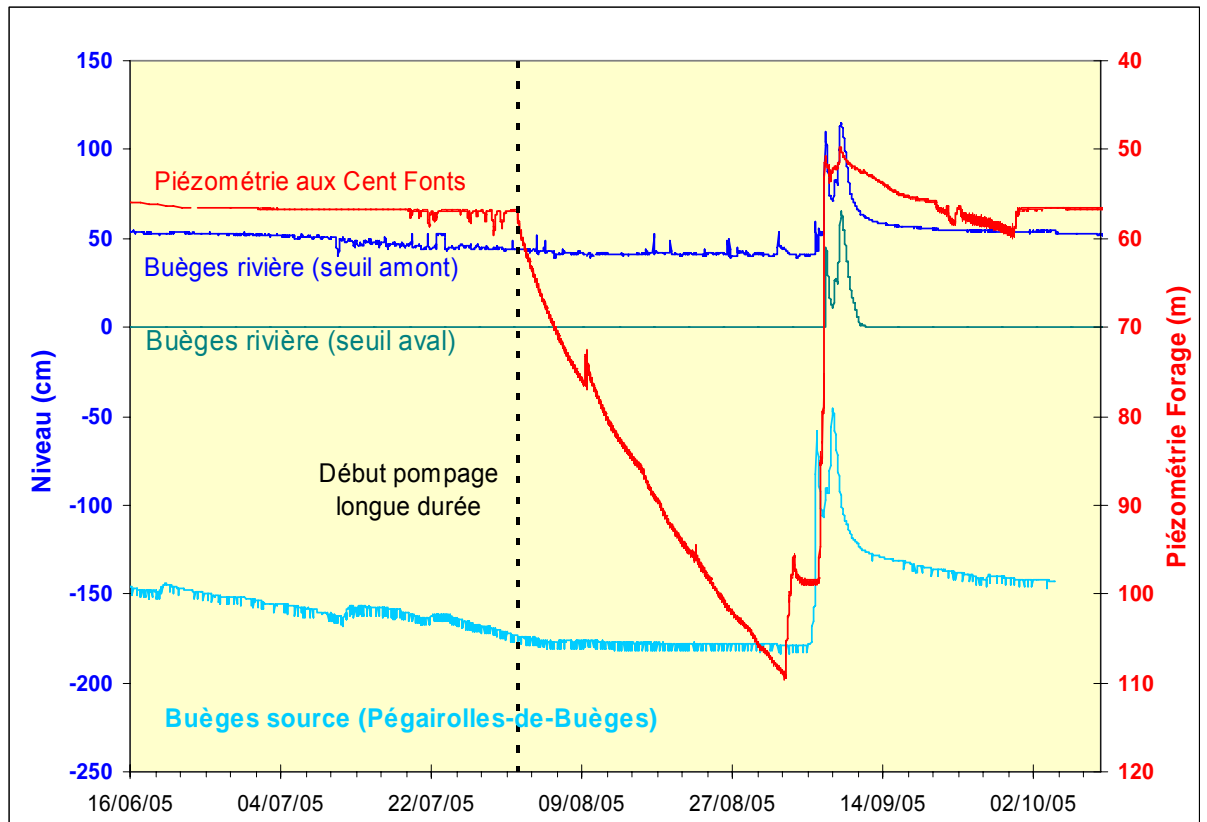


Illustration 38 : Evolution des niveaux de la source et de la rivière de la Buèges (seuils en amont et en aval de la zone des pertes) sur la période du 20/02/05 au 10/10/05. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée

Les variations de 5 cm d'amplitude (en moyenne) sur la chronique de la source de la Buèges sont dues aux prélèvements d'eau effectués par le dispositif de pompage qui équipe cette source pour l'AEP.

Au cours de la période qui précède les pompages d'essai aux Cent Fonts, la dynamique d'évolution de la piézométrie de la source de la Buèges présente différentes phases de diminution et d'augmentation. Du 21/06/05 au 11/07/05, le niveau d'eau diminue de -145 cm à -162 cm suivant une dynamique de l'ordre de -0,9 cm/jour. Du 11/07/05 au 14/07/05, le niveau d'eau augmente de -162 cm à -157 cm suivant une dynamique de l'ordre de +1,5 cm/jour. Du 14/07/05 au 18/07/05, le niveau d'eau demeure stable autour de -158 cm (compte tenu de l'incertitude du capteur ± 1 cm). Du 18/07/05 jusqu'au 22/07/05, le niveau d'eau diminue de 4 cm environ (de -158 cm à -162 cm), suivant une dynamique de l'ordre de -1,5 cm/jour. Du 22/07/05 au 23/07/05, le niveau reste stable puis diminue de nouveau du 23/07/05 au 05/08/05 (de -162 cm à -176 cm) suivant une dynamique de l'ordre de 1 cm/jour. A partir du 05/08/05 jusqu'au 05/09/05, la dynamique de diminution du niveau d'eau devient très faible : 0,07 cm/j environ (baisse de 2 cm ± 1 cm en 30 jours).

La dynamique d'évolution du niveau d'eau de la source de la Buèges semble uniquement refléter le fonctionnement du système karstique de la Buèges. En effet, la source de la Buèges n'est pas influencée par l'effet des pompages aux Cent Fonts car, si cela avait été le cas, la dynamique de baisse des niveaux d'eau aurait présenté une tendance à l'augmentation au cours du pompage de longue durée comme cela l'a été montré pour les piézomètres P3, P5, P6 et P7. Or, c'est l'inverse qui se produit à la source de la Buèges, avec un taux de baisse plus faible à partir du début du mois d'août.

L'évolution des niveaux d'eau de la source de la Buèges sera interprétée en détail dans le chapitre 5 du présent rapport sur la base des résultats acquis au cours des phases antérieures du projet et notamment à l'aide de l'analyse des courbes de récession des débits de la rivière de la Buèges (seuil amont).

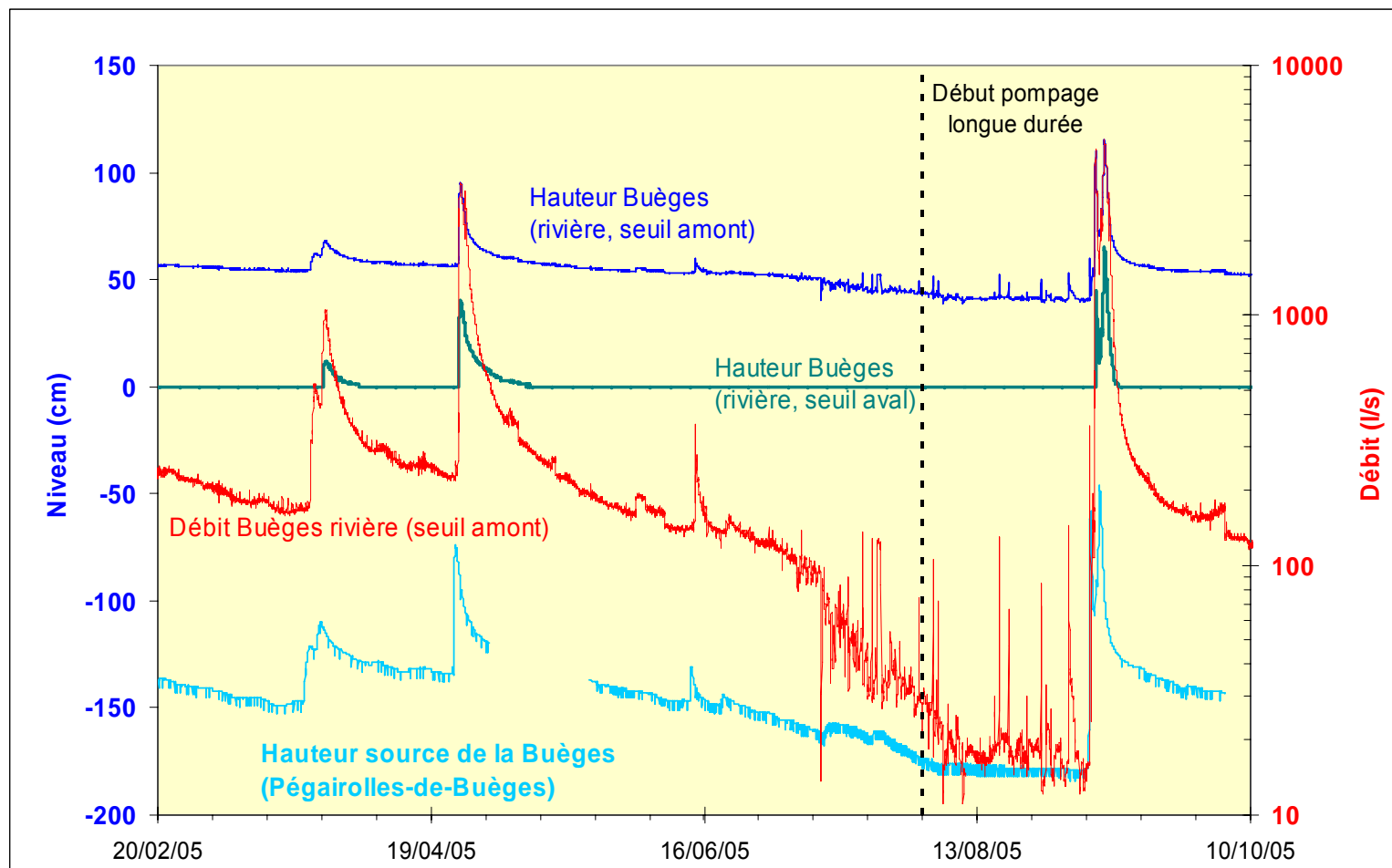


Illustration 39 : Evolution des niveaux de la source et de la rivière de la Buèges (seuils en amont et en aval de la zone des pertes) et du débit de la rivière de Buèges (seuil en amont de la zone des pertes) sur la période du 20/02/05 au 10/10/05

Les suivis réalisés sur la rivière de la Buèges en amont et en aval de la zone des pertes au cours de la période qui précède les crues de début septembre indiquent que les pertes de la rivière étaient totales entre le 01/07/05 et le 05/09/05 (aucun écoulement à l'aval ; Illustration 38 et Illustration 39). Lors des crues des 6 et 9 septembre, les pertes de la Buèges étaient partielles dans la mesure où un écoulement était observé à l'aval.

Lors de la phase d'essais par paliers de débit de la fin septembre (20 au 30/09/05), les pertes de la rivière de la Buèges étaient de nouveau totales.

4.7.2. Suivi des débits de la rivière de la Buèges (en amont et en aval des pertes) et des pertes de la Buèges

L'évolution temporelle des débits de la rivière de la Buèges (seuils amont et aval) ainsi que du débit des pertes de la Buèges est présentée sur l'Illustration 40.

Sur la période du 11/07/05 au 05/08/05 (Illustration 39 et Illustration 40), le débit de la Buèges au seuil amont a évolué de 80 l/s à 15 l/s. Du 05/08/05 au 05/09/05, le débit de la Buèges au seuil amont est resté stable autour de 15 l/s (± 5 l/s). Ces valeurs correspondent également au débit des pertes de la Buèges qui contribuent à alimenter le système karstique des Cent Fonts. Cette alimentation représente à cette période 6 % de l'écoulement naturel des Cent Fonts en étiage.

Au cours des épisodes pluvio-orageux de début septembre, les débits ont fortement augmenté. Le débit des pertes de la Buèges a atteint près de 4,5 m³/s lors des pics de crue des 6 et 09/09/05. La réponse des pertes de la Buèges lors des crues est quasi synchrone à la réponse observée aux Cent Fonts (Illustration 38). Le niveau d'eau aux Cent Fonts présente un retard de moins de 5 minutes (pas d'acquisition des enregistrements) par rapport au débit des pertes de la Buèges. Ce résultat montre à nouveau que l'écoulement des eaux entre la zone des pertes et la source des Cent Fonts se produit par l'intermédiaire de drain karstique en charge.

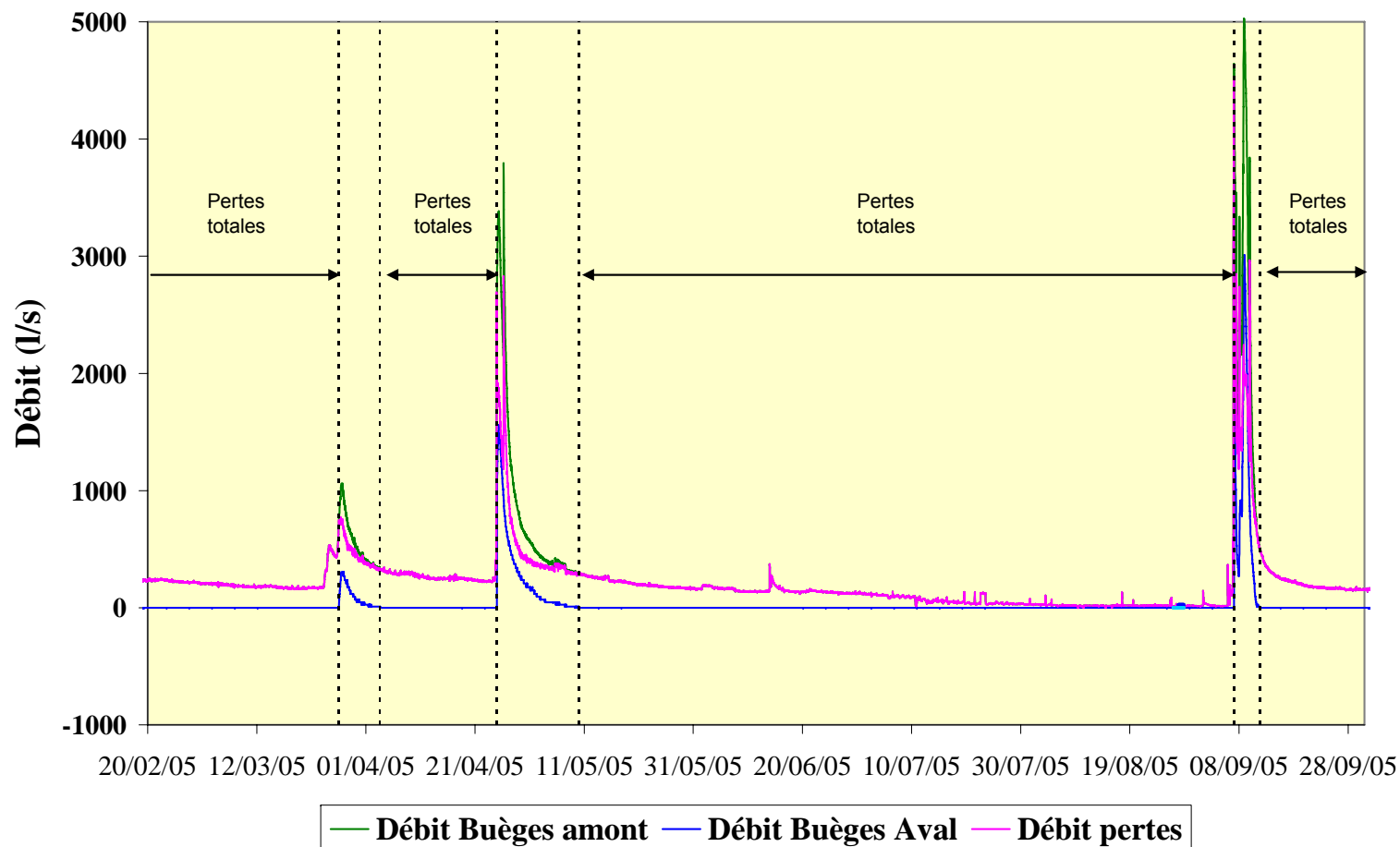


Illustration 40 : Evolution des débits de la rivière de la Buèges en amont et en aval de la zone de pertes sur la période du 20/02/05 au 15/10/05. Le débit des pertes de la Buèges est également présenté

4.7.3. Suivi de la conductivité et de la température de la rivière de la Buèges en amont de la zone des pertes

L'évolution temporelle de la conductivité de l'eau de la rivière de la Buèges (seuil amont) et de la conductivité de l'eau de l'ouvrage P7 situé dans la zone aval des pertes de la Buèges est présentée sur l'illustration 41.

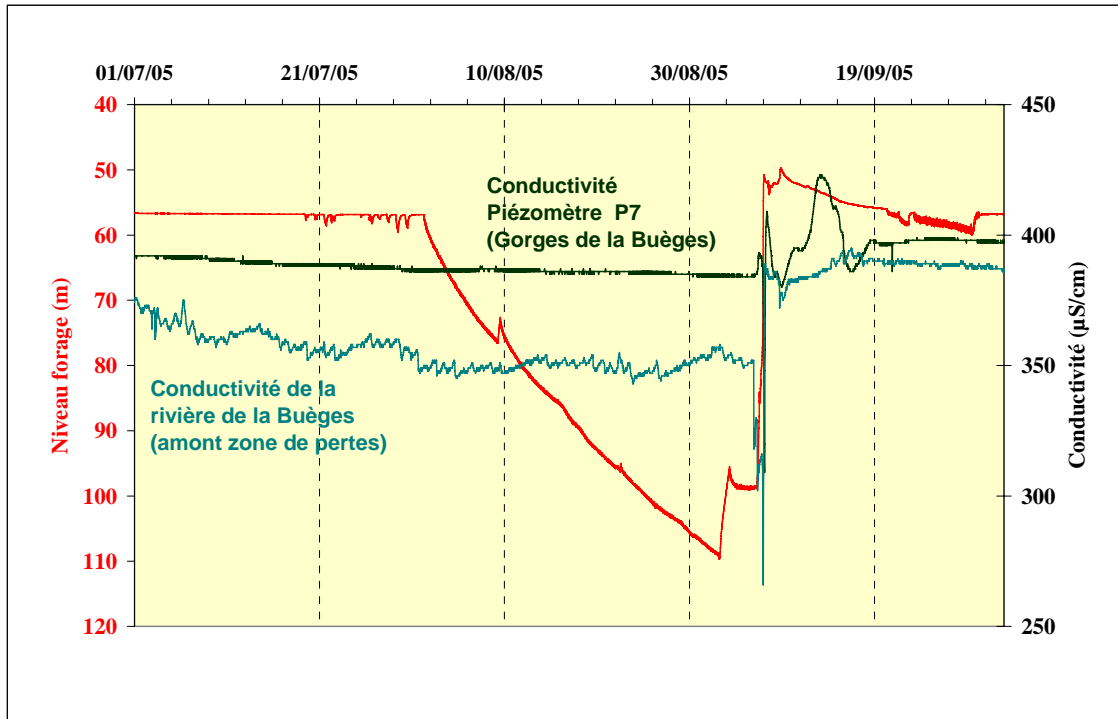


Illustration 41 : Evolution de la conductivité de l'eau de la rivière Buèges (seuil en amont des pertes) et de la conductivité de l'eau de l'ouvrage P7 (piézomètre des gorges de la Buèges) au cours de la période du 01/07/05 au 01/10/05. L'évolution du niveau piézométrique du drain des Cent Fonts est également présentée

Au cours de la période du 27/07/05 au 06/09/05, la conductivité des eaux de la rivière de la Buèges enregistrée en amont des pertes a présenté une légère tendance à la diminution entre le 01/07/05 et le 23/07/05 (de 374 à 354 $\mu\text{S}/\text{cm}$), puis a peu varié autour de cette valeur (à 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ près) jusqu'aux crues de septembre. Au cours de cette période (27/07/05 au 06/09/05), la conductivité de l'eau de l'ouvrage P7 est plus forte (de l'ordre de 385 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

L'évolution temporelle de la température de l'eau de la rivière de la Buèges (seuil amont) ainsi que la température de l'eau de l'ouvrage P7 situé dans la zone aval des pertes de la Buèges est présentée sur l'illustration 42.

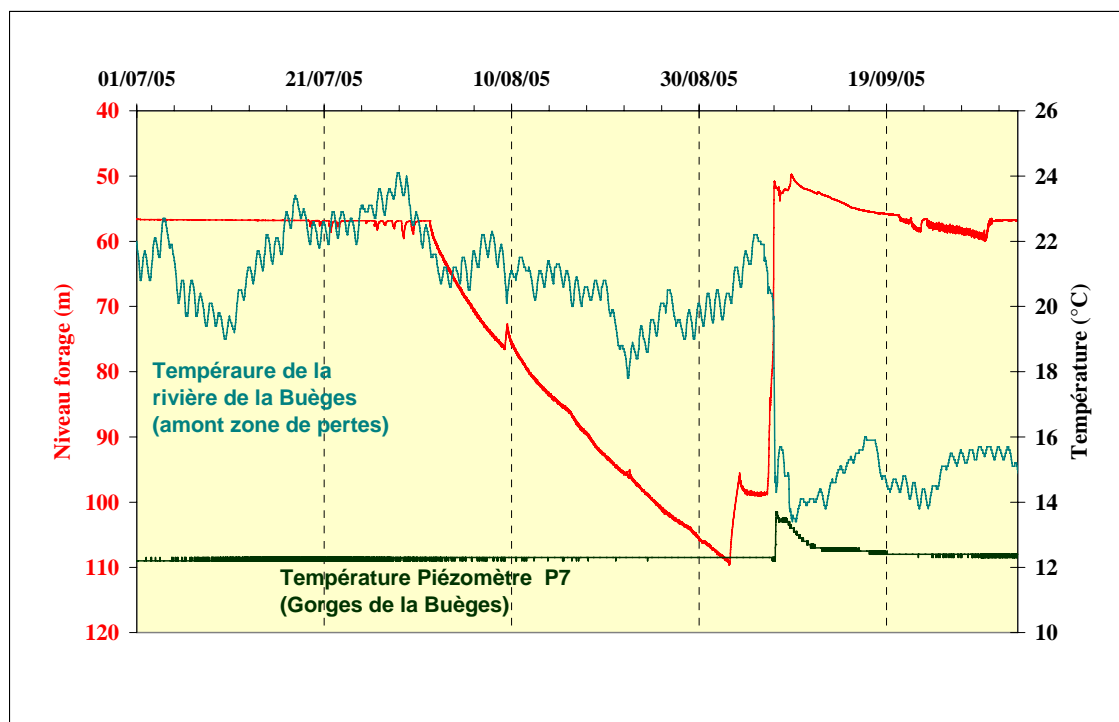


Illustration 42 : Evolution de la température de l'eau de la rivière Buèges (seuil amont) et de la température de l'eau de l'ouvrage P7 (piézomètre des gorges de la Buèges en aval des pertes) au cours de la période du 01/07/05 au 01/10/05. L'évolution du niveau piézométrique au drain des Cent Fonts est également présentée

Au cours de la période du 27/07/05 au 06/09/05, la température des eaux de la rivière de la Buèges enregistrée en amont des pertes a évolué entre 17,9°C (valeur minimale) et 24,1°C (valeur maximale). La température de l'eau de la rivière de la Buèges présente des variations journalières qui sont à mettre en relation avec les fluctuations journalières de la température de l'air. La température moyenne des eaux de la rivière de la Buèges sur la période est de 21,1°C, contre 12,3°C pour l'eau du piézomètre P7 située à l'aval des pertes de la Buèges, valeur proche de celle de l'équilibre thermique avec la température des formations géologiques encaissantes. Les paramètres physico-chimiques (conductivité électrique et température) ne permettent pas de mettre en évidence une relation directe entre les eaux de la rivière de la Buèges et le piézomètre P7 sur la période d'observation

4.8. SUIVI DES PRECIPITATIONS

Le Tableau 29 présente les hauteurs de pluie relevées aux stations Météo France d'Aniane, de St-Martin-de-Londres et de St-Maurice-de-Navacelle (Bourg) sur la période du 01/06/09 au 30/09/05. Seules les données des jours pluvieux sur la période sont mentionnées. Les informations du pluviomètre situé sur le bassin d'alimentation sont également présentées. La quantité de pluie précipitée sur l'impluvium karstique

des Cent Fonts, calculée à l'aide de la formulation présentée dans le paragraphe 3.5., est également reportée.

Sur la période des mois de juillet et août 2005, la quantité de pluie précipitée sur le bassin d'alimentation est très faible et est, en termes de maximum quotidien, de l'ordre de 13 mm, le 09/08/05. Les précipitations sont restés très nettement inférieures au seuil de pluie efficace de 50 mm au delà duquel, lors des périodes estivales, on peut observer une réponse du système karstique des Cent Fonts aux précipitations (Ladouche et al, 2002 ; 2004). L'absence de fluctuation des niveaux d'eau au sein du système karstique des Cent Fonts en atteste aussi.

A cours des épisodes pluvieux du début de mois de septembre 2005, le cumul de pluie précipitée sur l'impluvium des Cent Fonts est estimé à 180 mm environ.

Date Heure TU	Aniane Météo France	St_Martin de Londres Météo France	St_Maurice de Navacelle (Bourg) Météo France	Pluvio CF	Pluie estimée sur le Bassin d'Alimentation
	mm	mm	mm	mm	mm
12/06/2005 06:00	83.00	70.30	29.00	65.4	56.4
18/06/2005 06:00	10.00	0.00	0.00	0.0	3.0
20/06/2005 06:00	5.30	9.00	1.60	3.2	4.7
22/06/2005 06:00	0.00	0.00	0.00	3.4	0
27/06/2005 06:00	1.00	0.00	0.00	0.0	0.3
03/07/2005 06:00	1.0	1.2	6.0	--	3.2
05/07/2005 06:00	0	0	2	--	0.9
24/07/2005 06:00	0	2.6	0.2	--	0.8
09/08/2005 06:00	14.0	7.5	14.7	--	12.5
10/08/2005 06:00	0.4	0.6	1.0	--	0.7
16/08/2005 06:00	0	0	2	--	0.9
20/08/2005 06:00	0	0	3.2	--	1.4
26/08/2005 06:00	5.0	3.8	4.0	--	4.2
04/09/2005 06:00	3.4	2.4	2.5	--	2.7
05/09/2005 06:00	30	28.8	27	--	28.4
06/09/2005 06:00	95	147.2	91.3	--	107.5
07/09/2005 06:00	29	9.4	29.3	--	23.8
08/09/2005 06:00	5	30.2	22.3	--	19.2
09/09/2005 06:00	0	0.2	0.3	--	0.2
10/09/2005 06:00	0.6	1.0	2.5	--	1.5
11/09/2005 06:00	1.5	9.8	1.5	--	3.7
12/09/2005 06:00	0	0.2	0	--	0.1
14/09/2005 06:00	0	0.2	0	0	0.1
25/09/2005 06:00	1.1	0	2	2.2	1.2

-- : pluviomètre défectueux.

Tableau 29 : Précipitations sur le secteur d'étude au cours de la période du 01/06/05 au 30/09/05

4.9. SUIVI HYDROGEOCHIMIQUE DES EAUX PRELEVEES (HERAULT, SOURCE ET PIQUAGE DES CENT FONTS, BUEGES)

Les résultats des analyses chimiques effectuées sur les échantillons sélectionnés (cf. § 3.2.4 ; 3.3.1, 3.3.2) sont présentés en Annexe 5.

Les eaux prélevées aux Cent Fonts (source) avant le début des pompages d'essai se distinguent nettement des eaux prélevées dans l'Hérault. Les concentrations en bicarbonate (HCO_3), calcium (Ca), sulfate (SO_4), silice (SiO_2), nitrate (NO_3), bromure (Br) néodime (Nd), yttrium (Y) des eaux des Cent Fonts sont très supérieures aux valeurs mesurées dans l'Hérault. Les eaux de l'Hérault présentent quant à elles des concentrations supérieures en chlorure (Cl), sodium (Na), potassium (K), strontium (Sr), baryum (Ba), Bore (B), Europium (Eu) en comparaison avec les eaux prélevées à la source de Cent Fonts et au piquage du forage F3 (CF). Le rapport isotopique du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) des eaux de l'Hérault est significativement plus élevé (0.709178 en moyenne) que celui mesuré à la source des Cent Fonts avant les essais (0.708293). Les concentrations en isotopes stables (^{18}O , ^2H) des eaux de l'Hérault ne se distinguent pas de celles des Cent Fonts.

Les différences de composition hydrochimique entre les eaux de l'Hérault et les eaux du karst (avant pompage) vont permettre d'évaluer les proportions de mélange entre ces deux composantes au cours du pompage. Les résultats des calculs sont présentés et discutés dans le chapitre 5.

4.10. SUIVI HYDROBIOLOGIQUE DE LA FAUNE CAVERNICOLE DES EAUX SOUTERRAINES KARSTIQUES : LA FAUNE STYGOBIE

4.10.1. Principaux résultats

Le premier bilan du suivi hydrobiologique correspond à un total de 37 échantillons. Pour l'exploitation de la phase de pompage et sauf problème particulier seul l'échantillon à 4 l/s sera analysé et exploité, ce qui porte à 24 le nombre de prélèvements à utiliser (Annexe 6).

Ces prélèvements sont en cours de dépouillement (Annexe 6). Selon le groupe taxonomique considéré, certains spécimens sont identifiés à l'espèce, mais aucun échantillon n'est actuellement analysé dans sa totalité. Il n'est donc pas possible de délivrer à ce jour des résultats précis, même partiels.

Par contre, quelques observations générales, ne faisant pas référence aux espèces, peuvent être énoncées :

- lors des pompages par paliers de débit, la densité d'organismes extraits du massif est extrêmement faible (moins de 1 individu/ m^3),
- au cours de ces mêmes pompages, on note la présence de quelques éléments faunistiques externes, comme le genre *Gammarus*, descripteur des communautés stygoxènes (espèces étrangères au milieu souterrain),

- dès le début des pompages de longue durée, on note l'apparition de nombreux crustacés stygoxènes (non souterrains) et de nombreuses larves d'insectes de surface. Ainsi, par exemple, le premier échantillon fournit, sur un débit d'exhaure de 60 l/s, et pour une durée de filtration de 23 heures, un total de 350 Cladocères (marqueurs d'eau de surface), et plus d'un millier de Cyclopoïdes stygoxènes. Cette tendance s'accroît au cours des pompages. Les larves d'insectes récoltées appartiennent aux groupes des Héétéoptères, Trichoptères, Ephéméroptères, Diptères Chironomidae et Odonates,
- dans l'état actuel d'analyse des échantillons, il semble que la dérive de faune stygobie occasionnée par la pompe est très faible,
- la présence d'une faune de crustacés stygoxènes est classique dans les systèmes karstiques binaires, c'est-à-dire alimentés par des pertes de rivière. En effet, les pertes introduisent en permanence la faune aquatique superficielle ainsi que les débris organiques nécessaires à leur survie dans le système karstique. Cette faune colonise le milieu souterrain pauvrement peuplé par comparaison avec le cours d'eau de surface. L'analyse détaillée des échantillons avant et après pompage permettra de déterminer si la présence de crustacés stygoxènes est liée à l'infiltration des eaux de la Buèges dans le système karstique ou aux infiltrations en provenance de l'Hérault.

5. Interprétation des données recueillies au cours des pompages d'essai

5.1. ELEMENTS GEOLOGIQUES

Une comparaison de la nature lithologique des sédiments recueillis au sein de la partie dénoyée du réseau karstique des Cent Fonts et dans le lit majeur de l'Hérault a été effectuée. L'objectif de cette comparaison est d'apporter des éléments concernant la mise en place de la karstification du système karstique des Cent Fonts.

Le Tableau 30 synthétise les informations relatives à l'origine des sédiments, ceux-ci étant rattachés aux formations litho-stratigraphiques connues régionalement.

L'analyse des différents échantillons en provenance du réseau karstique des Cent Fonts indique un très large spectre de galets ayant pour origine les différents karsts régionaux pyrénéo-alpins. Tous les principaux faciès karstiques connus depuis l'émersion de la région au Crétacé sont représentés. Par contre, toutes les formations rocheuses traversées par le fleuve Hérault ne sont pas présentes. On observe aussi une grande polygénie des faciès en termes de granulométrie et en termes de composition. Cette polygénie constitue une différence fondamentale avec les sédiments alluviaux de l'Hérault qui sont caractérisés par une plus grande monogénie en taille, voire en faciès.

Les principaux types de karsts représentés par les spectres à galets sont les suivants :

- « Karst à bauxites potentiels » de la fin du Crétacé inférieur, par la forte présence de minéraux lourds dans les sables. Une analyse de ces minéraux lourds pourrait donner des traces d'alumine,
- « Karst du Sidérolithique » d'âge Crétacé supérieur – Eocène, avec les si caractéristiques dragées de quartz ou albarons,
- « Karst de la surface fondamentale » du Miocène moyen, avec la très belle signature de galets de roches grenues et de schistes,
- « Karst (oligocène) tortonien », avec la signature d'un conglomérat polyphasé (calcaires, schistes, quartz) consolidé avec un ciment carbonaté (conglomérat ayant subi une émersion importante probablement messinienne),
- « Karst à galets de quartz à facettes » quaternaire d'origine éolienne et/ou glaciaire repris dans un alluvial.

Provenance échantillonnage	Granulométrie		
	> 10cm	1-10cm	< 1mm
Réseau karstique Cent Fonts – grotte	<p>Tortonien</p> <ul style="list-style-type: none"> - blocs de conglomérat alluvial cimenté (galets d'exsudats de quarts, de calcaire, de schistes, dans un ciment carbonaté), galets de carbonates et de roches diverses non cimentés (rare) <p>Miocène moyen</p> <ul style="list-style-type: none"> - galets de roches éruptives grenues (fréquents); peuvent aussi être quaternaires - galets de schistes (fréquents); peuvent aussi être quaternaires <p>Quaternaire</p> <ul style="list-style-type: none"> - Galets de quartz à facettes (éoliennes ou glaciaires) (rares) 	<p>Crétacé supérieur–Eocène</p> <ul style="list-style-type: none"> - Albarons de quartz blanc et de quartzite de couleur <p>Miocène moyen</p> <ul style="list-style-type: none"> - galets de roches éruptives grenues (fréquents); peuvent aussi être quaternaires - galets de schistes (fréquents); peuvent aussi être quaternaires <p>Alluvial miocène et/ou Quaternaire</p> <ul style="list-style-type: none"> - galets d'exsudats de quartz (très nombreux) <p>Alluvial tortonien et/ou Quaternaire</p> <ul style="list-style-type: none"> - galets de calcaire (nombreux) <p>Quaternaire</p> <ul style="list-style-type: none"> - galets de quartz à facettes (éoliennes ou glaciaires reprises dans l'alluvial) (fréquents) 	<p>Pt 658 Grotte</p> <p>Sable en partie dolomitique et en partie quartzeux; les graviers sont quartzeux. Le matériel est mal classé avec une granulométrie depuis des micro-galets jusqu'aux silts; les minéraux lourds sont fréquents (Hématite, éléments roulés et polis); absence de débris de lignite.</p> <p>Existence de nombreux grains de quartz à facettes, émoussés et parfois ronds. Le poli est très fort.</p> <p>=> sables dolomitiques du karst remaniant des sables éoliens quartzeux. L'âge des sables est essentiellement quaternaire.</p> <hr/> <p>Pt 659 Grotte</p> <p>Sables dolomitiques et graviers divers très mal classés avec grains de quartz présentant des formes anguleuses, non usés, et d'aspect peu luisant.</p> <p>Fraction fluviatile avec petits galets de calcaire et albarons (dragées de quartz). Sables éoliens avec grains de quartz très arrondis et dépolis. Minéraux lourds fréquents, essentiellement de l'oxyde de fer.</p> <p>=> sables dolomitiques karstiques et graviers divers fluviatiles remaniant des sables éoliens.</p>

Provenance échantillonnage	Granulométrie	
Lit majeur de l'Hérault	Galets de schistes très fuselés de 3 à 5 cm :	<1cm
	Nombreux	Sables et graviers quartzeux essentiellement. Pas de sables moyens et fins ni de silts.
	Galets de calcaires de 3 à 5 cm :	Pas de sables éoliens
	Nombreux	Pas de minéraux lourds ; la fraction est probablement trop grossière.
	Galets d'exsudats de quartz (2 à 3 cm) : rares	Sables grossiers et graviers fluviaux plutôt anguleux très mal classés
Galet de roche grenue (3cm) : Très rare	laiteux, jaunâtre ou colorés par des oxydes de fer	

Tableau 30 : Eléments d'information géologiques déduits de l'analyse des sédiments prélevés dans le réseau karstique des Cent Fonts et dans le lit du fleuve Hérault

Les sables et graviers intrakarstiques sont essentiellement des matériaux karstiques dolomitiques, correspondant au terme de « grèsou » des auteurs décrivant les sédiments quaternaires ; il s'agit de remaniements des sables éoliens, dont l'origine quaternaire ne fait aucun doute.

Les roches meubles en provenance du lit majeur de l'Hérault correspondent à un matériel fluvial simple, très calibré en taille granulométrique entre des sables grossiers, graviers et petits galets. Le spectre des éléments est très restreint autour de deux types d'éléments essentiellement : des galets de calcaires et de schistes. Le quartz n'intervient que dans la fraction la plus fine des sables et graviers.

Ainsi, on observe que le spectre granulométrique est beaucoup plus restreint dans l'Hérault (sables grossiers à petits galets) que dans le système karstique des Cent Fonts (sils, sables, graviers, jusqu'à des galets grossiers et même des conglomérats consolidés). De plus, la polygénie des éléments est beaucoup plus importante au niveau du karst des Cent Fonts que dans l'Hérault. Des sables dolomitiques à minéraux lourds, des sables éoliens, des quartz à facettes, des conglomérats polygéniques, des galets de roches grenues et des albarons sont présents uniquement aux Cent Fonts, alors qu'ils font défaut dans l'Hérault.

5.2. DEBIT DE LA SOURCE DES CENT FONTS

5.2.1. Statistiques descriptives des débits de la source des Cent Fonts

Les débits de la source des Cent Fonts sont suivis depuis le mois de juin 1997 (Schoen et al, 1999 ; Ladouche et al, 2002, 2004). Des éléments de statistiques descriptives établis sur la base des 2980 valeurs de débit moyen journalier mesurés¹⁹ depuis juin 1997 sont présentés dans le Tableau 31. L'analyse statistique a porté sur l'ensemble des données disponibles de la période juin 1997-juillet 2005 inclus (ligne « Tous ») et a été également réalisée individuellement pour chaque mois de l'année. Les valeurs minimales, maximales et moyennes sont reportées ainsi que le premier et troisième quartile et la médiane.

La médiane divise les données en deux ensembles égaux : il y a autant de valeurs qui lui sont inférieures que supérieures. Le premier quartile Q_1 permet de connaître la valeur du milieu du premier ensemble, dans lequel 25 % des valeurs sont inférieures à Q_1 et 75 % lui sont supérieures. Le premier quartile prend la notation Q_1 . Le troisième quartile Q_3 est la valeur du milieu du deuxième ensemble, dans lequel 75 % des valeurs sont inférieures à Q_3 et 25 % lui sont supérieures.

Pour le mois de juillet par exemple, le premier quartile prend la valeur de $0,296 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui signifie que le débit de la source est supérieur à $0,296 \text{ m}^3/\text{s}$ dans 75 % des cas (204 valeurs de débit journalier sur les 273 valeurs mesurées ont été supérieures à $0,296 \text{ m}^3/\text{s}$ au cours des 9 mois de juillet étudiés sur la période 1997-2005). Dans 25 % des cas, le débit de la source est inférieur à $0,296 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_1). Le débit minimum mesuré pour les mois de juillet est de $0,250 \text{ m}^3/\text{s}$ et a été observé en 2005. La valeur du troisième quartile est de $0,348 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_3) et la valeur médiane est de $0,315 \text{ m}^3/\text{s}$. L'écart interquartile, qui couvre 50 % d'un ensemble de données, indique que, dans 50 % des cas, le débit de la source des Cent Fonts en juillet est compris dans l'intervalle $[0,296 \text{ m}^3/\text{s} - 0,348 \text{ m}^3/\text{s}]$. En août, l'écart interquartile est de $[0,268 \text{ et } 0,305 \text{ m}^3/\text{s}]$.

¹⁹ **Débit moyen journalier** : Moyenne des débits mesurés sur une période de 24 heures et correspondant à une journée

	Nbr. de valeurs considérées	Débit (m3/s) Moyenne	Débit (m3/s) Minimum	Débit (m3/s) 1er quartile	Débit (m3/s) Médiane	Débit (m3/s) 3ème quartile	Débit (m3/s) Maximum	Asymétrie
Tous	2980	1.250	0.239	0.315	0.507	1.220	38.505	6.80
Janvier*	248	1.917	0.340	0.511	1.273	2.188	13.982	2.57
Février*	226	1.095	0.315	0.435	0.716	1.178	8.899	3.57
Mars*	248	1.203	0.282	0.337	0.671	1.322	7.327	2.24
Avril*	240	1.277	0.384	0.493	0.691	1.390	11.362	3.48
Mai*	248	1.372	0.322	0.552	0.754	1.423	8.899	2.57
Juin**	270	0.545	0.291	0.388	0.462	0.550	3.902	5.00
Juillet**	273	0.339	0.250	0.296	0.315	0.348	1.290	4.80
Août*	248	0.289	0.251	0.268	0.279	0.305	0.388	1.42
Septembre*	240	0.334	0.239	0.264	0.282	0.306	5.437	11.65
Octobre*	248	1.643	0.252	0.274	0.527	2.421	16.347	2.81
Novembre*	240	2.073	0.252	0.544	1.009	2.644	16.679	2.69
Décembre*	248	3.063	0.239	0.504	1.332	4.016	38.505#	4.39

valeur douteuse, surestimée

* valeurs des 8 mois considérés sur la période juin 1997- juillet 2005

** valeurs des 9 mois considérés sur la période juin 1997- juillet 2005

*Tableau 31 : Statistiques descriptives des débits de la source karstique des Cent Fonts.
L'analyse a notamment porté sur l'ensemble des valeurs journalières des mois considérés
(période étudiée : juin 1997 à juillet 2005)*

Les valeurs moyennes des débits journaliers sont globalement supérieures aux valeurs médianes, excepté pour les mois de juillet et août où les valeurs moyennes et médianes sont similaires. A la différence de la médiane, la moyenne arithmétique est fortement influencée par les valeurs extrêmes. Lorsque les valeurs sont distribuées de manière symétrique, la moyenne arithmétique coïncide avec la médiane. Dans le cas du système karstique des Cent Fonts, la distribution est asymétrique, ce qui se traduit par des valeurs moyennes qui sont supérieures aux valeurs médianes. Plus l'asymétrie est marquée (mois d'octobre, de novembre et de décembre par exemple), plus la différence est grande entre la moyenne et la médiane.

L'illustration 43 représente l'évolution temporelle du débit moyen journalier interannuel de la source des Cent Fonts calculé sur la base des données journalières de la période étudiée (1997-2005). Cette figure permet également de représenter de manière synthétique les évolutions des différents critères descriptifs au cours d'une année civile. Ont ainsi été reportés sur cette figure l'évolution des débits minimum, des quartiles (25 %, 50 %, 75 %) ainsi que les débits mesurés en 2005.

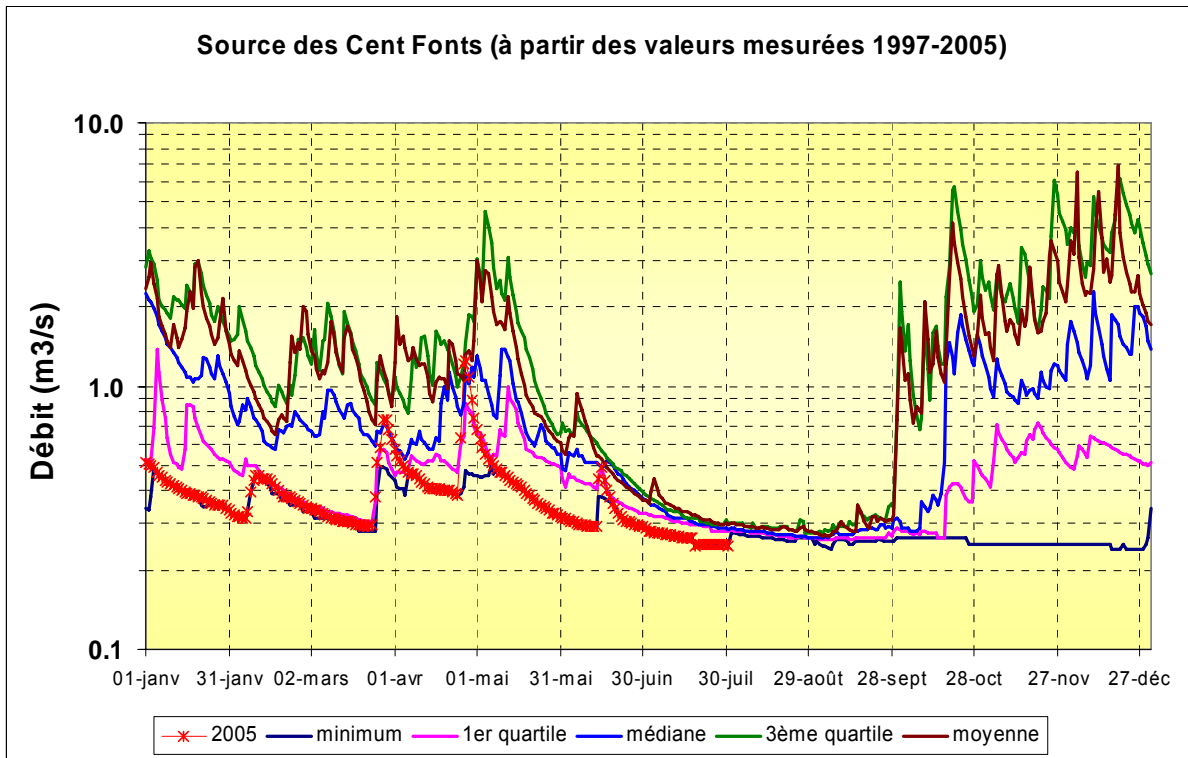


Illustration 43 : Evolution temporelle des paramètres statistiques (minimum, quartiles, médiane et moyenne) du débit interannuel journalier de la source des Cent Fonts calculé pour la période juin 1997-juillet 2005 inclus. Les débits mesurés en 2005 sont également reportés

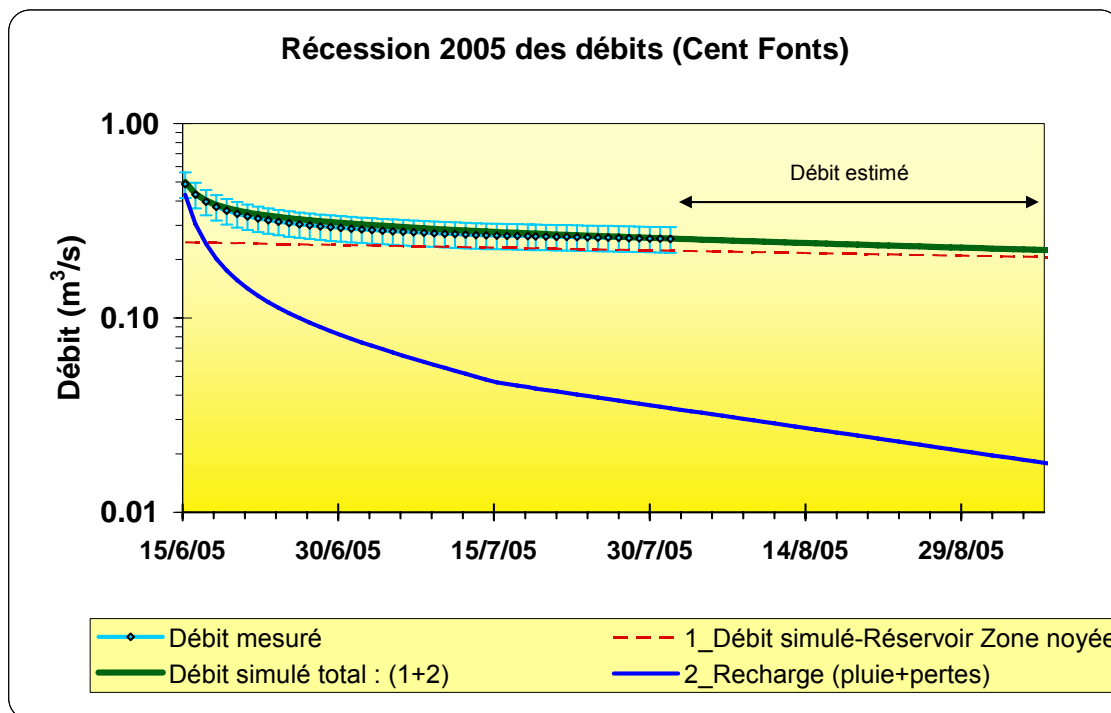
5.2.2. Les débits de la source des Cent Fonts en 2005

Les débits mesurés en 2005 apparaissent de manière quasi confondue avec la courbe du débit minimum, exception faite des épisodes de crue des mois de mars et mai 2005. Ce résultat permet d'illustrer la nature très déficitaire de l'écoulement pour l'année 2005. Les débits de 2005 correspondent en fait aux débits les plus faibles mesurés depuis le début des suivis (1997). La nature déficitaire du cycle 2004-2005 est à mettre en relation avec la faible quantité de pluie précipitée au cours de cette période (cf. §5.2.5).

5.2.3. Estimation du débit qu'aurait eu la source des Cent Fonts en août 2005 en l'absence de pompage d'essai

Sur la base des connaissances acquises au cours des phases préalables de l'étude (Ladouche et al, 2002 ; 2004), il est possible de déterminer le débit qui aurait coulé au cours de l'été 2005 à la source des Cent Fonts, en absence de pompage. Ceci est réalisé à l'aide d'une extrapolation de la courbe de récession déterminée suivant la méthode d'analyse de Mangin modifiée (Ladouche *et al.*, 2002). Les paramètres de la récession de 2005 sont présentés sur l'illustration 44. Les débits estimés sur la période du 01/08/05 au 06/09/09 sont également présentés sur cette illustration.

Ainsi, en absence de pompage sur la période du 01/08/05 au 06/09/05, le débit de la source des Cent Fonts aurait naturellement évolué entre 255 l/s et 225 l/s. Le volume d'eau cumulé qui se serait naturellement écoulé à la source au cours de cette période est évalué, au moyen de cette relation, à 750 000 m³.



Coefficient de tarissement du réservoir de la zone noyée ($\alpha, j-1$) = 0.0021
 Contribution initiale du réservoir de la zone noyée le 15/06/05 : 0.245 m³/s

Illustration 44 : Récession du débit de la source des Cent Fonts (du 15/06/05 au 06/09/05)

5.2.4. Estimation du débit qu'aurait eu la source en septembre 2005 en l'absence de pompage d'essai

De la même manière que pour le mois d'août 2005, le débit qu'aurait présenté la source des Cent Fonts, en septembre 2005, en absence de la seconde série de pompages, a été estimé²⁰ pour la période concernée (Illustration 45). Sur la période du 22/09/05 au 01/10/09 et en l'absence de pompage, le débit de la source des Cent Fonts aurait naturellement évolué entre 400 l/s et 280 l/s. Le débit déduit de la courbe de tarage le 01/10/05 est comparable (298 ± 60 l/s) à celui estimé par la méthode de récession (282 l/s).

²⁰ Coefficient de tarissement de la zone noyée ($\alpha, j-1$) = 0.005.

Contribution initiale du réservoir de la zone noyée : 260 l/s le 12/09/05.

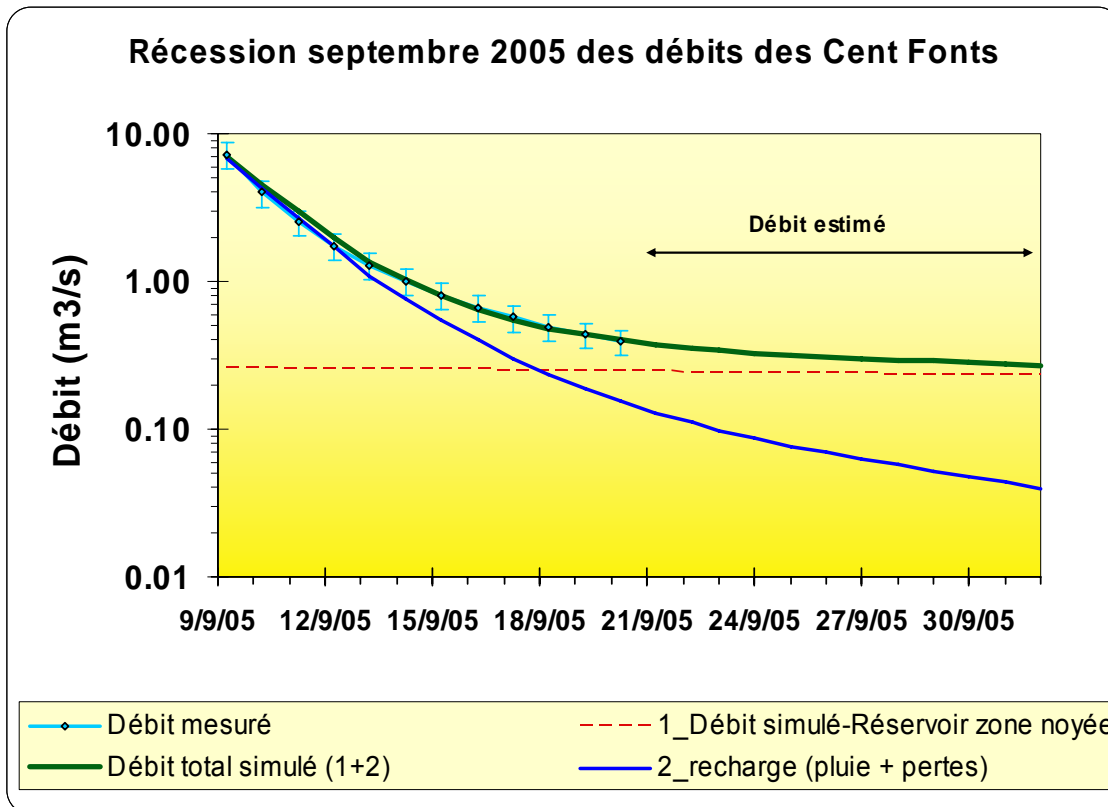


Illustration 45 : Récession du débit de la source des Cent Fonts (du 09/09/05 au 01/10/05)

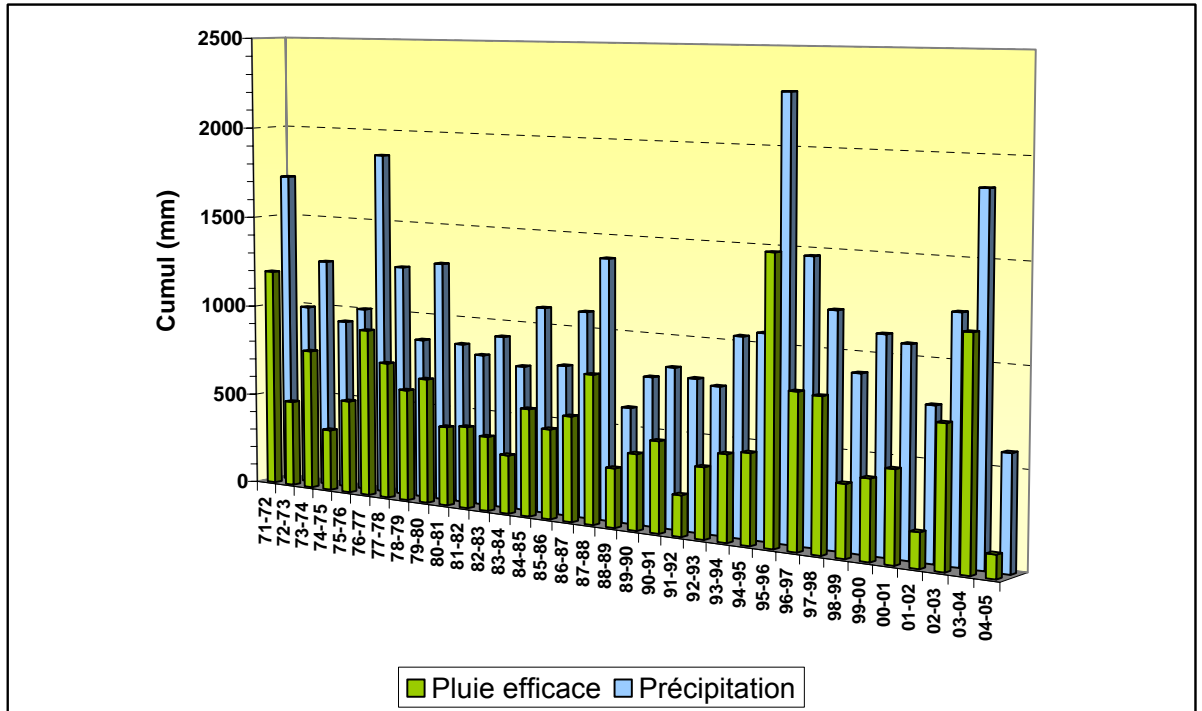
5.2.5. Discussion

Les débits mesurés en 2005 (Illustration 43) apparaissent comme quasi confondus avec la courbe du débit minimal, exception faite des épisodes de crue des mois de mars et mai 2005. Ce résultat permet d'illustrer la nature très déficitaire de l'écoulement pour l'année 2005. Les débits de 2005 correspondent en fait au débit les plus faibles mesurés depuis le début des suivis (1997). La nature déficitaire du cycle 2004-2005 est à mettre en relation avec la faible quantité de pluie précipitée au cours de cette période. La pluviométrie du cycle hydrologique²¹ 2004-2005 est de l'ordre de 590 mm (Illustration 46), ce qui correspond à une pluie efficace²² de 120 mm compte tenu des pertes par évapotranspiration. Le cycle hydrologique 2004-2005 se place parmi les cycles les plus secs de ces 35 dernières années en termes de pluie efficace (Illustration 46), le volume de pluie qui contribue à la recharge (120 mm) apparaît ainsi

²¹ cycle hydrologique : du 01 septembre au 31 août de l'année suivante

²² L'estimation des pluies efficaces a été réalisée à l'aide du modèle de transfert construit pour le système karstique des Cent Fonts (Ladouche et al, 2004). Les stations météorologiques (Météo France) utilisées pour le calcul sont celles d'Aniane, de St-Martin-de-Londres et de St-Maurice-de-Navacelle (Bourg).

4 fois moins important environ que pour une année médiane (476 mm) ou moyenne (555 mm)²³.



Cycle	71-72	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87
Précipitation (mm)	1721	990	1255	927	1005	1865	1256	865	1291	862	813	923	773	1097	798	1094
pluie efficace (mm)	1195	469	766	334	508	911	740	603	675	427	439	400	313	573	478	559

Cycle	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92	92-93	93-94	94-95	95-96	96-97	97-98	98-99	99-00	00-01	01-02	02-03
Précipitation (mm)	1383	611	783	844	798	769	1036	1062	2276	1466	1206	903	1107	1069	781	1243
pluie efficace (mm)	790	312	401	481	216	373	454	473	1488	807	795	374	415	474	181	724

Cycle	03-04	04-05
Précipitation (mm)	1845	588
pluie efficace (mm)	1171	120

Illustration 46 : Evolution de la pluviométrie précipitée sur l'impluvium du système karstique des Cent Fonts depuis 1971. La pluie efficace qui contribue à la recharge du karst est également reportée. L'estimation de la pluie efficace est réalisée au moyen du modèle de transfert des Cent Fonts précédemment développé (Modèle Tempo, Ladouche et al., 2004)

23 Les évolutions temporelles des paramètres statistiques de la pluviométrie et des pluies efficaces mensuelles sont présentées en Annexe 7.

5.3. DEBIT DES PERTES DE LA BUEGES

5.3.1. Statistiques descriptives des débits des pertes de la Buèges

Les débits des pertes de la Buèges²⁴ sont suivis depuis le mois de mars 2000. Des éléments de statistiques descriptives établis sur la base des 2027 valeurs de débit moyen journalier mesurés depuis mars 2000 sont présentés dans le Tableau 32. L'analyse statistique a porté sur l'ensemble des données disponibles de la période mars 2000-septembre 2005 inclus (ligne « Tous ») et a été également réalisée individuellement pour chaque mois de l'année. Les valeurs minimale, maximale et moyenne sont reportées ainsi que le premier et le troisième quartile et la médiane.

	Nbr. de valeurs considérées	Débit (l/s) Moyenne	Débit (l/s) Minimum	Débit (l/s) 1er quartile	Débit (l/s) Médiane	Débit (l/s) 3ème quartile	Débit (l/s) Maximum	Asymétrie
Tous	2027	513	15	160	280	494	4449	2.62
Janvier*	155	689	200	308	445	815	3739	2.50
Février*	141	592	184	314	392	595	3733	3.10
Mars**	173	616	165	302	405	599	3396	2.51
Avril**	180	682	224	271	342	669	3909	2.12
Mai**	186	512	162	238	328	416	3595	3.05
Juin**	180	243	122	169	220	289	1081	3.01
Juillet**	186	147	29	118	151	179	263	-0.16
Août**	186	87	15	45	88	129	205	0.11
Septembre**	180	177	15	55	117	149	1993	4.34
Octobre*	155	730	49	247	442	831	3444	1.69
Novembre*	150	789	32	268	375	1232	3937	1.66
Décembre*	155	1128	18	289	764	1758	4449	1.05

* valeurs des 5 mois considérés sur la période mars 2000-septembre 2005

**valeurs des 6 mois considérés sur la période mars 2000-septembre 2005

Tableau 32 : Statistiques descriptives des débits des pertes de la Buèges. L'analyse a notamment porté sur l'ensemble des valeurs journalières des mois considérés (période étudiée : mars 2000 à septembre 2005 inclus)

Pour les mois de juillet et août, les premiers quartiles prennent respectivement les valeurs de 118 l/s et 45 l/s, ce qui signifie que le débit des pertes est supérieur à ces valeurs dans 75 % des cas. Dans 25 % des cas, le débit des pertes est inférieur à 118 l/s en juillet et 45 l/s en août. Les débits minimum mesurés pour les mois de juillet et août sont respectivement de 29 l/s et 15 l/s et ont été observé en 2005.

Les valeurs du troisième quartile sont respectivement de 179 l/s et 129 l/s pour les mois de juillet et août. L'écart interquartile, qui couvre 50 % d'un ensemble de données, indique que, dans 50 % des cas, les débits des pertes de la Buèges sont

²⁴ Le débit des pertes de la Buèges est calculé sur la base du suivi des stations hydrométriques situées en amont et en aval des gorges de la Buèges. Les dispositifs expérimentaux sont présentés dans le rapport BRGM/RP-51584-FR (Ladouche et al, 2002). Les suivis réalisés sur la rivière de la Buèges depuis mars 2000 indiquent que les pertes sont totales lors des périodes estivales. En été, le débit des pertes est ainsi égal au débit mesuré en amont des pertes (St-Jean-de-Buèges).

compris dans les intervalles [118 l/s - 179 l/s] et [45 l/s - 129 l/s] pour les mois de juillet et août respectivement.

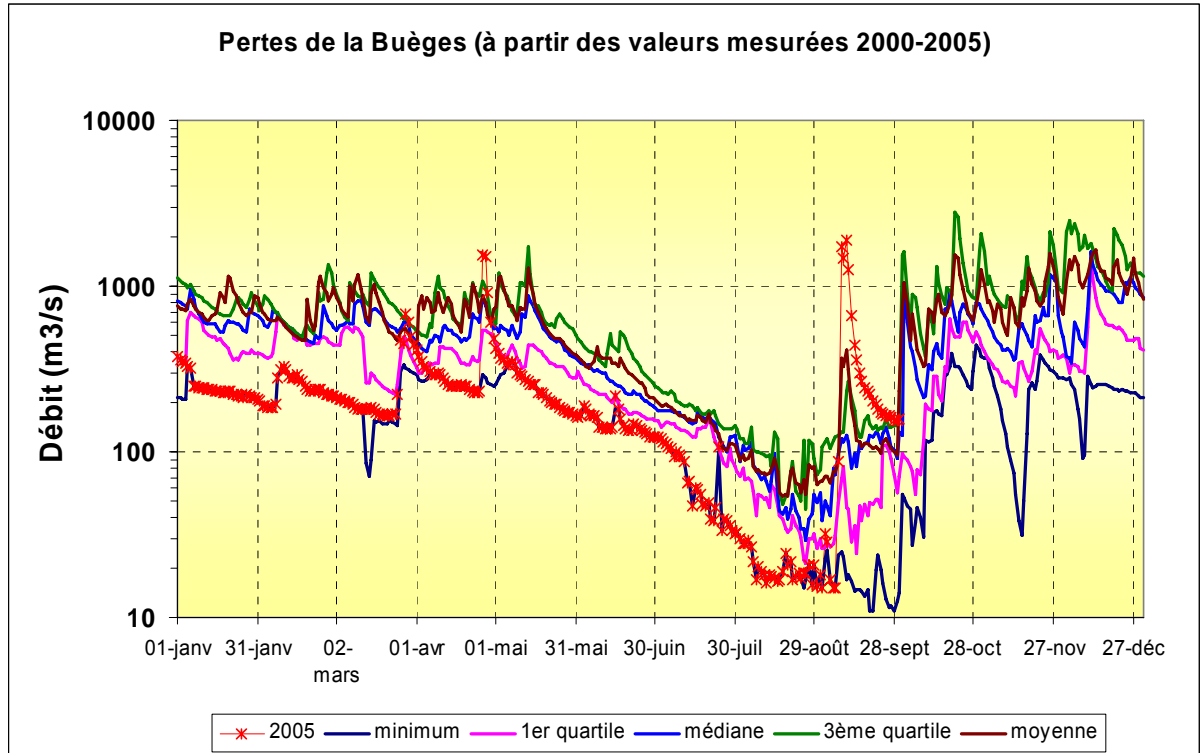


Illustration 47 : Evolution temporelle des paramètres statistiques (minimum, quartiles, médiane et moyenne) du débit interannuel journalier des pertes de la Buèges calculé pour la période mars 2000-septembre 2005 inclus. Les débits mesurés en 2005 sont également reportés

L'illustration 47 présente les évolutions temporelles des paramètres statistiques (minimum, quartiles, médiane et moyenne) du débit interannuel journalier des pertes de la Buèges, calculé pour la période mars 2000-septembre 2005. Le débit des pertes de la Buèges en 2005 est également reporté.

De manière similaire à la source des Cent Fonts, les débits des pertes de la Buèges mesurés en 2005 apparaissent comme quasi confondus avec la courbe du débit minimum. Là encore, ces résultats illustrent la nature déficitaire du cycle hydrologique 2004-2005, aussi bien sur le bassin versant d'alimentation de la source des Cent Fonts que sur celui des pertes de la Buèges. Les débits des pertes de la Buèges mesurés au début du mois de juillet 2005 sont observés, en année moyenne ou médiane, vers la fin du mois d'août, voire le début du mois de septembre. Une constatation similaire peut être faite pour le débit de la source des Cent Fonts.

5.3.2. Evolution du débit de la rivière de la Buèges (seuil amont) comme témoin du fonctionnement de la source de la Buèges

Les débits mesurés sur la rivière de la Buèges au seuil amont sont très fortement corrélés au niveau d'eau mesuré à la source de la Buèges située à Pégairolles-de-Buèges (cf. § 4.7).

En été, le débit de la rivière de la Buèges est quasi exclusivement assuré par la source de la Buèges. En effet, le ruisseau (« Le Garrel ») qui traverse St-Jean-de-Buèges et qui alimente la rivière de la Buèges présente alors un débit très faible (< 0.5 l/s).

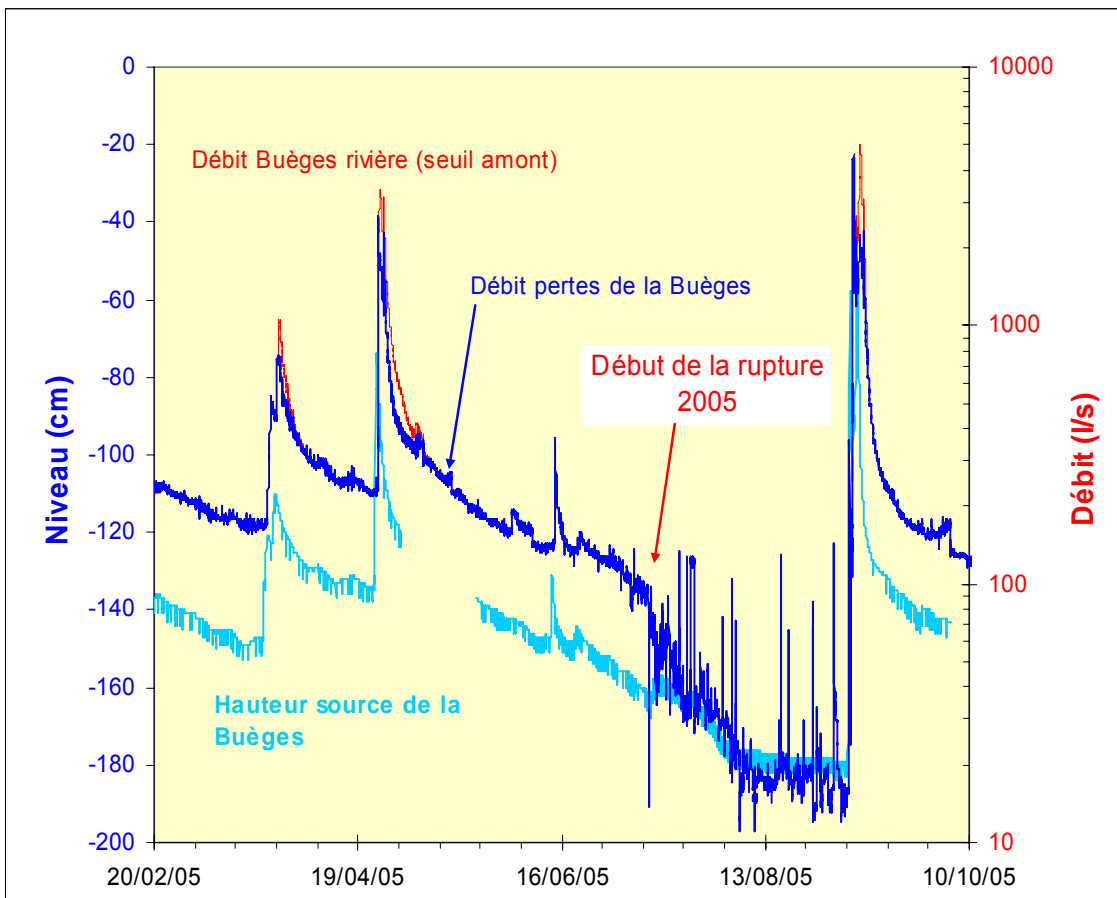


Illustration 48 : Evolution temporelle des niveaux d'eau de la source de la Buèges et des débits de la rivière de la Buèges mesurés au seuil amont (St-Jean de Buèges). Les débits des pertes de la Buèges sont également reportés

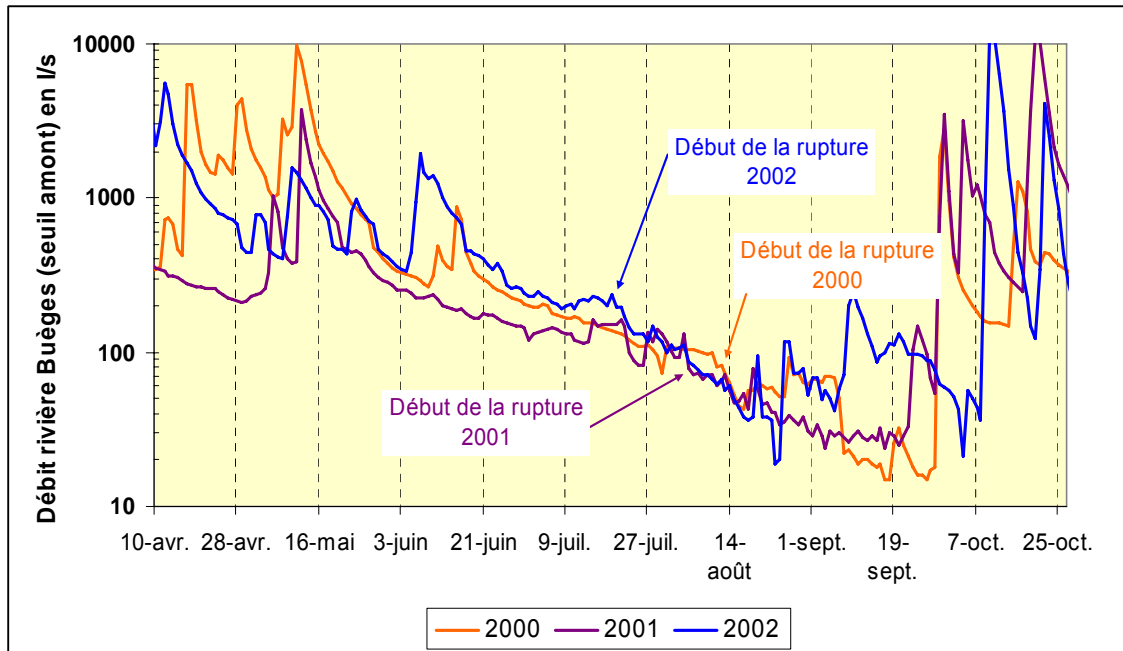


Illustration 49 : Evolution des débits journaliers de la Buèges (seuil amont) mesurés en 2000, 2001 et 2002 (représentation dans une année calendaire, période du 10 avril au 25 octobre).

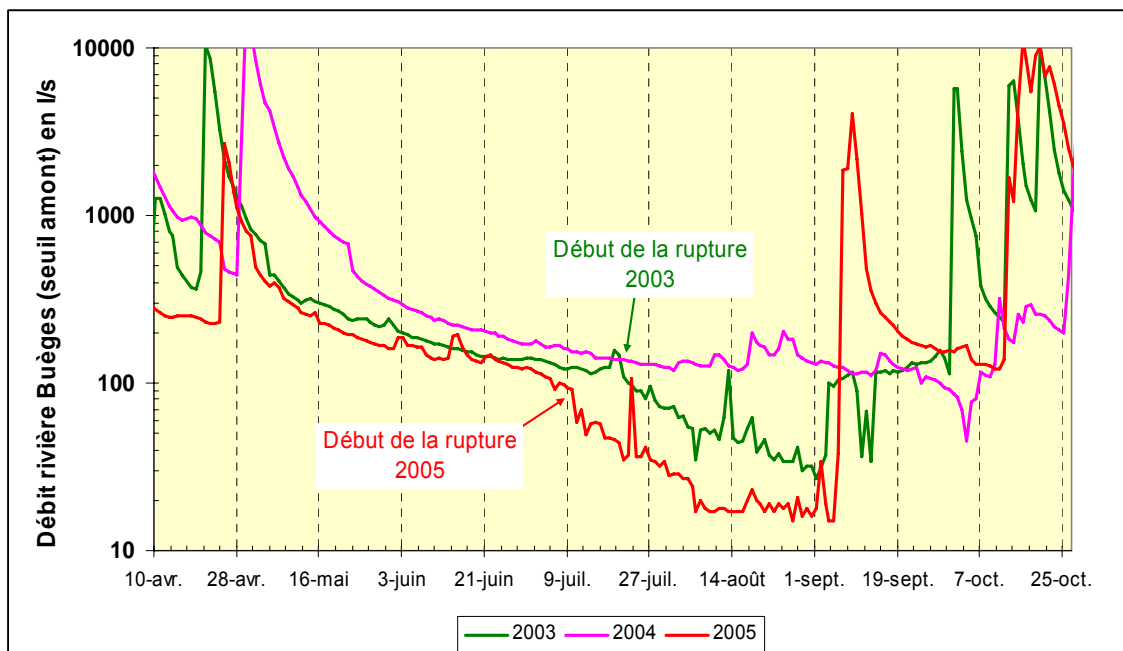


Illustration 50 : Evolution des débits journalier de la Buèges (seuil amont) mesurés en 2003, 2004 et 2005 (représentation dans une année calendaire, période du 10 avril au 25 octobre).

La rupture dans la courbe du débit de la rivière de la Buèges (seuil amont) que l'on observe à partir du début du mois de juillet 2005 (Illustration 48) est également visible sur les niveaux d'eau mesurés à la source de la Buèges. Ce phénomène de rupture de pente dans la chronique du débit des pertes de la Buèges a déjà été observé lors des années antérieures (2000 à 2004) ; il apparaissait néanmoins de manière plus tardive (fin juillet voire début août ; Illustration 49 et Illustration 50). L'année 2004, fortement excédentaire, ne présente pas ce phénomène de rupture de pente.

Les Illustration 49 et Illustration 50 montrent en outre que le phénomène de stabilisation des débits mis en évidence en août 2005 (fin d'étiage) a déjà été observé dans le passé, notamment en 2001 et, dans une moindre mesure, en 2003.

Le phénomène de rupture de pente dans la chronique du débit des pertes de la Buèges, puis la relative stabilisation des débits observée en fin d'étiage, est à rattacher (Illustration 51) au fonctionnement de l'aquifère de la source de la Buèges, située à Pégairolles-de-Buèges.

En effet, l'évolution hydrologique observée peut être interprétée comme le résultat de la vidange de plusieurs réservoirs, où composantes d'un système karstique, possédant des dynamiques d'écoulements différentes (Illustration 51) :

la composante rapide de l'écoulement est éphémère et disparaît quelques jours seulement après l'événement de pluie efficace qui l'a générée. Cette composante traduit la diminution de débit qui fait suite au transfert de pression induit par la connexion hydraulique qui s'établit, entre la zone d'infiltration et la zone noyée, lors de la crue. Ce phénomène peut être rattaché au phénomène d'infiltration directe défini par Plagnes 1997 et Pinault et al, 2001 ;

la seconde composante (« composante lente » sur l'illustration 51) peut être rattachée au « réservoir » de la zone d'infiltration du système de la Buèges. Elle permet de caractériser la vidange lente des eaux de pluie infiltrées dans le système karstique,

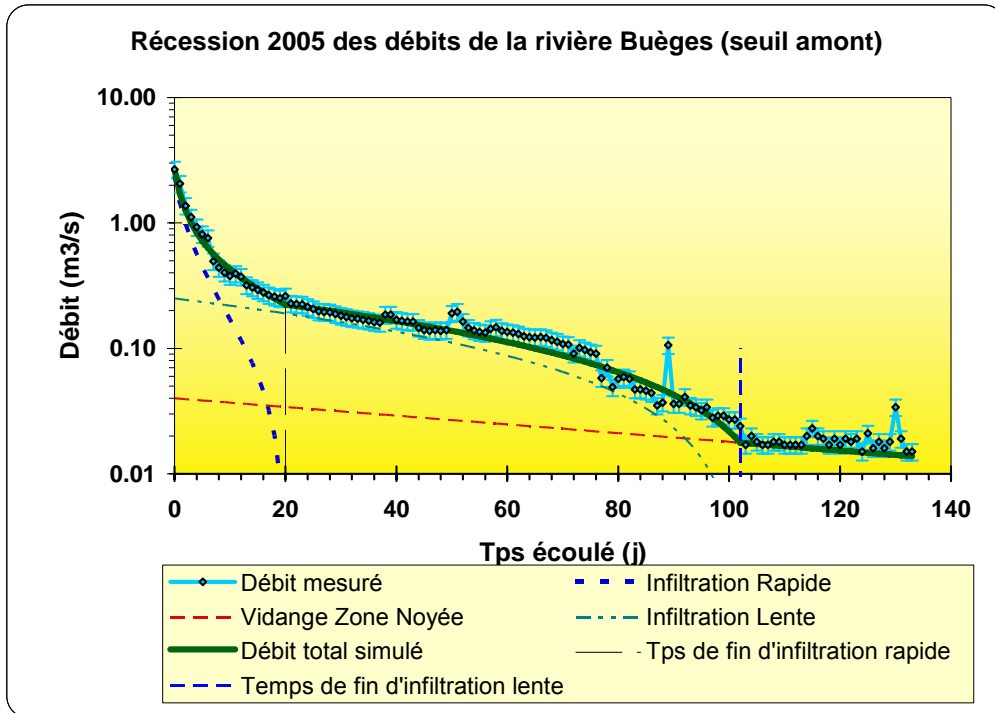
la dernière composante (« zone noyée » sur l'illustration 51) caractérise les modalités de vidange des réserves contenues dans la zone noyée. Elle devient prépondérante lorsque les contributions des eaux issues de la zone d'infiltration et de l'épikarstique cessent.

La contribution de la recharge par les pluies efficaces via la zone d'infiltration cesse au bout de 100 jours environ (t_i). La vitesse moyenne d'infiltration caractérisée par l'inverse du temps d'infiltration ($1/t_i$) est très faible (0,01), ce qui indique que le transfert de l'eau au travers de la zone d'infiltration est très lent. Ce résultat est en accord avec l'épaisseur importante des formations carbonatées en amont de la source de la Buèges (Sud du Larzac). Il illustre aussi que le système est globalement peu karstifié dans sa zone d'infiltration (épikarst), même s'il existe localement des drains verticaux qui permettent une bonne connexion hydraulique entre la zone noyée et la zone d'infiltration (composante rapide), la réponse du système aux précipitations se produisant en 1 jour environ et cette composante rapide durant une quinzaine de jours environ.

Le fonctionnement hydrogéologique de cet aquifère karstique tel que décrit ci-dessus apparaît en accord avec les informations hydrogéochimiques obtenues aux cours des phases préalables du projet (Ladouche *et al.*, 1999).

Le réservoir de la zone noyée du système présente un coefficient de tarissement relativement faible (0,008) ce qui indique que la zone noyée se vidange assez lentement. La valeur du volume dynamique (qui peut constituer un indicateur des réserves du système karstique) est de l'ordre de 0,5 million de m³, ce qui renseigne sur la présence d'une zone noyée peu importante.

L'évolution temporelle en apparence complexe observée à la source de la Buèges et à l'amont des pertes est expliquée par le fonctionnement du karst. La diminution significative des débits observée dès le début du mois de juillet se produit au moment où la contribution retardée de la recharge par les pluies efficaces commence à fortement décroître. En raison du contexte très déficitaire du cycle 2004-2005, ce phénomène naturel se produit plus tôt qu'à l'accoutumée (début août en général). La faiblesse de l'écoulement observé au mois d'août 2005 (de l'ordre de 15 l/s) est directement à rattacher aux caractéristiques de la zone noyée de l'aquifère karstique de la source de la Buèges : zone noyée de faible importance et se vidangeant lentement. Elle ne peut en aucun cas être expliquée comme une conséquence des pompages qui ont été réalisés aux Cent Fonts. Rappelons à ce sujet que le dispositif de pompage n'a été opérationnel qu'à partir du 19 juillet et que les premiers tests de fonctionnement de la pompe n'ont été réalisés qu'à partir de cette date.



Début Récession	25/04/05
Fin Récession	05/09/05
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	0.600
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	20
Débit d'infiltration rapide (à t=0) en m3/s	2.385
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.003
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	102
Débit d'infiltration lente (à t=0) en m3/s	0.25
Coef tarissement Zone Noyée	0.0080
Qo Zone noyée (m3/s) à t=0	0.040

vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.050
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.010
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.41
Critère de Nash (qualité de la simulation)	97.80
Volume d'infiltration rapide (million de m3)	0.72
Volume d'infiltration lente (million de m3)	1.01
Volume dynamique (million de m3)	0.43

Illustration 51 : Analyse de la courbe de récession des débits journaliers de la rivière de la Buèges au seuil amont : période 25/04/05-05/09/05

5.4. INTERPRETATION DES DONNEES HYDROGEOCHIMIQUES

5.4.1. Bilan des connaissances hydrogéochimiques acquises avant le pompage d'essai

Au cours des premières phases de l'étude du système karstique des Cent Fonts, un fort investissement a été consacré au suivi hydrochimique de la source des Cent Fonts. Au total, depuis le début du programme (1997), 54 échantillons d'eau ont été analysés (éléments majeurs, traces, isotopes) à la source des Cent Fonts (Ladouche et al, 1999 ; Ladouche et al, 2002). Sur ces 54 échantillons analysés, 21 concernent des prélèvements en périodes de basses eaux. Sur la base de ces résultats, les caractéristiques chimiques moyennes des eaux des Cent Fonts en étiage peuvent être déterminées avec précision et les évolutions de la qualité des eaux observées au cours du pompage d'essai pourront être discutées.

Les principaux éléments de connaissance sur le fonctionnement hydrogéochimique de l'aquifère des Cent Fonts sont résumés ci-dessous.

a) Fonctionnement lors des crues et lors des périodes de hautes eaux

Lors des périodes de crues, on observe, dans la plupart des cas étudiés, une augmentation de la conductivité et de la température des eaux de la source des Cent Fonts. Au cours des crues, la conductivité des eaux des Cent Fonts est élevée (de 465 à 550 $\mu\text{S/cm}$). Cette augmentation de la conductivité des eaux est à mettre en relation directe avec les augmentations des concentrations en HCO_3 et Ca observées. Les paramètres du système calco-carbonique (CMTD²⁵ et pCO_2 ²⁶) augmentent en période de crue tandis que l'indice de saturation de la calcite (IS-Calcite) diminue et devient très négatif. Les concentrations en magnésium diminuent également en période de crue. Dans ce contexte, les conditions du système calco-carbonique ne permettent pas la précipitation de calcite mais, au contraire, favorisent le phénomène de dissolution des carbonates.

Ce résultat est confirmé par les informations apportées par les isotopes du carbone ($\delta^{13}\text{C}$, A^{14}C). En période de crue, les eaux présentent des activités en carbone 14 (A^{14}C) importantes (95 %) et sont nettement plus appauvries en carbone 13 par rapport à l'étiage ($\delta^{13}\text{C} = -13 \text{‰}$ contre $-11,5 \text{‰}$ en étiage). Ce phénomène est à rattacher à un écoulement en milieu triphasique (eau-roche-air) qui favorise les échanges isotopiques Eau(soluté)-Air(CO_2). Ces évolutions traduisent le phénomène de dissolution des carbonates sous l'action du CO_2 biogénique entré dans le système lors de l'infiltration des eaux de pluie.

²⁵ CMTD : Carbone Minéral Total Dissous

²⁶ PCO_2 = pression partielle de CO_2

Il a été montré que l'eau qui contribue à la genèse des crues ne provient pas directement de la pluie mais est issue de l'épikarst, réservoir tampon situé près de la surface (Ladouche et al, 1999 ; Aquilina et al 2005). L'eau issue de ce réservoir épikarstique, et s'écoulant par des fissures et des drains plus ou moins bien connectés avec la zone noyée, met en charge le réseau de drains de la zone noyée. Le décalage temporel entre les réponses hydrologiques et hydrogéochimiques (retard de la réponse hydrogéochimique) est de l'ordre de 1 à 1.5 jours, ce qui indique que le système possède un réseau de conduits karstiques fonctionnels bien développés entre la surface et la zone noyée.

En terme de fonctionnement, les informations apportées par les traceurs qui n'interagissent pas avec le milieu carbonaté (chlorure, isotopes de l'eau) permettent de montrer que ce sont les drains mis en charge lors des crues qui assurent l'essentiel de la recharge des systèmes annexes au drainage (zones fissurées et/ou vides de grandes tailles connectés d'un point de vue hydraulique aux drains karstiques).

Au cours de la période hivernale, on observe généralement une diminution graduelle de la température des eaux de la source des Cent Fonts (de l'ordre de 0,5°C à 1°C). Ce phénomène est à attribuer à l'infiltration de l'eau des pertes de la Buèges qui contribue de manière importante (50 % en moyenne) à l'alimentation du système karstique des Cent Fonts.

b) Fonctionnement lors des étiages

Après la période hivernale et avant les étiages estivaux, on observe une augmentation progressive de la température des eaux associée à une augmentation progressive des concentrations en magnésium. La teneur en magnésium devient ainsi maximale en fin d'étiage.

Les espèces chimiques, telles le sodium, la silice ou les sulfates (traceurs qui renseignent sur l'évolution hydrogéochimique des eaux au cours de son transfert dans le milieu) et les espèces du système carbonaté montrent que l'eau subit de nombreuses interactions avec les roches encaissantes et les minéraux argileux contenus dans la zone noyée. Ces informations couplées aux résultats des rapports isotopiques du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) indiquent que l'eau a séjourné (de quelques semaines à quelques mois) dans les formations dolomitiques avant de sortir à l'exutoire (source). Ces formations constituent le siège de la zone noyée du système karstique des Cent Fonts.

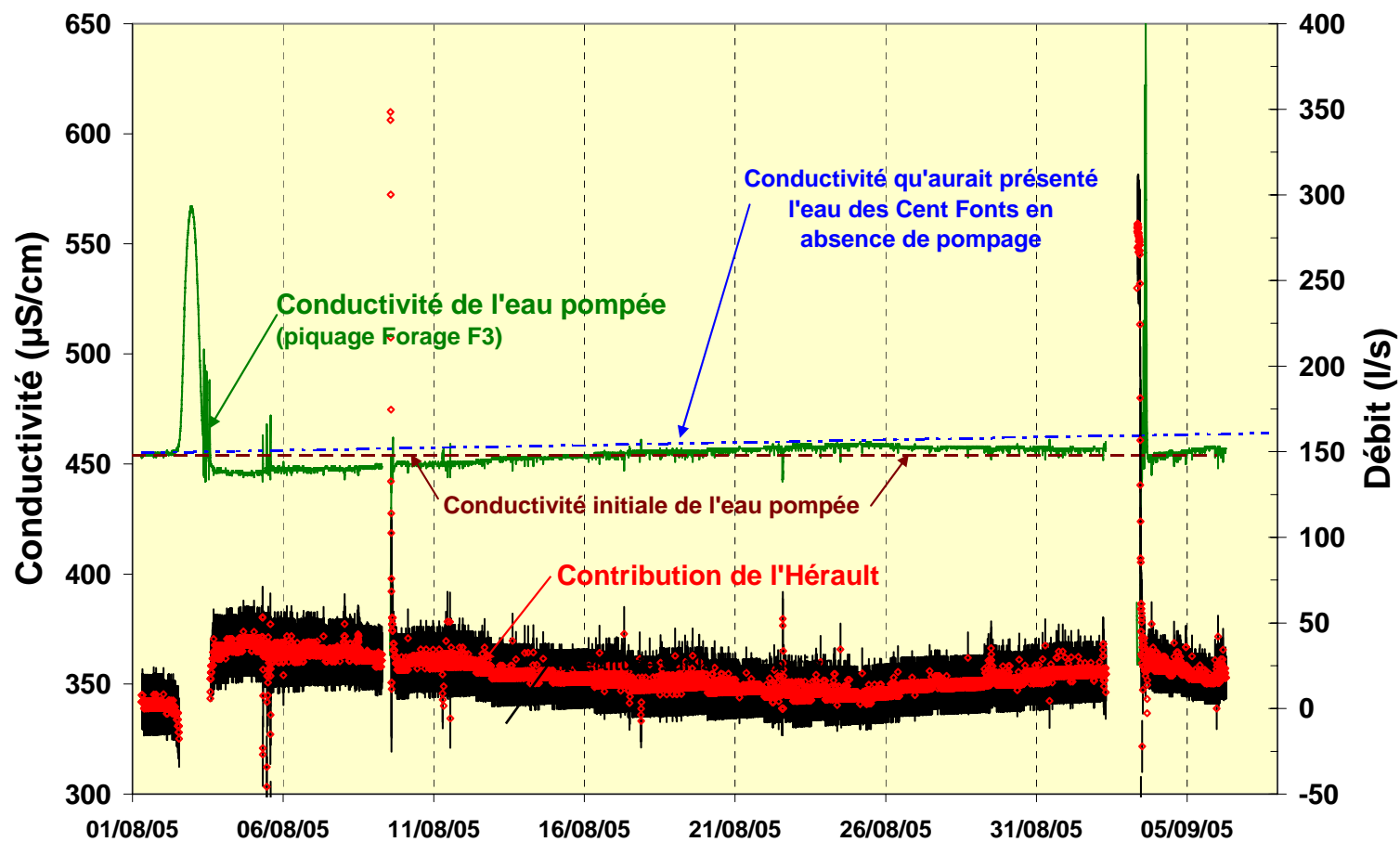


Illustration 52 : Evolution de la contribution d'eau en provenance de l'Hérault au cours de l'pompage d'essai de longue durée. L'évolution de la conductivité de l'eau pompée est également reportée

5.4.2. Quantification de la part d'eau en provenance de l'Hérault dans les eaux pompées au forage F3 (CF)

a) Informations obtenues par le suivi de la conductivité des eaux

Le suivi en continu des débits pompés à l'ouvrage F3 (CF) de la conductivité électrique des eaux pompées et de la conductivité de l'eau de l'Hérault, durant tous les tests de pompages d'essai y compris de longue durée, permet d'évaluer la part d'eau en provenance du fleuve Hérault au cours du pompage.

La contribution relative des eaux issues de l'Hérault est calculée à l'aide de la formulation suivante :

$$X = \frac{Q_{\text{Hérault}}}{Q_{\text{pompé}}} = 1 - \left(\frac{C_{\text{pompage}} - C_{\text{Hérault}}}{C_{\text{Karst}} - C_{\text{Hérault}}} \right) \quad \text{eq. 3}^{27}$$

Avec X, contribution relative de l'Hérault, et C_{Karst} , C_{pompage} et $C_{\text{Hérault}}$, correspondant respectivement aux conductivités des eaux du karst (avant pompage), des eaux pompées et de l'Hérault.

Dans l'équation précédente, la seule variable mal contrainte est C_{Karst} . En effet, on a montré que la conductivité des eaux du karst présentait une tendance à l'augmentation au cours de la période précédant les pompages d'essai (cf. § 4.4.1). Sur la base du gradient d'évolution enregistré par la sonde de conductivité installée dans l'ouvrage de la CGE, la conductivité qu'aurait présentée l'eau du karst des Cent Fonts en absence de pompage a été estimée. A la date du 06/09/05, la conductivité aurait été de 464 $\mu\text{S/cm}$; elle était de 454 $\mu\text{S/cm}$ le 01/08/05 avant le pompage de longue durée.

L'incertitude concernant la contribution relative de l'Hérault (X) est donnée par la formulation suivante (équation 4) :

$$\Delta X = \frac{|C_{\text{Hérault}} - C_{\text{Karst}}| \times \Delta C_{\text{pompage}} + |C_{\text{Karst}} - C_{\text{pompage}}| \times \Delta C_{\text{Hérault}} + |C_{\text{pompage}} - C_{\text{Hérault}}| \times \Delta C_{\text{Karst}}}{(C_{\text{Hérault}} - C_{\text{Karst}})^2}$$

Avec $\Delta C_{\text{pompage}}$, ΔC_{karst} et $\Delta C_{\text{Hérault}}$, les incertitudes absolues sur les différentes variables considérées.

Les calculs d'erreur ont été réalisés en considérant que l'erreur absolue pour la mesure de la conductivité du karst et des eaux pompées est égale à deux fois l'incertitude de

²⁷ Dans la gamme des valeurs observées au cours des pompages d'essai, la conductivité évolue de manière linéaire avec les concentrations en éléments conservatifs (chlorures par exemple).

mesure ($1 \mu\text{S/cm}$) des sondes de conductivité : $\Delta C_{\text{karst}} = 2 \mu\text{S/cm} = \Delta C_{\text{pompage}}$. Pour l'Hérault on a considéré que la conductivité était constante ($350 \mu\text{S/cm}$) à $10 \mu\text{S/cm}$ près (cf. §4.5.3).

Le débit en provenance de l'Hérault est déduit de l'équation 3. L'évolution temporelle des débits en provenance de l'Hérault est présentée sur l'illustration 52.

A l'exception des phases de reprise du pompage des 09/08/05 et 03/09/05, le débit en provenance de l'Hérault calculé de cette façon a varié entre 0 l/s^{28} et $37 \text{ l/s} \pm 18 \text{ l/s}$ au cours de l'essai de longue durée à 400 l/s . La contribution maximale est observée en début de pompage de longue durée (vers le 05/08/05). Elle diminue progressivement en cours de pompage jusqu'à une valeur proche de $10 \pm 15 \text{ l/s}$ (observée vers le 24 août 2005). A partir de cette date, la contribution augmente faiblement pour atteindre, à la fin du pompage à 400 l/s (le 02/09/05), une valeur de l'ordre de $20 \text{ l/s} \pm 15 \text{ l/s}$.

Lors de l'essai à 300 l/s (03/09/05 au 06/09/05), la contribution en provenance de l'Hérault évolue entre $30 \pm 13 \text{ l/s}$ et $20 \text{ l/s} \pm 12 \text{ l/s}$.

Sur l'ensemble de la période du pompage de longue durée, le débit moyen en provenance de l'Hérault est estimé, de cette façon, à 20 l/s ($2\sigma = 18 \text{ l/s}$).

Lors des phases de reprise de pompage les 09/08/05 et 03/09/05, la conductivité des eaux pompées présente des valeurs nettement inférieures à $400 \mu\text{S/cm}$, ce qui témoigne d'une contribution importante d'eau en provenance de l'Hérault. Le phénomène est observé pendant 3 heures le 03/09/06. Pendant ces 3 premières heures, le volume d'eau issue de l'Hérault évacué par le pompage est de l'ordre de 2670 m^3 . L'arrêt de pompage du 02/09/05 au 03/09/05 a duré 24 heures et 30 minutes. En supposant que la contribution de l'Hérault est restée stable au cours de cette période de 24 heures, le volume d'eau infiltrée dans le karst en provenance de l'Hérault serait de l'ordre de 2646 m^3 , sur la base d'un débit d'infiltration de 30 l/s . Le volume d'eau en provenance de l'Hérault infiltré au cours de l'arrêt sur la base de cette hypothèse de débit d'infiltration est comparable au volume d'eau en provenance de l'Hérault évacué au cours des 3 premières heures de pompage (2670 m^3).

Un résultat de même nature peut être déduit de l'arrêt de 09/08/05. Le phénomène de faible conductivité ($<400 \mu\text{S/cm}$) a été observé pendant 1 heure environ le 09/08/05, lors de la reprise du pompage à 400 l/s . Le volume d'eau pompé en provenance de l'Hérault sur cette période est de l'ordre de 580 m^3 . L'arrêt de pompage du 09/08/05 a duré 5 heures et 50 minutes. Sur la base d'un débit d'infiltration de 30 l/s , le volume d'eau en provenance de l'Hérault infiltré au cours de l'arrêt (630 m^3) est tout à fait comparable au volume d'eau en provenance de l'Hérault évacué au cours de la première heure de pompage (580 m^3).

²⁸ Le débit d'infiltration en provenance de l'Hérault est nul tant que la charge hydraulique dans le système karstique est supérieure au niveau d'eau du fleuve Hérault.

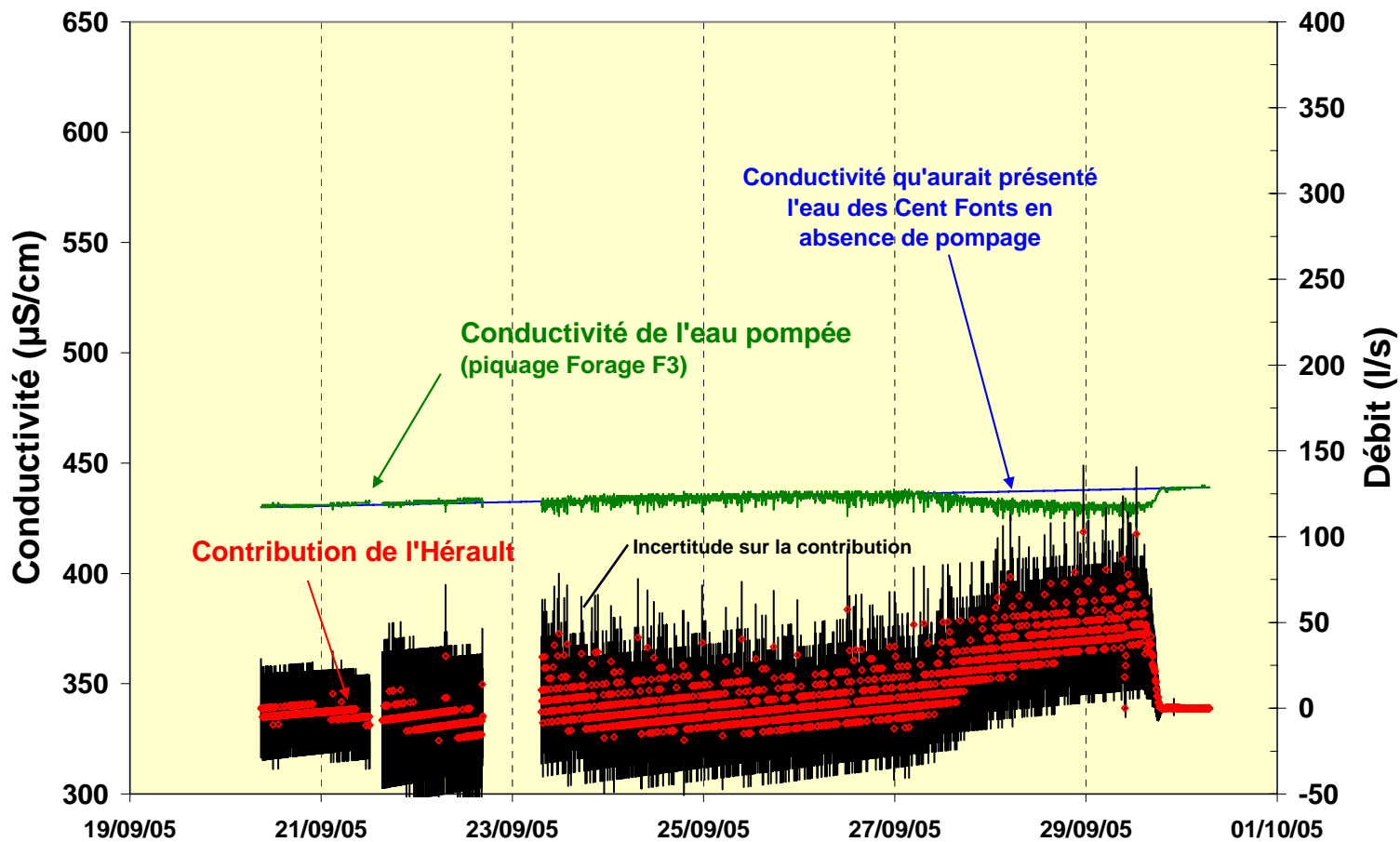


Illustration 53 : Evolution de la contribution de l'eau en provenance de l'Hérault au cours des essais par paliers de débit de septembre 2005. L'évolution de la conductivité de l'eau pompée est également reportée

Ces résultats permettent d'illustrer que le débit en provenance de l'Hérault est resté quasi stable au cours de l'essai et qu'il est indépendant du rabattement du niveau d'eau dans le drain karstique (ce qui est normal sur le plan hydraulique dès lors que le niveau dans le karst est inférieur au niveau du lit de l'Hérault). Les observations réalisées au sein de la partie dénoyée du conduit karstique confirment cette analyse (observation de cascades qui attestent d'une déconnection hydraulique entre les arrivées d'eau en provenance de l'Hérault et le niveau piézométrique dans le drain pompé).

L'évolution temporelle des débits en provenance de l'Hérault lors des essais par paliers de débit du mois de septembre est présentée sur l'illustration 53.

Au cours des essais par paliers de débit n° 5 (300 l/s) et n° 6 (500 l/s), la conductivité des eaux pompées n'a pas évolué, la contribution de l'eau de l'Hérault est donc nulle ($0 \text{ l/s} \pm 15 \text{ l/s}$). Au cours du palier n° 7 à 400 l/s, la conductivité a commencé à diminuer vers la 99^{ème} heure de pompage. La contribution maximale de l'Hérault lors de cet essai est évaluée à $45 \text{ l/s} \pm 32 \text{ l/s}$ soit, compte tenu des incertitudes, plus importantes lors de cette seconde phase de pompage, une contribution semblable à celle estimée pour les pompages d'essai d'août 2005.

b) Informations obtenues par le suivi hydrogéochimique des eaux

Les interprétations des résultats hydrogéochimiques réalisées dans le cadre de ce rapport portent principalement sur l'analyse des informations apportées par les isotopes du strontium²⁹ ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) et les concentrations en strontium des eaux. L'interprétation porte aussi sur les informations apportées par les rapports chimiques Xi/Sr (Xi représentant par exemple les concentrations en Cl, Si ou Ba, etc.) que l'on représente en fonction des rapports isotopiques du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs Xi/Sr ³⁰) des eaux. L'interprétation complète des résultats hydrogéochimiques sera présentée dans le rapport final prévu pour mai 2006.

²⁹ 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 naturel dans les études environnementales puisqu'il est naturellement présent dans le milieu. Il possède 4 isotopes stables : ^{88}Sr , ^{87}Sr , ^{86}Sr et ^{84}Sr . 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 sa 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 sur un isotope stable soit : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

³⁰ Dans ce type de représentation, les mélanges sont mis en évidence à l'aide de droites.

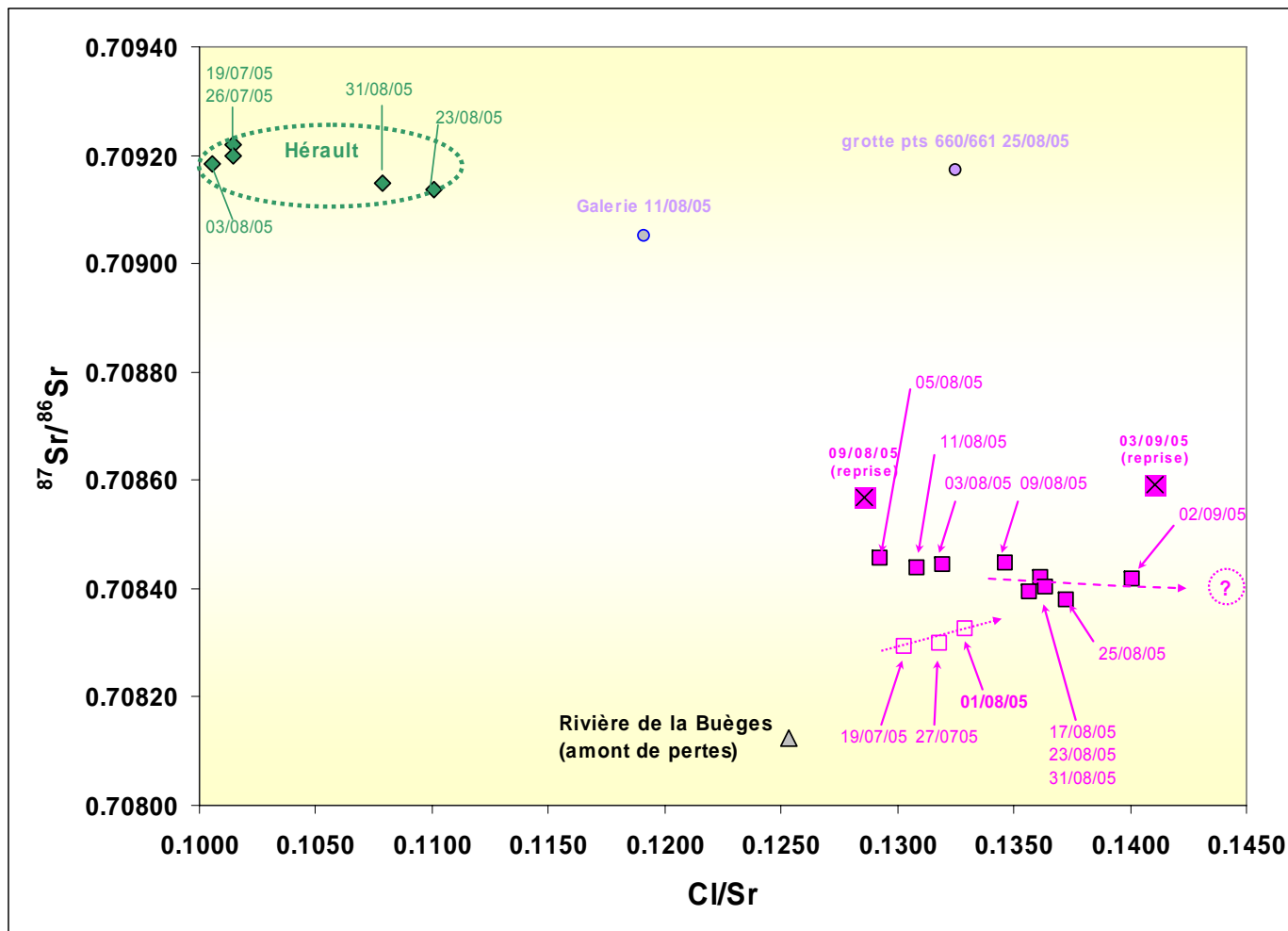


Illustration 54 : Evolution du rapport isotopique du strontium des eaux analysées en fonction du rapport Ct/Sr (concentrations exprimées en meq/l)

Rappelons que les eaux qui circulent au sein d'une roche 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 s'écoulent au sein de roches silicatées (granite par exemple) présentent des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ relativement élevés ; celles qui circulent au sein des roches carbonatées (sédimentaires d'origine marine) ont des signatures plus faibles (moins radiogéniques). Le strontium n'est pas modifié par des processus tels que l'évaporation ou la précipitation de minéraux. Sa composition isotopique reflète donc un terme source : soit celui du strontium de l'eau initiale, soit celui d'un minéral avec lequel elle a été en contact (dissolution).

Les variations du rapport isotopique du strontium dans un hydrosystème donnent ainsi des informations sur (1) l'origine et les proportions de mélange des différentes composantes intervenant dans le fonctionnement du système ainsi que sur (2) la nature et l'intensité des processus d'interaction eau-roche, notamment liés à l'altération et/ou à l'érosion.

Le fonctionnement hydrogéochimique du système karstique des Cent Fonts au cours du pompage peut être résumé à l'aide des informations fournies par le diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs Cl/Sr (Illustration 54). Les 4 types d'eau en présence se distinguent nettement les uns des autres :

1. les eaux de l'Hérault présentent de faibles rapports Cl/Sr (compris entre 0.10 et 0.11) et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ très élevés (0.709187 ± 0.000035) en moyenne. Ces rapports isotopiques élevés sont le témoin de la part d'eau de l'Hérault issue du socle cristallin (Mont-Aigoual, notamment) ;
2. les eaux prélevées dans la galerie dénoyée et qui avaient des conductivités faibles, proches de celles du fleuve Hérault ($C = 350 \mu\text{S}/\text{cm}$), présentent des signatures distinctes de celles de l'Hérault, avec notamment des rapports Cl/Sr bien plus élevés. Ce résultat indique que des processus hydrogéochimiques se produisent dans le karst au cours de l'infiltration des eaux de l'Hérault.
L'échantillon du 11/08/05 présente ainsi un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nettement plus faible que celui de l'Hérault. Ce résultat s'explique par un mélange entre l'eau du karst et l'eau de l'Hérault.
L'échantillon du 25/08/05 présente un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.709172) comparable à celui mesuré dans l'Hérault en moyenne (0.709187 ± 0.000035).
3. les eaux de la rivière de la Buèges prélevées au seuil amont situé à St-Jean de Buèges présentent les plus faibles rapports isotopiques en strontium de toutes les eaux analysées (0.708125 ± 0.000009).
4. les eaux prélevées aux Cent Fonts (source et piquage du forage F3 (CF)) montrent une évolution complexe, leurs signatures étant très différentes de celles de la Buèges, des arrivées d'eau dans la galerie dénoyée et de l'Hérault. Différentes phases d'évolution peuvent être décrites :

- i. la première concerne l'évolution du 19/07/05³¹ au 01/08/05. Au cours de cette période, les rapports chimiques Cl/Sr et les rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ augmentent, respectivement de 0.130 à 0.133 et de 0.708293 ± 0.000007 à 0.708326 ± 0.000009 . Ces augmentations du rapport isotopique sont significatives compte tenu de l'incertitude de mesure. Cette évolution des signatures hydrogéochimiques est à mettre en relation avec la phase d'augmentation naturelle de la conductivité des eaux du système déduite du suivi réalisé à l'ouvrage de la CGE (cf. § 4.4.1) ;
- ii. la seconde phase concerne l'évolution des eaux pompées au cours des premiers jours de pompage à 400 l/s. La signature des eaux pompées change de manière significative entre le 03/08/05 et le 05/08/05 ; le rapport Cl/Sr des eaux pompées diminue jusqu'à 0.129 le 05/08/05. La signature isotopique en strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) des eaux pompées devient plus radiogénique (rapport plus élevé) et se stabilise autour de la valeur de 0.708450 ± 0.000009 . Cette phase d'évolution est à rattacher à une contribution d'eau en provenance de l'Hérault. La quantification de la proportion de mélange sera présentée et discutée plus bas ;
- iii. la troisième phase concerne l'évolution entre le 05/08/05 et le 09/08/05, avant l'arrêt programmé du 09/08/05. Au cours de cette période, le rapport chimique Cl/Sr augmente tandis que le rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ demeure stable (0.708450). Cette phase d'augmentation du rapport chimique Cl/Sr est vraisemblablement à mettre en relation avec la modification hydrogéochimique qui se produit dans le karst au cours de l'infiltration des eaux de l'Hérault (cf. point 2, ci-dessus) ;
- iv. la quatrième phase d'évolution concerne les jours qui suivent l'arrêt programmé du 09/08/05. L'échantillon du 09/08/05 prélevé 1 heure après la reprise de l'essai présente un rapport Cl/Sr nettement plus faible (0.128) que celui prélevé le même jour avant l'arrêt (0.135). Il présente aussi un rapport isotopique ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) plus élevé (0.708567). Ce phénomène est à rattacher à une contribution temporaire plus importante d'eau en provenance de l'Hérault (eau stockée au sein du drain pendant la période d'arrêt du pompage) et apparaît en accord avec les résultats du suivi de la conductivité (cf. § 4.3.1 et 5.4.2 a). Au cours des jours qui suivent la reprise du pompage d'essai (du 11/08/05 au 17/08/05), le rapport Cl/Sr des eaux pompées se remet à augmenter et, dans le même temps, les rapports isotopiques du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) diminuent jusqu'à atteindre, le 17/08/05, la valeur de 0.708419. Cette évolution pourrait être rattachée à une diminution de la contribution relative des eaux en provenance de l'Hérault. Une autre explication possible serait de considérer une augmentation relative de la contribution des eaux issues des réserves du système. Ceci sera discuté ci-après ;
- v. la cinquième phase d'évolution concerne la période du 17/08/05 au 02/09/05, date de l'arrêt programmé du pompage à 400 l/s. Au cours de cette période,

³¹ Rappelons que cet échantillon permet de caractériser l'état géochimique du système avant tout pompage, les premières phases de test du dispositif de pompage ayant débuté le 19/07/05.

les rapports chimiques Cl/Sr des eaux pompées ont augmenté tandis que les rapports isotopiques ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) ont présenté une tendance à la diminution. Cela suggère une contribution de plus en plus importante des eaux issues des réserves du système, comme on peut le constater sur l'illustration 55. La mise en perspective de l'évolution des eaux pompées avec le contexte hydrogéochimique connu des Cent Fonts, montre qu'au cours de cette cinquième phase de pompage, l'eau évolue vers la signature mesurée lors d'une fin d'étiage (septembre 2000), dans un contexte de très basses eaux. La signature isotopique en strontium est comparable à celle du pôle dolomitique régional défini par le système karstique du Durzon, développé dans les formations dolomitiques du Bathonien (Plagnes, 1997). L'illustration 55 montre aussi que l'évolution hydrogéochimique observée fin juillet 2005 tend également vers la même signature de fin d'étiage. L'estimation des proportions de mélange entre les eaux du karst et de l'Hérault devra donc prendre en considération l'évolution naturelle qu'aurait eu le système en absence de pompage ;

- vi. la dernière phase concerne l'évolution observée à la reprise du pompage le 03/09/05 (300 l/s). De la même manière que pour la reprise de pompage du 09/08/05, l'échantillon du 03/09/05, prélevé 4 heures après la reprise de l'essai, présente un rapport isotopique ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) plus élevé (0.708592) que celui de l'échantillon prélevé la veille (0.708417). Le rapport Cl/Sr de l'échantillon du 03/09/05 apparaît légèrement plus élevé (0.189) que celui prélevé la veille avant l'arrêt (0.186). La modification de la signature hydrogéochimique des eaux est à rattacher à une contribution temporaire plus importante d'eau en provenance de l'Hérault. Là encore, ce résultat apparaît en accord avec les résultats du suivi de la conductivité (cf. § 4.3.1 et 5.4.2 a).

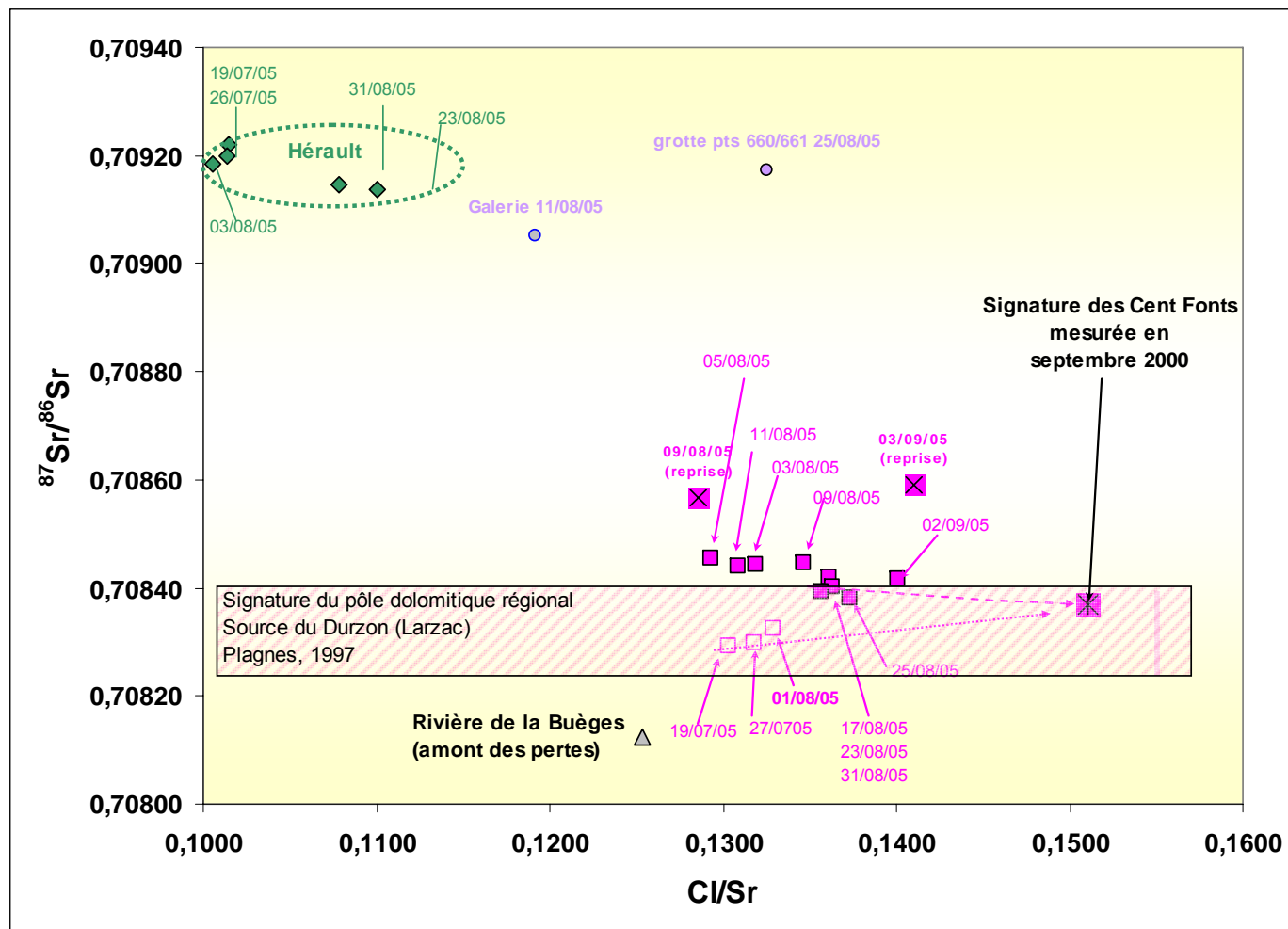


Illustration 55 : Evolution du rapport isotopique du strontium et du rapport Cl/Sr des eaux pompées dans le contexte hydrogéochimique connu du système des Cent Fonts

Procédure de calcul pour l'estimation des proportions de mélange entre les eaux du karst et l'apport de l'Hérault

L'estimation des proportions de mélange (droites de mélange) a été réalisée en résolvant ce système à 3 équations :

$$Sr_{mélange} = X * Sr_1 + (1 - X) * Sr_2 \quad \text{éq. 4}$$

$$Cl_{mélange} = X * Cl_1 + (1 - X) * Cl_2 \quad \text{éq. 5}$$

$$\left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} \right)_{mélange} = \frac{X * Sr_1 * \left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} \right)_1 + (1 - X) * Sr_2 * \left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} \right)_2}{Sr_{mélange}} \quad \text{éq. 6}$$

Avec X, la contribution relative des eaux en provenance de l'Hérault ; les indices 1, 2 et mélange représentant respectivement ; (1) la signature hydrogéochimique des eaux de l'Hérault infiltrées dans le karst, (2) la signature hydrogéochimique qu'aurait présenté le karst en absence de pompage et (mélange), la signature hydrogéochimique du mélange.

L'évolution des droites de mélange entre les pôles 1 et 2 pour différentes situations au cours de pompage a été reportée dans le diagramme ${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$ vs Cl/Sr (Illustration 56). La confrontation des signatures hydrogéochimiques des eaux pompées par rapport au pourcentage sur les droites de mélange permet de visualiser les évolutions au cours du pompage.

Deux situations ont été considérées :

(1) la première concerne la période du 09/08/05 au 11/08/05 au cours de laquelle un prélèvement effectué dans la galerie permet de bien contraindre la signature du pôle 1, (2) la seconde situation concerne la période de fin de pompage. Les points reportés sur la droite d'évolution du pôle 2 ont été calculés sur la base du gradient hydrogéochimique d'évolution observé avant le pompage d'essai de longue durée. Le dernier point calculé correspond à la date du 03/09/05.

Sur la base de ces résultats (Tableau 33), on montre que la contribution relative de l'Hérault a varié entre $1 \% \pm 1 \%$ et $11 \% \pm 1,5 \%$ au cours de l'essai de longue durée à 400 l/s. La contribution maximale ($11 \% \pm 1,5 \%$), soit un débit de $44 \text{ l/s} \pm 6 \text{ l/s}$ est observée en début de pompage de longue durée (vers le 05/08/05). Celle-ci diminue ensuite progressivement en cours de pompage jusqu'à une valeur proche de $6 \% \pm 1 \%$ ($24 \text{ l/s} \pm 4 \text{ l/s}$, vers le 25 août 2005). A partir de cette date, la contribution augmente faiblement pour atteindre, à la fin du pompage à 400 l/s (le 02/09/05), une valeur de $8,5 \% \pm 1,5 \%$ ($34 \text{ l/s} \pm 6 \text{ l/s}$). Il apparaît en outre que l'échantillon d'eau en provenance de l'Hérault prélevé dans la galerie le 11/08/05 est composé de 80 % d'eau issue de l'Hérault et de 20 % d'eau du karst.

	% Hérault	incertitude	Débit Hérault (l/s)	Incertitude l/s
01/08/2005 12:00	2.0 %	1.0 %	8	4
03/08/2005 10:00	11.0 %	1.5 %	44	6
05/08/2005 12:00	11.0 %	1.5 %	44	6
09/08/2005 09:00	11.0 %	1.5 %	44	6
09/08/2005 16:00	21.0 %	2.0 %	84	8
11/08/2005 13:00	10.0 %	1.5 %	40	6
17/08/2005 12:00	9.0 %	1.5 %	36	6
23/08/2005 10:00	7.5 %	1.0 %	30	4
25/08/2005 07:00	5.5 %	1.0 %	22	4
31/08/2005 10:00	7.5 %	1.0 %	30	4
02/09/2005 07:00	9.0 %	1.5 %	36	6
03/09/2005 13:00	28.0 %	2.0 %	84	6

Tableau 33 : Contribution de l'eau en provenance de l'Hérault aux dates de prélèvement des échantillons d'eau au piquage du forage F3 (CF)

Les résultats obtenus par l'approche hydrogéochimique permettent de préciser les estimations de proportion de mélange déduites du suivi de la conductivité des eaux pompées. En moyenne, sur la période considérée, le débit de contribution en provenance de l'Hérault est estimé à 35 l/s ($2\sigma = 14$ l/s), valeur comparable aux 20 l/s ($2\sigma = 14$ l/s) déduits de l'interprétation des données de conductivité. On a considéré dans la suite de l'étude la valeur intermédiaire de 30 l/s.

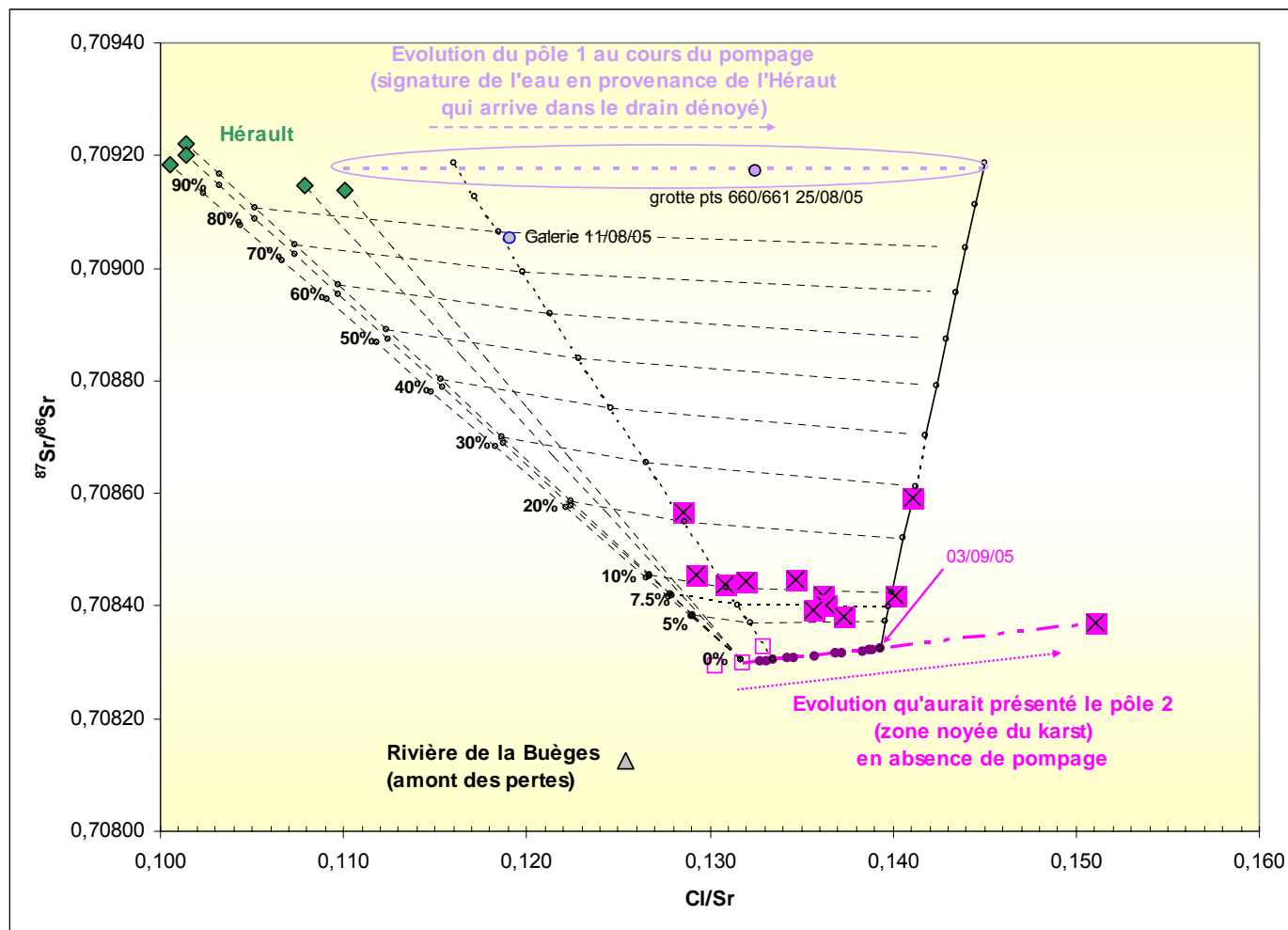


Illustration 56 : Evolution des proportions de mélange dans les eaux pompées au cours de pompage d'essai de longue durée

5.5. INTERPRETATION HYDRODYNAMIQUE DU POMPAGE D'ESSAI

5.5.1. Estimation des pertes de charge quadratiques

Quatre paliers de pompage d'une durée moyenne de 6 heures à des débits respectifs d'environ 200, 300, 500 et 400 l/s ont été réalisés entre le 27 et le 30 juillet 2005. Les rabattements mesurés au forage de pompage F3 (CF) sont présentés sur l'illustration 57.

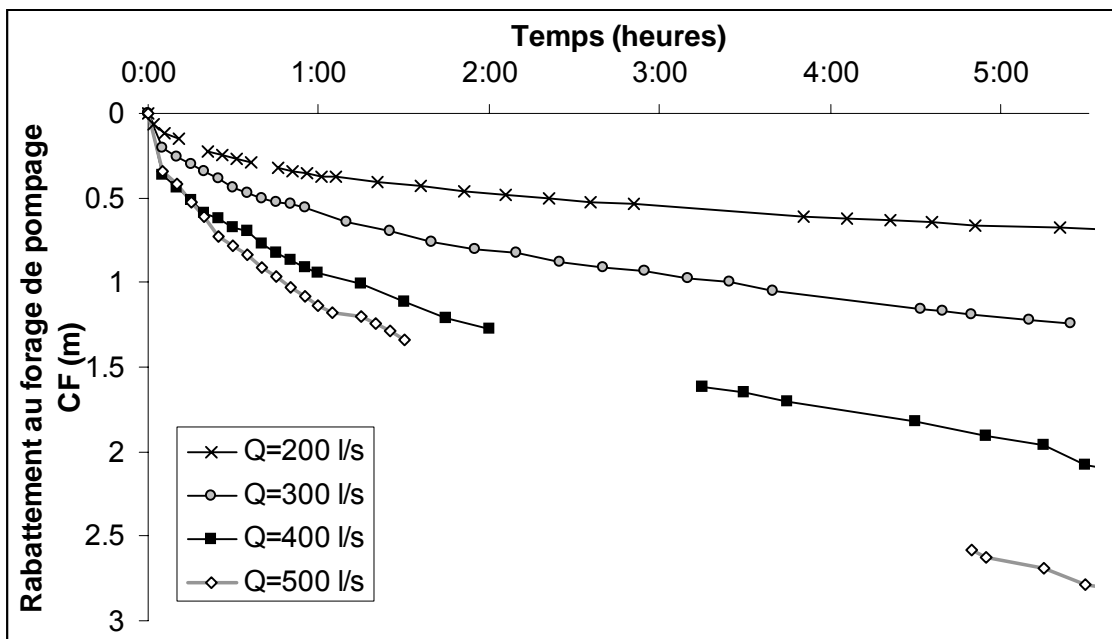


Illustration 57 : Rabattements mesurés au forage F3 (CF) lors des quatre essais par paliers de juillet 2005 (sur la base des mesures manuelles de contrôle)

Ces pompages par paliers ont été interprétés au moyen de la relation de Jacob permettant de distinguer les pertes de charge linéaires des pertes de charges quadratiques dans les rabattements totaux :

$$s = BQ + CQ^2 \quad \text{éq.7}$$

où s désigne le rabattement à la fin du palier, Q le débit moyen de pompage durant le palier, B le coefficient de pertes de charge linéaires et C le coefficient de pertes de charge quadratiques.

Les données des quatre paliers, au bout de 5h30 de pompage, sont présentées au sein du Tableau 34. Le rabattement observé après 5h30 min de pompage lors de l'essai de longue durée est également utilisé à titre de comparaison.

Palier	Début (TU)	Débit moyen (l/s)	Piézométrie initiale (m)	Piézométrie finale (m)	Rabatement (m)	s/Q
Palier 1	27/7/05 7:25	202,9	56,96	57,65	0,69	0,0034
Palier 2	28/7/05 6:30	301,5	56,96	58,20	1,24	0,0041
Palier 3	29/7/05 6:20	504,6	56,96	59,78	2,82	0,00559
Palier 4	30/7/05 6:30	402,1	56,96	59,04	2,08	0,00517
LD	01/8/05 7:10	404,2	57,01	58,63	1,62	0,00401

Tableau 34 : Données des quatre paliers de juillet 2005 après 5 heures 30 minutes de pompage au forage F3 (CF)

L'interprétation de ces données sur un diagramme du rabattement spécifique (s/Q) en fonction du débit (Q) permet de déterminer un coefficient de pertes de charge quadratiques : $C = 7 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})$ (Annexe 8). Selon cette relation, cette composante quadratique des pertes de charge génère un rabattement de l'ordre de 1,2 m à 400 l/s.

Après l'essai de longue durée et après la crue du 6–9 septembre, trois nouveaux paliers à des débits de 200, 400 et 500 l/s ont été réalisés du 20 au 23 septembre (Illustration 58 et Illustration 59).

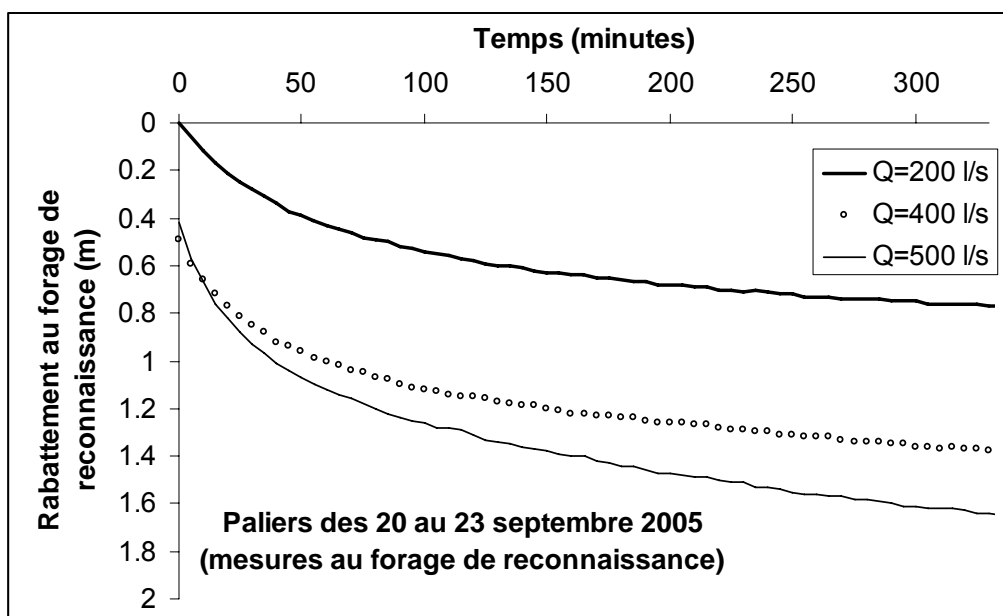


Illustration 58 : Rabattements mesurés à l'ouvrage de reconnaissance (F2) lors des trois essais par paliers de septembre 2005

Compte tenu de la faible précision des mesures au forage F3 (CF) (± 12 cm) et des interférences liées au pompage, les rabattements mesurés au forage de reconnaissance F2 sont comparés à ceux mesurés en juillet au forage F3 (CF) (Illustration 60). Cette comparaison est justifiée par la faible différence de charge hydraulique observée entre ces ouvrages traversant tous deux le drain karstique et situés à 3 mètres l'un de l'autre (Illustration 59).

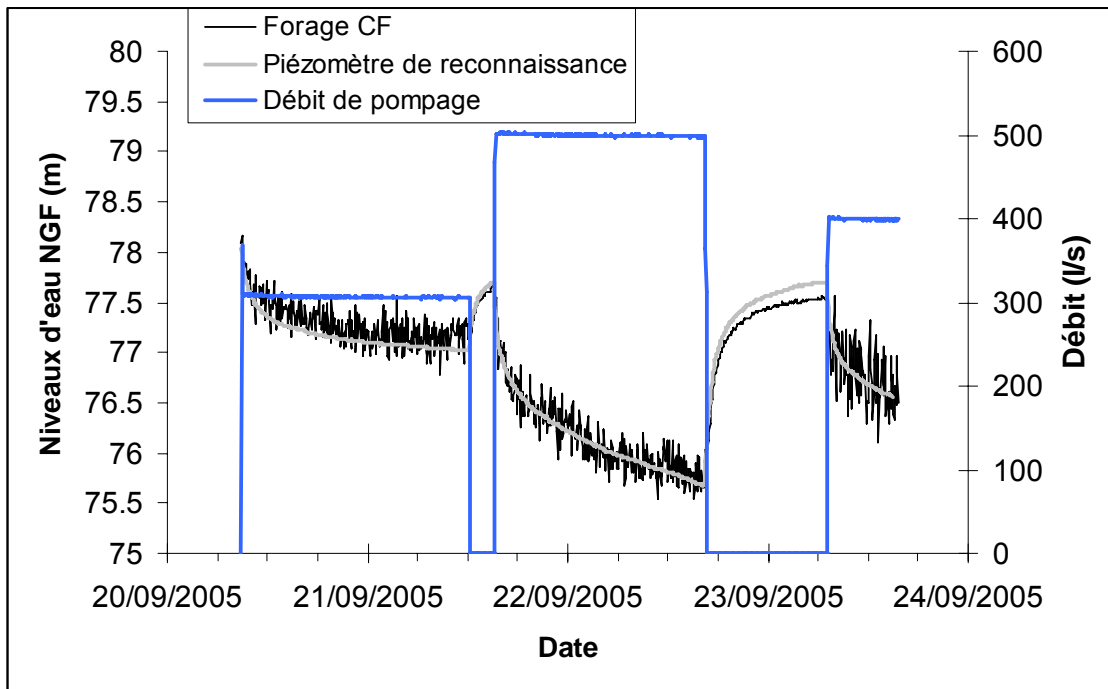


Illustration 59 : Comparaison des niveaux piézométriques au forage CF (F3) et au piézomètre de reconnaissance F2 durant les trois essais de septembre 2005

Palier	Début (TU)	Débit moyen (l/s)	Piézométrie initiale (m)	Piézométrie finale (m)	Rabattement (m)	s/Q
Palier 6	20/9/05 8:50	309,0	55,96	56,73	0,77	0,00249
Palier 7	21/9/05 15:10	500,8	55,96	57,6	1,64	0,00327
Palier 8	23/9/05 7:10	399,2	55,96	57,34	1,38	0,00346

Tableau 35 : Données des trois paliers de septembre 2005 après 5h30 min de pompage, mesurés au forage de reconnaissance F2 (Q = débit; s = rabattement)

Dans les conditions hydrologiques du mois de septembre, les rabattements sont systématiquement inférieurs à ceux de juillet (Tableau 35). Par ailleurs, le rabattement

observé en septembre à 400 l/s est assez proche, tout en restant néanmoins plus faible, de celui observé pour le même débit lors du pompage de longue durée.

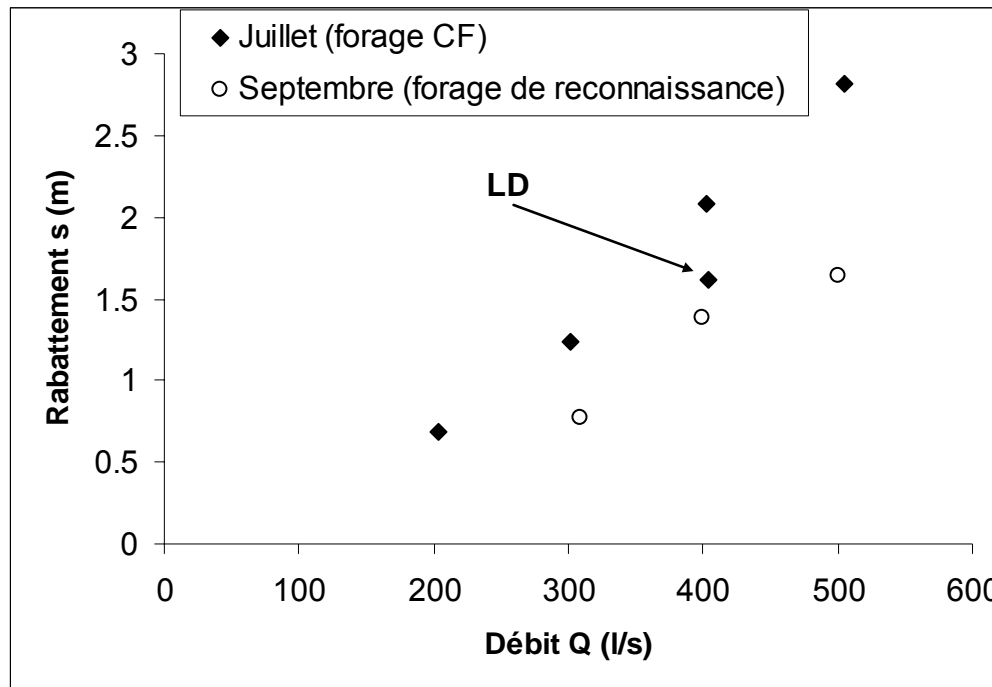


Illustration 60 : Comparaison des rabattements obtenus lors des différents paliers de pompages réalisés en juillet et septembre 2005 au forage de reconnaissance (F2) et au forage CF (F3)

5.5.2. Caractérisation du régime des écoulements au sein du drain karstique principal

L'analyse du pompage d'essai par paliers de débit au moyen de la méthode de Jacob suggère l'existence de pertes de charge quadratiques au sein du système constitué par l'ouvrage et le(s) drain(s) karstique(s).

Les faibles différences de rabattements observées entre le puits de pompage F3 (CF) et le forage de reconnaissance F2 (17 centimètres en moyenne, Illustration 61) situé à trois mètres de distance dans le même drain karstique suggèrent que les pertes de charge quadratiques observées se produisent au sein du système karstique lui-même et non pas seulement, comme dans les milieux poreux, au sein de l'ouvrage de pompage ou dans son environnement très proche.

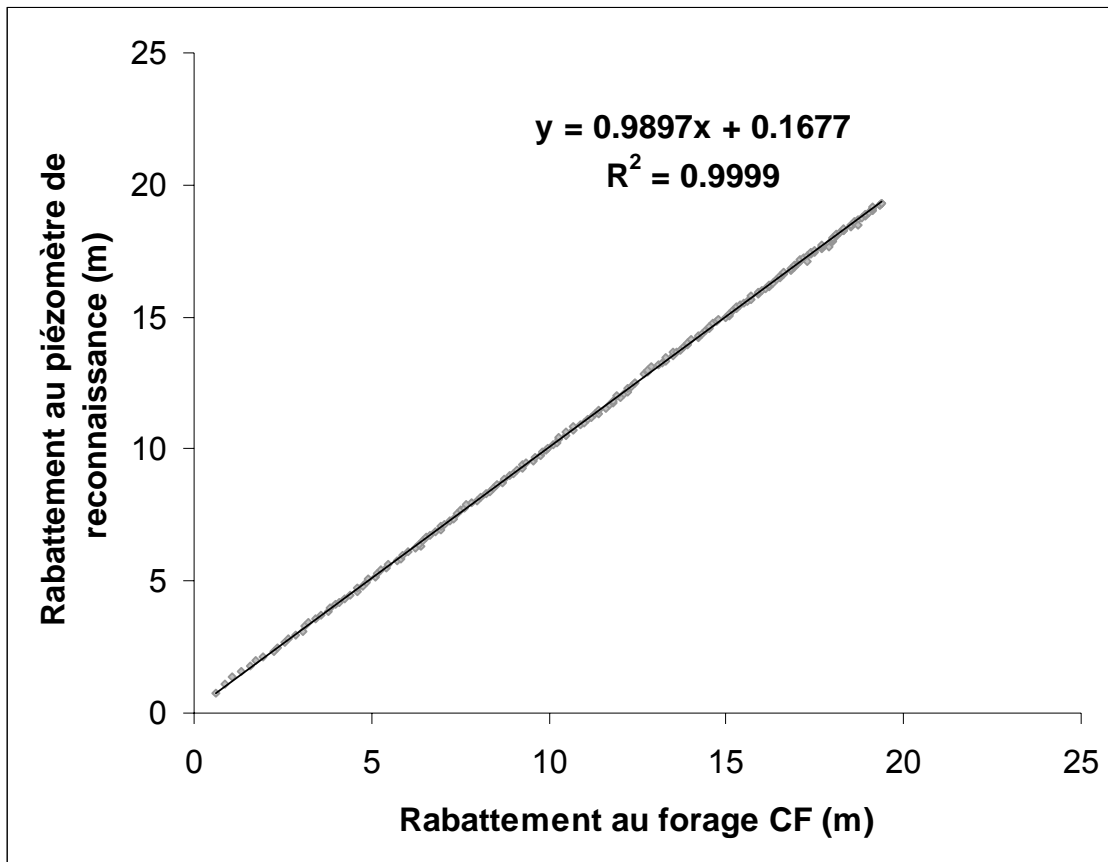


Illustration 61 : Comparaison des rabattements observés au Forage CF (CF=F3) et au piézomètre de reconnaissance (F2) durant l'essai de longue durée en août 2005

Le régime d'écoulement au sein du drain karstique en amont du pompage est dès lors étudié ci-dessous.

En hydraulique, le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement. Dans un écoulement en charge (drain karstique noyé par exemple), le nombre de Reynolds s'écrit :

$$R_e = \frac{U D_h}{\nu} = \frac{Q D_h}{S \nu} = \frac{4 Q R_h}{S \nu} \quad \text{éq.8}$$

Avec :

ν : coefficient de viscosité cinématique (m^2/s), = $1,17 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ pour une eau à 14°C

U : vitesse moyenne égale à Q/S (m/s)

Q : débit dans le drain karstique (m^3/s)

R_h : rayon hydraulique du drain (m)

S : section d'écoulement du drain (m²)

$D_h = 4 R_h$: diamètre hydraulique du drain (m) ; dans le cas de conduites circulaires, D_h est le diamètre

Pour les petites valeurs du nombre de Reynolds ($Re < 2000$), l'écoulement est *laminaire* et les pertes de charges sont proportionnelles au débit d'écoulement.

Quand le nombre de Reynolds augmente, les trajectoires des particules ne sont plus régulières et rectilignes ; au contraire, il s'établit une turbulence qui se traduit par des mouvements transversaux des molécules d'eau. Ce type de mouvement est appelé *turbulent*. Il en résulte des pertes d'énergie plus importantes et les pertes de charge deviennent proportionnelles au carré du débit.

Entre le régime laminaire et le régime turbulent, il existe une *zone de transition* dont les caractéristiques sont variables avec la rugosité des parois (Lencastre, 1966).

En hydraulique générale, la *rugosité absolue* est définie comme étant la mesure de l'épaisseur des rugosités des parois du drain. La *rugosité relative* $\frac{\varepsilon}{D_h}$ est le rapport de la rugosité absolue ε au diamètre hydraulique du drain D_h .

L'écoulement devient turbulent lorsque :

$$- R_e > 10000 \quad \text{si} \quad \frac{\varepsilon}{D_h} > 0,05$$

$$- R_e > 100000 \quad \text{si} \quad \frac{\varepsilon}{D_h} > 0,01$$

Dans un drain karstique, la présence de galets, blocs, phénomènes de dissolution tels que marmites et cupules ou processus de précipitation, induit une rugosité relative généralement supérieure à 0,05. Par exemple, le drain des Cent Fonts supposé unique, cartographié en différentes sections (AA', BB', CC', DD', EE') possède un diamètre moyen de l'ordre de 3,5 mètres en le rapportant à une section circulaire (Bardot, 2001). Avec $D = D_h = 3,5$ mètres en moyenne, et en admettant une rugosité de l'ordre de 20 centimètres, la rugosité relative $\frac{\varepsilon}{D_h}$ est supérieure à 0,05. Dès lors, le nombre de Reynolds critique définissant le passage au régime turbulent vaut $R_e = 10\,000$.

En supposant des sections circulaires et en déterminant des diamètres équivalents, il est possible de définir le nombre de Reynolds aux différentes sections cartographiées (Tableau 36). Celui-ci est toujours supérieur à 10 000, indiquant l'existence, pour le

débit pompé de 400 l/s, en majorité, d'écoulements turbulents au sein du drain karstique alimentant la source des Cent Fonts

Section	Diamètre moyen (m)	Re
AA'	1,8	2,46E+05
BB'	4,1	1,06E+05
CC'	5,0	8,68E+04
DD'	2,9	1,48E+05
EE'	3,5	1,23E+05
Moyenne	3,5	1,20E+05

Tableau 36 : Calcul du nombre de Reynolds en différentes sections du drain karstique à l'amont du pompage

Il est donc très probable que ce soit la turbulence des écoulements dans le drain principal qui génère l'essentiel des pertes de charge quadratiques mesurées au forage de pompage.

Dans un drain karstique, les pertes de charge quadratiques linéaires (par unité de longueur de drain, liées à la rugosité du drain) sont nettement prépondérantes par rapport aux pertes de charge quadratiques singulières (liées aux changements de section, direction, etc.). Elles représentent de l'ordre de 85 %, contre 15 % pour les secondes (Bögli, 1980 ; Jeannin et Maréchal, 1995).

Il est possible de calculer les pertes de charge quadratiques linéaires générées dans un tuyau au moyen de la formule de Manning-Strickler (Annexe 9). Avec un coefficient de Manning-Strickler $K_s = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (tuyau très irrégulier), on obtient des pertes de charge quadratiques de l'ordre de 1,14 m pour des diamètres de réseaux de drain karstiques compris entre 1,25 et 1,65 m. Ce résultat montre la cohérence des pertes de charge quadratiques observées dans le système des Cent Fonts avec ses caractéristiques géométriques probables.

5.5.3. Interprétation du pompage d'essai de longue durée au moyen de solutions analytiques

a) Solution de Theis

La solution classique d'écoulements cylindriques radiaux vers un puits en nappe captive développée par Theis a été appliquée aux rabattements observés durant l'essai de longue durée, corrigés de l'effet des pertes de charge quadratiques (cette correction a été réalisée seulement lorsque le logiciel utilisé ne permet pas de prendre en compte explicitement les pertes de charge quadratiques).

Il a été constaté un ajustement non satisfaisant de la descente de l'essai (Illustration 62) au moyen de cette solution analytique. Dès lors, d'autres approches doivent être

prises en œuvre de façon à modéliser correctement le comportement de ce système karstique en conditions de pompage.

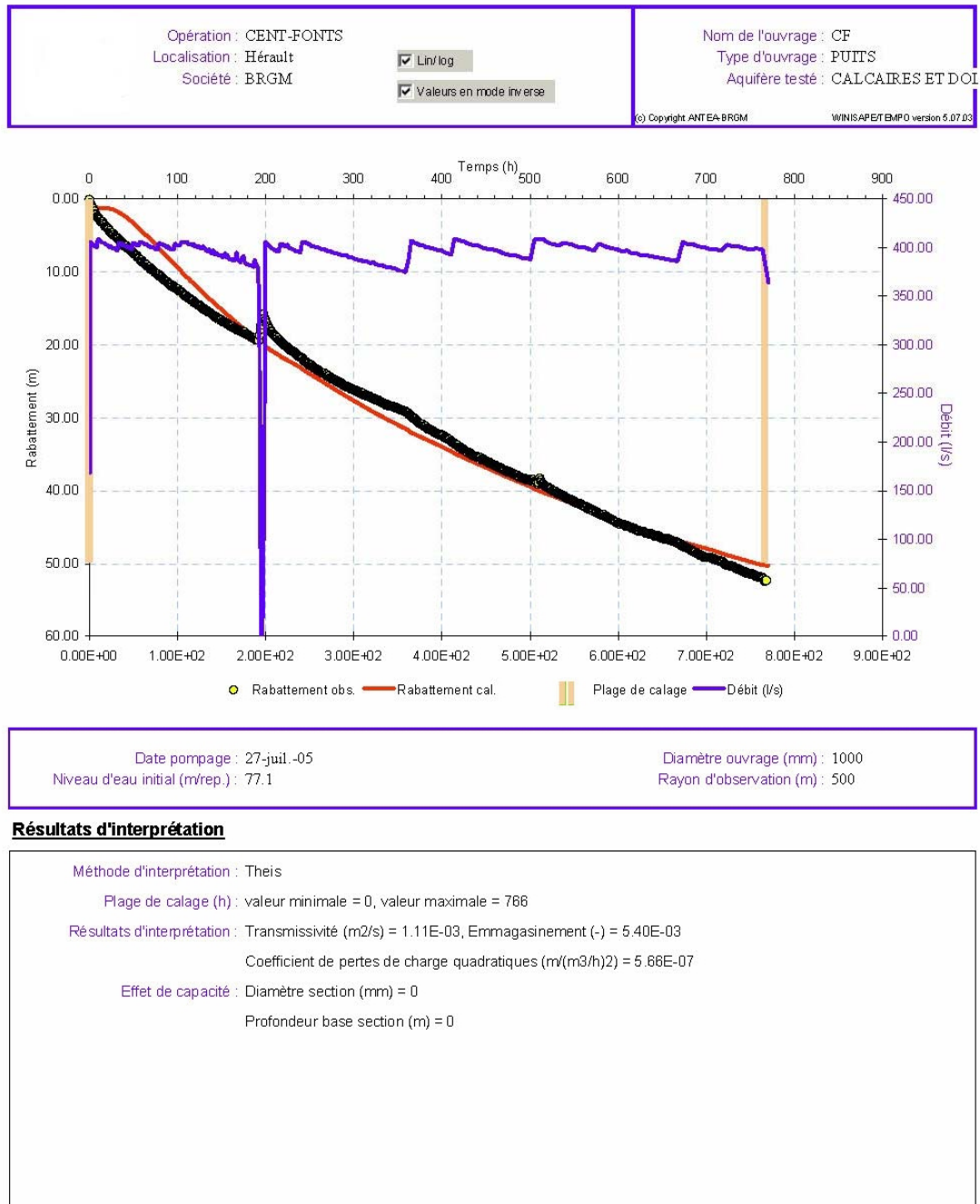


Illustration 62 : Interprétation du pompage d'essai de longue durée au moyen de la solution de Theis

b) Solution d'écoulement en chenal

Le pompage a été réalisé dans un drain karstique. Si la sollicitation concerne le drain uniquement et que celui-ci présente une section verticale constante, l'évolution des rabattements exprimés en fonction de la racine carrée du temps devrait être linéaire (Bourdarot, 1996).

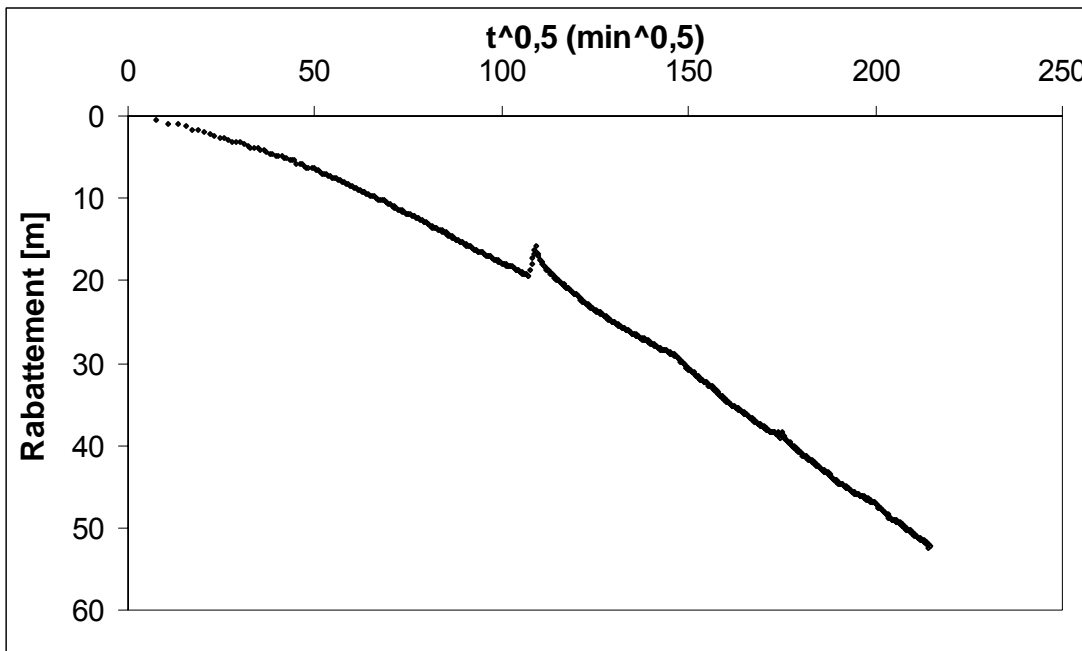


Illustration 63 : Evolution du rabattement au Forage F3 (CF) en fonction de la racine carrée du temps

L'illustration 63 montre que l'évolution du rabattement au Forage F3 (CF) n'est pas linéaire. Ceci indique que les écoulements ne sont pas limités au drain karstique et qu'une autre contribution (les blocs ou les systèmes annexes au drainage (SAD)) alimente le pompage.

Dès lors, les solutions de type « chenal » décrites par (Bourdarot, 1996) ne sont pas adaptées à l'interprétation de cet essai.

c) Solution d'écoulement à dimension fractionnaire

La solution analytique d'écoulement à dimension fractionnaire développée par (Barker, 1988) est une généralisation de la solution analytique classique de Theis extrapolée à des écoulements de géométrie complexe.

La forme de l'évolution des rabattements observés dans le drain karstique (absence de stabilisation à long terme) lors du pompage d'essai de longue durée suggère une géométrie d'écoulements non classique, de dimension inférieure à 2 (Bangoy *et al.*,

1992). Dans un diagramme bi-logarithmique (Illustration 64), les rabattements observés évoluent de façon linéaire en fonction du temps. Dans ce cas, conformément à la théorie de (Bangoy *et al.*, 1992), la pente N de la droite ainsi tracée permet de déterminer la dimension n dominante de l'écoulement vers le puits de pompage. Celle-ci vaut dans ce cas :

$$n = 2(1 - N) = 2(1 - 0,7047) \approx 0,59 \quad \text{éq.9}$$

Où N désigne la pente de la droite sur l'illustration 64 et n désigne la dimension d'écoulement.

Cette dimension très faible, inférieure à 1, suggère des écoulements complexes, constitués d'une combinaison d'écoulements linéaires à dimension proche de 1 (possiblement les écoulements dans les blocs et/ou systèmes annexes vers les drains) et de la vidange (écoulement à dimension 0,5) d'un réservoir (potentiellement lié à l'effet capacitif du système de drains karstiques). Ceci suggère que les écoulements dans les blocs vers les drains auraient une géométrie linéaire et non radiale ou sphérique.

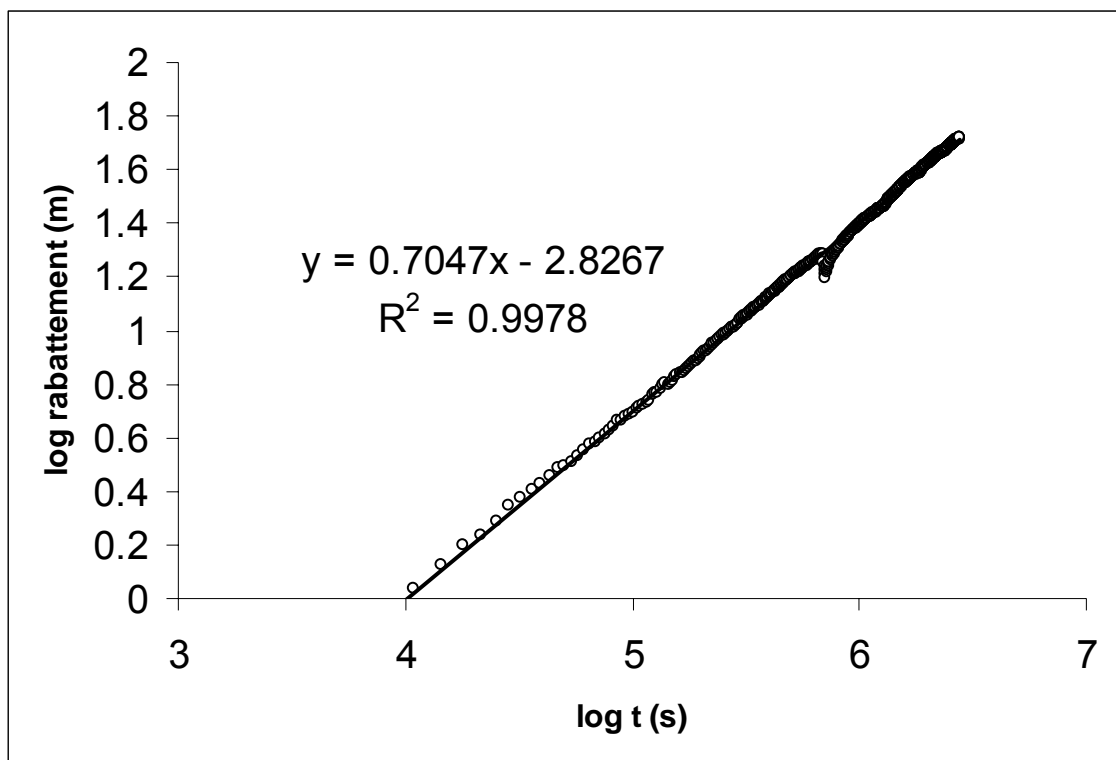


Illustration 64 : Diagramme bi-logarithmique des rabattements mesurés au forage F3 (CF) en fonction du temps lors du pompage de longue durée de juillet-août 2005

Un ajustement des rabattements observés au forage F3 (CF) par la solution analytique de Barker a été réalisé en utilisant la dimension d'écoulement déterminée ci-dessus.

Les résultats sont détaillés au sein du Tableau 37. Les rabattements ont été corrigés de l'effet des pertes de charge quadratiques et le débit considéré est un débit de sollicitation réelle de l'aquifère par rapport à l'état initial : débit de pompage moins régime de tarissement de la source et la contribution de l'Hérault, soit :

$$Q = 400 - 245 - 30 = 125 \text{ l/s}$$

Caractéristiques du puits	Symbole	Valeur	Unité
Débit de pompage	Q_0	0,125	[m ³ /s]
Rayon du puits	r_w	0,5	[m]
Caractéristiques de l'écoulement			
Dimension d'écoulement	n	0,59	[-]
Extension de la région d'écoulement	b	50	[m]
Dimension modifiée	v	0,705	[-]
Caractéristiques du système de fractures			
Conductivité hydraulique	K_f	6,80E-06	[m/s]
Emmagasinement spécifique	S_{sf}	7,00E-02	[-/m]
Transmissivité généralisée	$Kf*b^{(3-n)}$	8,45E-02	
Emmagasinement généralisé	$Ssf*b^{(3-n)}$	8,70E+02	

Tableau 37 : Paramètres d'ajustement de la solution analytique de Barker

Ces paramètres hydrodynamiques K_f et S_{sf} sont des paramètres équivalents qui n'ont pas de signification physique réelle au regard de la complexité des écoulements dans le système karstique. Toutefois, la qualité de l'ajustement obtenu (Illustration 65) démontre la cohérence de cette approche par écoulements à dimension fractionnaire.

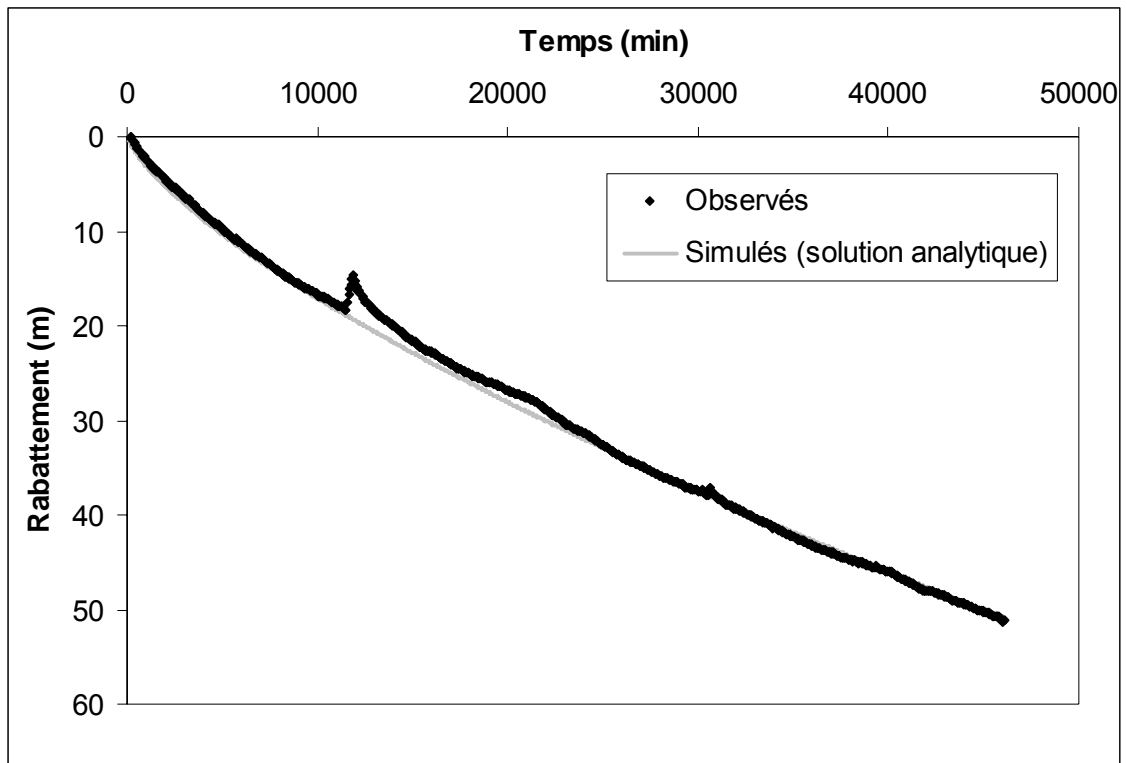


Illustration 65 : Ajustement des rabattements observés (corrigés des pertes de charge quadratiques) par la solution analytique de Barker

d) Courbes de dérivées

L'examen des rabattements exprimés en dérivées permet d'identifier le type de comportement d'un système hydrogéologique en cours de pompage. Il s'agit d'observer l'évolution du rabattement s en fonction du temps sur un diagramme bi logarithmique ainsi que le produit $t \times ds/dt$ sur le même diagramme.

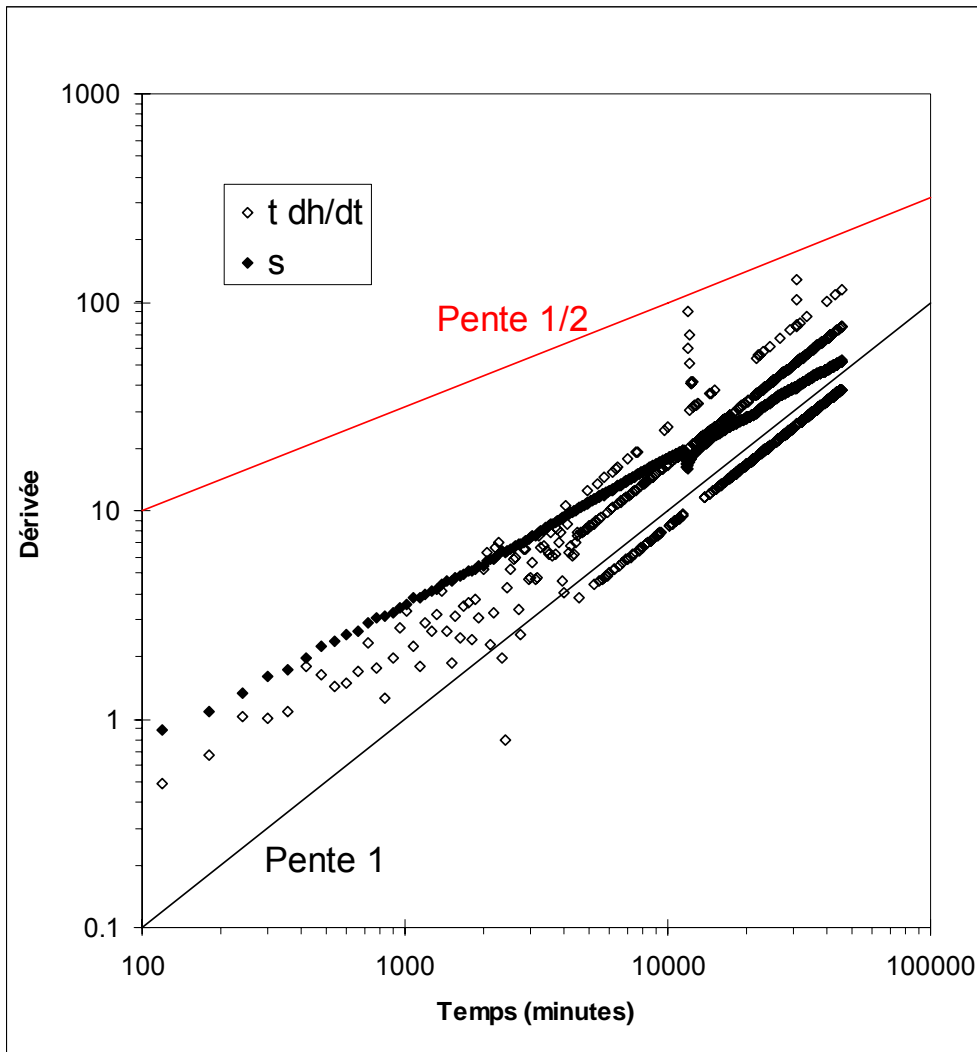


Illustration 66 : Dérivées des rabattements

Aux Cent Fonts, les dérivées évoluent selon deux droites très proches, de pente comprise entre 0,5 et 1 (Illustration 66). Le modèle simple le plus proche de ce type de comportement est celui d'une fracture de conductivité hydraulique très élevée (Bourdet *et al.*, 1989 ; Bourdet *et al.*, 1983), qui correspond au drain karstique dans le cas présent.

Ainsi, aucun comportement de type double porosité n'est mis en évidence sur ces diagrammes.

5.6. MODELISATION DU POMPAGE D'ESSAI

5.6.1. Principe

Les solutions analytiques classiques ne peuvent rendre compte efficacement du comportement hydrodynamique du système karstique des Cent Fonts sollicité par le pompage d'essai réalisé en 2005.

Face à la complexité d'une part de la géométrie du système karstique sollicité par le pompage d'essai et d'autre part des écoulements générés (contribution des pertes de la Buèges, des blocs fissurés et des systèmes annexes au drainage, du déstockage dans les drains, de la rivière Hérault), une approche de modélisation mathématique du pompage d'essai a été mise en oeuvre.

Elle a été implémentée dans le logiciel de calcul MATLAB au moyen du module de simulation SIMULINK.

L'approche développée est nouvelle : elle est hybride et associe un modèle de type « réservoir » à une solution analytique d'écoulement.

5.6.2. Description du modèle

Le modèle mathématique a été conçu de façon à reproduire au mieux la physique des phénomènes telle qu'elle est connue à ce jour au sein du système karstique des Cent Fonts.

En dehors des périodes de pompage, le débit Q' de la source correspond au débordement du drain karstique, qui est alimenté par les pertes de la Buèges et par la contribution des réserves de l'aquifère, issue de la zone noyée.

Lors du pompage d'essai, on considère que le débit Q pompé dans le drain karstique provient (Illustration 67) :

- des pertes de la Buèges alimentant le drain karstique ;
- d'infiltrations de la rivière Hérault alimentant le drain karstique au sein de sa partie aval ;
- de la contribution des blocs de calcaires (et/ou dolomies) poreux et/ou fissurés, et/ou des systèmes annexes au drainage (SAD) situés entre les drains karstiques et alimentant ceux-ci ;
- du déstockage de l'eau contenue dans le drain karstique.

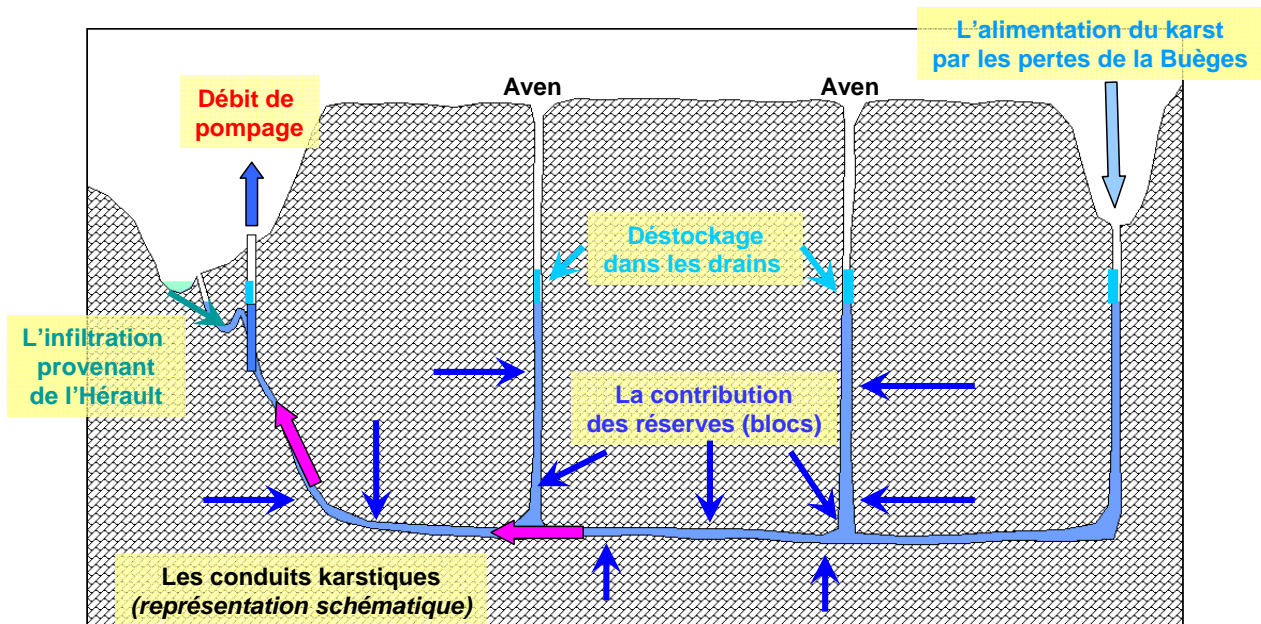


Illustration 67 : Schéma de fonctionnement du système karstique des Cent Fonts au cours de la période de pompage

Il en résulte que le drain karstique, ou plus exactement le réseau de drains karstiques, constitue le réservoir qui est directement sollicité par le pompage. Il est alimenté par des écoulements d'origines diverses. Dès lors, le modèle mathématique repose sur un modèle conceptuel au cœur duquel est situé un réservoir sollicité et alimenté : il s'agit du ou des drains karstiques. Un second réservoir correspond aux blocs³² poreux et/ou fissurés, et/ou aux systèmes annexes au drainage. Il se vidange dans le réseau de drains karstiques au gré de l'évolution relative des charges hydrauliques dans les deux réservoirs (Illustration 68).

Le modèle fonctionne en régime transitoire à pas de temps horaire avec $t = 0$ le 27/07/2005 à 6h00 (TU). Les données horaires utilisées correspondent à des moyennes horaires calculées à partir des données mesurées toutes les 5 minutes.

Les pertes de charge quadratiques, de faible importance ($\sim 2\%$) au regard du rabattement total, n'ont pas été explicitement modélisées dans la mesure où il n'est pas possible de les localiser en l'absence d'une connaissance précise du drain karstique à l'échelle du bassin d'alimentation.

³² Le terme « bloc » ne préjuge pas de la nature karstique des vides alimentant le drain : fissures ou porosité de la matrice dolomitique ou systèmes annexes au drainage

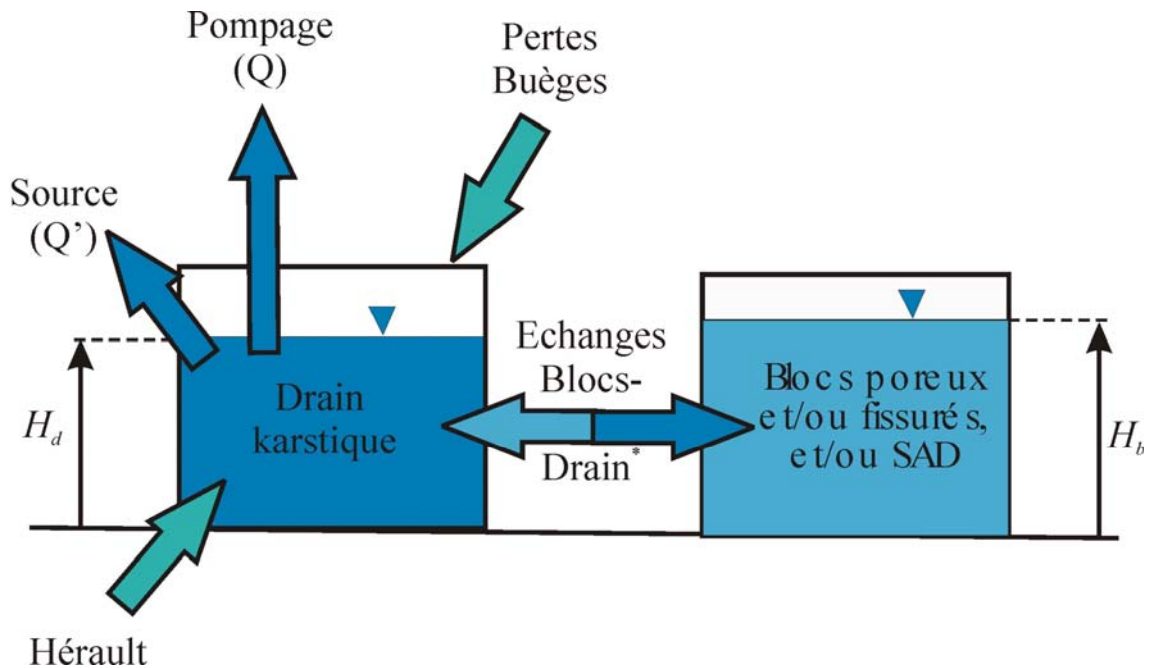


Illustration 68 : Schématisation du modèle mathématique (* échanges blocs-drains que ce soit avant le pompage ou en pompage). H_b : charge hydraulique dans les blocs ; H_d : charge hydraulique dans le drain

5.6.3. Hydraulique du réservoir « drain karstique »

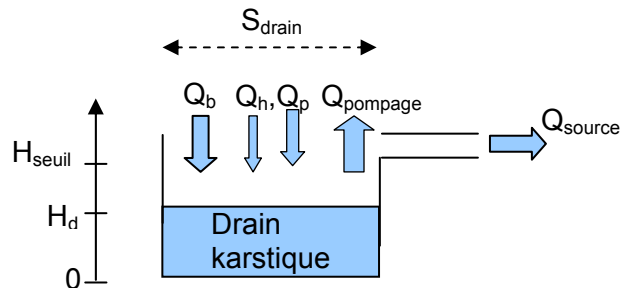
a) Fonctionnalités

Ce réservoir correspond au réseau de drains karstiques connectés à la source des Cent Fonts et directement sollicité par les pompages d'essai. Il est alimenté par le réservoir « blocs » et par les flux provenant de l'Hérault et des pertes de la Buèges. Il est sollicité par le débit de pompage.

Il possède une fonction capacitive liée au stock d'eau situé dans les vides constituant le drain karstique.

Par débordement, il fournit le débit de la source des Cent Fonts.

b) Description mathématique



Si $H_d > H_{seuil}$ et $Q_b + Q_{pertes} + Q_h - Q_{pomp} > 0$, $Q_{source} = Q_b + Q_{pertes} + Q_h - Q_{pomp}$ sinon $Q_{source} = 0$
(*éq. 10*)

Si $H_d < 75$, $Q_h = 108 \text{ m}^3/\text{h} = 30 \text{ l/s}$ sinon $Q_h = 0$ (*éq. 11*)

$$\frac{dH_d}{dt} = \frac{Q_b + Q_h + Q_{pertes} - Q_{pomp} - Q_{source}}{S_{drain}} \quad (\text{éq. 12})$$

avec : H_d : niveau d'eau ou charge hydraulique dans le drain karstique (m)

S_{drain} : surface dénoyée du drain (m^2)

Q_b : débit de contribution des blocs et/ou systèmes annexes au drainage (m^3/h)

Q_p : débit de contribution des pertes de la Buèges (m^3/h)

Q_h : débit d'infiltration de la rivière Hérault (m^3/h)

$Q_{pompage}$: débit de pompage (m^3/h)

Q_{source} : débit calculé par le modèle de la source des Cent Fonts (m^3/h)

H_{seuil} : seuil de débordement du drain (m)

Le débit de contribution des blocs (Q_b) est calculé dans le réservoir « blocs » décrit ci-dessous. Il comprend la contribution naturelle des blocs (débit de tarissement naturel de la source, en l'absence de pompage) ainsi que leur sollicitation du fait des rabattements induits par le pompage.

Le débit des pertes de la Buèges (Q_{pertes}) est mesuré sur le terrain par jaugeage différentiel du débit de la Buèges entre l'amont et l'aval de la zone des pertes. Durant l'essai de pompage, il vaut $Q_{pertes} = 15 \text{ l/s}$ (§ 4.7.2).

Le débit d'infiltration de la rivière Hérault a été estimé par méthode hydrogéochimique (§ 5.4) à environ 30 l/s (soit 108 m³/h) lors du pompage. Il a été considéré que ce débit apparaît lorsque le niveau dans le drain karstique est inférieur à 75 m NGF, soit environ 2 mètres sous le niveau de la source. Il est donc considéré comme nul lorsque le niveau dans le drain karstique est supérieur ou égal à cette valeur.

Le débit de pompage (Q_{pompe}) est constitué de la série de valeurs mesurées pendant l'essai.

Seuls trois paramètres caractérisent ce réservoir « drain karstique » (Tableau 38). Ils sont décrits ci-dessous :

la fonction capacitive du drain karstique correspond à son emmagasinement, exprimé en m². Il s'agit du volume d'eau libéré par le réseau karstique lorsque le niveau d'eau dans le drain baisse d'un mètre, exprimé en m³/m, soit en m². Le drain karstique étant constitué de vides de porosité égale à 100 %, son emmagasinement correspond donc à la surface totale des vides : c'est la surface dénoyée du drain S_{drain} ;

le seuil de débordement (H_{seuil}) au-delà duquel le réservoir « drain karstique » déborde correspond à l'altitude de la source des Cent Fonts, ce paramètre, mesuré sur le site, est fixé à 76,9 m NGF ;

la hauteur d'eau³³ initiale dans le drain (H_{d0}) a été fixée à l'altitude de la source puisque la source débordait au début du pompage.

Paramètre et unité	Signification	Fixé / ajusté
S_{drain} (m ²)	Surface dénoyée du drain karstique	Ajusté
H_{seuil} (m)	Hauteur d'eau dans le drain au-delà de laquelle la source déborde	Fixé (altitude de la source : 76,9 m NGF)
H_{d0} (m)	Hauteur d'eau initiale dans le drain	Fixé (altitude de la source : 76,9 m NGF)

Tableau 38 : Paramètres du réservoir « drain karstique »

Sur la base des trois paramètres décrits ci-dessus et des débits imposés des pertes de la Buèges, de pompage et de contribution de l'Hérault, ainsi que des débits d'échange entre les blocs et le drain calculés dans l'autre réservoir, le réservoir « drain karstique » calcule le niveau d'eau dans le drain (H_d) au moyen de la relation (éq.12) et le débit de la source (Q_{source}) au moyen de la relation (éq. 10).

³³ Au sein de ce chapitre, les termes « hauteur d'eau » et « niveau d'eau » sont fréquemment utilisés en tant que synonymes de « charge hydraulique » ou de « niveau piézométrique ».

Les niveaux d'eau calculés dans le drain karstique pourront alors être comparés à ceux mesurés dans le forage de pompage CF (F3) et dans le forage de reconnaissance (F2).

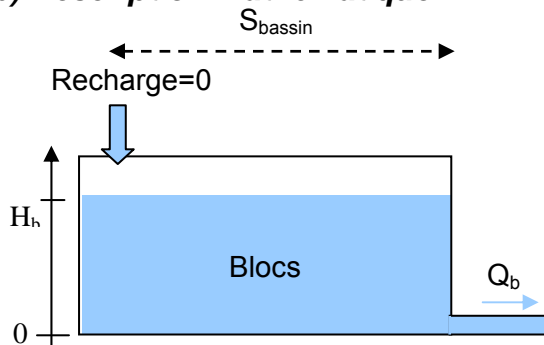
5.6.4. Hydraulique du réservoir « blocs »

a) Fonctionnalités

Ce réservoir correspond aux blocs poreux (et/ou fissurés) et/ou aux systèmes annexes au drainage (SAD) situés entre les drains du réseau karstique. Ceux-ci alimentent le drain karstique selon une relation dépendant de la différence de charge hydraulique qui règne entre blocs et drain.

Le rôle de ce réservoir est de calculer la contribution des blocs au drain en période de pompage, suite au rabattement induit dans le drain karstique ou, à l'inverse, la contribution du drain aux blocs.

b) Description mathématique



$$\frac{dH_b}{dt} = \frac{R - Q_b}{\phi S_{bassin}} \quad (\text{eq. 13})$$

avec : H_b : niveau d'eau dans les blocs (m)

S_{bassin} : surface du bassin d'alimentation (m^2)

Q_b : débit de contribution des blocs au drain (m^3/h)

R : recharge des blocs (m^3/h), $R = 0$ pendant l'essai en l'absence de pluies

ϕ : porosité efficace moyenne des blocs (sans dimension)

Q_b est calculé au moyen de diverses relations analytiques simples décrites ci-dessous dans la section consacrée aux résultats.

Outre les paramètres dépendant de la solution analytique employée pour le calcul du débit Q_b , ce réservoir est caractérisé par trois paramètres (Tableau 39) :

- la surface du bassin d'alimentation des blocs du système karstique a été déterminée par étude hydrogéologique, bilan hydrogéologique et essais de traçage (Schoen et al, 1999 ; Ladouche *et al.*, 2002) ; elle est évaluée à 30 km² ;
- la porosité efficace des blocs constitue un paramètre d'ajustement ;
- la hauteur d'eau initiale dans les blocs a été fixée en moyenne à 110 m NGF, conformément aux mesures disponibles dans le piézomètre P6 dont le contexte hydrogéologique est représentatif de celui d'un bloc.

Paramètre et unité	Signification	Fixé / ajusté
S_{bassin} (m ²)	Surface du bassin d'alimentation du karst (hors BV des pertes de la Buèges)	Fixé : 30 km ²
ϕ (-)	Porosité efficace des blocs	Ajusté
H_{b0} (m)	Hauteur d'eau initiale dans les blocs	Fixé : 110 m NGF
Autres paramètres	Selon la solution analytique utilisée pour calculer Q_b	Ajustés

Tableau 39 : Paramètres du réservoir « blocs »

Sur base des trois paramètres décrits ci-dessus, des paramètres de la solution analytique utilisée et des niveaux d'eau dans le drain karstique et dans les blocs, le réservoir « blocs » calcule le débit de contribution des blocs au drain karstique ou, à l'inverse, le débit de contribution du drain aux blocs.

5.6.5. Résultats des modélisations

Les résultats de la modélisation sont très dépendants du choix de la solution analytique employée pour déterminer la contribution des blocs au drain. Ils sont donc décrits ci-dessous successivement pour chacune des solutions analytiques testées.

a) Modèle 1 : solution diffusive classique

• Solution

Cette relation implique un débit dans les blocs proportionnel à la différence de niveau d'eau entre les blocs et le drain :

$$Q_b(t) = K_{ech}(H_b(t) - H_d(t)) \quad (\text{éq. 14})$$

avec K_{ech} (m²/s) : un facteur d'échange entre blocs et drain, proportionnel à la transmissivité des blocs.

Ce modèle correspond à celui de Thiem en écoulement captif permanent (Thiem, 1906), qui comporte des écoulements radiaux vers un drain et une limite alimentée située à une distance finie du drain.

• Paramètres

Deux des jeux de paramètres (jeux 1 et 2) les plus représentatifs ayant été calés avec ce premier modèle sont présentés ci-dessous (Tableau 40 et Illustration 69 et Illustration 70).

Réservoir	Paramètre	Signification	Valeurs (jeu 1)	Valeurs (jeu 2)
Drain	S_{drain} (m ²)	Surface dénoyée du drain karstique	1800	9000
	H_{seuil} (m)	Hauteur d'eau dans le drain au-delà de laquelle la source déborde	76,9	76,9
	H_{d0} (m)	Hauteur d'eau initiale dans le drain	76,9	76,9
Blocs	S_{bassin} (km ²)	Surface du bassin d'alimentation du karst	30	30
	ϕ (-)	Porosité efficace des blocs	0,007	0,005
	H_{b0} (m)	Hauteur d'eau initiale dans les blocs	110	110
	K_{ech} (m ² /s)	Facteur d'échange blocs / drain	0,0045	0,003

Tableau 40 : Paramètres du modèle 1 (en gris, paramètres d'ajustement)

• Résultats

Les niveaux d'eau au forage F3 (CF) mesurés et simulés pour le jeu de paramètres 1, sont comparés au sein de l'illustration 69.

On constate que, si l'amplitude totale du rabattement est bien approchée, la forme de son évolution au cours du temps est mal reproduite. Alors que les rabattements simulés tendent vers une « pseudo-stabilisation » (logique compte tenu de la présence implicite d'une limite alimentée au sein de la solution analytique employée), les rabattements observés continuent à croître. La deuxième phase de pompage à 300 l/s à la fin de la période d'essai (à partir du 3 septembre 2005) est aussi mal représentée.

Par contre, la remontée du niveau d'eau observée suite à l'arrêt du pompage du 9 août et, dans une moindre mesure, la remontée observée le 2 septembre sont relativement bien simulées, du moins en amplitude. L'amplitude de ces variations de niveaux est inversement proportionnelle au paramètre de calage S_{drain} . Ces variations permettent donc de bien cadrer la valeur du paramètre de stockage/déstockage au sein du réseau de drains karstiques.

Le paramètre S_{drain} vaut dans ce cas 1800 m², ce qui correspond par exemple à :

- une galerie horizontale de 400 m de long et 2 m de large qui serait dénoyée sur une hauteur égale à celle du rabattement mesuré ;

- et une série de 50 avens verticaux de 20 m² de section qui seraient également dénoyés sur une hauteur égale au rabattement.

La porosité dans les blocs est ajustée de manière qualitative compte tenu de la représentativité des piézomètres d'observation situés sur le bassin d'alimentation de la source, au moyen des fluctuations de niveau mesurées au sein de ces piézomètres. Les valeurs inférieures à 1 % permettent d'obtenir des fluctuations de l'ordre de 5 à 7 mètres sur la durée du pompage, comparables à celles observées au piézomètre P6.

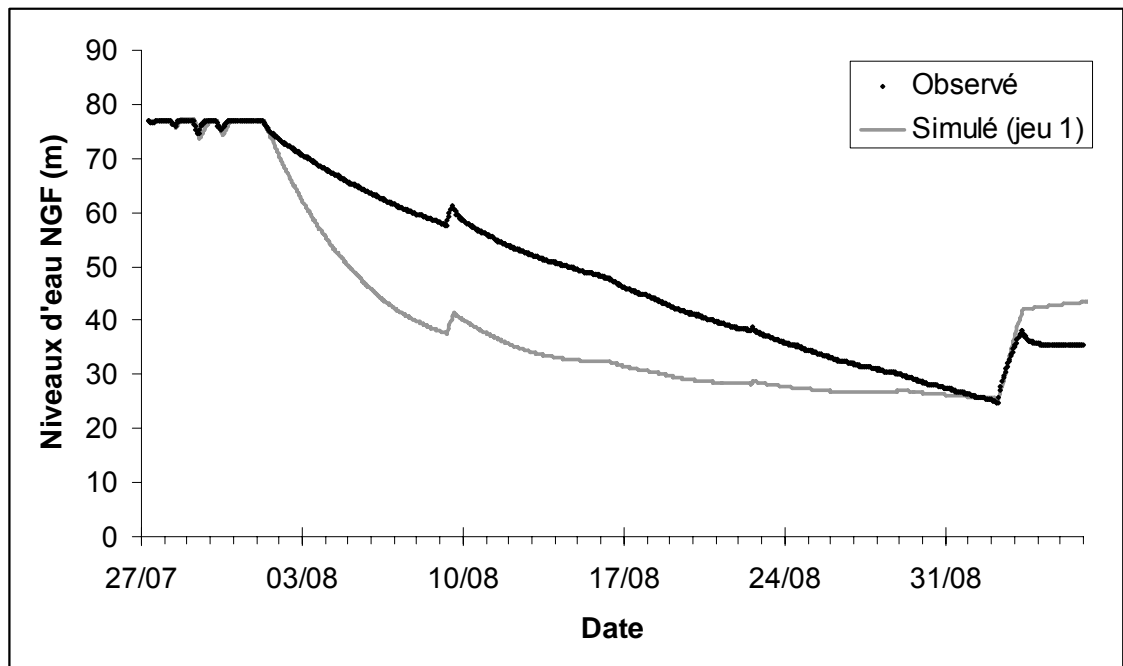


Illustration 69 : Comparaison des niveaux d'eau observés et simulés (Modèle 1, jeu 1) au forage F3 (CF)

L'introduction d'un plus grand volume de stockage dans les drains (9000 m³/m, jeu 2, Tableau 40) permet de mieux représenter, dans sa globalité, l'évolution des niveaux observée au forage de pompage (jeu 2, Illustration 70). Toutefois, les brusques variations du débit de pompage (lors des paliers de fin juillet, de l'arrêt du 9 août, ou de la remontée de septembre) sont mal représentées en raison de l'amortissement induit par l'effet capacitif dû au grand volume de stockage dans les drains.

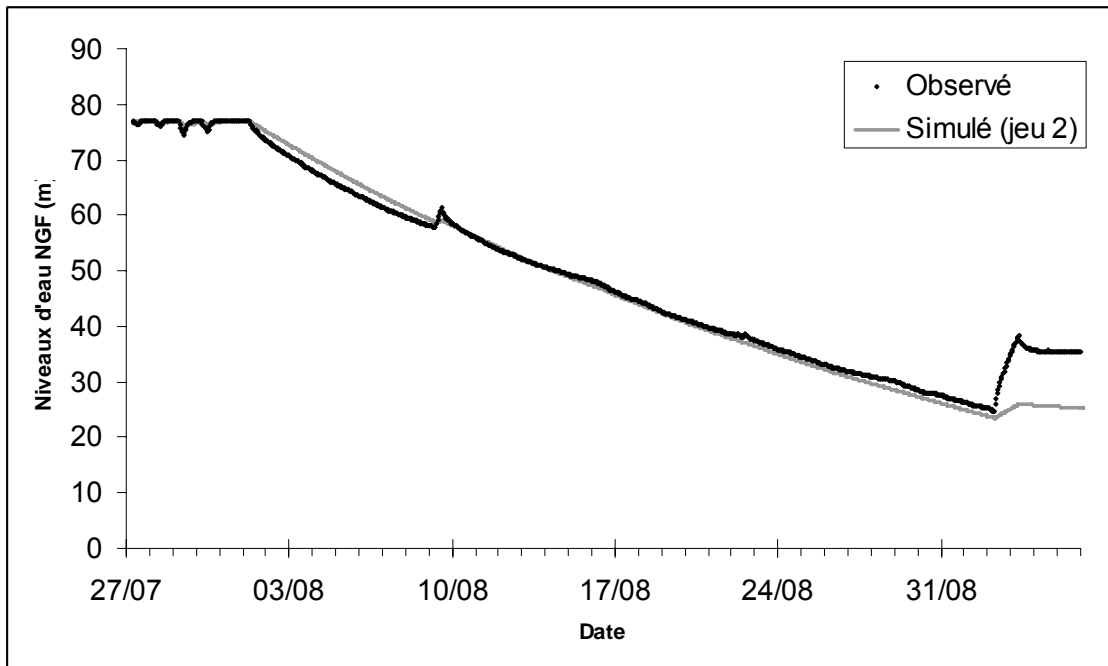


Illustration 70 : Comparaison des niveaux d'eau observés et simulés (Modèle 1, jeu 2) au forage F3 (CF)

Les phases ou périodes durables d'arrêt du pompage ou de changement de débit de pompage apparaissent ainsi comme déterminantes pour la qualité du calage du modèle.

b) Modèle 2 : écoulements permanents vers une tranchée drainante

• Solution

La géométrie de drains karstiques horizontaux drainant des blocs fissurés peut être assimilée à celle d'une tranchée linéaire drainant un aquifère. Pour cette raison, une solution analytique de type « tranchée drainante » a été testée pour déterminer la relation blocs - drain.

Cette solution en régime permanent, implique un débit dans les blocs proportionnel à la différence des carrés des charges hydrauliques dans les blocs et le drain :

$$Q_b(t) = \frac{Kl}{2L} (H_b^2(t) - H_d^2(t)) = K_{ech} (H_b^2(t) - H_d^2(t)) \quad (\text{éq. 15})$$

Avec $K_{ech} = \frac{Kl}{2L}$ et :

K_{ech} (m²/s) : un facteur d'échange entre blocs et drain, proportionnel à la transmissivité des blocs,

K (m/s) : perméabilité des blocs,

l (m) : longueur de la tranchée ou, dans le cas présent, du drain karstique,

L (m) : distance à laquelle le potentiel imposé est appliqué au sein des blocs.

Ce modèle correspond à un écoulement linéaire en régime permanent vers une tranchée complète, avec une condition de potentiel imposé H_b à une distance L . Dans le cas présent, la solution « permanente » est appliquée à chaque pas de temps en cours de pompage.

• Paramètres

Les paramètres ajustés avec ce deuxième modèle sont les suivants (Tableau 41).

Réservoir	Paramètre	Signification	Valeurs
Drain	S_{drain} (m ²)	Surface dénoyée du drain karstique	2600
	H_{seuil} (m)	Hauteur d'eau dans le drain au-delà de laquelle la source déborde	76,9
	H_{d0} (m)	Hauteur d'eau initiale dans le drain	76,9
Blocs	S_{bassin} (km ²)	Surface du bassin d'alimentation du karst	30
	ϕ (-)	Porosité efficace des blocs	0,007
	H_{b0} (m)	Hauteur d'eau initiale dans les blocs	110
	K_{ech} (m ² /s)	Echange blocs / drain	3,6E-05

Tableau 41 : Paramètres du modèle 2 (en gris, paramètres d'ajustement)

• Résultats

Les niveaux d'eau mesurés et simulés au forage F3 (CF) sont comparés au sein de l'illustration 71.

L'utilisation de cette solution analytique ne permet pas d'améliorer de manière significative la simulation des rabattements observés (Illustration 71). D'une manière générale, l'effet de limite alimentée est encore trop marqué.

D'autres essais ont été effectués, notamment en faisant varier (diminution) l'emmagasinement dans le drain en fonction de la profondeur, sans toutefois améliorer sensiblement la qualité des résultats.

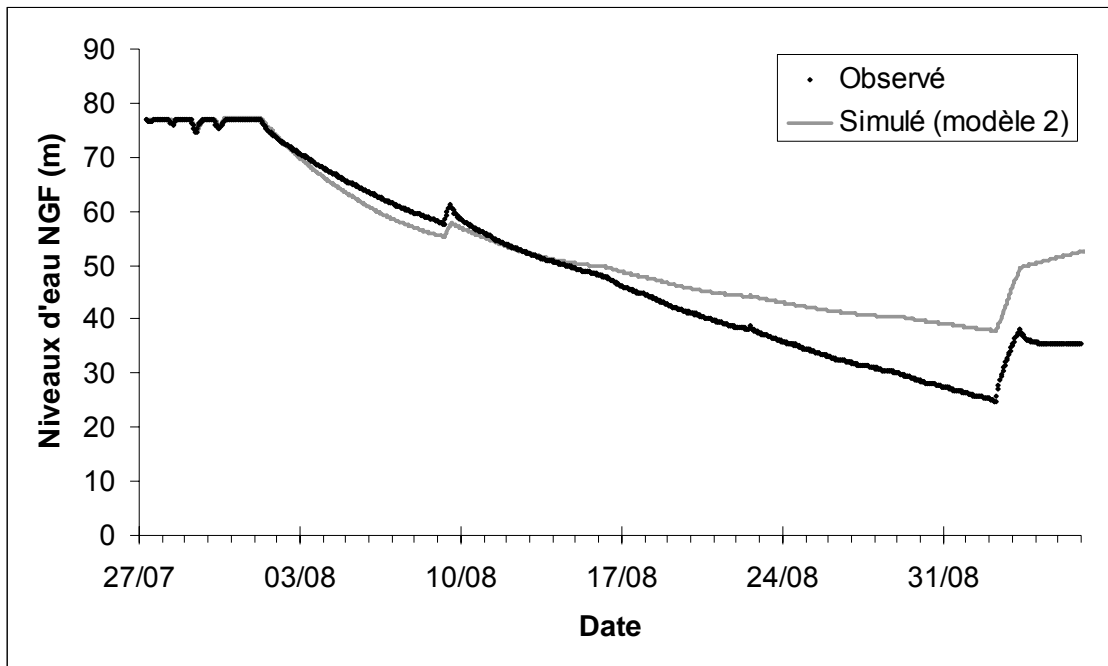


Illustration 71 : Comparaison des niveaux d'eau observés et simulés (Modèle 2) au forage F3 (CF)

c) Modèle 3 : écoulements transitoires vers une tranchée drainante

• Solution

Un troisième modèle, de type « tranchée drainante », similaire au modèle 2, mais fonctionnant dans ce cas en régime transitoire, a également été testé. Le débit des blocs vers le drain évoluant en fonction des variations de différence de charge hydraulique entre blocs et drain, la solution testée est une solution de type potentiel imposé.

L'évolution du débit en fonction du temps t , dans une tranchée linéaire drainante dans laquelle un potentiel h_0 est subitement imposé au moment $t = 0$ alors que prévalait une condition hydrostatique initiale H_0 est donnée par la relation suivante :

$$Q(t) = \frac{l}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{TS}{t}} (H_0 - h_0) = \frac{K_{ech}}{\sqrt{t}} (H_0 - h_0) \quad (\text{éq. 16})$$

Avec :

l (m) : longueur de la tranchée, ou, dans le cas présent, le réseau de drains karstiques,

T (m²/s) : transmissivité de l'aquifère, les blocs dans le cas présent,

S (-) : emmagasinement de l'aquifère, les blocs dans le cas présent,

H_0 (m) : charge hydraulique initiale dans l'aquifère, dans les blocs par exemple,

h_0 (m) : charge hydraulique constante dans la tranchée, dans le drain dans le cas présent.

Cette solution a été obtenue pour une nappe captive par intégration de l'équation de Darcy avec les conditions initiales et aux limites suivantes (schématisées au sein de l'illustration 72) :

$$H(x,0) = H_0 \qquad H(\infty, t) = H_0$$

et $H(0, t) = h_0$

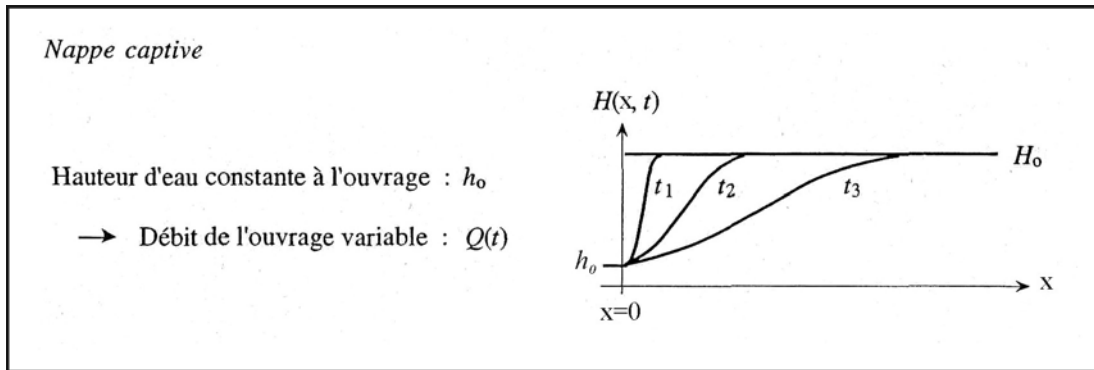


Illustration 72 : Schéma d'un écoulement transitoire vers une tranchée drainante située en $x = 0$, dont le potentiel, initialement à H_0 , est instantanément imposé à h_0 (le niveau piézométrique dans l'aquifère évolue au cours du temps t_1 , t_2 , t_3)

Dans le système karstique des Cent Fonts, les conditions initiales avant pompage ne sont pas des conditions hydrostatiques de type $H(x,0) = H_0$ partout avec un débit nul des blocs vers le drain. Au contraire, il existe une différence de potentiel entre les blocs et le drain, à l'origine du débit s'écoulant à la source.

Dès lors, la relation (éq. 16) a été appliquée en perturbation pour calculer le rabattement supplémentaire $(H_b(t) - H_d(t))$, où les indices « b » et « d » font respectivement référence aux « blocs » et au « drain », par rapport à un rabattement initial $(H_{b0} - H_{d0})$ générant le débit « naturel » de tarissement de la source Q_{taris} . De cette façon, le débit s'écoulant des blocs vers le drain peut s'écrire :

$$Q_b(t) = Q_{taris}(t) + \frac{l}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{T_b S_b}{t}} [(H_b(t) - H_d(t)) - (H_{b0} - H_{d0})] \qquad (\text{éq. 17})$$

Il s'agit de la somme du débit de tarissement de la source lié à la différence initiale de potentiel entre drain et blocs et des débits additionnels générés par les variations de rabattement induites par le pompage.

En supposant que la variation de niveau dans les blocs est négligeable en face du rabattement total dans le drain :

$$H_b(t) - H_{b0} \approx 0$$

la relation (éq. 16) peut se simplifier comme suit :

$$Q_b(t) = Q_0 e^{-\alpha t} + \frac{l}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{T_b S_b}{t}} s_d(t) = Q_0 e^{-\alpha t} + \frac{K_{ech}}{\sqrt{t}} s_d(t) \quad (\text{éq. 17})$$

Où :

- $s_d(t) = H_{d0} - H_d(t)$ désigne le rabattement dans le drain, égal aussi au rabattement mesuré dans le puits de pompage ;
- $Q_0 e^{-\alpha t}$ (formule de Maillet, 1905) est utilisé pour représenter le tarissement naturel (Q_{taris}) de la source, en utilisant des paramètres Q_0 et α calés sur le suivi de la source réalisé antérieurement et juste avant le pompage (cf. § 5.2.2).

Dans la mesure où les rabattements imposés dans le drain par le pompage varient au cours du temps, la relation (éq. 17) a été mise en oeuvre au moyen du principe de superposition.

Si le rabattement s_d dans le drain évolue au cours du temps (s_1 à $t = t_1 \dots s_N$ à $t = t_N$), le débit additionnel des blocs vers le drain (ou vice versa) s'écrit, à chaque variation de s ou, dans le cas qui nous concerne, à chaque pas de temps :

$$Q(t_1) = \frac{K_{ech}}{\sqrt{t_1}} s_1 \quad (\text{éq. 18})$$

$$Q(t_2) = \frac{K_{ech}}{\sqrt{t_2}} s_1 + \frac{K_{ech}}{\sqrt{t_2 - t_1}} (s_2 - s_1) \quad (\text{éq. 19})$$

$$Q(t_3) = \frac{K_{ech}}{\sqrt{t_3}} s_1 + \frac{K_{ech}}{\sqrt{t_3 - t_1}} (s_2 - s_1) + \frac{K_{ech}}{\sqrt{t_3 - t_2}} (s_3 - s_2) \quad (\text{éq. 20})$$

$$Q(t_N) = \frac{K_{ech}}{\sqrt{t_N}} s_1 + \frac{K_{ech}}{\sqrt{t_N - t_1}} (s_2 - s_1) + \frac{K_{ech}}{\sqrt{t_N - t_2}} (s_3 - s_2) + \dots + \frac{K_{ech}}{\sqrt{t_N - t_{N-1}}} (s_N - s_{N-1}) \quad (\text{éq. 21})$$

De façon itérative, on peut l'écrire :

$$\text{Pour } i = 1 : Q_1 = \frac{K_{ech}}{\sqrt{t_N}} s_1 \quad (\text{éq. 22})$$

$$\text{pour } i = 2 \text{ à } N : Q_i = Q_{i-1} + \frac{K_{ech}}{\sqrt{(t_N - t_{i-1})}} (s_i - s_{i-1}) \quad (\text{éq. 23})$$

• Paramètres

Les paramètres ajustés avec ce troisième modèle sont les suivants (Tableau 42).

Réservoir	Paramètre	Signification	Valeurs
Drain	S_{drain} (m ²)	Surface dénoyée du drain karstique	1900
	H_{seuil} (m)	Hauteur d'eau dans le drain au-delà de laquelle la source déborde	76,9
	H_{d0} (m)	Hauteur d'eau initiale dans le drain	76,9
Blocs	S_{bassin} (km ²)	Surface du bassin d'alimentation du karst	30
	ϕ (-)	Porosité efficace des blocs	0,007
	H_{b0} (m)	Hauteur d'eau initiale dans les blocs	110
	Q_0 (l/s)	Contribution initiale des blocs à t=0 (le 27/07/05)	240
	α (j ⁻¹)	Coefficient de tarissement du système	$2,1 \times 10^{-3}$
	T_b (m ² /s)	Transmissivité des blocs	$1,6 \times 10^{-5}$
	S_b (-)	Emmagasinement des blocs	0,007
	l_{drain} (km)	Longueur du réseau de drains karstiques	10

Tableau 42 : Paramètres du modèle 3 (en gris, paramètres d'ajustement)

La surface dénoyée du drain karstique $S_{\text{drain}} = 1900 \text{ m}^2$ est identique à celle déterminée avec le modèle 1. Cette valeur permet notamment d'ajuster de façon satisfaisante la remontée brusque du niveau piézométrique induite par l'arrêt du pompage du 9 août ainsi que les effets des autres arrêts ou changements de débit. Il n'est pas nécessaire de faire varier ce paramètre en fonction du niveau piézométrique au sein du drain, ce qui suggère l'absence de changement notable de sa porosité efficace (donc de sa géométrie) en fonction de la profondeur, au moins dans la gamme des niveaux piézométriques explorée dans le cadre du pompage d'essai. Ce sont donc plutôt des conduits verticaux que des réseaux horizontaux qui auraient été dénoyés, à l'échelle de l'ensemble du système aquifère, au cours de l'essai.

Le débit initial de contribution des blocs Q_0 le 27/07/2005 à l'instant $t = 0$ vaut 240 l/s (255 l/s de débit de la source moins 15 l/s de débit des pertes) et le coefficient de tarissement de la source est $\alpha = 0,0021 \text{ j}^{-1}$ (cf. § 5.2.2.).

La transmissivité obtenue pour les blocs, $T_b = 1,6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, est d'un ordre de grandeur tout à fait acceptable dans ce type de contexte hydrogéologique.

L'emmagasinement $S_b = 0,007$ utilisé pour le calcul du débit de contribution des blocs est identique à la valeur de porosité efficace utilisée dans le calcul du rabattement dans les blocs.

La longueur du réseau de drains karstiques obtenue, $l_{\text{drain}} = 10 \text{ km}$, suggère un développement du réseau cohérent avec la structure de l'aquifère. Toutefois, ce paramètre intervient dans la relation (éq. 17) au même titre que $\sqrt{T_b S_b}$. Par conséquent, plusieurs couples de valeurs de l_{drain} et $\sqrt{T_b S_b}$ peuvent permettre le même ajustement. Dès lors, celui-ci permet de déterminer le produit $l_{\text{drain}} \times \sqrt{T_b S_b}$ mais pas chacun des termes du produit indépendamment.

Les paramètres retenus à l'issue de l'ajustement sont représentés ci-dessous sur le modèle conceptuel de l'aquifère (Illustration 73).

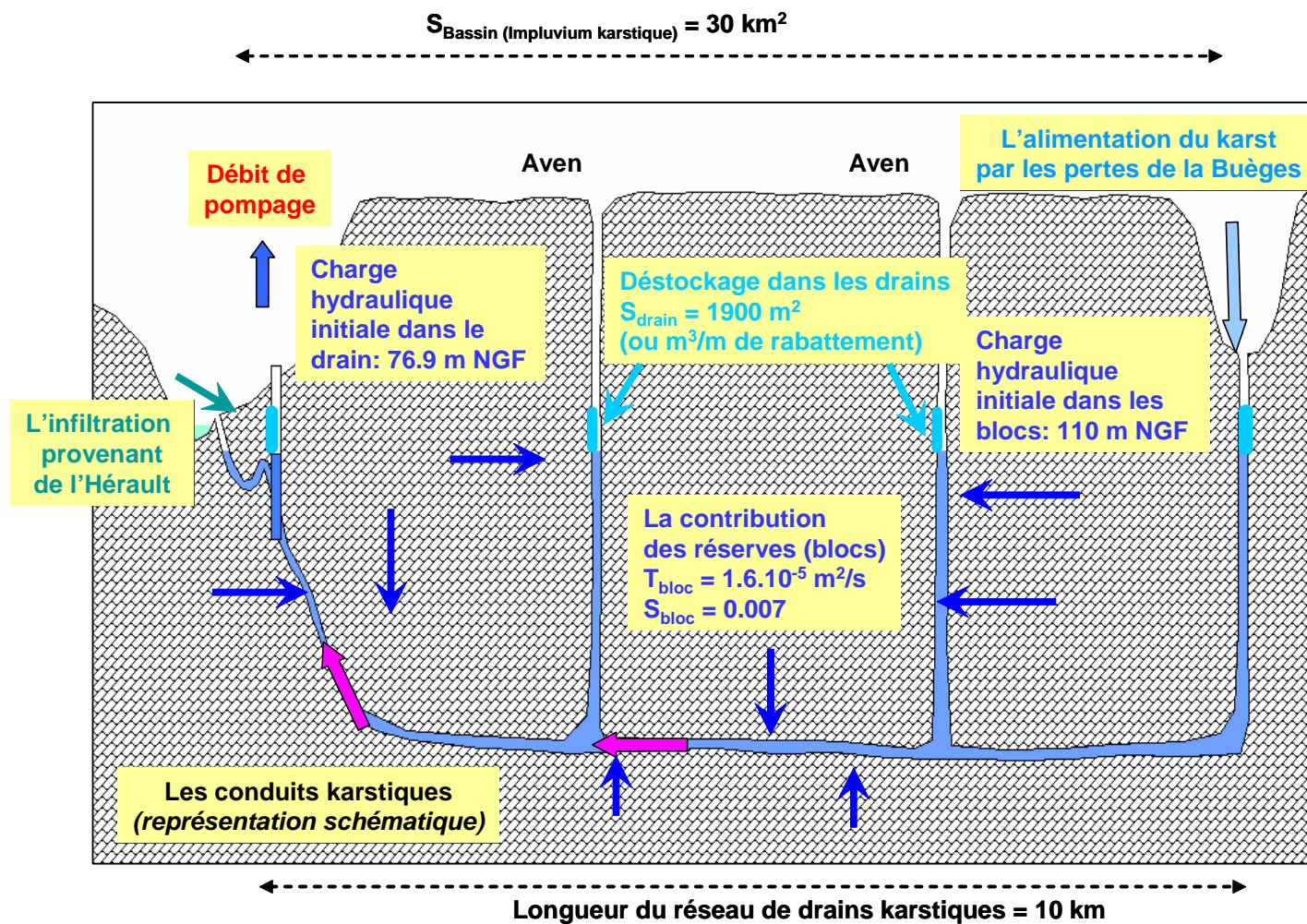


Illustration 73 : Modèle conceptuel de l'aquifère karstique des Cent Fonts et paramètres utilisés pour le calage du modèle 3

• **Résultats**

Qualité de l'ajustement de la piézométrie et des débits de la source

Les niveaux piézométriques observés et simulés au forage F3 (CF) et au piézomètre F6 sont comparés à l'illustration 74.

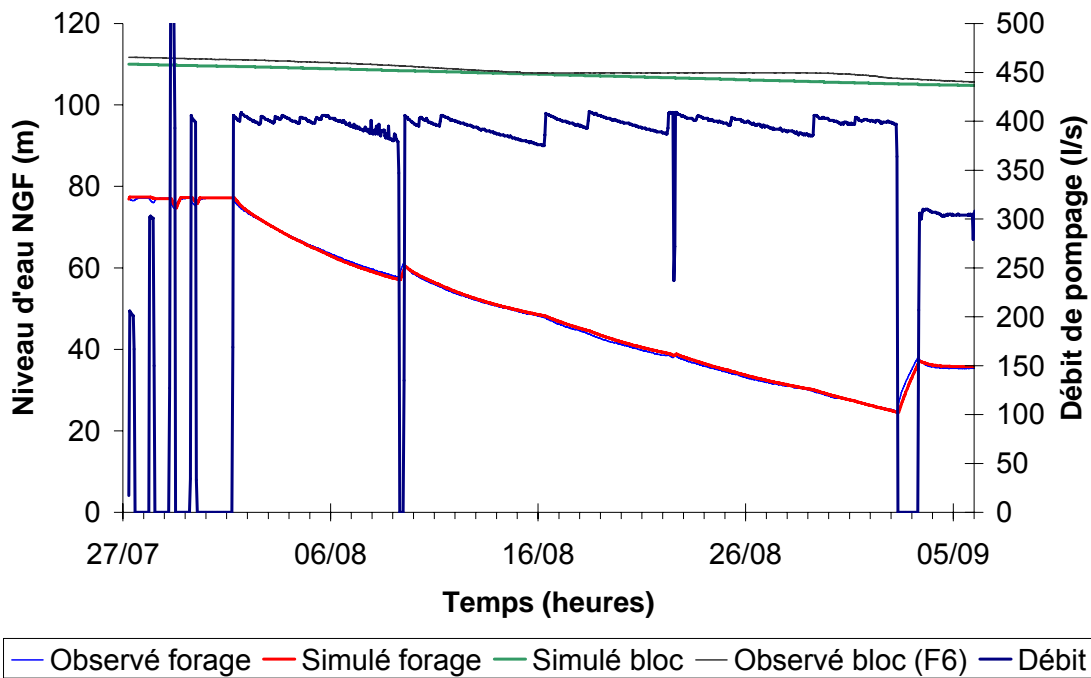


Illustration 74 : Comparaison des niveaux d'eau simulés et observés au forage F3 (CF) et dans le piézomètre F6 (modèle 3)

Les niveaux d'eau simulés au forage F3 (CF) au moyen de ce modèle sont très proches des niveaux d'eau observés lors du pompage d'essai. La qualité de l'ajustement est particulièrement remarquable lors de la remontée observée lors de l'arrêt programmé du début du mois de septembre et lors du palier de 300 l/s qui l'a suivi.

Les débits observés et simulés à la source des Cent Fonts sont comparés sur l'illustration 75 durant les pompages d'essai par paliers de débit et durant le début du pompage d'essai de longue durée. Le modèle reproduit relativement bien les phases de tarissement de la source ainsi que leur dynamique. On constate cependant une différence entre débits simulés et observés, notamment lors des phases de réaugmentation du débit, durant lesquelles le débit simulé augmente plus rapidement que le débit observé. Certains processus non pris en compte ou imparfaitement pris en compte par ce modèle sont susceptibles d'expliquer ces différences : variabilité

verticale et latérale de l'emmagasinement à proximité des sources, non progressivité de l'augmentation du débit d'échange entre l'Hérault et le karst aux faibles rabattements, etc.

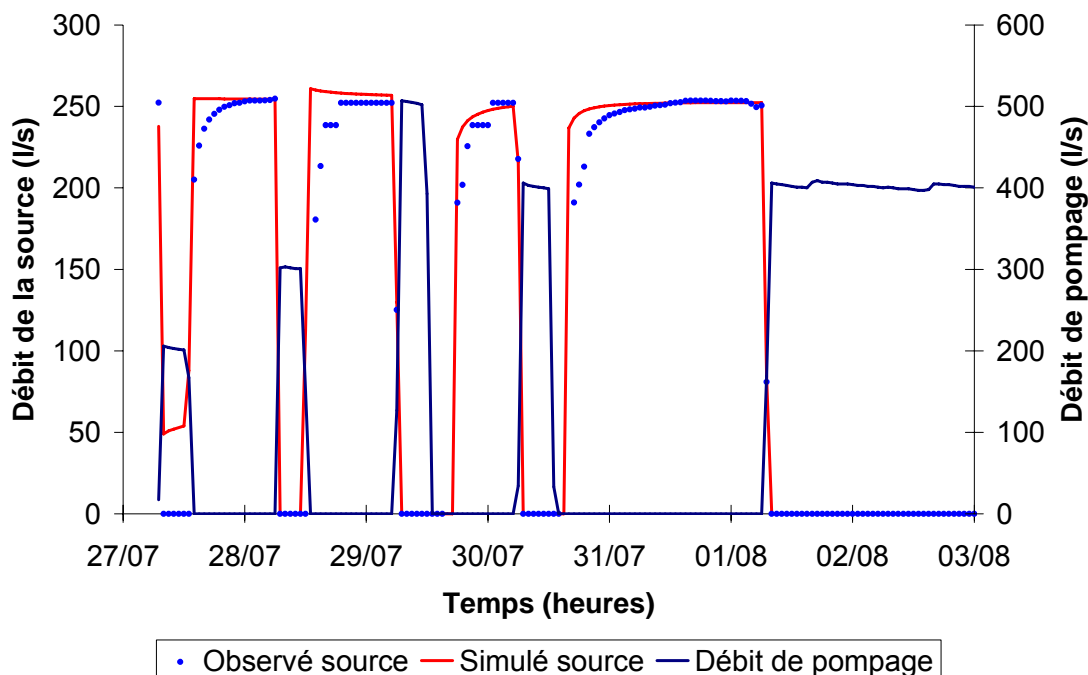


Illustration 75 : Comparaison des débits observés et simulés à la source entre le 27 juillet et le 3 août 2005

Simulation de la poursuite du pompage à 300 l/s

Le modèle a permis de simuler l'évolution des niveaux d'eau au forage de pompage F3 (CF) dans l'hypothèse où le palier à 300 l/s aurait été maintenu sur une plus longue durée, sans recharge de l'aquifère (Illustration 76), c'est-à-dire si les pluies du début du mois de septembre ne s'étaient pas produites. Cette simulation montre qu'après une période de stabilisation d'une durée de quelques semaines, le rabattement aurait augmenté à nouveau. La « pseudo – stabilisation » observée vers le 5 septembre lors du palier à 300 l/s serait donc temporaire et résulterait en fait de la combinaison des effets de la « remontée » liée à l'arrêt du précédent pompage à 400 l/s et de la « descente » liée au pompage suivant à 300 l/s.

Cette absence de stabilisation à long terme est due au fait que la solution analytique utilisée ne comprend pas de limite alimentée, ce qui est en accord avec les observations réalisées pendant la durée de l'essai, mais ne préjuge pas du comportement réel de l'aquifère à plus long terme. En réalité, le modèle est vraisemblablement pessimiste, car le système devrait nécessairement se réalimenter lors des périodes de pluie.

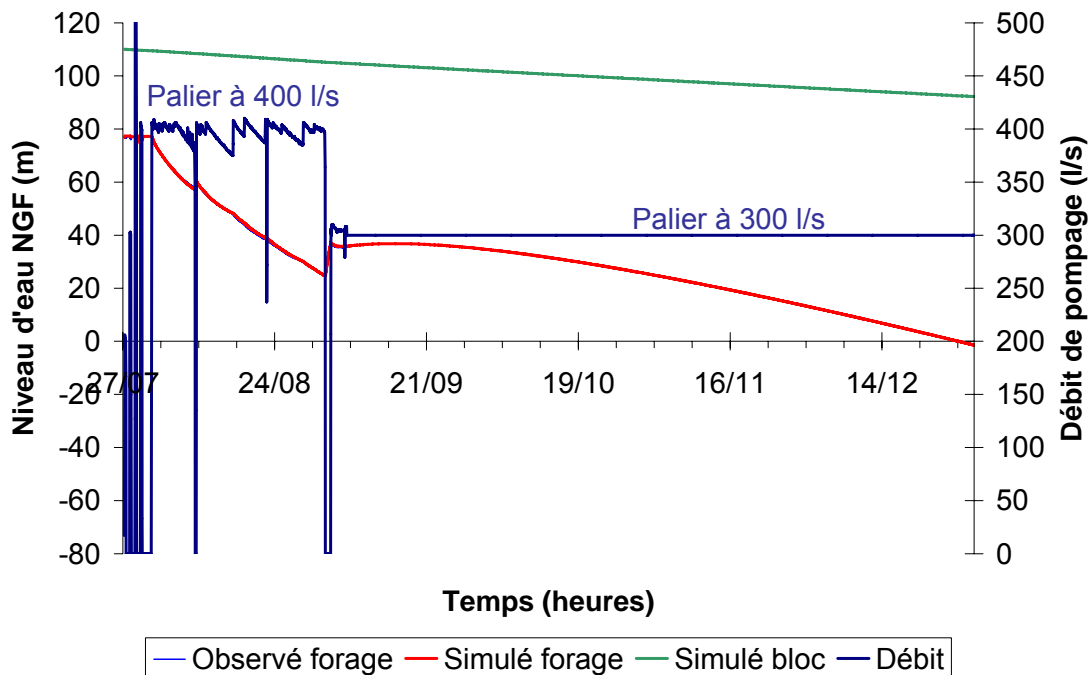


Illustration 76 : Niveaux d'eau simulés au forage F3 (CF) dans l'hypothèse d'un long palier à 300 l/s (jusqu'au 31 décembre 2005) et sans recherche de l'aquifère par les précipitations

Rayon d'action du pompage d'essai

Le rayon d'action du rabattement généré, dans les blocs, par le rabattement imposé au drain s'exprime au moyen de la relation suivante, valable en écoulements linéaires vers une tranchée à potentiel imposé :

$$R(t) = \sqrt{\pi} \sqrt{\frac{Tt}{S}} \quad (\text{éq. 24})$$

Par le principe de superposition, la distance maximale entre une limite hydraulique se situant au sein des blocs et le drain, dont les effets seraient perceptibles lors d'un pompage de durée t , s'écrit :

$$d < \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{Tt}{S}} \quad (\text{éq. 25})$$

Avec les caractéristiques hydrodynamiques des blocs obtenues dans le modèle 3 et sous réserve des équivalences possibles, des paramètres tels que (i) le rayon d'action du pompage au sein des blocs et (ii) la distance maximale en deçà de laquelle une limite hydraulique devrait se trouver, au sein des blocs, pour être perceptible au cours d'un pompage de durée t , peuvent être calculés (Tableau 43).

t (jours)	t (secondes)	R (m)	d (m)
30	2592000	136	68
60	5184000	193	96
90	7776000	236	118
120	10368000	272	136

Tableau 43 : Calcul, au sein des blocs, du rayon d'action R du pompage et de la distance maximale d en deçà de laquelle les effets d'une limite hydraulique seraient perceptibles au cours d'un pompage de durée t (valeurs données à titre indicatif étant données les équivalences possibles sur les caractéristiques hydrodynamiques des blocs)

Ceci indique que le pompage d'essai de juillet-août 2005, d'une durée approximative d'un mois a atteint un rayon d'action dans les blocs, autour du drain, d'environ 140 mètres. Ce même pompage d'essai n'a mis en évidence aucune limite hydraulique dans un rayon d'environ 70 mètres autour du drain.

Décomposition temporelle des différents flux au moyen du modèle

Le modèle mathématique permet de calculer l'évolution temporelle de chacun des flux au cours du pompage d'essai (Illustration 77) et, bien entendu, au cours de toute simulation.

Le débit pompé résulte de la contribution naturelle des blocs, de la sollicitation des blocs due au pompage, de la contribution de l'Hérault, des apports par les pertes de la Buèges et du déstockage se produisant dans le drain karstique.

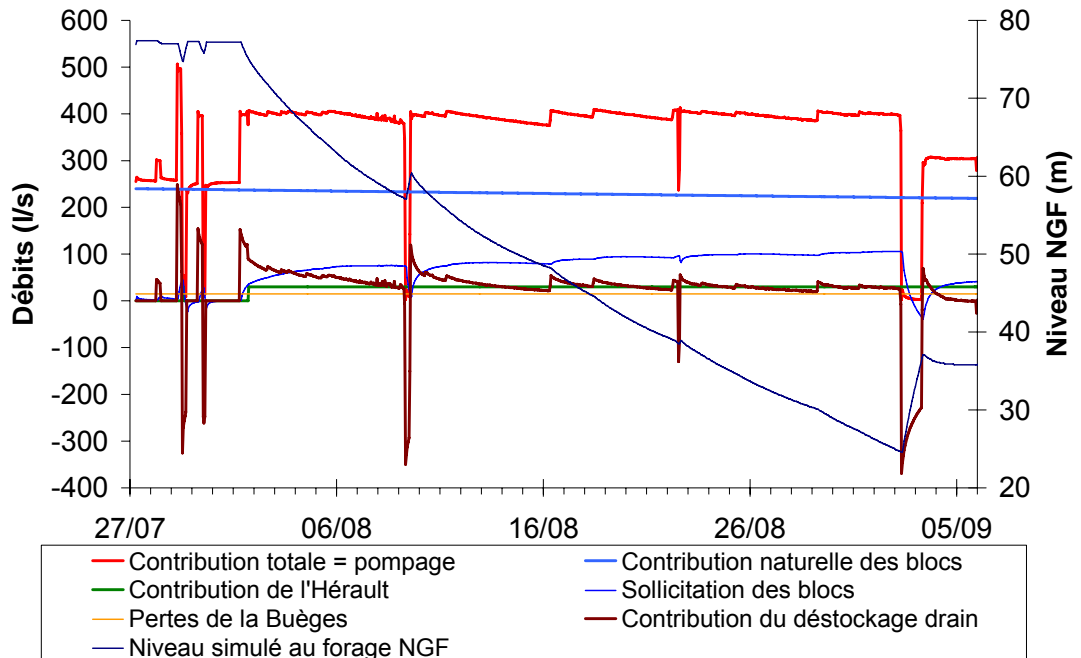


Illustration 77 : Evolution temporelle des différents flux simulés par le modèle au cours du pompage d'essai

Les apports des pertes de la Buèges ont été considérés comme constants durant toute la durée de l'essai et sont imposés à 15 l/s, valeur correspondant aux mesures disponibles.

La contribution de l'Hérault s'établit à 30 l/s dès le 1^{er} août, lorsque le niveau piézométrique dans le drain karstique devient inférieur à 75 m NGF.

Conformément à la fonction de tarissement introduite au sein du modèle, la contribution naturelle des blocs (débit de tarissement naturel de la source) décroît de façon exponentielle de 240 l/s en début du pompage d'essai à environ 219 l/s en fin d'essai.

La sollicitation des blocs par le pompage croît avec le temps en raison de l'augmentation des rabattements : elle évolue ainsi de 0 l/s en début de pompage à environ 105 l/s à la fin du palier à 400 l/s. Elle diminue relativement rapidement après chaque arrêt du pompage en raison de la remontée du niveau piézométrique dans le drain et peut même devenir négative lorsque le niveau dans le drain augmente rapidement et induit une inversion du gradient hydraulique entre les blocs et le drain. Dans ce cas, le drain alimente alors les blocs (débit négatif de sollicitation des blocs), de manière similaire à ce qui se produit lors de la recharge de l'aquifère en période de hautes eaux.

Le déstockage dans le drain diminue au cours du temps, proportionnellement à la décroissance de l'augmentation des rabattements. En effet, le déstockage est strictement proportionnel au rabattement dans le drain quelle que soit la valeur du rabattement. Le déstockage oscille entre 150 l/s en début d'essai et environ 20 l/s à la fin de la phase de pompage à 400 l/s. Il croît de façon importante après chaque augmentation du débit de pompage, du fait de l'augmentation associée des rabattements. Il devient négatif lors des arrêts de pompage, lorsque le niveau d'eau dans le drain augmente rapidement et que l'eau y est restockée (débit de déstockage négatif).

Origine de l'eau pompée durant le pompage d'essai

L'intégration des différents flux calculés au moyen du modèle durant l'ensemble du pompage d'essai de basses eaux (du 27 juillet au 6 septembre 2005) permet de quantifier l'origine des différents volumes d'eau pompés (Tableau 44 et Illustration 78).

Flux	Volume (m³)	Contribution au volume total (%)
Contribution naturelle des blocs	812419	63,6 %
Sollicitation des blocs	241307	18,9 %
Pertes de la Buèges	53136	4,2 %
Infiltration de l'Hérault	92340	7,2 %
Déstockage drain	78904	6,2 %
Total	1278106	100,0 %

Tableau 44 : Origine des volumes d'eau pompés lors de l'essai de juillet-août 2005 à partir des résultats du modèle

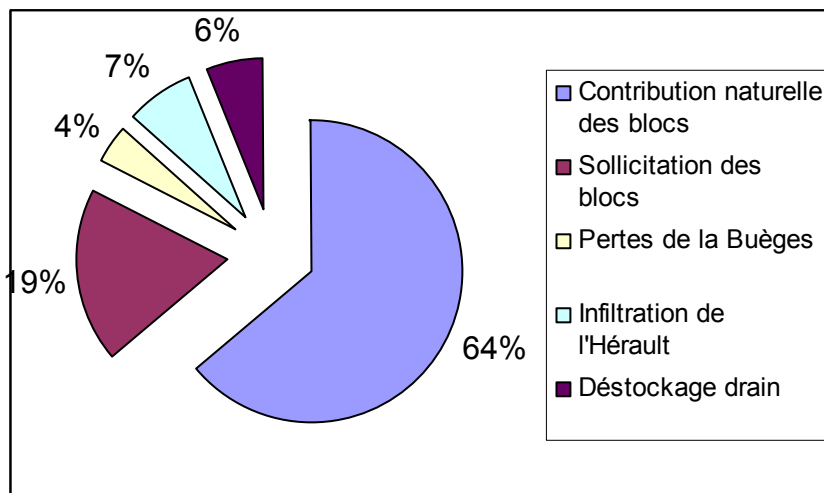


Illustration 78 : Origine des volumes d'eau pompés lors du pompage d'essai de juillet-août 2005

En l'absence de pompage, le volume d'eau (déduit du modèle) qui se serait naturellement écoulé aux sources des Cent Fonts est de 812 000 m³. Ce volume est comparable aux incertitudes³⁴ près (<10 %), au volume d'eau écoulé déduit par l'extrapolation de la courbe de tarissement (750 000 m³, cf. § 5.2.3).

Simulations de pompages à différents débits

Des simulations de pompages à débit constant ont été effectuées au moyen du modèle pour plusieurs valeurs débit (280, 300, 350, 400, 450, 500 et 550, 600 l/s). La durée maximale de pompage (avant d'atteindre le rabattement limite de 54 m imposé par la localisation actuelle de la pompe) a été calculée ainsi que les volumes d'eau pompés (Illustration 79) : volume total prélevé, contribution totale des blocs (contribution naturelle et sollicitation due au pompage), et contribution due au pompage seule.

La durée maximale de pompage augmente lorsque le débit de pompage diminue. La sollicitation des blocs est maximale, en volume, lorsque les débits sont les plus faibles car cette configuration de pompage permet de solliciter les blocs plus longtemps et d'y générer des effets qui se propagent à plus grande distance du réseau de drains. Elle est néanmoins maximale, en pourcentage, lorsque les débits sont les plus forts.

³⁴ Erreur minimale sur la détermination des débits de la source des Cent Fonts = 10 %

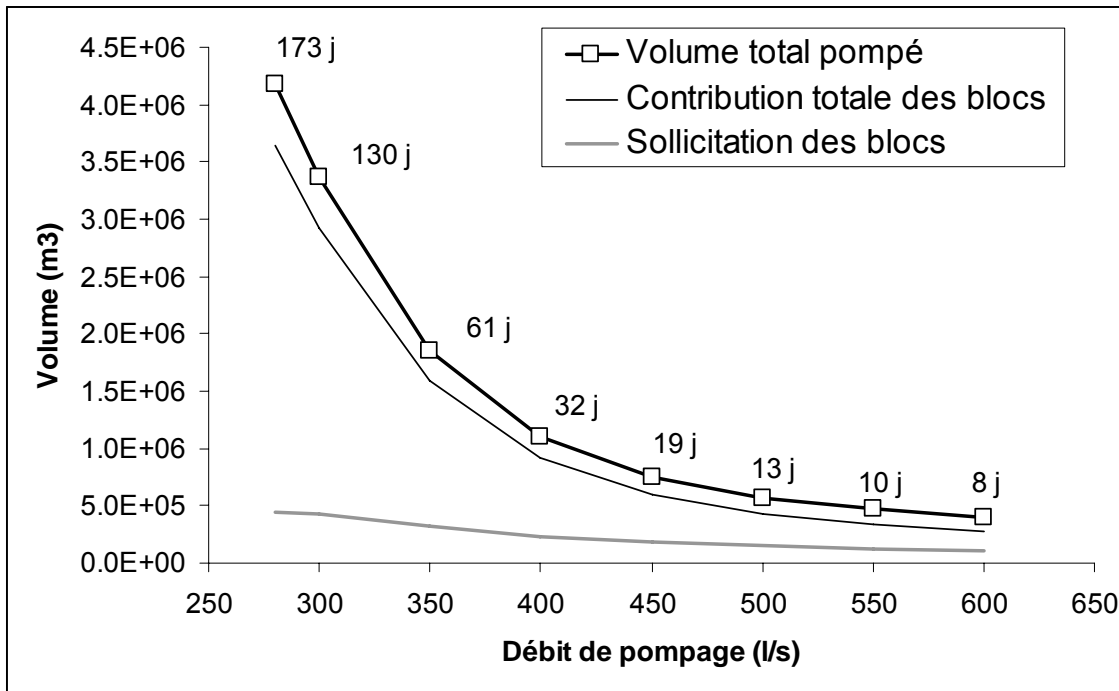


Illustration 79 : Volumes pompés en continu avant d'atteindre le rabattement limite de 54 m (la durée de pompage est indiquée pour chaque valeur du débit)

Simulation de la remontée suite à l'arrêt du 02/09/05 dans l'hypothèse où la poursuite du pompage à un débit différent (300 l/s) n'aurait pas eu lieu

Le comportement du système a été testé au moyen du modèle en simulant l'hypothèse selon laquelle, après l'arrêt du 2 septembre 2005 à la fin du long palier à 400 l/s, la pompe n'aurait pas été remise en marche. Il s'agit de simuler la phase de remontée après pompage, en l'absence de recharge par les précipitations, qui n'a pas pu avoir lieu compte tenu des crues du début du mois de septembre.

La simulation de la remontée du niveau piézométrique au forage F3 (CF) est mise en regard des différents flux calculés par le modèle (Illustration 80).

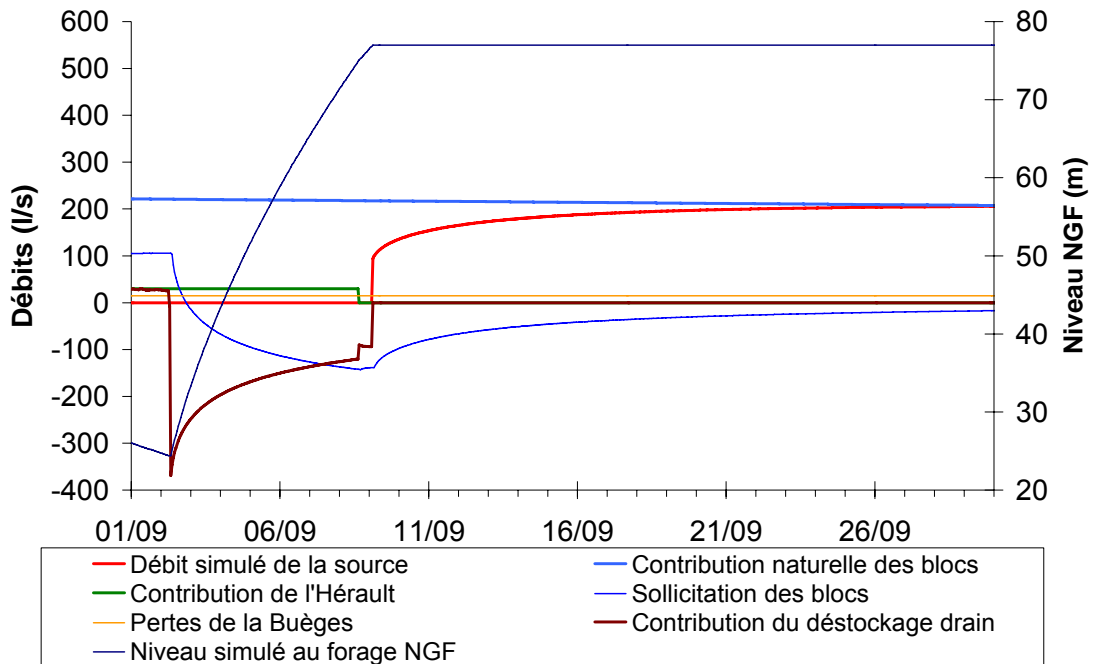


Illustration 80 : Simulation du comportement du système karstique dans l'hypothèse où, après l'arrêt du 2 septembre 2005 à la fin du long palier à 400 l/s, la pompe n'aurait pas été remise en marche et le système karstiques n'aurait pas été rechargé par les précipitations

Après une remontée relativement rapide, la piézométrie simulée au forage atteint le niveau initial d'avant pompage (= niveau de la source) dans la journée du 9 septembre 2005, soit 7 jours après la fin du pompage. A ce moment là, le stockage au sein du drain karstique cesse et la source se remet à fonctionner à un débit d'environ 100 l/s. Ce débit est composé du flux issu des pertes de la Buèges et de la contribution naturelle des blocs (étiage naturel), flux diminué de la part de ces écoulements qui contribue à recharger les blocs qui avaient été sollicités durant le pompage. Le débit naturel des sources est intégralement reconstitué à la fin du mois de septembre ; néanmoins plus de 80 % du débit initial est atteint 2 semaines après la fin du pompage.

Dès l'arrêt du pompage, le 2 septembre, la sollicitation des blocs décroît fortement. Elle devient négative moins d'un jour plus tard, ce qui signifie que le drain karstique alimente les blocs à partir de ce moment là, comme en période de hautes eaux lors du processus de recharge de la zone noyée de l'aquifère. Cette alimentation des blocs est d'autant plus forte que la différence de charge existant entre le drain et les blocs est importante, ce qui se produit principalement lorsque le niveau piézométrique dans le drain augmente rapidement pendant la phase de remontée. Ce sont les eaux issues de la poursuite du déstockage « naturel » de certaines des réserves de l'aquifère et, dans une moindre mesure, les eaux en provenance des pertes de la Buèges qui contribuent à cette reconstitution des réserves de l'aquifère.

L'infiltration d'eau en provenance de l'Hérault cesse dès le 8 septembre, lorsque le niveau piézométrique dans le drain atteint 75 m NGF.

Simulation des pompages d'essai en moyennes eaux du mois de septembre 2005

Le même modèle a été testé sur les pompages réalisés en septembre, les simulations débutant le 20/09/2005 à 8h00 (TU) (Illustration 81). Les flux d'eau imposés au modèle à cette époque sont différents de ceux de juillet avec :

- une contribution de la recharge (alimentation provenant indirectement de la pluie, par l'intermédiaire de l'épikarst + pertes de la Buèges) décroissant de 140 l/s à 50 l/s entre le 20/09/05 et le 01/10/05 (cf. § 5.4.2) ;
- un débit de vidange de la zone noyée de 260 l/s au 12/09/2005 et un coefficient de tarissement $\alpha = 0,005 \text{ j}^{-1}$ (cf. § 5.4.2).

Deux paramètres d'ajustement du réservoir « drain » ont dû être modifiés :

- la surface dénoyée du drain S_{drain} a été portée de 1900 à 4000 m³/m. Cette modification suggère que le potentiel de stockage dans le drain est plus important lorsque le niveau piézométrique est proche de la cote de débordement de la source, ce qui est en accord avec un développement du réseau karstique plus important au niveau de l'altitude de la source,
- l'altitude du seuil de débordement de la source H_{seuil} a été portée de 76.9 à 77.3 m NGF. Cette modification peut représenter les pertes de charge générées, entre le forage et la source, par les forts écoulements qui se produisent en cette période de crue.

La qualité du calage est moyennement satisfaisante (Illustration 81) ; elle est affectée par des incertitudes portant sur la connaissance des débits d'entrée dans le système (contribution au drain des pertes de la Buèges et de la recharge via l'épikarst) et sur les variations possibles de l'effet capacitif du drain avec la profondeur pour de faibles rabattements à proximité du niveau d'émergence de la source, comme le suggèrent les changements de pente observés lors du palier à 400 l/s, qui ne sont pas reproduits par le modèle, ainsi que les ajustements médiocres des paliers à 300 et 500 l/s (Illustration 81).

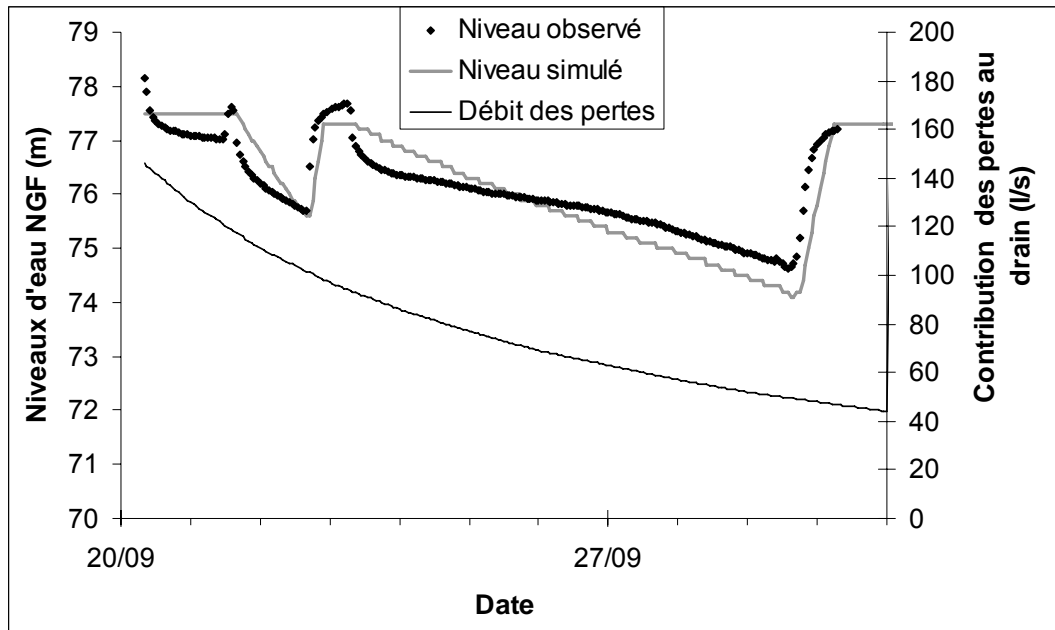


Illustration 81 : Comparaison des niveaux piézométriques simulés et observés au forage F3 (CF) lors du pompage de septembre 2005. Le terme « débit des pertes » correspond à la somme de l'alimentation du système karstique par les pertes de la Buèges et par l'épikarst

d) Modèle 4 : écoulements transitoires vers un puits en nappe captive

• Solution

Une autre solution analytique en régime transitoire, mais avec une symétrie radiale d'écoulements vers un puits en nappe captive, est celle connue sous le nom du puits artésien (Jacob et Lohman, 1952). Elle est similaire à la solution classique de Theis à la seule différence que la condition aux limites fixée dans le puits est un potentiel imposé h_0 et non un débit constant. Dès lors, le débit résultant de la différence de potentiel entre l'aquifère et le puits s'exprime sous la forme :

$$Q(t) = 2\pi T (H_0 - h_0) G(\alpha) \quad (\text{éq. 26})$$

$$G(\alpha) = \frac{4\alpha}{\pi} \int_0^\infty x e^{-\alpha x^2} \left\{ \frac{\pi}{2} + \arctan \left[\frac{Y_0(x)}{J_0(x)} \right] \right\} dx, \quad \alpha = \frac{Tt}{Sr_0^2} \quad (\text{éq. 27})$$

où α est un temps sans dimension et J_0 et Y_0 sont les fonctions de Bessel d'ordre zéro, respectivement de première et de seconde espèce.

Avec :

T (m^2/s) : transmissivité de l'aquifère, les blocs dans le cas présent,

S (-) : emmagasinement de l'aquifère, les blocs dans le cas présent,

H_0 (m) : potentiel hydraulique initial dans l'aquifère, au sein des blocs dans le cas présent,

h_0 (m) : potentiel hydraulique constant dans le forage, dans le drain karstique par exemple,

r_0 (m) : rayon du forage ; le drain karstique dans le cas présent.

La fonction transitoire $Q(t)$ est utilisée pour quantifier le rendement d'un puits artésien ou les débits dans un tunnel horizontal profond (Maréchal et Perrochet, 2003). C'est l'analogie entre la géométrie d'un tunnel horizontal et celle d'un drain karstique qui justifie de tenter d'appliquer cette solution. Ce modèle diffère ainsi du modèle 3 par la géométrie des écoulements.

La fonction $G(\alpha)$ est approximée par la relation suivante (Perrochet, 2004) :

$$G(\alpha) \approx \frac{1}{\ln(1 + \sqrt{\pi\alpha})} \quad (\text{éq. 28})$$

Cette très bonne approximation permet de simplifier les calculs en évitant une seconde intégration. Ensuite, la solution est appliquée comme le modèle 3, en perturbation par rapport à un état initial générant le débit de la source et au moyen du principe de superposition, afin d'intégrer les variations du niveau piézométrique dans le drain au cours du temps.

• Paramètres

Les paramètres ajustés avec ce quatrième modèle sont les suivants (Tableau 45).

Réservoir	Paramètre	Signification	Valeurs
Drain	S_{drain} (m ²)	Surface dénoyée du drain karstique	2500
	H_{seuil} (m)	Hauteur d'eau dans le drain au-delà de laquelle la source déborde	76,9
	H_{d0} (m)	Hauteur d'eau initiale dans le drain	76,9
Blocs	S_{bassin} (km ²)	Surface du bassin d'alimentation du karst	30
	ϕ (-)	Porosité efficace des blocs	0,03
	H_{b0} (m)	Hauteur d'eau initiale dans les blocs	110
	Q_0 (l/s)	Débit initial de la source à t=0 (le 27/07/05)	240
	α (j ⁻¹)	Coefficient de tarissement du système	$2,1 \times 10^{-3}$
	T_b (m ² /s)	Transmissivité des blocs	2×10^{-3}
	S_b (-)	Emmagasinement des blocs	0,03
	r_0 (m)	Rayon moyen du drain karstique	1

Tableau 45 : Paramètres du modèle 4 (en gris, paramètres d'ajustement)

Le rayon r_0 du drain karstique a été choisi égal à 1 mètre en moyenne.

La transmissivité des blocs T_b vaut $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et l'emmagasinement $S_b = 0,03$.

• Résultats

Les niveaux d'eau mesurés et simulés au forage F3 (CF) sont comparés sur l'illustration 82.

Cette solution ne permet pas d'ajuster les observations de façon aussi satisfaisante que le modèle 3, notamment durant la remontée et lors du palier à 300 l/s de début septembre. Ici encore, la forme de la courbe des rabattements simulés n'est pas assez linéaire et ceux-ci tendent de façon trop marquée vers une stabilisation. La géométrie des écoulements au sein des blocs n'est pas bien restituée au moyen de cette solution analytique.

La solution du modèle 3, à écoulements linéaires vers une tranchée, est donc conservée.

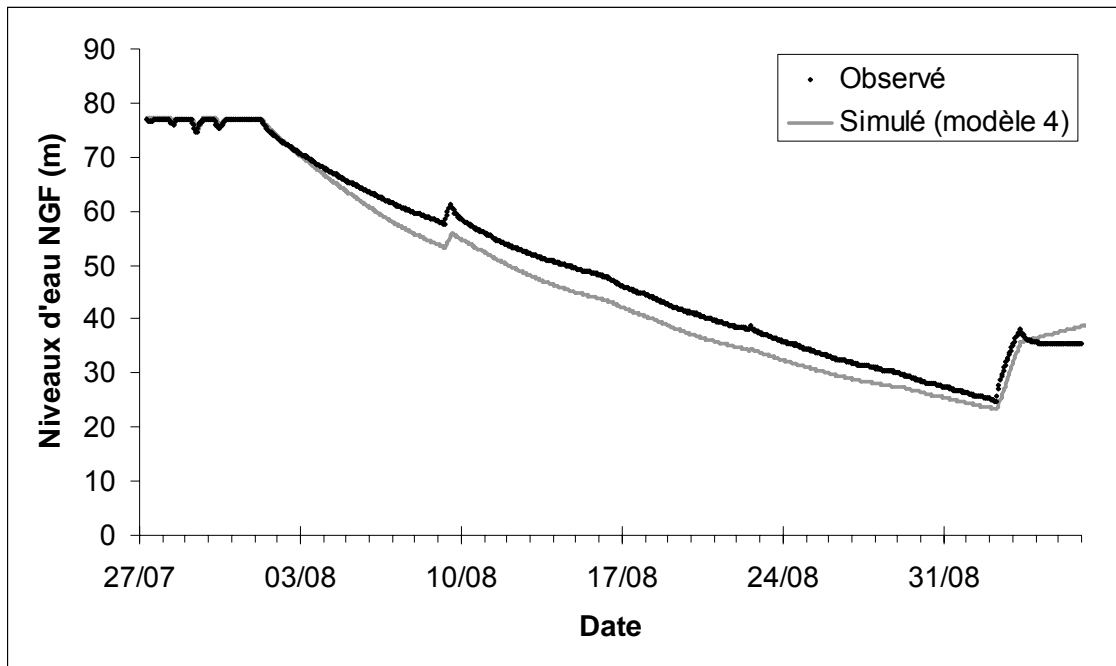


Illustration 82 : Comparaison des niveaux piézométriques observés et simulés (Modèle 4) au Forage F3 (CF)

5.7. INTERPRETATION DU SUIVI HYDROBIOLOGIQUE DE LA FAUNE STYGOBIE

Le tri de six échantillons de filtration des eaux d'exhaure semble montrer que l'aspiration d'eau par la pompe extrait un très faible nombre d'organismes stygobies du massif. Ce résultat exprime le fait que la configuration du pompage (positionnement de la pompe, vitesses d'écoulement générées à son voisinage, etc.) conduit à aspirer un

minimum d'éléments minéraux, comme en témoigne la faible turbidité des eaux d'exhaure. Or, les organismes qui colonisent les eaux souterraines vivent en majorité au contact du sédiment, soit à sa surface (espèces benthiques) soit à l'intérieur de celui-ci (espèces interstitielles) ; elles sont plus rarement planctoniques et sont donc naturellement rares au milieu de vastes cavités immergées.

Ces premiers résultats tendent donc à montrer que la pompe devrait avoir un faible impact sur l'entraînement des organismes souterrains à l'extérieur du massif. Ces premières données doivent néanmoins être confortées par la suite de l'analyse des échantillons et comparées avec la dérive naturelle de la faune en période de crue.

Les pompages peuvent aussi provoquer un autre type d'impact, non mesurable de manière directe, induit, lors du rabattement du niveau piézométrique, par l'exondation, sur plus de 50 mètres d'épaisseur, des sédiments meubles présents au sein du massif. Il est très probable que ces sédiments abritent la majeure partie des communautés souterraines du karst. Il n'est actuellement pas possible de statuer sur la survie de la faune dans de telles conditions d'exondation et sur une durée aussi longue (1 mois). On sait que certaines espèces comme *Niphargus virei* sont capables de construire des terriers de survie (Ginet, 1960) dans lesquels ils s'enferment pour résister à la dessiccation, mais cet exemple est loin d'être une généralité et il n'est certainement pas applicable aux formes interstitielles (*Microcharon*, *Pseudectinosoma*, *Proasellus*, ...). Il se peut également que la structure du massif ménage des poches de survie (des « refuges ») qui se déconnectent du réseau principal et permettent une recolonisation ultérieure. Les prélèvements post-pompage fourniront quelques éléments de réflexion, mais seul un suivi de crue à *long terme* pourrait apporter une réponse définitive à ce second aspect du problème.

L'apparition, très tôt dans le processus de pompage, d'éléments de la faune de surface, à la fois diversifiés et abondants, confirme de manière certaine la contribution rapide des eaux de surface en provenance de l'Hérault (premières 24 heures du pompage de longue durée). L'alimentation du système karstique par les pertes de la Buèges pourra également être mise en évidence à l'aide de l'analyse des échantillons et de la présence de faunes stygoxènes avant pompage d'essai à la source des Cent Fonts. Une première trace de contamination par les eaux de surface est d'ailleurs visible lors des pompages par paliers (présence de gammares lors du palier de débit à 300 l/s).

6. Conclusion

6.1. APPORT DES POMPAGES D'ESSAI POUR LA CONNAISSANCE DU MODELE CONCEPTUEL DE LA STRUCTURE ET DU FONCTIONNEMENT DE L'AQUIFERE

Etat des connaissances avant les pompages d'essais

Au terme des études menées antérieurement aux pompages d'essai sur le système karstique des Cent Fonts, celui-ci est caractérisé comme étant un système binaire alimenté d'une part par les pertes de la Buèges et, d'autre part, par l'infiltration de la pluie efficace sur son bassin d'alimentation. La superficie totale de celui-ci (bassin versant des pertes et zone de recharge directe) est de 60 km² au total (dont 30 km² correspondant au bassin d'alimentation des pertes de la Buèges).

Le système karstique se développe dans les formations dolomitiques du Jurassique moyen (Bathonien), d'une puissance comprise entre 250 et 450 m au sein du bassin d'alimentation des Cent Fonts ; des développements de la karstification dans la formation sous-jacente de l'Aalénien-Bajocien ne peuvent pas être exclus. La structure du réseau karstique n'est reconnue que sur quelques 250 mètres, dans sa partie aval, au niveau de l'exutoire. Les caractéristiques fonctionnelles du système suggèrent qu'il est plus karstifié au sein de sa partie amont qu'à l'aval. Une continuité existe entre la zone des pertes de la Buèges et l'exutoire (drain karstique en charge), sans aucune indication de localisation et de géométrie du réseau.

Le volume écoulé aux Cent Fonts est de l'ordre de 33 millions de m³ par an. La contribution moyenne des pertes de la Buèges à l'écoulement des Cent Fonts est évaluée à 50 %. La ressource peut être considérée comme importante avec un débit moyen légèrement supérieur à 1 m³/s. Les réserves sont significatives, avec une valeur estimée à 9 millions de m³ sur la base de la détermination du volume dynamique de l'aquifère à l'aide des courbes de récession de l'hydrogramme des Cent Fonts (Ladouche et al, 2002). Cette estimation du volume dynamique (9 millions de m³) est confirmée par les résultats de l'interprétation des récessions des cycles hydrologiques 2002/2003, 2003/2004 et 2004/2005 (cf. rapport final du projet, en cours de rédaction).

Les caractéristiques fonctionnelles et les réserves du système des Cent Fonts permettent de décrire un système influencé de manière prépondérante par une infiltration rapide, peu sensible aux variations saisonnières et interannuelles des précipitations. Il présente des retards à l'infiltration liés à la contribution des pertes de la Buèges. De plus, le système karstique est inertiel ; la réponse à l'infiltration (pluie et pertes) dure 50 jours environ. Il est aussi considéré comme propice à l'accumulation et à la reconstitution des réserves.

L'essentiel du débit de la source est assuré par la zone noyée (79 %), l'écoulement rapide issu du réservoir épikarstique (21 %) étant minoritaire (Ladouche et al, 2002).

En étiage sévère, le débit de la source des Cent Fonts est uniquement assuré par la vidange de la zone noyée de l'aquifère.

Apports de l'interprétation des pompages d'essai au modèle conceptuel du système karstique des Cent Fonts

Les principaux résultats des pompages d'essai des Cent Fonts concernent l'hydrodynamisme de l'essai ainsi que l'interprétation des analyses hydrogéochimiques.

- **Modèle hydrodynamique**

L'interprétation du pompage d'essai par paliers de débit permet d'évaluer à $7 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})$ le coefficient de pertes de charges quadratiques au puits de pompage. Selon ce modèle interprétatif, pour un pompage à 400 l/s, celles-ci sont à l'origine d'un rabattement de 1,2 m. En fait, ces pertes de charge quadratiques sont essentiellement générées par les écoulements de type turbulent se produisant au sein du drain karstique.

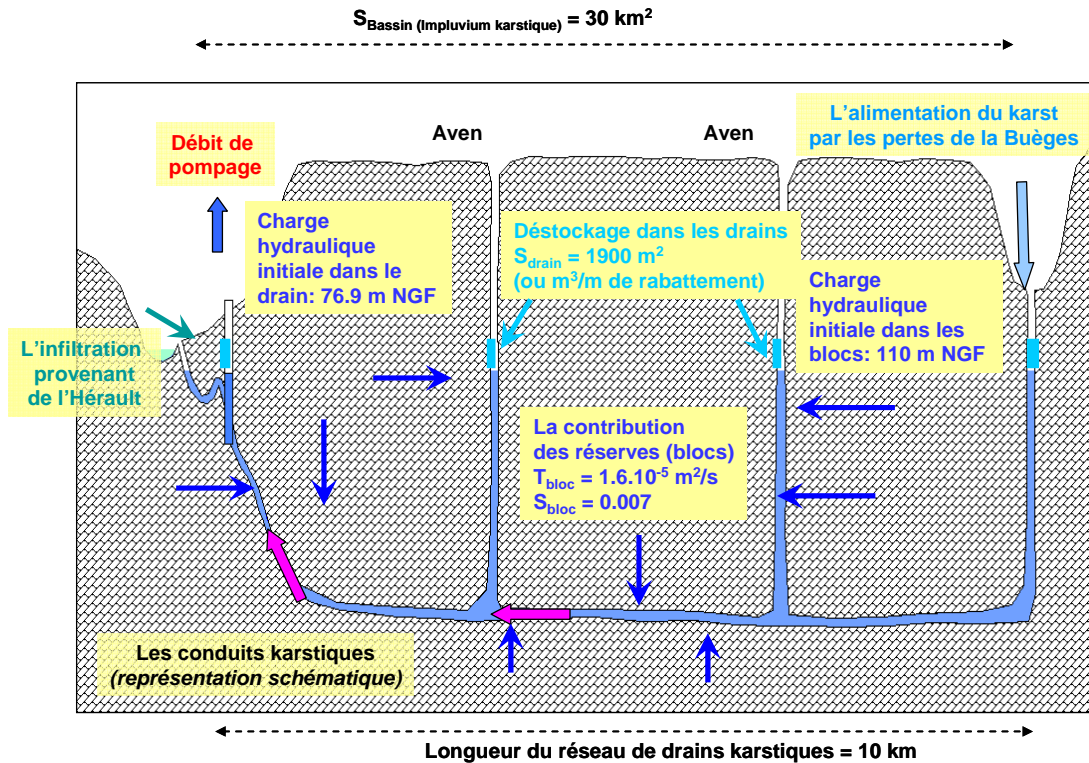
L'interprétation du pompage d'essai à l'aide de solutions analytiques classiques de type Theis, généralement utilisées en milieu poreux, n'est pas satisfaisante pour cet essai en contexte karstique ; d'autres approches ont donc été aussi mises en œuvre.

L'évolution du rabattement au forage de pompage n'étant pas linéaire, les écoulements ne sont pas limités au seul drain karstique, une contribution des « blocs » poreux et/ou fissurés environnants ou des systèmes annexes au drainage (SAD) doit exister.

En outre, aucun comportement de type « double porosité » n'est mis en évidence par l'analyse des dérivées des rabattements.

Les solutions analytiques ne pouvant rendre compte efficacement du comportement hydrodynamique du système karstique des Cent Fonts lorsqu'il est sollicité par pompage, une approche de modélisation mathématique nouvelle et originale a été mise en œuvre. Elle est hybride et associe un modèle de type « réservoir », représentant le drain karstique, à une solution analytique d'écoulement, figurant les flux au sein des blocs (ou des SAD) sous forme d'écoulements en milieu poreux.

La modélisation a été conçue de façon à reproduire au mieux la physique des phénomènes telle qu'elle est connue à ce jour au sein du système karstique des Cent Fonts :



- en l'absence de pompage, le débit de débordement du réservoir « drain karstique » correspond au débit de la source alimentée, en étiage, essentiellement par la contribution naturelle des blocs et, dans une moindre mesure, par les pertes de la Buèges ; en période de pompage, le débit pompé dans le drain karstique est considéré comme provenant de la contribution naturelle des blocs et des pertes de la Buèges, de l'infiltration d'eau en provenance de l'Hérault, du déstockage de l'eau contenue dans le drain karstique et de la contribution des blocs (et/ou des SAD) situés entre les drains karstiques. Le réseau de drains karstiques constitue ainsi le réservoir qui est directement sollicité par le pompage. Un second réservoir correspond aux blocs, qui se vidangent dans le premier réservoir (ou reçoivent des eaux issues du premier réservoir) au gré de l'évolution relative des charges hydrauliques dans les deux réservoirs.

Plusieurs solutions analytiques ont été testées pour représenter la contribution des blocs au drain. La solution analytique permettant la meilleure reproduction des niveaux piézométriques pendant le pompage d'essai est de type « écoulements transitoires vers une tranchée drainante ». Le calage le plus satisfaisant est obtenu avec les principaux paramètres suivants :

- alimentation du réseau karstique par les pertes de la Buèges et par la contribution naturelle des blocs, à la hauteur des valeurs mesurées ou extrapolées ; infiltration d'eau provenant de l'Hérault à hauteur de 30 l/s, valeur cohérente avec les estimations déduites des approches hydrogéochimiques,
- déstockage au sein du réseau de drains karstiques : 1900 m^3 par mètre de rabattement, ne dépendant pas de la cote piézométrique au sein de l'aquifère.

L'interprétation du pompage d'essai en moyennes eaux suggère néanmoins que les vides karstiques sont plus développés au voisinage de la cote de l'exutoire que plus en profondeur,

- longueur du réseau de drains karstiques : 10 km,
- paramètres hydrodynamiques des blocs :
 - transmissivité : $1.6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$,
 - coefficient d'emmagasinement : 0,7 %.

Ce modèle a été utilisé pour simuler plusieurs configurations de pompage : évolution des rabattements pour des durées de pompage non réalisées, pour différents débits de pompage compris entre 280 et 600 l/s, etc..

Ces simulations permettent notamment de caractériser les variations temporelles des différents flux au sein de l'aquifère. Ainsi, à titre d'illustration, lors du pompage d'essai de longue durée à 400 l/s, l'eau produite était issue : pour 64 % du déstockage naturel en provenance des blocs, pour 19 % de la sollicitation des réserves de l'aquifère contenues au sein des blocs, pour 6 %, des réserves déstockées au sein du drain, pour 4 % des pertes de la Buèges et pour 7 % des infiltrations en provenance de l'Hérault. Hors infiltrations en provenance de l'Hérault, le pompage a donc contribué à augmenter d'environ 37 % la sollicitation naturelle de l'aquifère.

Le modèle sera prochainement utilisé en simulation afin de tester différentes hypothèses et scénarios d'exploitation de l'aquifère.

- Hydrogéochimie

Les premières interprétations des analyses hydrogéochimiques disponibles, et notamment des isotopes du strontium, montrent que la signature hydrogéochimique des eaux pompées évolue vers celle du système karstique des Cent Fonts observée en étiage sévère. Cette signature est située dans la gamme d'évolution régionale des eaux issues des formations dolomitiques du Bathonien. Ces résultats sont en cohérence avec l'interprétation hydrodynamique de l'essai, à savoir la sollicitation, par l'intermédiaire du réseau de drains karstiques, d'un réservoir de type poreux et/ou fissuré (ou de Systèmes Annexes au Drainage (SAD)) situé majoritairement dans les dolomies du Bathonien.

De plus, les différentes approches hydrogéochimiques (isotopes du strontium, chimie des eaux, suivi en continu de la conductivité) ont permis d'évaluer avec une précision satisfaisante la contribution des eaux de l'Hérault au système karstique au cours des pompages.

6.2. IMPACTS DU POMPAGE

- Sur la source des Cent Fonts

Les pompages d'essai par paliers de débit et de longue durée ont un impact direct sur les écoulements au niveau des griffons des Cent Fonts. Dans les conditions hydrométéorologiques de l'été 2005 (étiage rencontré tous les 30 ans environ), la totalité des griffons tarit rapidement lorsque le débit de pompage dépasse 200 l/s. La vitesse de reprise des écoulements et leur débit sont fonction de l'état hydrologique de la source et de l'historique des pompages effectués.

Le modèle de simulation mis au point permet d'estimer de manière assez satisfaisante le débit de la source. Il permettra d'évaluer les impacts des scénarios d'exploitation du système karstique, notamment sur le débit de la source.

- Sur le fleuve Hérault

Dans les conditions hydrologiques de l'été 2005, les pompages d'essai à un débit supérieur à 200 l/s ont eu pour conséquence une infiltration d'eau provenant du fleuve Hérault dans le karst. Le débit moyen d'infiltration est évalué à 30 l/s. L'infiltration se produit dans les environs immédiats de la source (émergences de faible débit situées très probablement au sein du lit mineur de l'Hérault) dès que les rabattements dépassent quelques mètres et, une fois cette phase transitoire passée, le débit d'infiltration se stabilise et ne dépend pas de la différence de charge hydraulique entre le drain karstique et le fleuve.

- Sur les piézomètres et sources appartenant ou non au système karstique des Cent Fonts

L'analyse qualitative des données du réseau hydrologique suivi avant et pendant les pompages d'essai a permis de déterminer leur zone d'influence et de préciser l'extension spatiale du bassin versant d'alimentation de la source, notamment dans le secteur des piézomètres P5 et P6 qui appartiennent sans ambiguïté à son bassin versant.

Deux des quatre piézomètres du bassin d'alimentation de la source des Cent Fonts (P5 et P6) sont influencés de manière significative par les pompages d'essai. Ils sont représentatifs du fonctionnement des « blocs » du système karstique ; ils ne se situent pas à proximité immédiate d'un drain connecté au réseau des Cent Fonts. Les piézomètres P3 et P7 sont peu influencés par le pompage.

Ces résultats montrent que, si le drain sur lequel a été effectué le pompage n'est a priori pas en relation directe avec l'ensemble des réserves de la zone noyée de l'aquifère (cf. le rapport entre la production naturelle des réserves et le surcroît obtenu grâce au pompage), il sollicite néanmoins une fraction notable de celles-ci car l'influence du pompage s'exerce sur une partie significative, c'est-à-dire au moins sur 30 à 40 % de la surface du bassin versant d'alimentation de la source.

Les autres points du réseau de suivi des eaux souterraines, extérieurs à son bassin versant d'alimentation, ne sont pas influencés par le pompage.

La source des Fontanilles tout comme celle de la Buèges ne montrent aucun impact lié aux pompages d'essai. Les variations de niveau et de débit observées à la source de la Buèges reflètent uniquement le fonctionnement du système karstique dont les eaux émergent à cet exutoire.

- sur la faune stygobie

Aucun échantillon n'a actuellement été analysé dans sa totalité. Ainsi, il n'est pas possible de délivrer à la date de rédaction du présent rapport, des résultats précis, même partiels.

Cependant, quelques observations générales peuvent être énoncées, sans faire référence aux espèces en particulier :

- la densité d'organismes stygobies extraits du massif par le pompage est extrêmement faible (moins de 1 individu/m³). En effet, la configuration de celui-ci conduit à aspirer un minimum d'éléments minéraux, comme en témoigne la faible turbidité des eaux d'exhaure. Or, les organismes qui colonisent les eaux souterraines vivent en majorité au contact du sédiment ; elles sont donc naturellement rares au milieu des cavités immergées.

Ces premiers résultats tendent donc à montrer que le pompage devrait avoir un faible impact sur l'entraînement des organismes souterrains à l'extérieur du massif.

Ces premières données doivent néanmoins être confortées par la suite de l'analyse des échantillons et comparées avec la dérive naturelle de la faune en période de crue ;

- les pompages peuvent aussi provoquer un autre type d'impact induit par l'exondation des sédiments meubles présents au sein du massif qui abritent très probablement la majeure partie des communautés souterraines du karst. Il n'est actuellement pas possible de statuer sur la survie de la faune dans de telles conditions d'exondation, qui dépendra notamment de l'importance des « refuges » disponibles au sein du milieu. Les prélèvements post-pompage fourniront quelques éléments de réflexion, mais seuls un suivi de crue à *long terme* pourrait apporter une réponse définitive à ce second aspect du problème ;
- l'apparition, très tôt dans le processus de pompage, d'éléments de la faune des eaux de surface, confirme de manière certaine la contribution rapide des eaux en provenance de l'Hérault.

6.3. PERSPECTIVES

Le présent rapport de fin de travaux des pompages d'essai sur le système karstique des Cent Fonts avait pour principal objectif de présenter les données recueillies au cours des pompages d'essai de l'été 2005 et leur interprétation, conformément à la réglementation en vigueur et à l'arrêté de prescriptions complémentaires.

De premiers éléments relatifs aux apports de ces pompages d'essai vis-à-vis de la connaissance de la structure et du fonctionnement du système karstique ont été présentés ci-dessus.

Certaines données ne sont pas encore disponibles, notamment le nivellement d'un certain nombre d'ouvrages du réseau de suivi, les résultats complets des analyses portant sur la faune stygobie (prélèvements effectués durant les pompages d'essai et au cours de l'hiver 2005-2006) et leur interprétation, les rapports du Maître d'Oeuvre du projet, etc.

Une analyse plus poussée de ces résultats et leur mise en perspective avec l'ensemble des données disponibles sur le système karstique des Cent Fonts seront proposées dans le cadre du rapport final de cette partie du projet, dont la finalisation est prévue contractuellement pour la fin mai 2006. Ce rapport comprendra aussi l'élaboration, en collaboration avec les Services Techniques du Conseil Général, de scénarios d'exploitation et de gestion de la ressource en eau de cet aquifère karstique qui pourront servir de base de discussion notamment dans le cadre des travaux du SAGE Hérault.

7. Références bibliographiques

Mise en place de deux stations de mesures hydrométriques de part et d'autre des Pertes de la Buèges. Rapport Antéa n° A 19775/A. Décembre 2000, 18 p.

Aquilina L., Ladouche B. and Dorfliger N. (2005) - Recharge processes in karstic systems investigated through the correlation of chemical and isotopic composition of rain and spring-waters. *Applied Geochemistry* 20, 2189–2206

Aquilina L., Ladouche B., Bakalowicz M., Schoen R. et Pételet E. (1999) – Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains. *Volume de synthèse générale*. Rap. BRGM R40746. Volume 0, 50 p., 8 fig., 5 tabl., 1 annexe .

Bakalowicz M., Schoen R., Ladouche B., Aquilina L., Pételet E. (1999) - Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains. *Volume 1 : Contexte géologique et hydrogéologique* Rap. BRGM R 40747. Volume 1, 75 p., 23 fig., 1 annexe.

Bangoy, L.M., Bidaux P., Drogue C., Plegat R., Pistre S. (1992) - A new method of characterizing fissured media by pumping tests with observation wells.- *Journal of Hydrology*, vol. 138, 1-2, pp. 77-88.

Bardot (2001) - Cartographie de la galerie noyée des Cent Fonts.- Rapport BARDOT & Co n° 2001-09.

Barker, J.A. (1988) - A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock.- *Water Resources Research*, vol. 24, 10, pp. 1796-1804.

Bögli, A. (1980) -*Karst hydrology and physical speleology*.- 284 pp.- Springer Verlag, Berlin.

Bou C., Rouch R. (1967). Un nouveau champ de recherches sur la faune aquatique souterraine Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris 265m 369-370.

Bourdarot, G. (1996) -*Essais de puits : méthodes d'interprétation*.- 350 pp.- Collection des Cours de l'ENSPM.

Bourdet, D., Ayoub J.A., Pirard Y.M. (1989) - Use of pressure derivative in well-test interpretation.- *SPE Formation Evaluation*, vol. 4, 2, pp. 293-302.

Bourdet, D., Ayoub J.A., Whittle T.M., Pirard Y.M., Kniazeff V. (1983) - Interpreting well tests in fractured reservoirs.- *World Oil*, vol. 197, 5, pp. 77-87.

Charcosset P. (1998) – Reconstitution d'un segment de la marge ouest-téthysienne au Bathonien dans les Grands Causses et le Bas-Languedoc. *Strata*, série2, vol.31, p.1-311, 109 fig., 6 tab., 15 graph., 10 pl .

Gibert J., Laurent R. (1982) - L'écosystème karstique du massif de Dorvan (Torcieu, Ain, France). IV - La dérive d'invertébrés hypogés aquatiques au niveau de l'exutoire principal du massif. *Pol. Arch. Hydrobiol.*, 29, 2, 471-483

Gibert J., Laurent R.& Müller I. (1984) - L'écosystème karstique du massif de Dorvan (Torcieu, Dpt. Ain, France). VI - Analyse hydrochimique et hydrobiologique d'une crue de printemps au niveau de l'exutoire principal. *Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel*, 5, 71-90

Ginet, R. (1960) -Ecologie, éthologie et biologie de *Niphargus* Annales de spéléologie 15/1-2, 254p.

Jacob, C., Lohman S. (1952) - Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer.- *Transactions, American Geophysical Union*, vol. 33, 4, pp. 559-569.

Jeannin, P., Maréchal J. (1995) - Lois de pertes de charge dans les conduits karstiques : base théorique et observations.- *Bulletin du centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel*, vol. 14, 149-176.

Ladouche B., Aquilina L., Petelet E., Bakalowicz M. et Schoen R. (1999) - Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains. *Volume 4 : Interprétation des données hydrochimiques*. Rap. BRGM R 40940 Volume 4, 170 p., 67 fig., 25 tabl.

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

Ladouche B., Dörfliger N. (2004) Modélisation hydrogéologique du système karstique des Cent Fonts : Vers la constitution d'un outils de prévision. Rapport intermédiaire, BRGM/RP-53595-FR, 78 p.

Lencastre, A. (1966) -*Manuel d'hydraulique générale*.- 411 pp.- Ed. Eyrolles, Paris.

Le Strat P. (1981) – Jurassique des causses Languedoc. Bordure cévenole. Essai de synthèse géologique. Rapport BRGM 81 SGN 388 GEO

Le Strat P. (1987) – Dynamique des dépôts bathoniens autour des Cévennes. Rapport BRGM 87 SGN 679 GEO.

Le Strat P. (1992) – Groupe français d'étude du Jurassique. Excursion en Languedoc. Documents sur le Jurassique au Sud des Cévennes. Université de Nantes.

Mangin A (1970) - Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse de courbes de décrue et de tarissement, *Annales de Spéléologie*, t 25, 3, pp 581-609.

Mangin A., (1975) - contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, Thèse de Doctorat, Université de Dijon, (*Ann. Spéléol.*, 1974, 3, pp. 283-332, 1974, 29, 4, pp. 495-601 ; 1975, 30., 1, pp 21-124).

Marechal, J.C., Perrochet P. (2003) - New analytical solution for the study of hydraulic interaction between Alpine tunnels and groundwater.- *Bulletin De La Societe Geologique De France*, vol. 174, 5, pp. 441-448.

Pinault J.L. Plagnes V., Aquilina L., Bakalowicz M. (2001) - Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems - Characterization of karst system functioning., *Water Resources Research*, Vol. 37, n° 8, p. 2191-2204.

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

Perrochet, P. (2004) - A simple solution to tunnel or well discharge under constant drawdown.- *Hydrogeology Journal*, vol., DOI: 10.1007/s10040-004-0355-z, pp.

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

Rouch, R. (1970) - Le système karstique du Baget. Le phénomène d' « hémorragie » au niveau de l'exutoire principal. *Annales de Spéléologie*, 25, 665-709.

Rouch, R. Pitzalis A., Descouens A. (1993) - Effets d'un pompage à gros débit sur le peuplement des Crustacés d'un aquifère karstique. *Annales de Limnologie* 9/1, 15-29.

Schoen R., Ladouche B., Cubizolles J., Aquilina L. et Bakalowicz M. (1999) – Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains. *Volume 2 : Moyens mis en œuvre* Rap. BRGM R 40748 - Volume 2, 69 p., 22 fig., 1 annexe (1 fig., 12 tab.).

Schoen R., Bakalowicz M., Ladouche B. et Aquilina L. (1999) – Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains. *Volume 3 : Interprétation des données hydrologiques* Rap. BRGM R 40939 Volume 3, 91 p., 16 fig., 4 annexes.

Thiem, G. (1906) -*Hydrologische Methoden.*- J.M. Gebhardt, Leipzig.

Annexe 1

Présentation du protocole prévisionnel de pompage tel que mentionné dans « Dossier relatif aux procédures de déclaration prévues par l'arrêté interministériel du 11/09/03 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau ».

Projet de réalisation d'un forage pour pompages d'essai sur le site des Cent Fonts (Commune de Causse de la Selle, Hérault)

A-1. OBJECTIF ET MODALITE D'EXECUTION DES ESSAIS DE PUIITS (POMPAGE PAR PALIERS DE DEBIT)

L'objectif de ce type d'essai est de caractériser l'ouvrage du point de vue hydraulique en déterminant principalement les pertes de charge quadratiques liées à d'éventuels écoulements turbulents se produisant lors du pompage.

Quatre paliers de débit d'une heure chacun, avec attente de la récupération initiale du niveau d'eau sont envisagés

Les modalités de pompage sont présentées dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : programme prévisionnel du pompage par essais de paliers (essais de puits)

Palier	Durée de pompage (en heure)	Suivi de la remontée (en heure)	Remarque
n° 1 : 100 l/s	1	1, voire plus	Attente jusqu'à la récupération de l'état initial
n° 2 : 200 l/s	1	1 voire plus	Attente jusqu'à la récupération de l'état initial
n° 3 : 300 l/s	1	1 voire plus	Attente jusqu'à la récupération de l'état initial
n° 4 : 400 l/s	1	1 voire plus	Attente jusqu'à la récupération de l'état initial

A-2. OBJECTIF DES ESSAIS DE NAPPE (POMPAGE D'ESSAIS LONGUE DUREE)

L'objectif des pompages d'essai longue durée sont multiples :

1- Caractériser la manière dont on peut solliciter les réserves de l'aquifère au moyen d'un dispositif particulier de prélèvement : le forage qui est testé.

D'un point de vue de la quantité :

- caractérisation de la structure et du fonctionnement du drain sur lequel est implanté le forage (volume etc.),
- caractérisation des relations hydrauliques entre le drain et les autres structures de stockage de l'aquifère :
 - système annexe au drainage,
 - perméabilité de fissures,

- Caractérisation des relations hydrauliques éventuelles avec les :
 - eaux de surface,
 - systèmes aquifères voisins,

D'un point de vue de la qualité :

- Turbidité : des rabattements importants peuvent donner lieu à des décolmatages de cavités remplis de sédiments argileux,
 - évolution géochimique des eaux pompées.

2- Evaluer les impacts :

- sur le débit de la source,
- sur les niveaux d'eau au sein de la zone noyée de l'aquifère,
- sur les eaux de surface (Hérault en particulier d'un point de vue de la qualité et de la quantité),
- sur les débits des sources et/ou des niveaux d'eau des systèmes aquifères voisins.

3- Définir les modalités d'exploitation de l'aquifère

- Débit d'exploitation
- Scénarios de gestion etc.

Pour répondre à ces objectifs, différents types d'essais sont envisagés au cours de la période de pompage.

Le premier type d'essai concernent l'établissement de plusieurs courbes permettant la caractérisation du débit résiduel de la source en fonction du débit pompé pour différents contextes hydrogéologiques (cf. courbe de principe figure 2, ci-dessous). Ceci est réalisé par l'intermédiaire des pompages d'essai par paliers de débit de moyenne durée (12 heures par exemple). Les relations ainsi établies permettrait ainsi d'évaluer, par extrapolation, le débit de pompage (sur une période de 12 heures) à appliquer au système pour complètement tarir les sources. Des éléments de réponse pourraient être apportés aux questions suivantes :

- s'agit il d'une valeur de pompage unique quelque soit le contexte hydrogéologique ?
- ou au contraire, le débit de pompage qui tari la source est-il fonction du contexte hydrogéologique ?

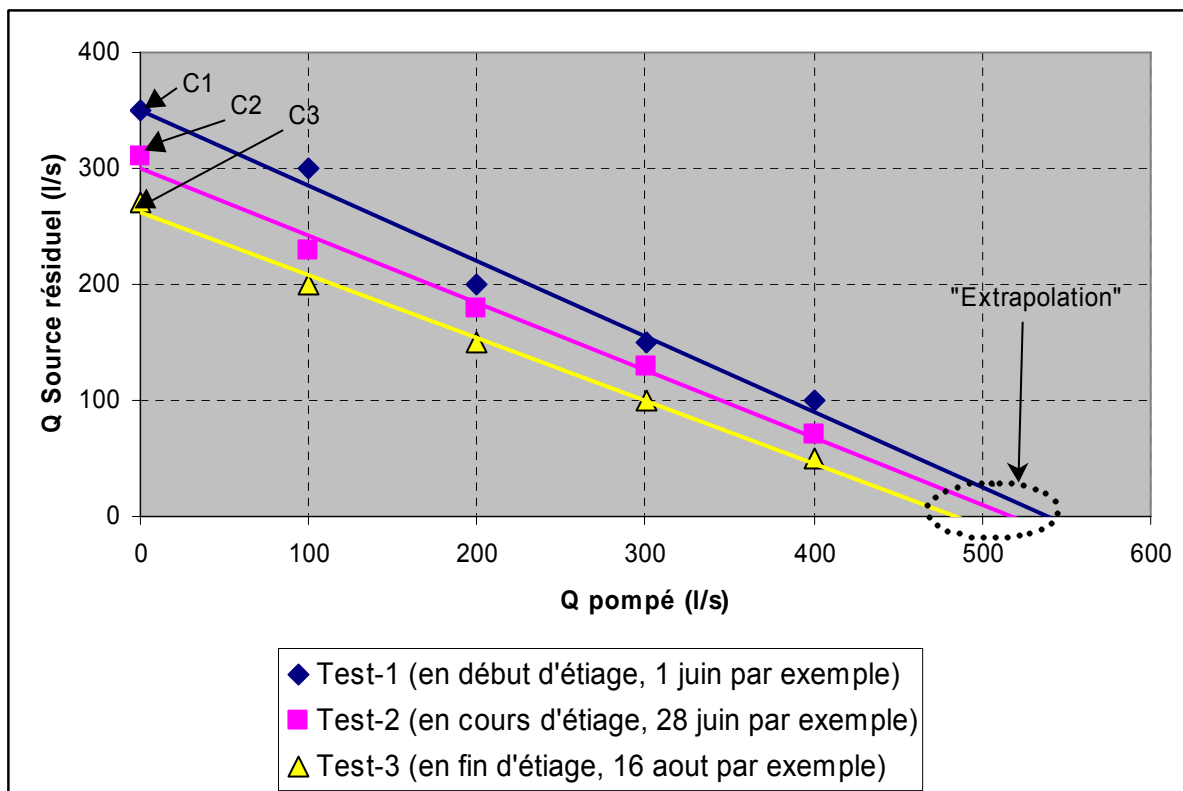


Figure 1 : Représentation conceptuelle de l'évolution du débit résiduelle de la source en fonction des paliers de débit (ne préjuge pas des évolutions qui seront observées)

Le second type d'essai concernant des pompages d'essais longue durée afin d'évaluer d'une part, le volume du drain et d'autre part, la capacité du drain à mobiliser les réserves latérales des systèmes annexes au drainage (disponibilités de la ressource). L'étude de la réponse obtenue devrait permettre de caractériser les caractéristiques d'écoulement au sein du drain sollicité et la qualité globale de la relation drain-blocs capacitifs qui est fonction de la différence de charge entre les deux composantes du système (cf. schéma conceptuel, figure 3)

Ces informations seront recherchées à partir du type de réponse de la courbe des rabattements mesurés au forage (cf courbe de principe ci dessous, figure 4). Le rendement de pompage tel que défini par Marsaud (1997) sera évalué :

$$R_p = (Q_p - (\Delta Q_s)) / Q_p$$

Ce rapport traduit l'importance du débit faisant défaut à l'exutoire (ΔQ_s) par rapport au débit prélevé et relativement à ce dernier. Si $R_p = 0$, le système a un faible taux de libération de ses réserves liées à l'existence de fortes pertes de charge entre drain et SAD. Si $R_p = 1$, le régime de la source n'est pas influencé, le débit pompé est entièrement compensé par la libération des réserves avec de faibles pertes de charge. Au cours du pompage, les blocs capacitifs peuvent fournir un surcroît de débit et les

réserves vont diminuer au cours du temps (diminution de charge au niveau des SAD). Le rendement du pompage va ainsi diminuer au cours du temps. Cette notion va pouvoir permettre de caractériser la pérennité de l'exploitation. La pérennité de l'exploitation pourra être calculée en calculant le rendement R_p en début et en fin de pompage longue durée. La mobilité des réserves pourra être considérée en fonction des conditions d'essai (débit de pompage, durée etc...) et pour les caractéristiques du forage testé.

La contribution des SAD lors du pompage d'essai doit se marquer par une rupture de pente ou des seuils. Les sources de débordement de la zone d'émergence pourront être amenées à s'assécher à un moment où l'autre au cours du pompage. Des rabattements importants peuvent donner lieu à des décolmatages de cavités remplis de sédiments argileux ou de provoquer des seuils hydrauliques liés au partitionnement de la zone noyée en secteurs indépendants les uns des autres.

Le pompage d'essai de longue durée est prévu à un débit de 400 l/s. La durée envisagée doit être la plus longue possible (3 mois par exemple) et doit débiter au tout début de la période de basses eaux (1 juin par exemple).

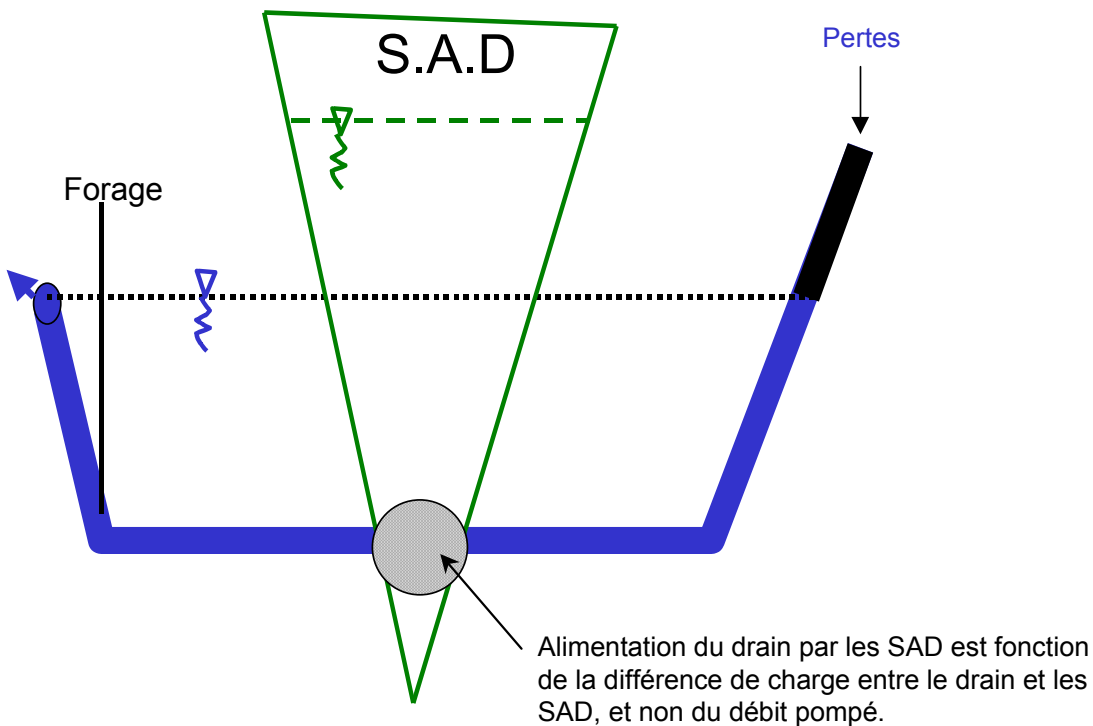


Figure 2 : Représentation conceptuelle du réseau de drainage et des systèmes annexes au drainage

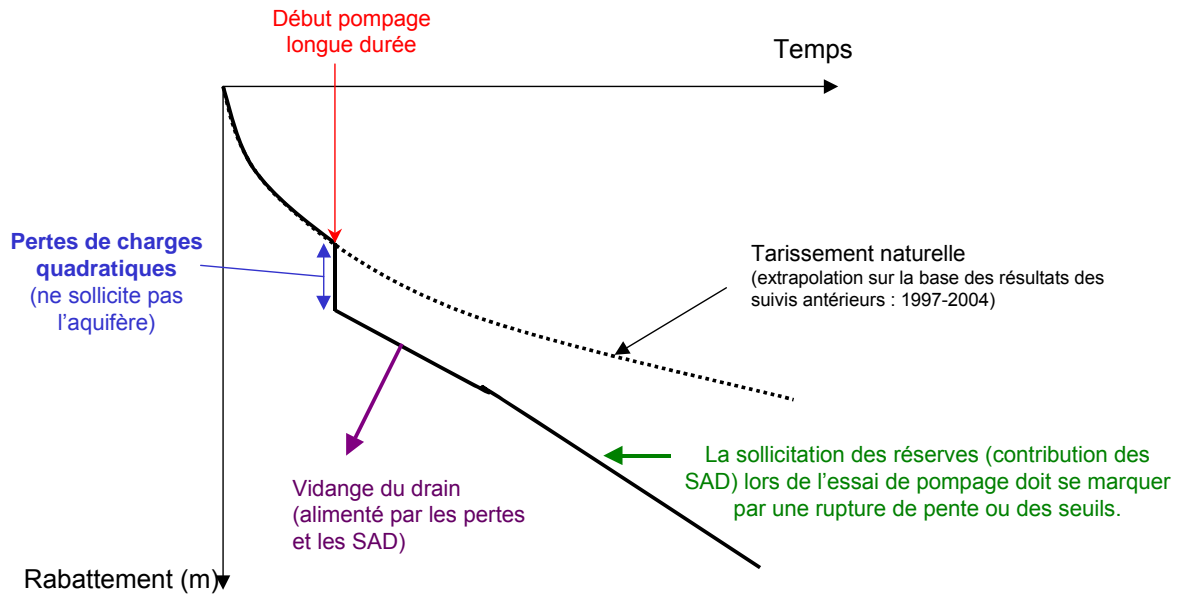


Figure 3 : Evolution conceptuelle du rabattement de la charge d'un aquifère karstique au cours d'un pompage d'essai longue durée (ne préjuge pas de l'évolution qui sera réellement observées)

3. Modalités d'exécution des essais de nappe

Le protocole envisagé qui sera éventuellement adapté en fonction de la réponse du système karstique aux sollicitations par pompage est présenté dans le tableau et la figure ci-après (tableau 2 et figure 5).

Trois essais par paliers de moyenne durée (12 heures) sont envisagés pour différents contextes hydrologiques (cf. § précédent 4.3.2.2).

Dans la poursuite des essais par palier, des essais de plus ou moins longue durée (de 3 semaines à 5 semaines) seront réalisés. Différentes périodes de calage constituées par l'arrêt momentané du pompage (2 jours) seront réalisés afin de replacer l'état du système par rapport à l'évolution naturelle qu'il aurait eu en absence de pompage.

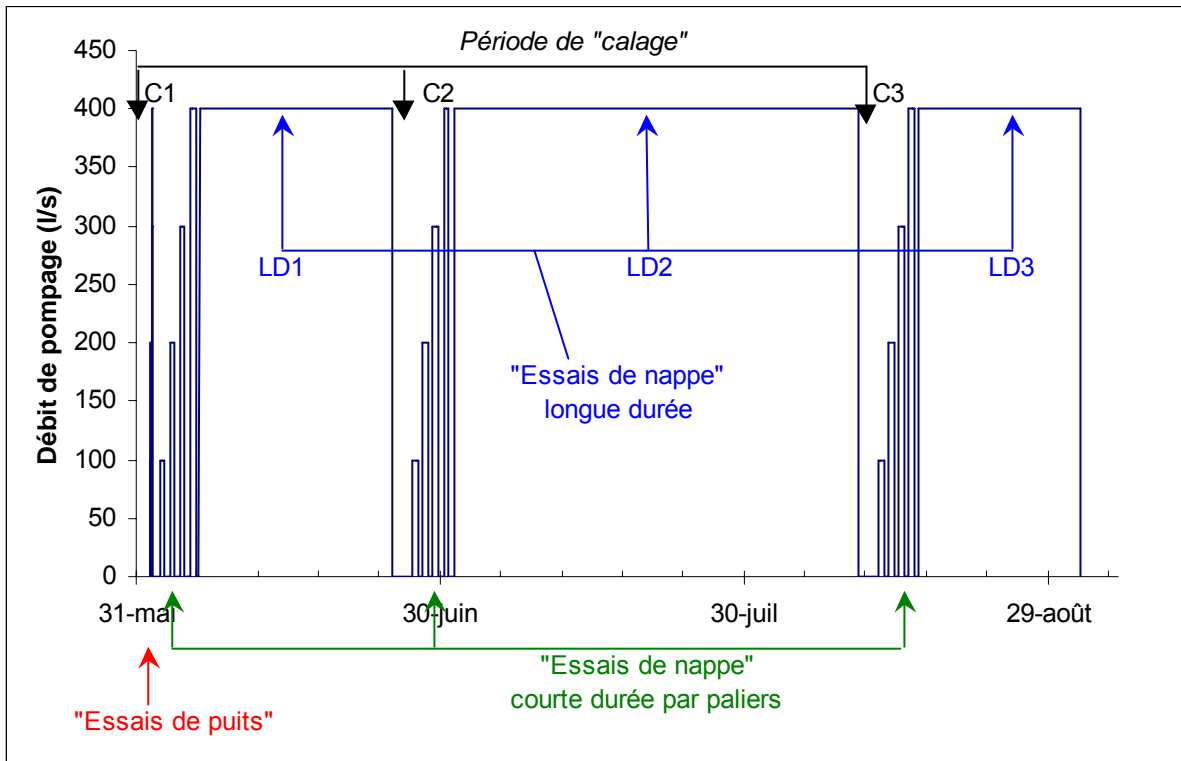


Figure 4 : Chronogramme prévisionnel des opérations de pompage

Les périodes de "calage" doivent permettre de caractériser l'état hydrogéologique du système par rapport à l'état de référence caractérisé en absence de pompage.

Le protocole présenté ci-après pourra faire l'objet d'adaptation en fonction d'une part, des conditions hydrogéologiques du système karstique au 01 juin 2005 et d'autre part, en fonction des prévisions météorologiques à 5 jours qui seront réalisés par Météo France lors des essais. Ce protocole pourra également faire l'objet d'une adaptation en fonction de la réponse que présentera l'aquifère aux différentes sollicitations par pompage.

Type d'essai	Quand ?	Durée de pompage	Suivi de la remontée	Remarque
Essais de puits	1 juin	1 heure par paliers	1 heure voire plus par palier	Caractérisation de l'état initial de l'aquifère « C1 »
Essai de nappe par paliers n° p1a : 100 l/s	2 juin	12 heures	12 heures	Contrôle du débit de la source Caractérisation de l'état hydrologique « C1a » de l'aquifère
Essai de nappe par paliers n° p1b : 200 l/s	3 juin	12 heures	12 heures	Contrôle du débit de la source Caractérisation de l'état hydrologique « C1b » de l'aquifère
Essai de nappe par paliers n° p1c : 300 l/s	4 juin	12 heures	12 heures	Contrôle du débit de la source Caractérisation de l'état hydrologique « C1c » de l'aquifère
Essai de nappe par paliers n° p1d : 400 l/s	5 juin	12 heures	12 heures	Contrôle du débit de la source Caractérisation de l'état hydrologique « C1d » de l'aquifère
Essai de nappe longue durée n° LD1 : 400 l/s	6 juin	19 jours	2 jours	Contrôle du débit de la source Caractérisation de l'état hydrologique « C2 » de l'aquifère
Essai de nappe par paliers n° p2a : 100 l/s	27 juin	12 heures	12 heures	Contrôle du débit de la source Caractérisation de l'état hydrologique « C2a » de l'aquifère
Essai de nappe par paliers n° p2b : 200 l/s	28 juin	12 heures	12 heures	Contrôle du débit de la source Caractérisation de l'état hydrologique « C2b » de l'aquifère
Essai de nappe par paliers n° p2c : 300 l/s	29 juin	12 heures	12 heures	Contrôle du débit de la source Caractérisation de l'état hydrologique « C2c » de l'aquifère
Essai de nappe par paliers n° p2d : 400 l/s	30 juin	12 heures	12 heures	Contrôle du débit de la source Caractérisation de l'état hydrologique « C2d » de l'aquifère
Essai de nappe longue durée n° LD2 : 400 l/s	1 juillet	40 jours	2 jours	Contrôle du débit de la source Caractérisation de l'état hydrologique « C3 » de l'aquifère
Essai de nappe par paliers n° p3a : 100 l/s	10 août	12 heures	12 heures	Contrôle du débit de la source Caractérisation de l'état hydrologique « C3a » de l'aquifère
Essai de nappe par paliers n° p3b : 200 l/s	11 août	12 heures	12 heures	Contrôle du débit de la source Caractérisation de l'état hydrologique « C3b » de l'aquifère
Essai de nappe par paliers n° p3c : 300 l/s	12 août	12 heures	12 heures	Contrôle du débit de la source Caractérisation de l'état hydrologique « C3c » de l'aquifère
Essai de nappe par paliers n° p4d : 400 l/s	13 août	12 heures	12 heures	Contrôle du débit de la source Caractérisation de l'état hydrologique « C3d » de l'aquifère
Essai de nappe longue durée n° LD3 : 400 l/s	14 août	La plus longue possible jusqu'au première crue		Fin prévu le 01 septembre

Tableau 1 : Chronogramme prévisionnel des opérations de pompage (essais de puits et de nappe)

Annexe 2

Coupes techniques et géologique des ouvrages F2 (piézomètre de reconnaissance) et F3 (Forage)

Nom de l'entreprise de forage: FORACO
Représenté par : Frédéric Desloges
Adresse : BP 173
 ZI des Fournels
 34401 Lunel Cedex 1
Téléphone : 04.67.83.51.60
Télécopie : 04.67.83.51.79

Fiche technique Piézomètre de reconnaissance F2	
Nom	Piézomètre reconnaissance F2
Localisation géographique	Coordonnées Lambert III - X : 703 738.66 - Y : 163 100.35 - Z sol : 133.50 m
Profondeur totale	123 m
diamètre	- 17"1/2 (445 mm) de 0 à 8 m de profondeur - 12"1/4 (311 mm) de 8 à 123 m de profondeur
Tubage	- Nature : acier noir E24 - Diamètre extérieur : 14" (355 mm) - Epaisseur : 7 mm - Longueur : 8.25 m de +0.25 à -8.0 m - Cimentation : coulis de ciment gravitaire de 6 à 8 m de profondeur
Méthode de foration	Marteau fond de trou en Circulation Inverse avec fluide air + eau (500l/h env.)
Destination des déblais	Déblais inertes (graviers et fines carbonatés) réutilisés sur site sur la piste provisoire
Gestion des eaux	De 0 à 103 m de profondeur : pas de venues d'eau A partir de 103 m de profondeur, eau karstique provenant du réseau des Cent Fonts rejetée dans le milieu naturel après décantation
Géologie	Formations carbonatées de l'Oxfordien et Bathonien
Venues d'eau	- Venue d'eau à partir de 103 m de profondeur - Cavité cible traversée de 117 à 122 m de profondeur
Niveau d'eau	56 m de profondeur
Diagraphies réalisées	- Déviation, - Inspection vidéo, - Inspection sonar dans la cavité

Log géologique du sondage des Cent Fonts

Profondeur mètres	Log	Description lithologique	Formations	Stratigraphie
0		Calcaires lithographiques café au lait clair	Calcaires lithographiques	Oxfordien calcaire
10		Calcaires lithographiques café au lait sombre, calcite fréquente. Limite nette		
20		Alternances de calcaires argileux sombres en plaquettes avec des marnes sombres	Alternances calcaires et marnes en plaquettes	Oxfordien marneux
30		Alternances très homogènes de calcaires argileux en plaquettes sombres et de marnes feuilletées très homogènes		
40		Calcaires graveleux brun-clair à brun foncé en gros banc	Calcarénites dolomitique graveleuse et oolithique	Bathonien
50		Dolomie saccharoïde brun-ocre avec Hard Ground rouille en tête		
60		Calcarénite graveleuse Packstone/Grainsrone gris sombre dolomitique		
70		Calcarénite fine dolomitique à matrice micritique plus claire, abondance de cuttings de calcite (faille?)		
80		Calcarénite graveleuse Packstone/Grainsrone gris sombre dolomitique		
90		Calcarénite fine dolomitique à matrice micritique plus claire		
100		Calcarénite graveleuse Packstone/Grainsrone gris sombre dolomitique		
110		Calcarénite oolithique et graveleuse dolomitique brune très claire	Calcaires à stiptites?	Bathonien inférieur?
120		Alternances de calcaires micritiques brun (sublithographiques) plus ou moins dolomitiques avec des calcaires argileux noirs plus ou moins riches en matière organique. Lacune de 120 m à 126 m		
126m	Fin du forage			

Log géologique du piézomètre de reconnaissance F2.

Description détaillée

- 0 – 10 m : Calcaires lithographiques café au lait clair. Cuttings très fins avec esquilles en plaquettes.
- 10 m : Limite progressive.
- 10 – 13 m : Calcaires lithographiques café au lait sombre. Cuttings plus grossiers avec débris calcitiques.
- 13 m : Limite très nette.
- 13 – 30 m : Alternances de calcaires argileux sombres en plaquettes avec des marnes sombres.
- 30 – 39 m : Alternances de calcaires argileux en plaquettes sombres et de marnes feuilletées très homogènes.
- 39 – 40 m : Calcaire graveleux brun-clair à brun-foncé en gros banc.

- 40 m : Limite très nette avec fond durci ferrugineux.
- 40 – 42 m : Dolomie saccharoïde brun-ocre. Ancienne calcarénite rouille (présence du fond durci).
- 40 – 51 m : Calcarénite dolomitique graveleuse gris-sombre à liant micritique Packstone/Grainstone.
- 51 – 68 m : Calcarénite fine dolomitique à matrice micritique gris-clair, Packstone. Débris de calcite dans les cuttings.
- 68 – 72 m : Calcarénite dolomitique fine sous forme d'une passée plus claire (abondance de cuttings calcitiques liés à une faille potentielle).
- 72 – 89 m : Calcarénite dolomitique brun-clair essentiellement graveleuse à matrice micritique. Packstone.
- 89 – 9 m : Calcarénite dolomitique gris-clair essentiellement graveleuse à matrice micritique. Packstone. Débris calcitiques plus fréquents liés à une faille potentielle.
- 93 – 100 m : Calcarénite dolomitique brun-clair essentiellement graveleuse à matrice micritique. Packstone.
- 100 – 106 m : Calcarénite oolithique et graveleuse dolomitique brune très claire (Grainstone/Packstone).
- 106 – 120 m : Alternances de calcaires micritiques brun sublithographiques plus ou moins dolomitiques avec des calcaires argileux noir, riches en matière organique.
- 120 – 125 m : Lacune d'échantillon.
- 125 – 126 m : Calcarénite oolithique dolomitique.

Attributions lithostratigraphiques

L'attribution lithostratigraphique se fonde sur l'analyse des cartes géologiques et sur la connaissance géologique régionale (Le Strat, 1981, 1987, 1992, Charcosset, 1998).

Les formations de 0 à 13 m sont attribuées à l'Oxfordien moyen calcaire de part sa lithologie.

Les formations de 13 à 40 m sont attribuées à l'Oxfordien moyen marneux.

Les formations de 40 à 106 m sont attribuées lithostratigraphiquement au Callovien supérieur.

La formation de 106 m à la fin du forage (120 m) est attribuée au Callovien moyen.

La formation de 125 à 126 m est rapportée au Bathonien supérieur.

Caractéristique technique de l'avant trou du Forage F3 (CF)	
Nom	Forage F3 (CF)
Localisation géographique	Coordonnées Lambert III - X : 703 743.08 - Y : 160 101.17 - Z sol : 133.54 m
Profondeur totale	128 m
diamètre	- 17''1/2 (445 mm) de 0 à 2 m de profondeur - 12''1/4 (311 mm) de 2 à 128 m de profondeur
Tubage	- Nature : acier noir E24 - Diamètre extérieur : 14'' (355 mm) - Epaisseur : 7 mm - Longueur : 2.25 m de +0.25 à -2.0 m - Cimentation : non cimenté car alésage prévu (forage de reconnaissance définitif)
Méthode de foration	Marteau fond de trou en Circulation Inverse avec fluide air + eau (500l/h env.)
Destination des déblais	Déblais inertes (graviers et fines carbonatés) réutilisés sur site pour améliorer les merlons latéraux de la piste dans le cadre du projet paysager
Gestion des eaux	De 0 à 95 m de profondeur : pas de venues d'eau A partir de 95 m de profondeur, eau karstique provenant du réseau des Cent Fonts rejetée dans le milieu naturel après décantation
Géologie	Formations carbonatées du Bathonien
Venues d'eau	- Venue d'eau à partir de 95 m de profondeur - Cavité cible traversée de 120 à 126 m de profondeur
Niveau d'eau	56 m de profondeur
Diagraphies réalisées	- Déviation, - Inspection vidéo, - Inspection sonar dans la cavité

Fiche technique du Forage F3 (CF)	
Nom	Forage F3 (CF)
Localisation géographique	Coordonnées Lambert III - X : 703 743.08 - Y : 160 101.17 - Z sol : 133.54 m
Profondeur totale	128 m
Diamètre	- Diamètre de 42" (1066 mm) jusqu'au fond de la galerie à 125 de profondeur, plus un ancrage de pied dans le plancher de la galerie sur environ 3 m de profondeur (diamètre 17"1/2 -445 mm)
Tubage	- Tubage inox 304L de diamètre 783-813 mm sur 120 m de profondeur + 5 m de crépines de même diamètre + un dispositif d'ancrage de pied (diamètre 14' = 355 mm) - Tubage cimenté sur ombrelle par cannes d'injection sur une hauteur comprise de 50 m ; - Tête de puits constituée par une bride DN 800

Log géologique du sondage des Cent Fonts 2

Profondeur mètres	Log	Description lithologique	Formations	Stratigraphie
0		Calcaires lithographiques brun clair avec esquilles en plaquettes Calcite au mur de la formation (faille?)	Calcaires lithographiques	Oxfordien calcaire
10		Alternances de calcaires argileux sombres en plaquettes avec des marnes sombres	Alternances calcaires et marnes en plaquettes	Oxfordien marnoux
20		Alternances très homogènes de calcaires argileux en plaquettes sombres et de marnes feuilletées très homogènes. Marnes feuilletées noires de 32 à 34m		
30		Calcaires graveleux brun-clair à brun foncé en gros banc Type P/G		
40		Calcarénite type Grainstone/packstone brun clair	Dolomitisation partielle Calcarénites dolomitiques graveleuse et oolithique	Callovien supérieur
50		Calcarénite beige foncé a débris de calcite (faille probable) Calcarénite beige +ou-foncée sans débris de calcite Calcarénite beige clair à jaune à très nombreux débris de calcite (faille sûre) Calcarénite oolithique type Packstone beige clair très homogène		
60		Calcarénite jaunâtre type Packstone. Remplissage argilo sableux dolomitique (Karst ou faille)		
70		Calcarénite beige clair homogène type Packstone +ou- dolomitique		
80				
90				
100		Alternances de calc. et de marnes noires à nodules Feo et à M.Org.	Marnes	Call. moyen
110		Calcarénites oolithiques dolomitiques	Dolosparite oolithique	Baïthonien supérieur
120				
126m	Fin du forage			

Log géologique du Forage F3 (CF).

Description détaillée

- De 0 à 8 m : Calcaire lithographique avec des cuttings très fins et des esquilles en plaquettes.
- De 8 à 9 m : Calcaire lithographique brun-clair café au lait avec une faille probable due à la présence de calcite dans les cuttings.
- De 9 à 11 m : Calcaire argileux gris souris en plaquettes alternant avec des marnes.
- De 11 à 18 m : Alternances de marnes > Calcaires argileux en plaquettes gris souris.
- De 18 à 32 m : Marnes gris-souris à sombre + ou – en plaquettes.
- De 32 à 34 m : Marnes feuilletées noires (« Maximum flooding surface »).

- De 34 à 37m : Marnes feuilletées sombres avec des cuttings en + grosses esquilles.
- De 37 à 39 m : Calcaires graveleux type Grainstone / Packstone + ou – dolomitique avec débris de calcite et Feo (Hard ground en tête).
- De 39 à 46 m : Calcaires graveleux type Packstone / Grainstone brun-clair + ou – faiblement dolomitique.
- De 46 à 58 m : Calcarénite gris-clair type Grainstone / Packstone .
- De 58 à 61 m : Calcarénite beige foncé + débris de calcite avec faille probable. Grainstone / Packstone.
- De 61 à 65 m : Calcarénite beige + ou – foncée type Grainstone / Packstone.
- De 65 à 67 m : Calcarénite beige type packstone avec débris de calcite et faille probable.
- De 67 à 71 m : Calcarénite beige-clair à jaune à très nombreux débris de calcite. Packstone.
- De 71 à 80 m : Calcarénite oolithique type packstone beige clair à brun clair très homogène.
- De 80 à 88 m : Calcarénite beige clair à jaunâtre type Packstone. Matrice argileuse et dolomitique. Remplissage lié soit à un karst soit à une faille.
- De 88 à 105 m : Calcarénite beige clair à brune homogène type Packstone +ou- dolomitique.
- De 105 à 109 m : Alternances de calcaires +ou- micritiques et de marnes noires à nodules Feo et de calcaires argileux riches en matière organique.
- De 109 à 128 m : Dolomie saccharoïde brun-clair. Ancienne calcarénite oolithique type Grainstone assez ferrugineuse. Hard Ground en tête karstifié avec remplissages d'argiles indurées ferrugineuses.

Attributions lithostratigraphiques

L'attribution lithostratigraphique se fonde sur l'analyse des cartes géologiques et sur la connaissance géologique régionale (Le Strat , 1981, 1987, 1992, Charcosset, 1998).

Les formations de 0 à 11 m est attribuée à l'Oxfordien moyen calcaire de part sa lithologie.

Les formations de 11 à 37 m est attribuée à l'Oxfordien moyen marneux.

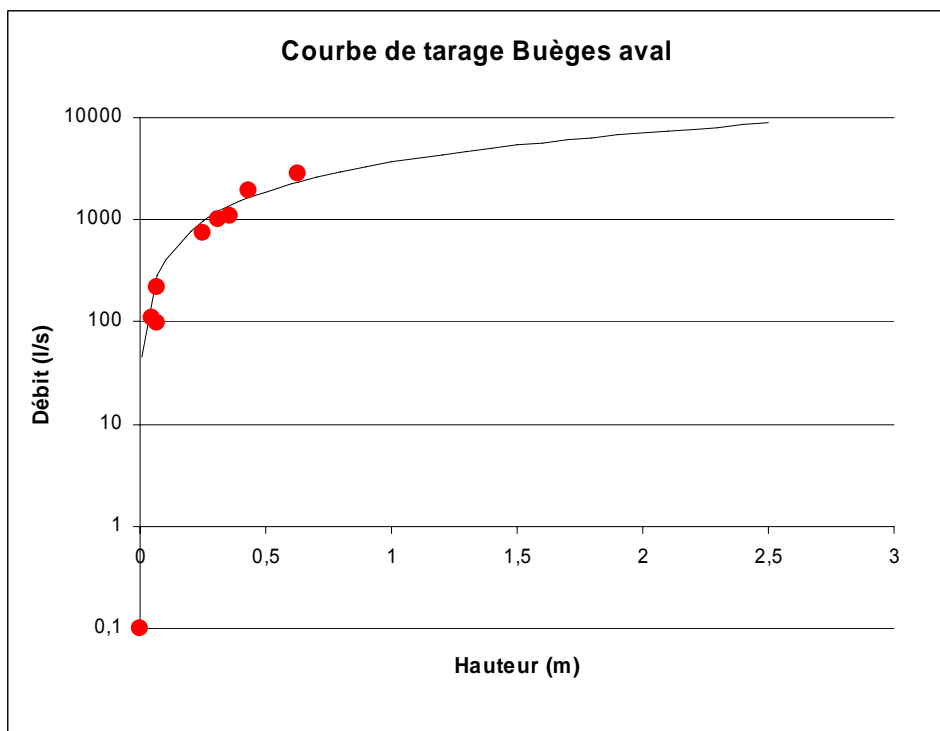
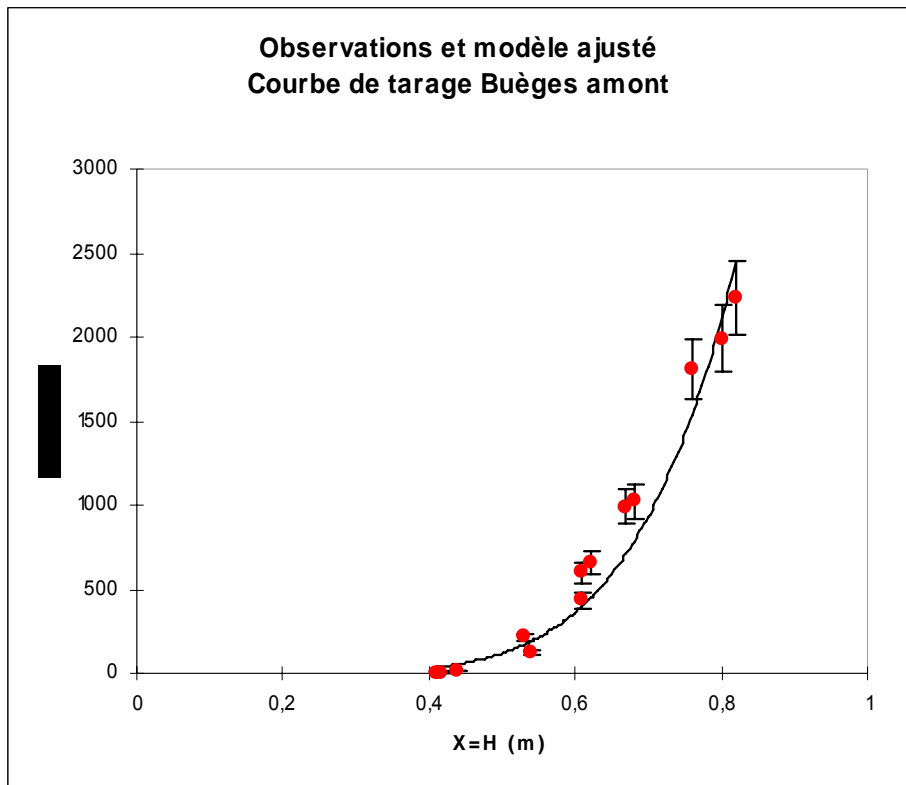
Les formations de 37 à 105 m sont attribuées lithostratigraphiquement au Callovien supérieur.

La formation de 105 à 109 m est attribuée au Callovien moyen.

La formation de 109 à 128 m est rapportée au Bathonien supérieur.

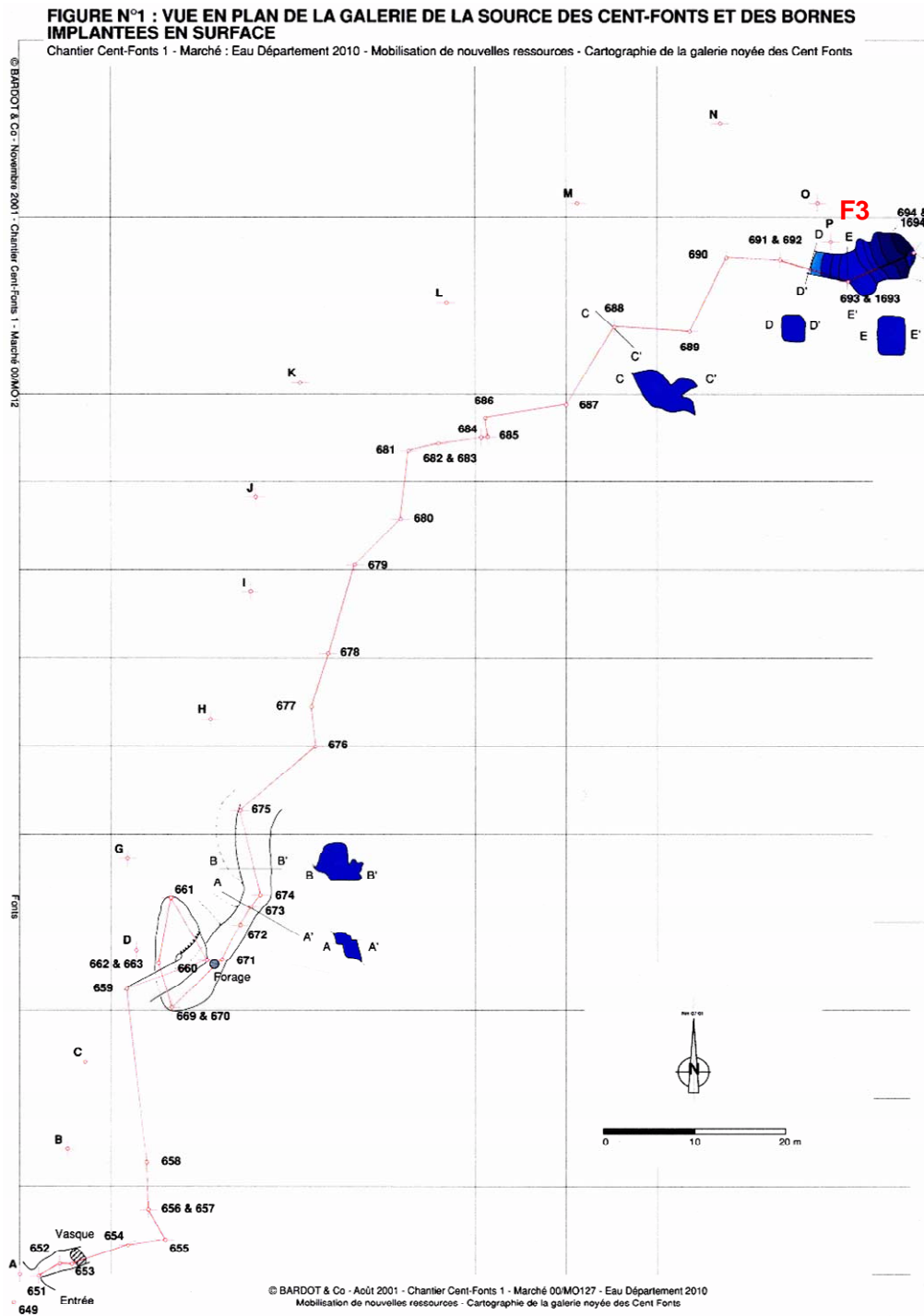
Annexe 3

Courbes de tarage des seuils amont et aval de la rivière de la Buèges

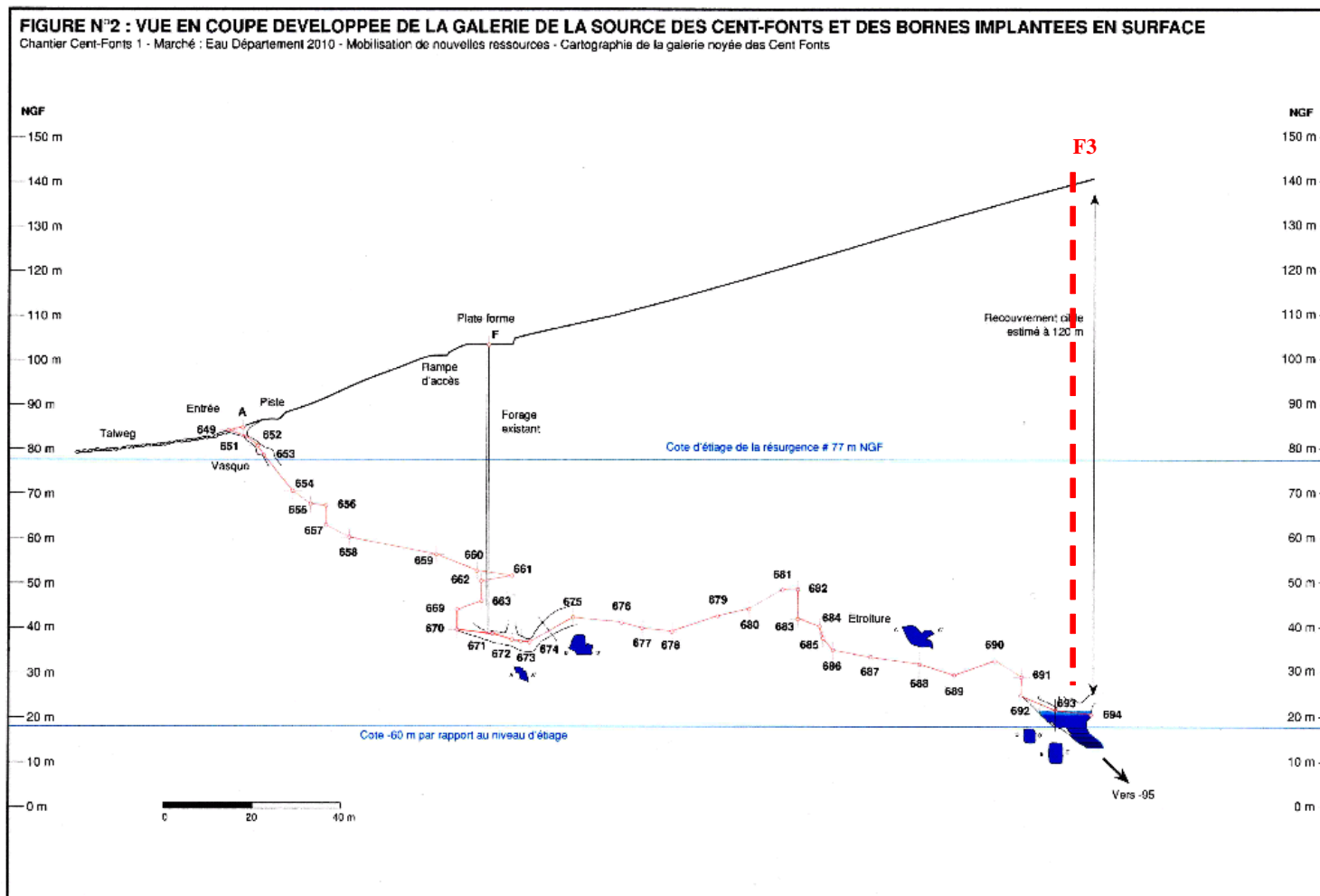


Annexe 4

Éléments topographiques du drain karstique au voisinage de la zone d'émergence des sources des Cent Fonts.



Croquis d'exploration de la source des Cent-Fonts : vue en plan (d'après Bardot)



© BARDOT & Co - Novembre 2001 - Chantier Cent-Fonts 1 - Marché 00/MO/27 - Eau Département 2010 - Mobilisation de nouvelles ressources - Cartographie de la galerie royée des Cent Fonts

Croquis d'exploration de la source des Cent-Fonts : vue en coupe (d'après Bardot)

Annexe 5

Résultats des analyses géochimiques effectuées sur les échantillons sélectionnés

Pompages d'essai sur le système karstique des Cent Fonts – interprétation des données recueillies

symbole		HCO3	CO3	Ca	Mg	Cl	Na	K	SO4	SiO2	NH4	NO2	NO3	F	Fe	CO3	PO4
LQ		5	5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.1	0.01	0.5	0.1	0.02	5	0.1
Unité		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	mg/l	mg/l
Nom échantillons	date																
Hérault amont	19/07/2005	184	<LQ	45.7	14.3	7.7	5.7	1.1	16	2.9	<LQ	0.02	<LQ	<LQ	0.03	<LQ	<LQ
Hérault amont	26/07/2005	188	<LQ	44.9	14.2	7.6	5.6	1.1	15.7	3	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0.03	<LQ	<LQ
Hérault amont	03/08/2005	189	<LQ	46.1	14.4	7.6	5.6	1.1	15.7	2.7	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0.03	<LQ	<LQ
Hérault amont	23/08/2005	191	<LQ	45.6	14.7	8.3	5.9	1.3	15.9	1.9	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Hérault amont	31/08/2005	183	<LQ	43.7	14.7	8.1	5.9	1	16.5	1.2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0.02	<LQ	<LQ
Hérault amont Fontanilles	31/08/2005	202	<LQ	49.7	14.6	7.7	5.5	0.9	14.7	1.7	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Galerie 11/08/05	11/08/2005	184	<LQ	46.7	13.2	7.5	5.5	1	15.3	3.2	<LQ	0.04	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
grotte pts 660/661 25/08/05	25/08/2005	182	<LQ	46.8	12.9	8	5.9	0.9	15.3	2.5	<LQ	<LQ	0.5	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Hérault grotte 2	25/08/2005	185	<LQ	46.2	13.6	8	5.6	0.9	15.9	2.4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Buèges amont pertes	23/08/2005	203	<LQ	58.4	8.6	4.9	3	<LQ	5	2.5	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
CF AP sce n°5	19/07/2005	257	<LQ	76.3	11.6	5.6	3.5	<LQ	6.6	3.6	<LQ	0.23	1.1	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
CF piquage P1=200	27/07/2005	264	<LQ	76.4	12	5.6	3.6	<LQ	6.7	3.8	<LQ	0.03	1.1	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
CF piquage LD400	01/08/2005	268	<LQ	76	12.3	5.7	3.6	<LQ	6.7	3.8	<LQ	0.04	0.9	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
CF piquage LD400	03/08/2005	264	<LQ	73.7	12.4	6	3.8	<LQ	7.8	3.7	<LQ	0.02	1.2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
CF piquage LD400	05/08/2005	258	<LQ	72.6	12.4	5.9	3.9	<LQ	7.8	3.6	<LQ	0.13	0.6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
CF piquage LD400	09/08/2005 09:00	261	<LQ	73.7	12.4	6.2	3.8	0.5	7.8	3.8	<LQ	0.34	0.8	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
CF piquage LD400	09/08/2005 16:00	246	<LQ	69.9	12.5	6.2	4.2	0.5	9	3.8	<LQ	0.23	0.7	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
CF piquage LD400	11/08/2005	260	<LQ	73.4	12.4	6.1	3.9	0.5	7.7	3.9	<LQ	0.08	1	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
CF piquage LD400	17/08/2005	270	<LQ	74.5	12.7	6.5	4.6	0.8	7.5	4	<LQ	0.02	1.6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
CF piquage LD400	23/08/2005	274	<LQ	74.1	12.9	6.4	4	<LQ	7.4	4.1	<LQ	<LQ	1.6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
CF piquage LD400	25/08/2005	273	<LQ	74.6	13.2	6.4	4	0.5	7.4	3.9	<LQ	<LQ	1.4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
CF piquage LD400	31/08/2005	270	<LQ	73.2	13.3	6.4	4	0.5	7.4	4.2	<LQ	0.02	1.6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
CF piquage LD400	02/09/2005	270	<LQ	74.1	13.3	6.6	4.1	0.6	7.6	4.3	0.2	0.01	2.8	<LQ	0.02	<LQ	<LQ
CF piquage LD400	03/09/2005	262	<LQ	70.4	13.2	6.7	4.1	0.6	8	3.9	<LQ	<LQ	1.7	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

LQ = limite de quantification

Tableau 1 : Résultats des analyses des éléments majeurs

Pompages d'essai sur le système karstique des Cent Fonts –interprétation des données recueillies

	nom	Cérium	Dysprosium	Erbium	Europium	Gadolinium	Holmium	Lanthane	Lutétium	Néodyme	Praséodyme	Samarium	Terbium	Thulium	Yttrium	Ytterbium
	Symbole	Ce	Dy	Er	Eu	Gd	Ho	La	Lu	Nd	Pr	Sm	Tb	Tm	Y	Yb
	LQ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	unité	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
Nom échantillons	date															
Hérault amont	19/07/2005	25	15	1	71	3	< LQ	62	< LQ	6	3	1	3	< LQ	10	2
Hérault amont	26/07/2005	4	11	< LQ	80	2	< LQ	24	< LQ	3	< LQ	1	2	< LQ	9	2
Hérault amont	03/08/2005	3	6	< LQ	85	1	< LQ	21	< LQ	2	< LQ	< LQ	1	< LQ	6	1
Hérault amont	23/08/2005	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Hérault amont	31/08/2005	4	6	< LQ	88	1	< LQ	21	< LQ	2	< LQ	1	1	< LQ	6	1
Hérault amont Fontanilles	31/08/2005	6	5	1	72	2	< LQ	31	< LQ	5	1	1	1	< LQ	18	2
Galerie 11/08/05	11/08/2005	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
grotte pts 660/661 25/08/05	25/08/2005	1	10	3	16	4	1	24	< LQ	8	1	2	1	< LQ	67	4
Hérault grotte 2	25/08/2005	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Buèges amont pertes	23/08/2005	1	7	< LQ	< LQ	1	< LQ	22	< LQ	1	< LQ	< LQ	1	< LQ	5	1
CF AP sce n°5	19/07/2005	5	21	3	5	5	1	40	< LQ	13	3	2	4	< LQ	65	4
CF piquage P1=200	27/07/2005	3	14	2	5	4	1	44	< LQ	12	2	2	2	< LQ	57	2
CF piquage LD400	01/08/2005	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
CF piquage LD400	03/08/2005	3	29	3	9	6	1	41	< LQ	14	3	2	5	< LQ	63	4
CF piquage LD400	05/08/2005	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
CF piquage LD400	09/08/2005 09:00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
CF piquage LD400	09/08/2005 16:00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
CF piquage LD400	11/08/2005	3	16	2	11	4	< LQ	34	< LQ	12	2	2	3	< LQ	55	3
CF piquage LD400	17/08/2005	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
CF piquage LD400	23/08/2005	3	12	2	9	3	< LQ	28	< LQ	7	1	1	2	< LQ	44	2
CF piquage LD400	25/08/2005	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
CF piquage LD400	31/08/2005	2	10	3	11	3	1	31	< LQ	10	2	2	2	< LQ	65	3
CF piquage LD400	02/09/2005	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
CF piquage LD400	03/09/2005	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

LQ = limite de quantification

-- non dosé

Tableau 2 : Résultats des analyses des terres rares

Pompages d'essai sur le système karstique des Cent Fonts – interprétation des données recueillies

symbole		Sr	Ba	Li	B	Br	2H	2σ	18O	2σ	87/Sr/86Sr	2σ
LQ		0.1	1	0.5	1	20					*	
Unité		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	‰	‰	‰	‰		
Nom échantillons	date											
Hérault amont	19/07/2005	93.8	74.2	1.5	15.3	< LQ	-35.2	0.8	-5.9	0.1	0.709220	0.000008
Hérault amont	26/07/2005	92.6	78.5	1.6	15.4	< LQ	-35.4	0.8	-5.9	0.1	0.709200	0.000008
Hérault amont	03/08/2005	93.4	86.1	1.6	16.1	< LQ	-35.3	0.8	-5.9	0.1	0.709184	0.000008
Hérault amont	23/08/2005	93.2	89.4	1.7	15.8	< LQ	--	--	--	--	0.709138	0.000009
Hérault amont	31/08/2005	92.8	89.6	1.5	16	< LQ	-35.8	0.8	-5.9	0.1	0.709147	0.000008
Hérault amont Fontanilles	31/08/2005	85.8	75	1.4	14.7	< LQ	-35.9	0.8	-6	0.1	0.709050	0.000008
Galerie 11/08/05	11/08/2005	77.8	46.1	1.1	15.5	< LQ	--	--	--	--	0.709052	0.000007
grotte pts 660/661 25/08/05	25/08/2005	74.6	16.3	0.9	14.3	< LQ	-35.9	0.8	-5.9	0.1	0.709172	0.000009
Hérault grotte 2	25/08/2005	81.1	47.7	1.1	15.1	< LQ	--	--	--	--	--	--
Buèges amont pertes	23/08/2005	48.3	3.2	< LQ	4	< LQ	-33.9		-6	0.1	0.708125	0.000009
CF AP sce n°5	19/07/2005	53.1	4.5	0.7	6.3	< LQ	-34.3	0.8	-6.2	0.1	0.708293	0.000007
CF piquage P1=200	27/07/2005	52.5	4.2	0.8	6.2	< LQ	-34.6	0.8	-6.2	0.1	0.708298	0.000009
CF piquage LD400	01/08/2005	53	4.5	0.8	6.5	21.4	--	--	--	--	0.708326	0.000008
CF piquage LD400	03/08/2005	56.2	7.7	0.9	7.3	23.7	-34.6	0.8	-6.1	0.1	0.708443	0.000007
CF piquage LD400	05/08/2005	56.4	8.8	0.8	7.1	21.1	--	--	--	--	0.708456	0.000010
CF piquage LD400	09/08/2005 09:00	56.9	10.1	0.9	6.9	21.8	--	--	--	--	0.708447	0.000009
CF piquage LD400	09/08/2005 16:00	59.6	15.4	0.9	7.9	21	--	--	--	--	0.708567	0.000007
CF piquage LD400	11/08/2005	57.6	9.9	0.9	7.4	23.2	-34.4	0.8	-6.1	0.1	0.708439	0.000010
CF piquage LD400	17/08/2005	59	9	0.9	7.4	< LQ	--	--	--	--	0.708419	0.000009
CF piquage LD400	23/08/2005	58	8.6	0.9	6.5	< LQ	-34.5	0.8	-6.1	0.1	0.708402	0.000009
CF piquage LD400	25/08/2005	57.6	6.7	0.9	7.6	23.7	--	--	--	--	0.708380	0.000008
CF piquage LD400	31/08/2005	58.3	9.3	0.9	8	22.1	-34.8	0.8	-6.1	0.1	0.708394	0.000009
CF piquage LD400	02/09/2005	58.2	12	0.9	7.4	< LQ	--	--	--	--	0.708417	0.000010
CF piquage LD400	03/09/2005	58.7	12.2	0.9	7	26.6	--	--	--	--	0.708592	0.000008

LQ = limite de quantification

* la valeur obtenue sur 29 déterminations du standard NBS987 analysé durant cette période est de 0.710243 +/-22



-- non dosé

Tableau 3 : Résultats des analyses des éléments traces et des isotopes

Annexe 6

Faune Stygobie : éléments sur les travaux en cours

Pompages d'essai sur le système karstique des Cent Fonts – interprétation des données recueillies

  CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE		Laboratoire d'Ecologie des hydrosystèmes Fluviaux Hydrobiologie & Ecologie Souterraines Université Claude Bernard - LYON 1 - UMR CNRS 5023			CENT FONTS: fiche de contrôle	
		échantillons C. Bou		tris achevés		
				tris en cours		
n° échantillon	n° sous-échantillon	DATE	HEURE	hydrologie/débit	Commentaires	
1 inventaire sources	1-A	18/7		périodes d'arrêt des essais de pompe	surber sources (2 échantillons)	
	1-B	19 - 20/07/2005		périodes d'arrêt des essais de pompe	Bou-Rouch sources (2 échantillons)	
	1-C	18/7		périodes d'arrêt des essais de pompe	surber sources (1 échantillon)	
	1-D	19-20/07		périodes d'arrêt des essais de pompe	filtrage sources (3 échantillons)	
2 inventaire grotte	1-E	19/7	11h-14h	débit d'étiage	prélèvement supplémentaire: hyporheic Hérault seuil amont	
	1-F	19/7	11h-14h	débit d'étiage	prélèvement supplémentaire: hyporheic Hérault seuil aval	
	2-A	19/7	15h-16h	période d'essai de pompe	Bou-Rouch grotte	
	2-B	19/7	10h-15h30	période d'essai de pompe	Appats grotte ("frollic")	
3 POMPAGE PALIERS	3-A	27/07/2005	11-13h	200 l/s (débit filtré 5 l/s)		
	3-B	28/07/2005	8-14h	300 l/s (filtré: 5 l/s)	1 Troglocariss	
	3-C	29/07/2005	8-14h	500 l/s (filtré: 4l/s)		
	3-D	30/07/2005	8/14h	400 l/s (filtré: 4l/s)		
4 POMPAGE CONTINU 400 l/s	4-A	4-5/08/05	durée: 22 h	4 l/s		
	4-B	4-5/08/05	durée 23 h	60 l/s	Gammares visibles	
	4-C	6-10/08/05	durée 4 jours	4 l/s		
	4-D	9-11/08/05		60 l/s	5 Harpact.	
5 POMPAGE CONTINU 400 l/s	5-A	10-12/08/05	48 h	4 l/s		
	5-B	10-12/08/05	48 h	60 l/s		
	5-C	12-15/08/05	72 h	4 l/s		
	5-D	12-15/08/05	72 h	60 l/s	2 Microcharon - 6 Salentinelles	
6 POMPAGE CONTINU 400 l/s	6-A	15-18/08/05	72 h	4 l/s		
	6-B	15-18/08/05	72 h	60 l/s	Niphargus	
	6-C	18-24/08/05	6 jours	4 l/s	2 Harpact.	
	6-D	18-24/08/05	6 jours	60 l/s		
7 POMPAGE CONTINU 400 l/s	7-A	24-28/08/05	4 jours	4 l/s	1 Bathynelle	
	7-B	24-28/08/05	4 jours	60 l/s		
	7-C	28/08-1/09/05	4 jours	4 l/s		
	7-D	28/08-1/09/05	4 jours	60 l/s		
8 perte grotte et crue	8-A	01/09/2005	12 h	20 l/s perte (résurgence)	Microcharon - 8 Faucheria et Niph.	
	8-B	7/09-17h au 8/09-13h	durée 20h	griffon déversoir BRGM		
	8-C	08/09/2005	24 h	griffon crue filtrage (50-80 l/s???)		
	8-D					
9 POMPAGE CONTINU (débit variable)	9-A	20/09 au 22/09	durée 48h	4 l/s	pompage 300 l/s (jusqu'au 21/09-16h30) ...	
	9-B				puis reprise à 19h16 à 500 l/s	
	9-C	23/09-12h au 30/09-8h	durée 164h	4 l/s	dernière phase pompage 400 l/s	
	9-D					
10 inventaire sources	10-A	02/12/2005	10h-12h	surbers sur tous les griffons en activité	surbers sources	
	10-B	02/12/2005	12h-14h	5 x 10L (= 5 griffons différents)	Bou-Rouch sources	
	10-C	01/12/05 au 02/12/05	16h15/10h		Filtrages sources (3 grands filets, 1 petit filtre rond)	
	10-D					
11 inventaire grotte	11-A	01/12/05 au 02/12/05	18h-15h	pose de 3 balances (viande-saucisson)	Appats grotte	
	11-B				Bou-rouch impossible (trop d'eau dans la cavité)	
	11-C					
	11-D					

Annexe 7

**Éléments de statistiques descriptives sur la pluie
et la pluie efficace de l'impluvium karstique du
système des Cent Fonts calculée à l'aide du
modèle de transfert des Cent Fonts (Ladouche et
al., 2004)**

	Nombre de valeurs mensuelles utilisées	Précipitation du cycle 2004-2005 (mm)	Moyenne précipitation (mm)	Minimum précipitation (mm)	1er quartile précipitation (mm)	Médiane précipitation (mm)	3ème quartile précipitation (mm)	Maximum précipitation (mm)	Asymétrie
Septembre	34	86.4	103.1	0.2	24.8	87.4	154.5	332.7	0.90
Octobre	34	155.1	159.2	2.8	65.6	120.8	257.7	548.8	1.00
Novembre	34	63.7	122.8	9.2	38.4	90.5	197.6	431.9	1.27
Décembre	34	42.2	128.5	2.9	29.4	100.4	198.8	422.2	1.03
Janvier	34	3.9	112.0	0.4	36.0	58.3	125.8	653.5	2.25
Février	34	28.1	94.7	5.0	28.1	60.5	128.3	406.9	1.47
Mars	35	22.2	73.9	0.0	22.2	49.4	120.7	202.3	0.69
Avril	35	53.6	100.6	12.4	46.7	87.8	133.1	311.8	1.05
Mai	35	38.9	80.9	5.0	35.9	70.7	112.6	233.2	1.02
Juin	35	66.4	51.4	4.1	24.2	39.5	68.9	210.5	1.59
Juillet	35	8.4	31.2	2.8	10.8	22.3	41.9	118.8	1.32
Août	35	19.2	53.3	9.2	22.8	45.7	79.9	146.2	0.73

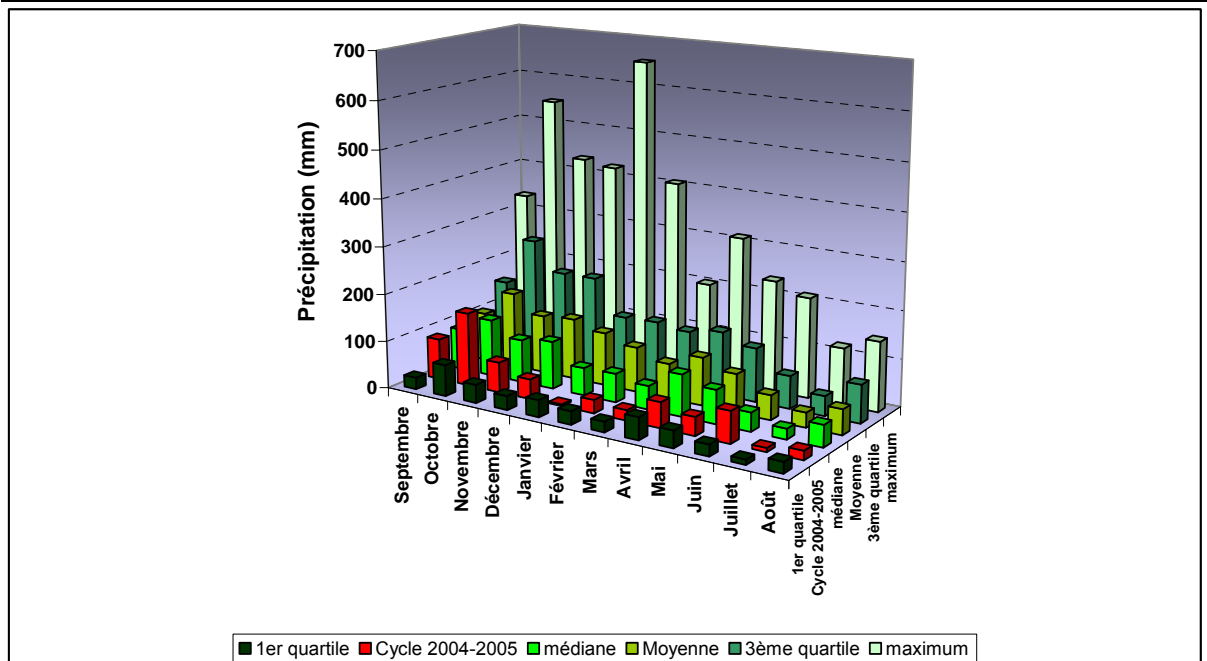


Illustration 1 : Evolution temporelle des paramètres statistiques de la pluie mensuelle (1^{er} quartile, médiane, 3^{ème} quartile, moyenne) déterminés à partir de la chronique 1971-2005.

	Nombre de valeurs mensuelles utilisées	Précipitation efficace du cycle 2004-2005 (mm)	Minimum précipitation efficace (mm)	1er quartile précipitation efficace (mm)	Médiane précipitation efficace (mm)	Moyenne précipitation efficace (mm)	3ème quartile précipitation efficace (mm)	Maximum précipitation efficace (mm)	Asymétrie
Septembre	34	0	0	0	0	22.0	35.3	159.9	1.9
Octobre	34	15	0	0	18.3	65.0	119.5	315.3	1.3
Novembre	34	35	0	8.4	38.1	72.3	123.4	323.7	1.4
Décembre	34	20	0	15.5	79.2	103.3	156.3	399.9	1.2
Janvier	34	1	0	21.4	44.8	103.2	114.4	651.2	2.3
Février	34	17	0	16.9	57.1	86.2	114.3	403.8	1.6
Mars	35	0	0	10.5	38.0	51.9	91.1	157.0	0.8
Avril	35	10	0	8.7	40.9	46.9	67.4	200.0	1.4
Mai	35	0	0	0	6.7	17.1	23.4	147.7	3.0
Juin	35	21	0	0	0	8.4	6.5	83.6	2.7
Juillet	35	0	0	0	0	1.6	0	24.9	3.3
Août	35	0	0	0	0	2.2	0	24.1	2.9

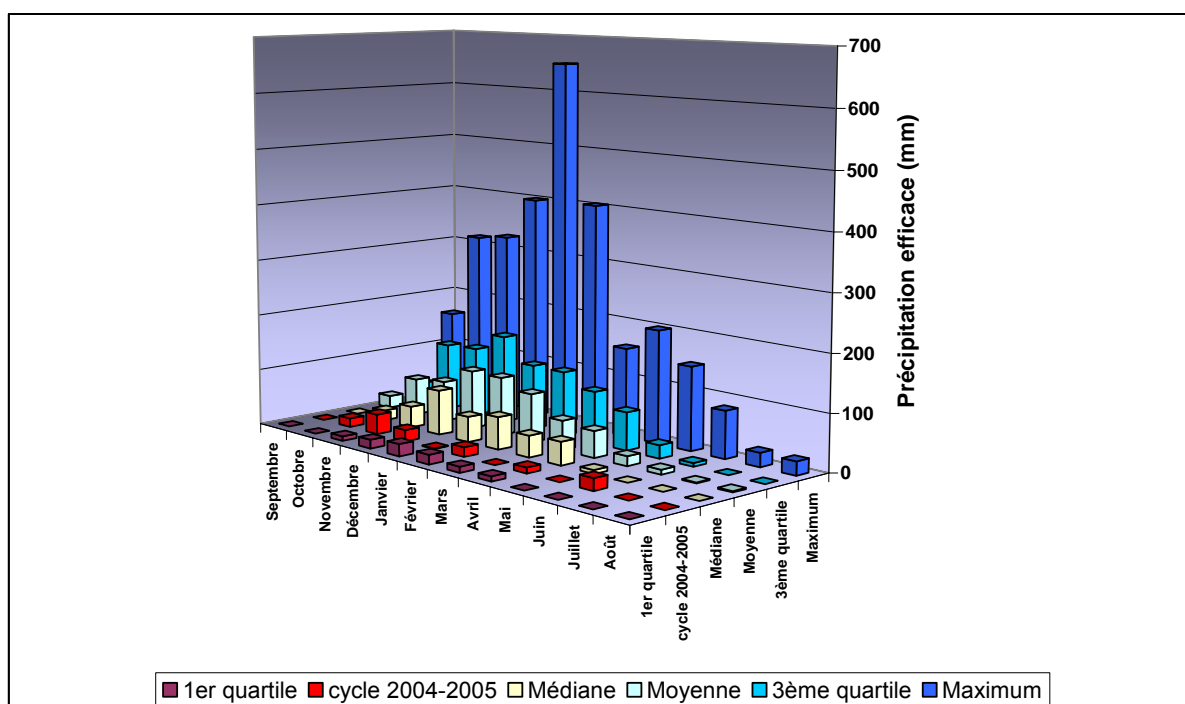


Illustration 2 : Evolution temporelle des paramètres statistiques de la pluie efficace mensuelle (1^{er} quartile, médiane, 3^{ème} quartile, moyenne) déterminés à partir de la chronique 1971-2005.

Annexe 8

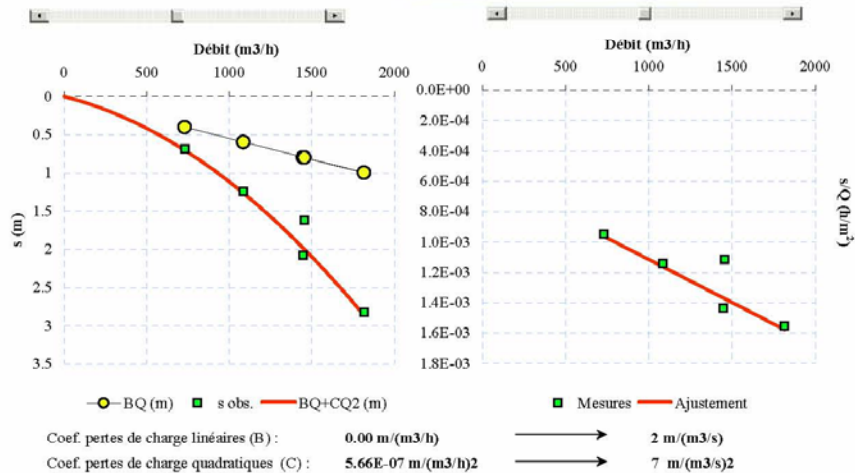
Evaluation des pertes de charge quadratiques

EVALUATION DES PERTES DE CHARGE AU PUIT DE POMPAGE

Opération : CENT-FONTS
 Localisation : Hérault
 Société : BRGM
 Date pompage : 27-juil-05

Nom de l'ouvrage : CF
 Type d'ouvrage : PUIITS
 Aquifère testé : CALCAIRES ET DOLOMIE:

Pompage par paliers	Palier 1	Palier 2	Palier 3	Palier 4	Palier 5
Débit (m3/h)	730	1085	1816	1447	1455
Temps de pompage (min)	330	330	330	330	330
Temps de remontée (min)	0	0	0	0	0
Rabatement observé (m)	0.69	1.24	2.82	2.08	1.62



CARACTÉRISTIQUES HYDRAULIQUES DU PUIT DE POMPAGE INFORMATIONS GÉNÉRALES

Essai de puits	
Niveau statique initial (m/sol)	
Profondeur pompe (m/sol)	
Type pompe	
Diamètre chambre de pompage (mm)	
Position crépine (m/sol)	
Type crépine	
Nature du massif filtrant	

Limites hydrauliques d'exploitation	
Niveau statique en basses eaux (m)	
Amplitudes saisonnières (m)	
Débit d'exploitation recommandé (m3/h)	
Pertes de charge linéaires (m)	0.00
Pertes de charge quadratiques (m)	0.00
Niveau dynamique en basses eaux (m)	0.00

Informations sur l'ajustement					
Q/s calculé (m2/h)	1038.73	859.47	634.13	730.85	1818.78
Q/s observé (m2/h)	1057.97	875.00	643.97	695.67	898.15
Ecart Q/s cal.- Q/s obs. (m2/h)	19.24	15.53	9.85	-35.18	-920.64
Rabatement calculé (m)	0.70	1.26	2.86	1.98	2.00
Ecart Scal-Sobs (m)	0.01	0.02	0.04	-0.10	0.38

WINISAPE/TEMPO version 5.07.03

Annexe 9

Simulation de pertes de charge quadratiques dans un drain karstique

Écoulements en charge - estimation de pertes de charge quadratiques

	Drain 1			Drain 2		
Conduite circulaire de diamètre D						
Diamètre	D=	1.65	m	D=	1.25	m
Coefficient de viscosité cinématique	ν =	1.17E-06	m ² /s	ν =	1.17E-06	m ² /s
Vitesse moyenne	U=	0.116	m/s	U=	0.101	m/s
Débit	Q=	0.248	m ³ /s	Q=	0.124	m ³ /s
Section	S=	2.14	m ²	S=	1.23	m ²
Rayon hydraulique	Rh=	0.4125	m	Rh=	0.3125	m
Diamètre hydraulique	Dh=	1.65	m	Dh=	1.25	m
Coefficient de Manning-Strickler	Ks=	20	m ^(1/3) /s	Ks=	20	m ^(1/3) /s
Longueur du drain karstique	L=	5000	m	L=	5000	m
Nombre de Reynolds	Re=	1.63E+05	(-)	Re=	1.07E+05	(-)
Pertes de charge quadratiques linéaires	i	0.000109079	(-)	i	0.00011988	(-)
Pertes de charge sur un drain de longueur L	PdeC drain1	0.545	(m)	PdeC drain2	0.599	(m)
Pertes de charge totales	PdeC	1.145	(m)			

Note : on considère que, dans le premier tronçon de drain, transite le débit de pompage moins la contribution de l'Hérault (30 l/s) et moins la moitié de la contribution naturelle de la source (122,5 l/s) ; la moitié de ce débit transite dans le second tronçon



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

Service EAU, Unité RMD
103rue de Pinville
34000 – Montpellier - France
Tél. : 04 67 15 79 90