

dk



Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains

Synthèse Générale

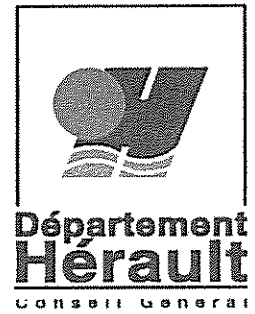
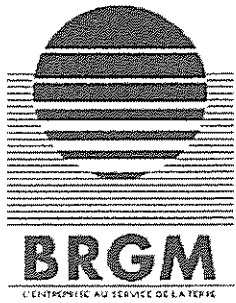
par

L. Aquilina, B. Ladouche, M. Bakalowicz, R. Schoen, E. Petelet

Juillet 1999

R40746



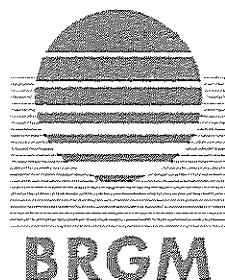


*Caractérisation du fonctionnement des
systèmes karstiques nord-montpelliérains*

Synthèse Générale

Juillet 1999

R40746



Mots clés : Géologie, Hydrogéologie, Hydrogéochemie, Systèmes karstiques, Hérault, Fontanilles, Cent Fonts, La Buèges, Jaugeage, Traçage artificiel, Débit, Eléments majeurs, Eléments traces, Isotope de l'eau ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$), Isotope du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), Isotope du carbone ($\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{14}\text{C}$).

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

L. AQUILINA, B. LADOUCHE, M. BAKALOWICZ, R. SCHOEN, E. PETELET (1999) – Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains. Synthèse générale Rap. BRGM R40746 volume 0, 50 p., 8 fig., 5 tabl., 1 annexe .

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

Table des matières

SYNTHÈSE	5
1. INTRODUCTION.....	7
2. CONTEXTE ET DÉMARCHE ADOPTÉE	9
2.1. La politique de l'eau du Conseil Général	9
2.2. L'étude des milieux karstiques.....	12
2.3. Objectif et démarche adoptée.....	13
2.4. Formalisation de la démarche d'étude	14
3. PRÉSENTATION DES SITES	17
4. PRESENTATION DES ETUDES MENEES PAR LE BRGM.....	19
4.1. Programme de travail.....	19
4.2. Structure du rapport	19
5. SYNTHESE DES ETUDES REALISEES : FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES KARSTIQUES	23
5.1. Caractéristiques générales des garrigues nord-montpelliéraines	23
5.1.1. Histoire géologique et constitution des séries	23
5.1.2. Structure géologique	23
5.1.3. Hydrogéologie.....	25
5.2. Système karstique des Fontanilles.....	26
5.2.1. Structure générale de l'aquifère	26
5.2.2. Fonctionnement hydrologique de l'aquifère.....	27
5.2.3. Caractérisation hydrochimique du fonctionnement de l'hydrosystème	29
5.3. Système karstique des Cent-Fonts	34
5.3.1. Caractéristiques générales de l'aquifère	34
5.3.2. Fonctionnement hydrologique de l'aquifère.....	35
5.4. Conclusion sur le mode de fonctionnement des aquifères	42
6. POTENTIALITES DES RESERVES EN VUE D'UNE EXPLOITATION	45
6.1. Importance des réserves du système des Fontanilles	45
6.2. Importance des réserves du système des Cent-Fonts.....	45
6.3. Perspectives.....	46
6.4. Vulnérabilité globale des systèmes	46
7. CONCLUSION : INTERET DES ETUDES POUR LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU A L'ECHELLE DU DEPARTEMENT	47
GLOSSAIRE	49
BIBLIOGRAPHIE.....	52
ANNEXE.....	1

Liste des figures

Figure 1 : Systèmes aquifères de l'Hérault

Figure 2 : Schéma de fonctionnement d'un système karstique

Figure 3 : Localisation des deux sites étudiés

Figure 4 : Colonne stratigraphique

Figure 5 : Schéma structural régional

Figure 6 : Schéma de fonctionnement du système des Fontanilles

Figure 7 : Schéma de fonctionnement du système des Cent-Fonts

Figure 8 : Classification des systèmes aquifères des Cent-Fonts et des Fontanilles dans le référentiel de Mangin

Liste des tableaux

Tableau 1 : Chronogramme des opérations

Tableau 2 : Distribution des formations aquifères

Tableau 3 : Paramètres de la récession aux Fontanilles

Tableau 4 : Paramètres de la récession aux Cent-Fonts

Tableau 5 : Principaux paramètres des analyses corrélatoires et spectrales

Synthèse

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

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

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

L'un des objectifs de l'étude réalisée par le BRGM est de développer les outils nécessaires à une gestion rationnelle des ressources en eau à l'échelle du département, à partir d'une exploitation et d'une gestion

optimisée de la ressource en eau des systèmes karstiques. Il s'agit donc d'une démarche de recherche dont l'ampleur va au delà des deux sites étudiés.

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

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

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

Le présent rapport replace l'étude dans son contexte et effectue la synthèse des résultats, avant de définir les perspectives d'exploitation des deux aquifères karstiques étudiés. Ces perspectives sont plutôt favorables pour la source des Cent Fonts, qui recèle des réserves importantes. En revanche, pour la source des Fontanilles, une exploitation plus importante qu'actuellement n'est guère envisageable.

1. Introduction

L'alimentation en eau potable du département de l'Hérault repose principalement, en période de forte fréquentation touristique, sur cinq grandes ressources (cf. figure 1) :

- l'exploitation la nappe alluviale de l'Hérault qui fournit actuellement un tiers des besoins du département,
- l'exploitation du fleuve Orb et sa nappe alluviale,
- l'exploitation de la la source du système karstique du Lez qui alimente en particulier la ville de Montpellier,
- l'exploitation la nappe captive de l'Astien,
- l'exploitation des eaux du Rhône par l'entremise du canal Philippe Lamour de la Compagnie Nationale d'aménagement de Bas-Rhône-Languedoc.

Ces différentes ressources, qui sont toutes plus ou moins vulnérables aux pollutions accidentelles, aux défaillances techniques ou encore aux sécheresses importantes, sont aujourd'hui proches de leurs limites de production - notamment pour les systèmes aquifères -, face à la demande qui ne cesse d'augmenter. Par ailleurs, le département de l'Hérault va voir sa population croître dans les prochaines décennies (près de 36 % en 20 ans), ce qui en terme de besoin en eau potable, se traduit par un augmentation des prélèvements d'environ 50 %, soit 740 000 m³ par jour en période de pointe. Les ressources actuellement exploitées ne pourront pas subvenir au nouveau besoin.

C'est ces différents arguments qui poussent les gestionnaires à non seulement trouver de nouvelles ressources, mais surtout développer un cadre permettant la protection et une meilleurs gestions des ressources exploitées aujourd'hui et de celles qui le seront demain.

Dans le cadre de cette problématique, le Conseil Général de l'Hérault a mis en œuvre depuis plusieurs années un vaste programme concernant les ressources en eau du département. Ce programme a débuté par une analyse prospective des besoins en eau à l'horizon 2010 qui a

mis en évidence le besoin d'un doublement de la capacité de production d'eau potable. Les ressources actuelles ne pourront fournir que 60 % de la demande prévisionnelle.

Un tel enjeu implique donc non seulement de trouver de nouvelles ressources mais également de développer un cadre permettant la protection des ressources déjà exploitées et de celles qui le seront demain. En effet, l'eau n'est pas un bien inépuisable, pas plus qu'une ressource fossile. Nos ressources en eau sont un bien vivant et fragile qui résulte de l'équilibre entre les précipitations et les capacités d'écoulement des aquifères et des rivières. Ne pas perturber la reconstitution, année après année, des réserves demande une compréhension du fonctionnement des hydrosystèmes et une utilisation raisonnée de la ressource en eau. De plus, les différents types d'aquifères (alluvial ou karstique par exemple) n'ont pas les mêmes structures. Ils ne présentent donc pas le même type de comportement, le même type de ressource et possèdent des sensibilités aux pollutions différentes.

L'utilisation des ressources en eau et leur développement demande donc une approche globale, compréhensive des différentes possibilités offertes par les environnements géologiques naturels du département, de leur fonctionnement et de leur vulnérabilité. Les réserves et les capacités de production en fonction du cycle hydrologique doivent être connues pour une gestion rationnelle des ressources en eau qui ne conduise pas à terme à une dégradation des hydrosystèmes. Car s'il ne faut que quelques jours, en suivant les cours d'eau, à une goutte pour transiter depuis le Mont Aigoual jusqu'à la mer, il faut plusieurs dizaines d'années pour éliminer une pollution d'un aquifère ou restaurer ses réserves en eau douce.

Cette gestion patrimoniale des ressources en eau se construit à travers la structure de Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux centré sur le fleuve Hérault (SAGE Hérault) que porte

2.Contexte et démarche adoptée

2.1. La politique de l'eau du Conseil Général

Afin de déterminer sa politique en matière de ressources en eau, le Conseil Général a mené une étude prospective sur les besoins du département d'ici 2010.

L'estimation des besoins en eau se base sur un accroissement de 36 % de la population entre 1990 et 2010, au profit des zones littorales et du pourtour de Montpellier. L'augmentation de la demande qui s'ensuit, inégalement répartie, dépasse 50 % en période de pointe, soit 740 000 m³/j.

Le bilan des ressources actuelles et de leur évolution futures fait apparaître une capacité de production qui devra être augmentée de 130 500 m³/j, c'est à dire 42 % de la production totale moyenne.

Plusieurs solutions de complément sont possibles, qui doivent pouvoir pallier une défaillance de l'une des sources de production (pollution, sécheresse, incident technique).

La politique que développe le Conseil Général de l'Hérault s'appuie sur la politique définie par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse (RMC) dans le cadre de la loi sur l'eau et le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du Bassin RMC.

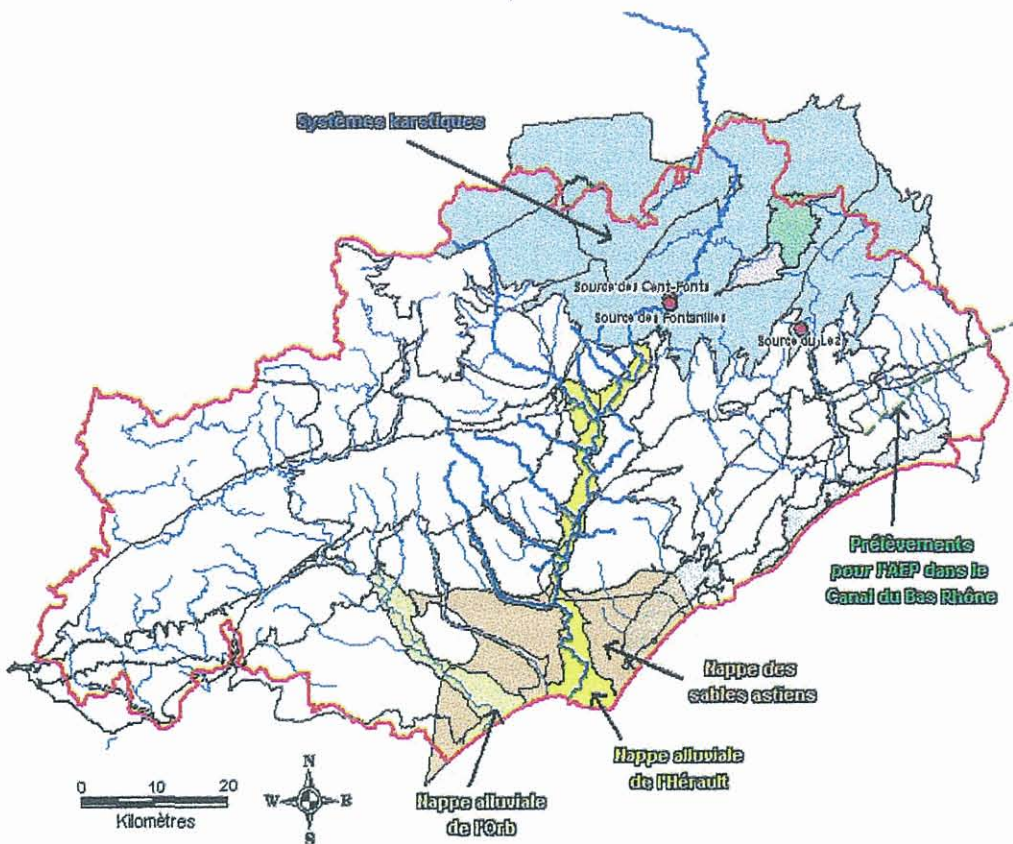


Figure 1 : Systemes aquifères de l'Hérault

Cette carte représente les différents systemes aquifères du département de l'Hérault. On y reconnaît quatre principaux systemes. La nappe alluviale sous couverture des sables de l'Astien, est déjà fortement sollicitée. Sa position littorale est une limite à son exploitabilité du fait de salinisation des eaux. Des systemes karstiques, seule la source du Lez fait l'objet d'une exploitation importante. Le fleuve Orb et sa nappe alluviale. Le fleuve Hérault et sa nappe constituent l'une des ressources majeures du département.

Plusieurs éléments ont sous-tendu l'action du Conseil Général :

♦ **La volonté de mener une action globale**

A l'échelle du département. Quatre systèmes aquifères différents sont sollicités dans le département et les études menées pour capter de nouvelles ressources ne peuvent pas être séparées d'une planification de l'ensemble des ressources portées par chaque aquifère. Or il s'avère que d'un point de vue scientifique général, et également du point de vue géographique local (département de l'Hérault), de tous les hydrosystèmes étudiés, ce sont les systèmes karstiques qui sont les moins bien connus.

♦ **La nécessité de diversifier les ressources**

Du fait du développement tant rural qu'urbain, la pression anthropique se fait de plus en plus importante sur les hydrosystèmes. Aucun d'eux n'est aujourd'hui à l'abri d'une dégradation de sa qualité, d'une diminution de ses ressources suite à une pollution accidentelle ou à une surexploitation. La centralisation de l'alimentation en eau potable autour d'un système unique peut donc s'avérer problématique en cas de défaillance de ce type. L'Agence de l'Eau dans le cadre de la loi sur l'eau et du SDAGE RMC préconisent donc la diversification des ressources utilisées. Ainsi dans l'Hérault, malgré la possibilité, à l'heure actuelle, d'accroître les volumes exploités dans le fleuve et sa nappe alluviale, il convient de prospecter et d'étudier d'autres types de systèmes aquifères. Le SDAGE préconise notamment d'étudier les aquifères karstiques de la moyenne vallée de l'Hérault.

♦ **La volonté de mener une approche de compréhension des hydrosystèmes respectueuse de l'ensemble du cycle de l'eau.**

La gestion des ressources menée à un niveau global implique non seulement d'essayer de trouver des réserves nouvelles mais également de les placer dans le contexte global du cycle de l'eau pour déterminer leur vulnérabilité aux variations climatiques (sécheresses, crues). De même, les ressources fluviales nécessitent une étude complète des évolutions du fleuve et de ses relations avec la nappe.

Pour ces différentes raisons, le Conseil Général de l'Hérault a décidé de mettre l'accent sur les ressources des milieux karstiques, encore peu exploitées et de mettre en place un programme d'étude portant sur la caractérisation de leur fonctionnement. Pour ce faire, le Conseil Général de l'Hérault s'est associé au BRGM, qui déve-

loppe depuis plusieurs années un large programme d'étude sur le fonctionnement et la gestion des aquifères karstiques. Deux sites ont été retenus sur la moyenne vallée de l'Hérault : il s'agit de la source des Fontanilles, située sur la commune de Puéchabon, et de la source des Cent Fonts, située sur la commune de Causse-de-la-Selle.

2.2. L'étude des milieux karstiques

Bien qu'ils recèlent des réserves importantes, les milieux karstiques sont peu exploités par rapport aux nappes alluviales. En effet, ces aquifères sont caractérisés par une structure hétérogène composée de drains de dimensions très variables (dont certains sont explorables et constituent de véritables rivières souterraines) et de blocs peu perméables. Cette hétérogénéité de structure se traduit également par une hétérogénéité des écoulements au sein des aquifères karstiques. En effet, selon les cas, ils peuvent être caractérisés par de fortes crues répondant aux précipitations aussi rapidement que les rivières, suivies par des écoulements plus lents, plus proches de ceux des nappes des milieux poreux ou fissurés.

Ainsi, l'implantation d'un forage dans ce type de milieu est-elle aléatoire et la connaissance des réserves difficile à déterminer à partir des méthodes de l'hydrogéologie classique.

La démarche adoptée pour répondre au problème posé s'appuie sur la connaissance actuelle du karst acquise ces dernières années par le BRGM à la faveur de différents programmes de recherche menés en collaboration avec le CNRS (Laboratoire Souterrain de Moulis, Université Montpellier II, Lab. d'Hydroscience, UMR 5563). Une méthodologie spécifique prenant en compte la structure des aquifères karstiques a été développée à cet effet. Le BRGM s'est associé au CNRS depuis 1995 pour développer ces recherches en hydrogéologie karstique en région Languedoc-Roussillon. Ces programmes ont porté sur les méthodes hydrogéologiques

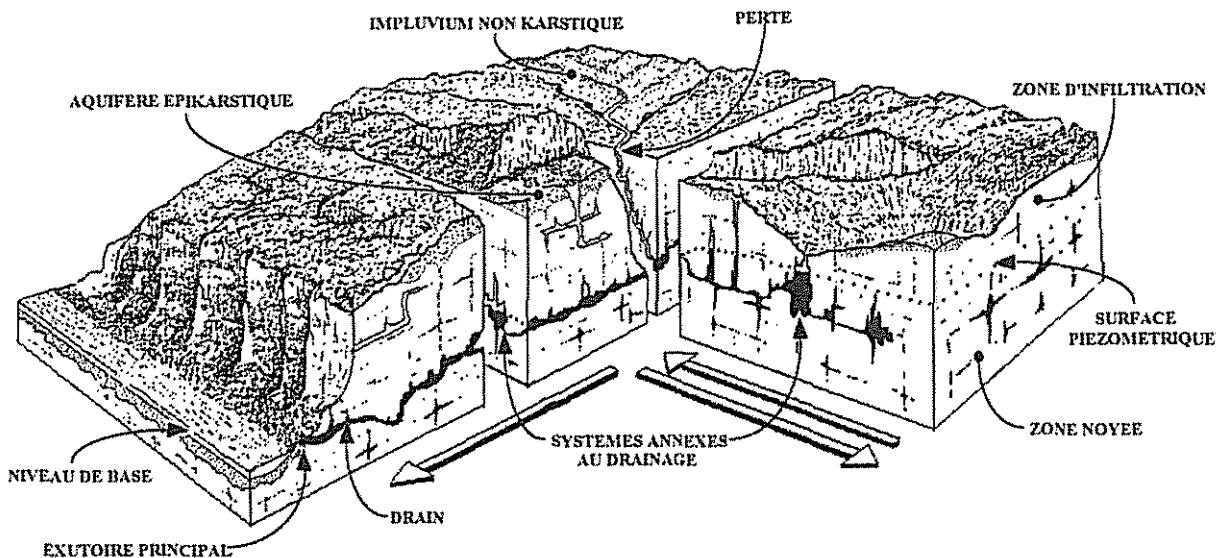


Figure 2 : Schéma de fonctionnement d'un système karstique.

On reconnaît dans le système les points qui permettent l'infiltration directe de la surface vers la zone noyée et le réseau qui draine cette dernière. C'est cet ensemble qui permet la transmission rapide de l'eau vers la source lors des pluies (caractère transmissif du karst). L'eau peut également s'infiltrer plus lentement dans l'ensemble de la matrice et durant l'étiage, les drains reçoivent l'eau des blocs moins perméables et des systèmes annexes au drainage (caractère capacitif du karst).

permettant d'appréhender les milieux karstiques (Marsaud, 1997) et un fort investissement a été mis sur l'apport des méthodes hydrochimiques à la compréhension du fonctionnement des systèmes. Ces méthodes ont été appliquées à l'ensemble des sources du plateau du Larzac (Plagnes, 1997). Une approche couplée hydrochimique et hydrogéologique est également menée sur les systèmes karstiques qui interfèrent avec l'étang de Thau (résurgence de la Vise). De plus, pour comprendre dans leur globalité le fonctionnement des systèmes étudiés dans le département, un suivi chimique des pluies a été entrepris sur un transect parallèle à l'Hérault au cours des cycles 1996 à 1998.

2.3. Objectif et démarche adoptée

L'objectif aujourd'hui est de définir le type d'exploitation le mieux adapté aux systèmes karstiques afin de permettre des débits d'exploitation maximum tout en restant dans le cadre d'une gestion optimale de la ressource.

Elle repose sur une stratégie d'étude organisée en quatre phases principales (cf. note technique en annexe) :

- *phase d'identification* dont le but est d'obtenir des indices sur la présence de réserves à partir de l'étude des transferts d'énergie au sein du système (analyse des débits de l'exutoire).
- *phase de caractérisation*, basée sur l'étude des transferts de masse (traçages, hydrochimie), permettant de caractériser la zone noyée.
- *phase de démonstration* dont l'objectif est d'évaluer la ressource exploitable à partir de l'étude du comportement de la zone noyée. Cette phase nécessite la mise en œuvre de pompes d'essai qui peuvent être réalisés sur l'exutoire, sur des regards naturels ou en forage.
- *phase d'évaluation* qui a pour objectif d'appréhender le fonctionnement de l'ensemble du système karstique en condition d'exploitation afin d'optimiser la gestion de la ressource.

L'étude qui a été menée par le BRGM actuellement ne porte que sur les deux premières

phases (identification et caractérisation), menées conjointement pour apprécier l'importance des réserves potentielles du système. Elle n'intègre pas la réalisation d'un forage de reconnaissance et le pompage d'essai qui permettront ultérieurement de tester la ressource.

2.4. Formalisation de la démarche d'étude

Pour répondre aux objectifs du Conseil Général, une convention d'appui scientifique à la politique entreprise dans les domaines karstiques a été signée entre le Conseil Général et le BRGM.

Cet appui aux politiques de l'eau, menée dans un souci de respect de la loi sur l'eau et du SDAGE, et envers des aquifères patrimoniaux, correspond à l'une des missions du BRGM, organisme public. De plus, cette politique, coïncidant avec l'un des axes de recherche défini en région Languedoc-Roussillon, un partenariat de recherche a pu être défini entre les deux structures. Ce partenariat a conduit à la définition du programme dont le financement a été assuré de manière conjointe. La répartition financière du programme d'étude des Fontanilles et Cent-Fonts est de l'ordre de 65 % pour le Conseil Général et 35 % pour le BRGM sur sa dotation publique de recherche. Le financement apporté par le BRGM à ce programme a porté en particulier sur les aspects hydrochimiques qui constituent la part la plus novatrice de ce programme et correspondent à une démarche volontariste de développement de cet outil de recherche au sein du BRGM. Néanmoins, les résultats obtenus dans le cadre de ce programme se sont appuyés sur des actions précédemment engagées par le BRGM ou sur des études menées sur la région dans le cadre de ses programmes de recherche propres (suivi chimique des précipitations le long du fleuve Hérault).

Par ailleurs, l'étude des systèmes des Fontanilles et des Cent-Fonts se poursuit en 1999 et 2000 par une démarche conjointe de recherche qui porte à la fois sur la poursuite du suivi hydrologique et hydrochimique sur les sources principales, et également sur une démarche de développement de modèles informatiques de simulation des écoulements et du transport, adapté aux milieux

karstiques et validés sur les sites des Fontanilles et des Cent-Fonts. Cette démarche est financée à hauteur de 60 % par le BRGM.

Ainsi, les études menées, même si elles ont porté sur deux sites, n'ont pas pour seul objectif de définir les réserves des deux systèmes étudiés en vue de leur éventuelle exploitation. Elles visent surtout à mettre en œuvre une politique de

recherche pouvant, d'une part, accroître la connaissance des milieux karstiques Héraultais et de leur particularités, et d'autre part, poursuivre le développement d'une méthodologie d'investigation, d'exploitation et de gestion adaptée aux systèmes karstiques en général. Cette démarche permettra à terme de disposer d'outils de gestion adaptés aux systèmes karstiques du département de l'Hérault.

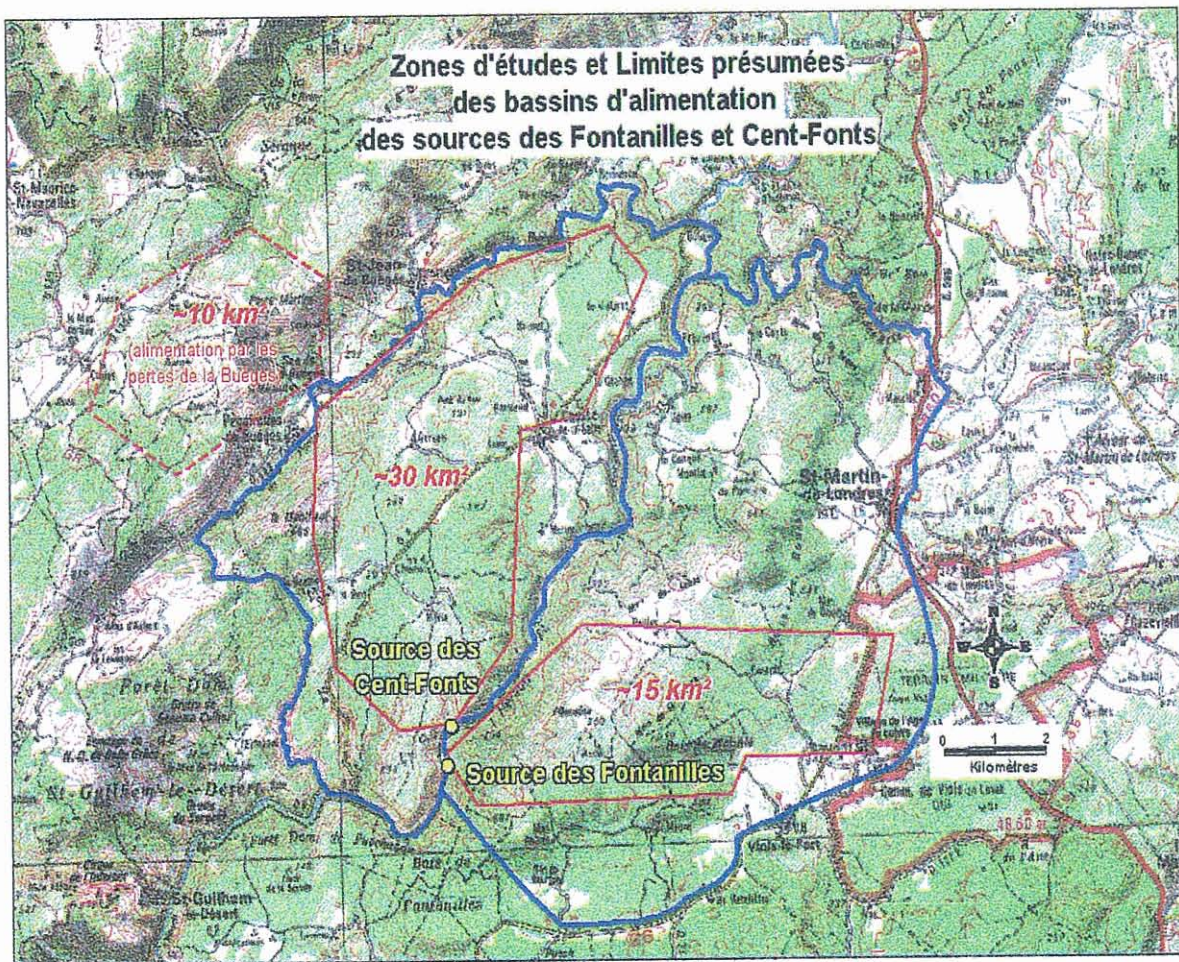


Figure 3 : localisation des deux systèmes étudiés.

3. Présentation des sites

Deux sites principaux ont été retenus dans le cadre de ce programme :

- la résurgence des Fontanilles, située en rive gauche de l'Hérault sur la commune de Puéchabon ;
- la résurgence des Cent Fonts, située en rive droite de l'Hérault sur la commune de Causse-de-la-Selle.

La source des **Cent Fonts** est l'exutoire principal du massif du Causse de la Selle, qui est situé entre les rivières de la Buèges et de l'Hérault. La source des Cent Fonts n'est pas captée actuellement, mais a déjà fait l'objet de travaux de reconnaissance. Ceux-ci, réalisés par la Compagnie Générale des Eaux, ont consisté d'une part, en la réalisation d'un forage recoupant la galerie noyée de la source temporaire à une profondeur de 40 m environ et d'autre part, à la réalisation d'un essai de pompage.

La source des **Fontanilles** est l'un des exutoires majeurs du Causse de Viols-le-Fort au Nord de Montpellier. Ce système karstique, bien que très proche du massif drainé par la source des Cent Fonts en est totalement indépendant. En effet, le cours de l'Hérault, représentant le niveau de base des écoulements souterrains, sert de limite entre ces deux unités karstiques. La source des Fontanilles est déjà captée au niveau de l'émergence et exploitée à un débit de 150 m³/j en été et pour 80 m³/j en hiver pour l'alimentation en eau potable de la commune de Puéchabon.

4. Présentation des études menées par le BRGM

4.1. Programme de travail

Le programme d'actions adopté pour l'étude des systèmes karstiques nord-montpelliérains, sources des Fontanilles et des Cent Fonts, a été formalisé par trois conventions passées entre le Conseil Général de l'Hérault et le BRGM :

1996, convention n°96/c229 du 3 Janvier 1997,

1997, convention n°97/c0640 du 9 Juillet 1997,

1998, convention n°98/c764 du 8 octobre 1998.

Le contenu du programme d'actions pour chaque source est le suivant : (1) Etude préliminaire de la géométrie du réservoir ; (2) Equipements ; (3) Récupération des données et jaugeages ; (4) Traçages ; (5) Hydrochimie ; (6) Synthèse générale.

Les études se sont déroulées au cours des années 1996 à 1999. Le chronogramme est représenté dans le tableau n°1. Les résultats ont fait l'objet de deux rapports d'étape en 1996 et 1997 qui portaient essentiellement sur l'avancement des études et le cadre géologique.

L'ensemble des résultats et des interprétations font l'objet de quatre rapports et de la présente synthèse qui constituent le rapport final stipulé par la convention de 1997 mais qui intègre également les suivis réalisés en 1998.

4.2. Structure du rapport

Le rapport a été divisé en 4 volumes, auxquels s'ajoute le présent document de synthèse.

« Document de synthèse »

Ce document présente le contexte général de l'étude, en rappelant les objectifs et la démarche retenue. Il fait par ailleurs la synthèse des 4 autres volumes du rapport. Ce document contient en outre une bibliographie portant sur l'ensemble du rapport.

Volume I

« Contexte géologique et hydrogéologique »

Le volume I de ce rapport définit le contexte géologique et hydrogéologique du système des Cent Fonts, puis du système des Fontanilles. Il passe en revue les connaissances disponibles sur les secteurs étudiés, dans les domaines suivants : géographique, géologique, structural, hydrogéologique et géomorphologique. La synthèse de ces connaissances est effectuée et des hypothèses sur la géométrie des aquifères karstiques concernés sont formulées.

Par ailleurs, les résultats des recherches effectuées dans le cadre de l'analyse micro-structurale sont présentés et discutés.

Volume II : « Moyens mis en œuvre »

Ce deuxième volume décrit les moyens qui ont été mis en œuvre dans le cadre de cette étude. Ces moyens sont l'équipement des sites en vue de la réalisation de mesures sur les écoulements et sur la qualité de l'eau des exutoires (capteurs et centrales d'acquisition des données), ainsi que la réalisation de visites de contrôle, de jaugeages, de traçages artificiels et de prélèvements pour l'analyse hydrochimique (précipitations et sources). Les protocoles expérimentaux de ces différentes actions sont détaillés dans ce volume.

Volume III

« Interprétation des données hydrologiques »

Le volume III présente les résultats obtenus pour les données hydrologiques, ainsi que l'analyse qui en a été faite, à l'aide de différentes méthodes d'interprétation. Les principes de ces méthodes sont tout d'abord rappelés. Les données acquises, issues des traçages artificiels, et des enregistrements aux exutoires (débit, conductivité électrique et température), sont présentées. Enfin, l'analyse des hydrogrammes par les méthodes de bilan hydrique, de débits classés, d'analyse des récessions et d'analyses corrélatoire et spectrale y est effectuée. Grâce à ces analyses, les deux systèmes aquifères

karstiques sont classifiés et comparés entre eux et avec des systèmes karstiques étudiés et bien caractérisés par ailleurs en France.

Volume IV « **Interprétation des données hydrochimiques** »

Le dernier volume présente l'ensemble de la démarche hydrochimique menée sur les sites. Dans un premier temps, on rappelle quelques notions sur les différents traceurs utilisés et leur signification dans le contexte des systèmes kars-

tiques nord-montpelliérains. Dans une seconde partie, on présente l'ensemble des résultats obtenus pour les données hydrochimiques, ainsi que l'analyse qui en a été faite, en particulier à partir d'une comparaison avec les analyses chimiques des pluies, menées par le BRGM en parallèle à cette étude sur un secteur comprenant les sites d'étude. Enfin, à l'aide de différentes méthodes d'interprétation, on analyse la signification des variations en terme de fonctionnement hydrologique des systèmes karstiques.

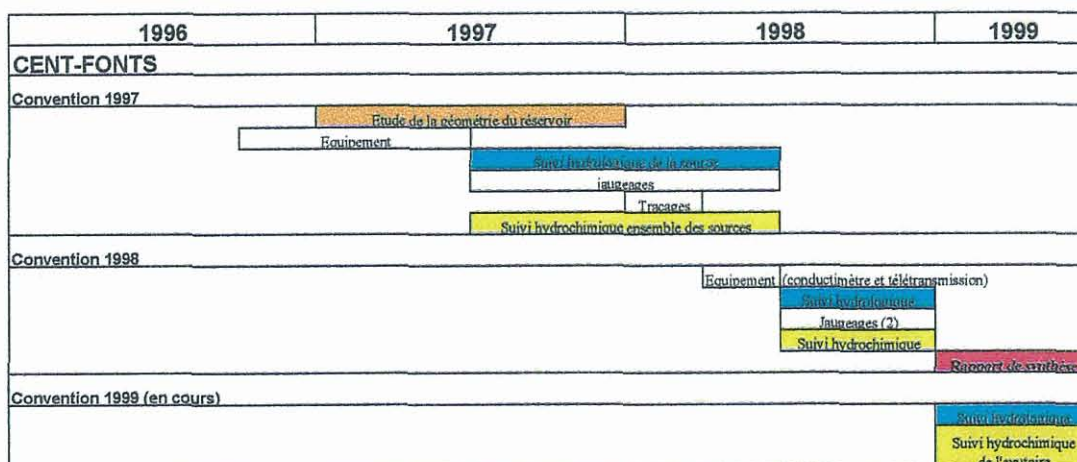
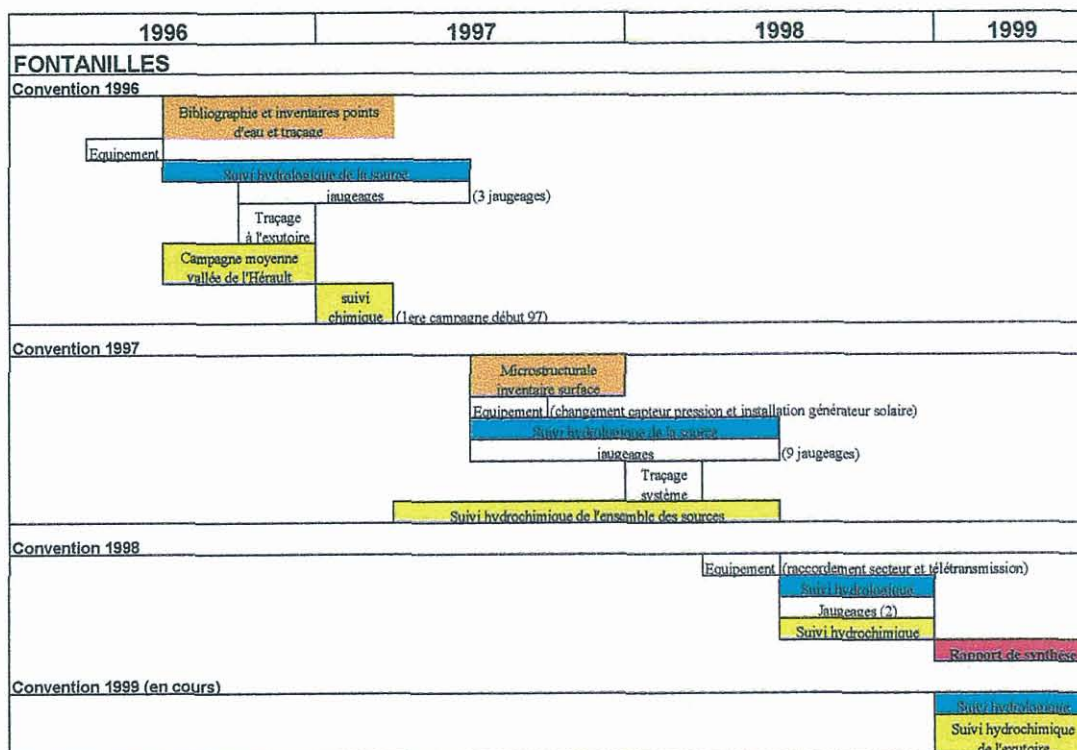


Tableau 1 : Chronogramme des opérations

5. Synthèse des études réalisées : fonctionnement des systèmes karstiques

5.1 Caractéristiques générales des garrigues nord-montpelliéraines

Les systèmes karstiques des Fontanilles et des Cent-Fonts s'insèrent dans la région des garrigues nord-montpelliéraines, composée des massifs calcaires situés entre Montpellier et les Cévennes. Cette région de collines et de bas plateaux est drainée par le fleuve Hérault et ses affluents, notamment le Lamalou et la Buèges.

5.1.1. Histoire géologique et constitution des séries

On peut reconstituer l'histoire géologique de la région étudiée de la manière suivante :

Durant le **Jurassique** se déposent les puissantes séries calcaires dans des environnements de mer peu profonde et chaude. Au **Crétacé** dans certains secteurs comme le bassin de St-Martin-de-Londres, les séries sont marquées par la destruction des premiers reliefs issus des mouvements tectoniques qui amorcent la surrection pyrénéenne. L'érosion et les dépôts qui s'en suivent comblent les dépressions formées.

La **surrection de la chaîne pyrénéenne** au début du tertiaire (Eocène, 35 à 50 Ma), crée dans la partie la plus au nord de grands plis et des mouvements cassants le long de grandes structures faillées comme celle des Cévennes qui limite la bordure du massif central et la faille de Corconne. Plus au sud, la compression va jusqu'à créer des structures extrêmement relevées, voire chevauchantes dont la plus marquée est celle du Pic St Loup.

A l'**Oligocène** (30 Ma), la surface de ces massifs exondés est arasée, ce qui conditionne partiellement les surfaces encore observées aujourd'hui. Durant cette époque, l'ensemble des massifs est drainé vers le sud.

Enfin au **Quaternaire ancien**, la région subit une nouvelle phase de surrection qui conduit au développement des profondes entailles des gorges du Lamalou et de l'Hérault ainsi que des vallées sèches qui s'y raccordent.

Les caractéristiques stratigraphiques des formations géologiques constituant les garrigues nord-montpelliéraines mettent en évidence **deux formations carbonatées majeures** du Jurassique supérieur et moyen. Ce sont les formations dans lesquelles se développent les systèmes des Fontanilles et des Cent-Fonts. La source du Lamalou draine, elle, les marno-calcaires de la base du Crétacé.

Sur la région étudiée, la puissance des séries du Jurassique moyen et supérieur est d'environ 600 à 700 m. Elle est constituée d'une puissante base de calcaires dolomitiques (*Bajocien-Bathonien*) séparée des calcaires sommitaux (*Kimméridgien à Portlandien*) par des niveaux calcaro-marneux peu épais (environ 50 m) (*Callovien-Oxfordien*).

5.1.2. Structure géologique

Sur le plan de la structure géologique, l'ensemble de la région des garrigues nord-montpelliéraines s'inscrit dans le couloir structural compris entre la faille des Cévennes et la faille de Corconne. Ce domaine tectonique est caractérisé par une couverture sédimentaire épaisse (entre 2000 et 4000 m), affectée par des accidents verticaux et, localement, par des faisceaux de plis Est-Ouest séparant des structures sub-tabulaires. L'essentiel des déformations de cette région est attribuée à la surrection pyrénéenne. La distension oligocène qui a suivi cette phase compressive s'est manifestée par la mise en place ou la réactivation de deux types de failles principales, ayant une importance pluri-kilométrique :

- une série d'accidents verticaux (N030°, N070°), représentés notamment par le faisceau de failles de l'Hérault et les accidents

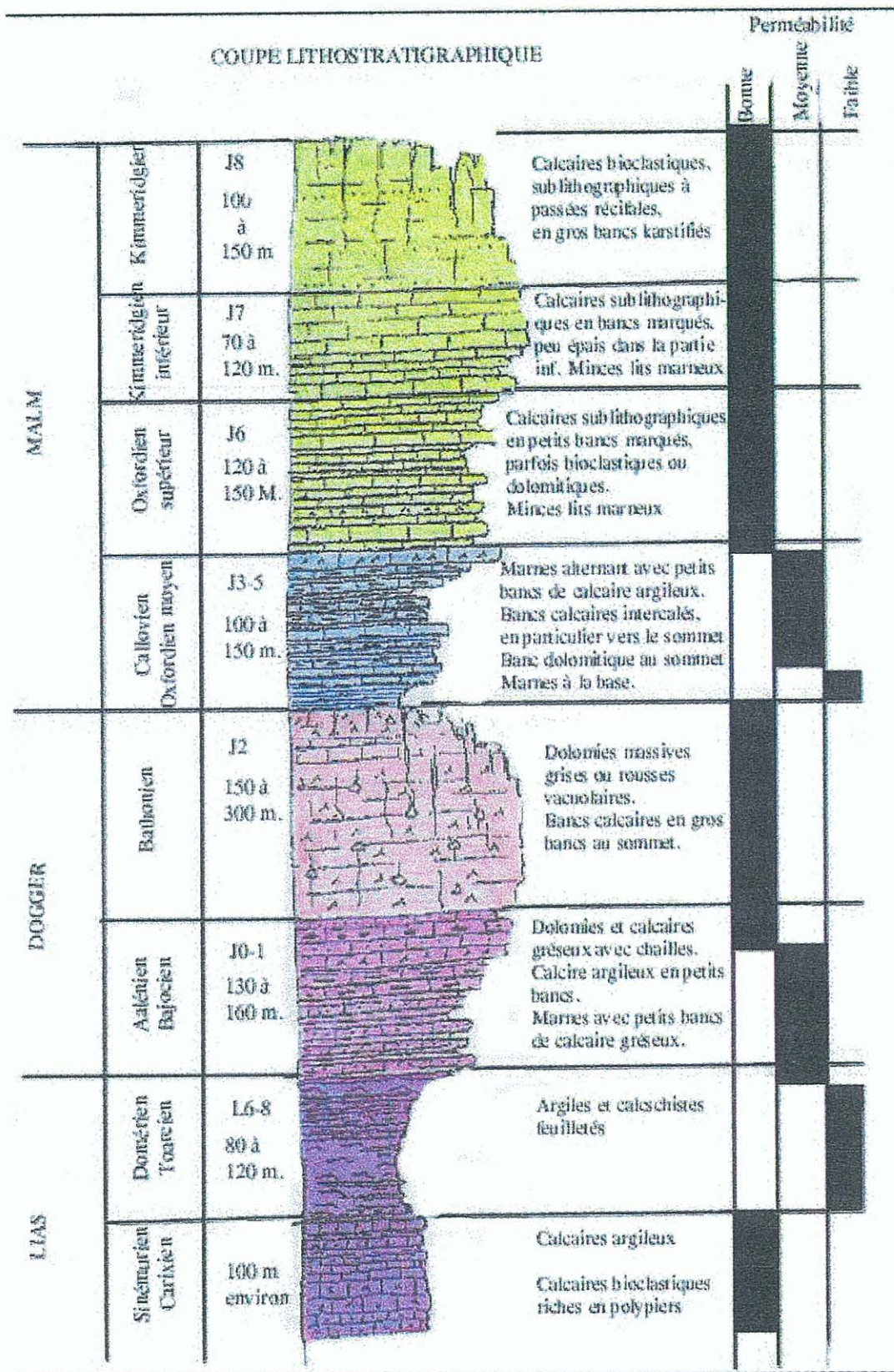


Figure 4 : Log stratigraphique

conjugués, nombreux sur le versant gauche des gorges de l'Hérault. Ces accidents ont compartimenté en mailles serrées les structures géologiques.

- une deuxième famille de failles orientées globalement E-W à NW-SE, inclinées vers le SSE et représentées par l'accident de Viols-le-Fort - Pic Saint Loup. Ces accidents délimitent le Sud du bassin de St-Martin-de-Londres.

La déformation essentiellement cassante des garrigues nord-montpelliéraines, liée à l'orogénèse pyrénéenne s'accompagne tout de même par la mise en place de quelques plis à grand rayon de courbure fréquemment déversés vers le Nord. Cette tectonique souple se traduit essentiellement par deux structures majeures :

- l'anticlinal déversé de Viols-le-Fort et du Pic St Loup, accident régional majeur, provoquant la remontée du Lias à l'Ouest de Viols-le-Fort,

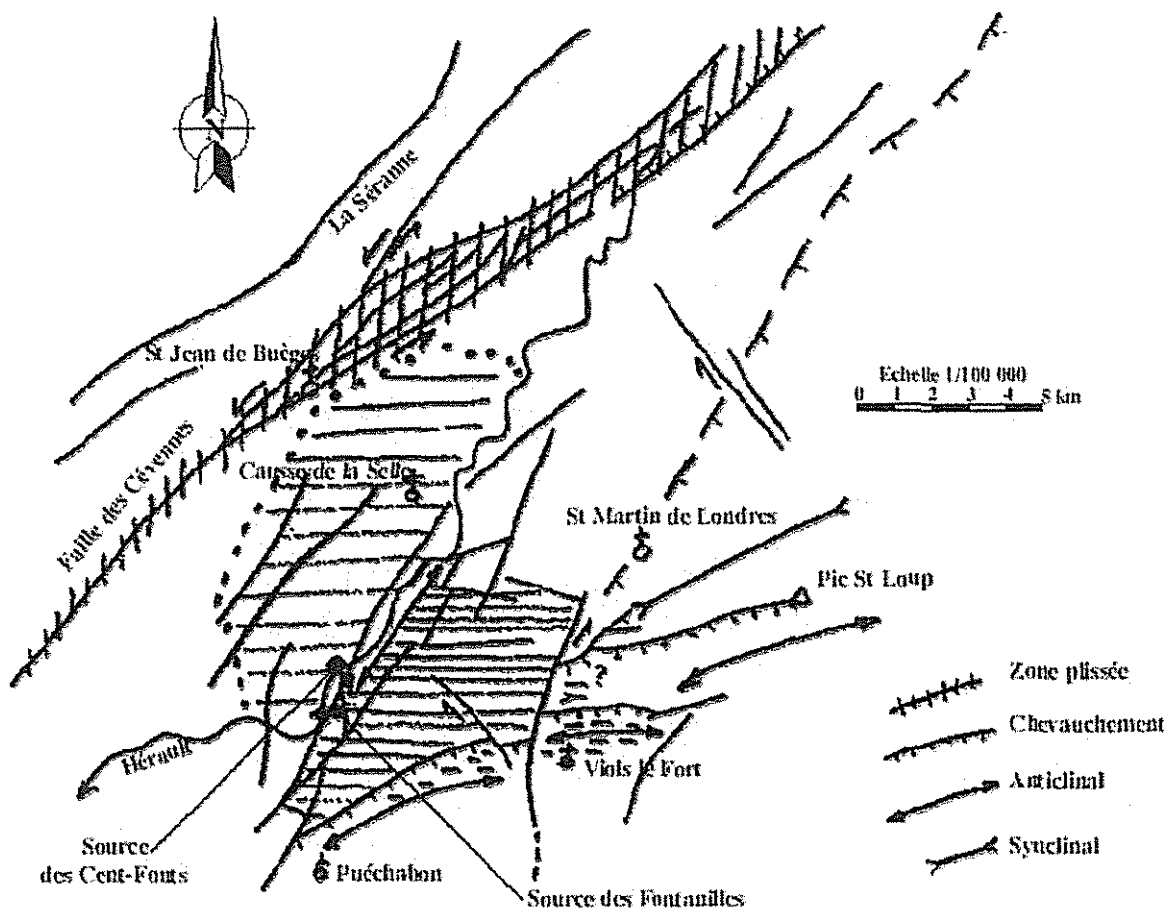


Figure 5 : Schéma structural régional

Les grandes masses relativement tabulaires des séries sédimentaires du secondaire, épaisses de plusieurs milliers de mètres sont structurées par deux éléments principaux : les faisceaux de failles NE-SW (faille des Cévennes, failles de l'Hérault et faille de Corconne) et la grande structure très redressée et chevauchante du Pic St Loup-anticlinal de Viols-le-Fort. Parallèlement au fleuve, on distingue également une voûture qui met à l'affleurement les calcaire dolomitiques du Jurassique moyen, où émergent les principales sources.

- l'anticlinal faillé de l'Hérault, parallèle aux gorges, qui impose l'affleurement des dolomies du Bathonien (Dogger) tout au long de la partie supérieure des gorges et génère le panneau monoclinale de la Montagne de la Sellette.

Ce sont ces structures principales qui, d'une part contraignent les limites des secteurs étudiés et d'autre part, imposent aux hydrosystèmes les structures conditionnant les écoulements comme on le verra plus loin.

5.1.3. Hydrogéologie

Sur le plan hydrogéologique, les formations carbonatées peuvent être subdivisées en 4 grands ensembles.

Ces ensembles sont potentiellement aquifères isolés imparfaitement les uns des autres par des niveaux marneux plus ou moins imperméables.

Cette distribution est résumée dans le tableau 2 :

important en raison de leur puissance (jusqu'à 200 mètres d'épaisseur), potentiellement aquifère. Plusieurs sources pérennes à ort débit émergent dans les gorges de l'Hérault à leur niveau.

Les niveaux marneux et marno-calcaires du *Jurassique* (*Callovien* et *Oxfordien inférieur* et *moyen*) jouent un rôle hydrogéologique peu connu et vraisemblablement complexe. En effet, ces formations peuvent localement constituer un niveau imperméable sous les formations carbonatées du *Jurassique supérieur* ; mais une cavité recensée dans ces formations, l'abondance des failles et l'absence d'émergences à la base du *Jurassique supérieur* laissent présager qu'elles ne jouent pas un rôle d'écran imperméable régional.

Le *Jurassique supérieur* (*Kimméridgien-Portlandien* et *Berriasien inférieur*) constitue le second aquifère potentiel important des formations. De par sa nature karstifiable, sa grande épaisseur et sa large zone d'affleurement. C'est un lieu privilégié pour les écoulements souterrains,

	Formations peu perméables ou imperméables	Formations carbonatées perméables (potentiellement aquifères)
<i>Tertiaire</i>	Paléocène : argiles	
<i>Crétacé inf.</i>		Valanginien sup. calcaires marins (Hortus)
(<i>Néocomien</i>)	Berriasien sup.-Valangien inf. : marnes et marno-calcaires	
<i>Jurassique</i>		Kimméridgien-Portlandien-Berriasien inf. calcaires marins
	Callovien-Oxfordien marnes et marno-calcaires	
		Bajocien-Bathonien Calcaires dolomitiques
	Toarcien : argiles	

Tableau 2 : Distribution des formations aquifères

Les formations *jurassiques* du *Toarcien* et du *Bajocien*, invisibles à l'affleurement dans la région étudiée, forment le **substratum imperméable**.

Les dolomies du *Jurassique moyen* (*Bajocien-Bathonien*) constituent un **ensemble basal**

attesté par de nombreuses cavités et phénomènes karstiques de surface (Montagne de la Sellette ou Puech Coubiou).

Les niveaux du *Crétacé inférieur* (*Berriasien supérieur* et *Valanginien inférieur*) à faciès marneux ou marno-calcaires, contiennent parfois

de petits aquifères isolés et sans importance régionale, mais peuvent globalement être considérées comme imperméables. Seule la dalle calcaire sommitale (*Valanginien*), qui constitue le Causse de l'Hortus, représente un aquifère karstique notable.

5.2. Système karstique des Fontanilles

5.2.1. Structure générale de l'aquifère

La région étudiée est limitée au Nord par le Lamalou, à l'Ouest par l'Hérault, à l'Est par le bassin de St-Martin-de-Londres et le causse de l'Hortus, et au Sud par les structures du Pic St Loup et de l'anticlinal de Viols-le-Fort. La région ainsi définie forme un triangle d'une vingtaine de kilomètres de long et d'une largeur maximale de 10 km de côté englobant plusieurs massifs ou parties de massifs calcaires (la Montagne de la Sellette et le Nord du Causse de Viols-le-Fort).

La morphologie générale, constituée par des plateaux peu accidentés, est fortement entaillée à l'Ouest par les gorges de l'Hérault et au Nord par celles du Lamalou. Les plateaux sont les témoins d'anciennes surfaces d'érosion Oligocène, étagées entre 200 et 500 m et pour partie (sud de la Montagne de la Sellette) morcelées par de nombreuses vallées sèches délimitant de petites unités aux sommets arrondis.

Différentes formes d'érosion karstique sont inventoriées sur le système des Fontanilles. Des reliefs ruiniformes et chaotiques, sur la rive gauche des gorges de l'Hérault ; des dolines et des dépressions, concentrées à l'Est du système karstique, entre Viols-le-Fort et St-Martin-de-Londres ; de grandes dépressions fermées comblées par des produits d'altération sur la bordure sud du système entre Viols-le-Fort et Puechabon ; des lapiaz, uniquement dans les formations calcaires du Jurassique supérieur ; et des thalwegs et vallons secs, favorisant la concentration des eaux de surface et leur infiltration, débouchant soit vers la vallée de l'Hérault, soit dans des dépressions de la zone sud.

Phénomènes karstiques

Un inventaire des cavités souterraines de l'ensemble du massif de la Sellette dans lequel s'inscrit le système karstique des Fontanilles a inventorié 628 phénomènes karstiques dont un nombre important de cavités et de réseaux souterrains. Cette abondance est liée à la nature fortement karstifiée des calcaires jurassiques constituant la surface de ce massif. Les cavités du massif de la Sellette sont en général peu importantes, tant par leur dénivelé que par leur développement. Seuls quatre avens dépassent cent mètres de profondeur, et trois cavités dépassent 1000 m de développement. La densité d'avens profonds de plus de 50 m est importante (23 avens pour 18 km² de superficie). Cette densité forte va dans le sens d'une infiltration rapide des précipitations.

24 sources temporaires et 2 sources pérennes ont été inventoriées. Elles sont localisées en rive gauche du Lamalou (1 source pérenne et 9 sources temporaires), en rive gauche de l'Hérault (la source des Fontanilles et 9 sources temporaires) et en bordure du bassin de St-Martin-de-Londres (6 sources temporaires).

Deux de ces pertes ont fait l'objet de traçages positifs vers la source des Fontanilles : l'aven-grotte du Trou qui Fume situé à 1700 m à l'Est des Fontanilles, et l'aven Vidal situé à 9000 m à l'Est des Fontanilles.

L'analyse microstructurale qui permet de définir les plans de drainage montre que la direction d'ouverture la plus probable (N105) pour le système karstique des Fontanilles est à peu près perpendiculaire à la direction de compression régionale. Cette direction est perpendiculaire à l'axe de la vallée de l'Hérault. Dans ce cas précis, la direction générale du gradient hydraulique et celle de l'ouverture des fractures sont à peu près colinéaires. Par conséquent, le réseau de drainage du système karstique des Fontanilles est très probablement développé selon cette direction générale SE-NW, en donnant naissance à un réseau plutôt linéaire et peu développé sous le niveau de l'exutoire.

5.2.2. Fonctionnement hydrologique de l'aquifère

Traçages

Traçage réalisé à l'exutoire : évolution du niveau de base

Un traçage a été réalisé à l'exutoire de la source des Fontanilles, l'injection ayant été effectuée dans la grotte, à 200 m environ en amont de la source.

Les caractéristiques de ce traçage exutoire, vitesse faible (49 m/h) et courbe étalée et complexe avec taux de dilution élevé, dénotent que l'écoulement de l'eau entre le point d'injection et les émergences se produit dans un milieu qui n'est pas un conduit karstique unique et bien développé. Cela signifie que le drainage karstique est mal organisé ou peu fonctionnel. Ce fonctionnement peu karstique de l'exutoire est confirmé par une sortie de l'eau répartie entre plusieurs griffons dont un très en aval ; et par un trop plein, la grotte, clairement positionnée sur un drainage bien développé mais nettement supérieur.

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

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

Lors des conditions de réalisation du traçage, le débit de la source était de 50 l/s.

Traçage du système : caractérisation des limites du système

Les limites Est et Nord du système des Fontanilles ne correspondent pas à des limites géologiques facilement identifiables. L'étude géologique et hydrogéologique, et les résultats du traçage réalisé dans le cadre de cette étude permettent de préciser la délimitation du bassin d'alimentation de la source des Fontanilles.

Le traceur injecté à la perte du Mas de Bouisse (aven Valette) n'est pas ressorti à la source des Fontanilles, mais à la source de la Combe de Rastel ($V_{max} = 13$ m/h). Cette perte ne participe donc pas à l'alimentation de la source des Fontanilles. Ce traçage paraît s'inscrire dans un schéma général d'écoulements souterrains grossièrement orientés E-W, en direction de la vallée de l'Hérault, comme le sont ceux de la perte de St-Martin de Londres vers la source des Châtaigniers et de l'aven Vidal vers les Fontanilles. La limite nord passerait donc approximativement entre le sommet de l'Ouradou et la montagne de Labau et serait orientée E-W. Le système karstique des Fontanilles présente donc une forme trapézoïdale d'environ 8 km de long et 3 km au maximum de largeur en bordure de l'Hérault, pour une superficie d'environ 18 km².

Bilan hydrique et surface d'alimentation

Le volume écoulé à l'exutoire au cours de la période allant du 01/10/97 au 31/12/98 est estimé à 11.9 millions de m³. La lame d'eau précipitée à la station de St Martin est de 1417 mm. Sur cette période, le total des pluies efficaces calculé à l'aide des données d'évapotranspiration réelle de la station Météo de Fréjorgues est estimé à 811 mm, tandis que le déficit d'écoulement calculé est de 634 mm, ce qui représente une lame d'eau infiltrée de 732 mm. Selon ces données, la superficie du bassin d'alimentation calculée par deux méthodes serait respectivement de 14,6 km² et 16,2 km². Ces valeurs sont entachées d'une grande incertitude (+/- 5 km²) en raison de l'imprécision des calculs (lame d'eau infiltrée, relation hauteur d'eau / débit de la source) et de la présence de lacunes dans la chronique des débits.

Analyse des débits classés

Cette méthode permet de caractériser les différents régimes d'écoulement observables à l'exutoire d'un système.

Seules les données enregistrées au cours du cycle hydrologique 1997-1998 ont été utilisées pour l'analyse des débits classés de la source des Fontanilles. Pour les faibles débits (0 à 1 m³/s) on observe en basses eaux une première rupture de pente à 120 l/s, peu marquée. Ce type de rupture correspond généralement à la reconstitution des réserves capacitives de l'aquifère lors de la décrue. Dans le cas présent, elle est peu marquée et donc peu significative. Pour les débits plus élevés on observe la présence de plusieurs ruptures de pentes successives (0.87 m³/s et 2.2 m³/s). Ces ruptures avec diminution de la vitesse de croissance des débits correspondent à la mise en fonction de trop-pleins dont les écoulements ne sont pas pris en compte à la station de jaugeage.

Analyse des courbes de récession

Ce type d'analyse consiste à étudier la partie décroissante de l'hydrogramme de crue d'une source, appelée récession, à partir d'un modèle mathématique de type boîte grise qui assimile le système karstique à des réservoirs se vidangeant l'un dans l'autre. L'ajustement des paramètres de la loi mathématique qui décrit la récession permet de caractériser le fonctionnement de la zone d'infiltration et permet également d'estimer le volume d'eau contenu dans la zone noyée, responsable de la décroissance des débits observés.

Cette méthode permet donc d'apprécier la présence d'une zone noyée et l'importance des réserves qu'elle contient.

L'analyse a porté sur les récessions des cycles 1996/1997 et 1997/1998. Les principaux résultats sont récapitulés dans le tableau 3.

	1997	1998
Coef. de tarissement α	0.0147	0.0243
Vitesse d'infiltration η	0.0147	0.0435
Hétérogénéité d'infiltration ϵ	0.965	1.65
Durée de l'infiltration T_i (j)	68	23
Volume dynamique V_d (Mm ³)	0.42	0.17

Tableau 3 : paramètres de la récession aux Fontanilles

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

La superficie du bassin d'alimentation du système des Fontanilles est de l'ordre de 15 km².

Les résultats indiquent d'une part que la vitesse d'infiltration de l'eau pour le système des Fontanilles est rapide et que l'hétérogénéité de l'écoulement est importante.

L'ensemble de ces éléments caractérise un système bien drainé et possédant une zone noyée peu importante.

Les coefficients de tarissement sont faibles ce qui indique que le système possède une zone noyée peu importante.

Les valeurs du volume dynamique sont variables d'un cycle à l'autre, ce qui indique que l'état des réserves est fortement dépendantes des variations interannuelles des hauteurs de pluie.

Analyse corrélatrice et spectrale

Les analyses corrélatrice et spectrale permettent de caractériser la réponse impulsionnelle d'un système, c'est à dire de caractériser l'action des pluies sur les débits.

Analyse simple des chroniques de débit

Le système des Fontanilles présente une fréquence de coupure moyennement haute (0.16 j⁻¹) ce qui indique que les événements

pluvieux de courte durée (< 3 jours) n'ont pas une influence significative sur les débits à l'exutoire. L'influence d'un événement pluvieux donné sur le débit à l'exutoire se fait sentir pendant 32 jours (effet mémoire), ce qui indique que le système possède une inertie importante. Le temps de régulation du système est d'environ 31 jours.

Analyse croisée pluie - débit

La réponse aux événements pluvieux est de deux types : tout d'abord une réponse rapide et marquée sur une période de 2-3 jours puis une réponse amortie et plus lente qui s'étale sur 30-40 jours environ. Le déphasage entre l'entrée (pluie) et la sortie (débit) pour la fréquence de coupure de (0.16 j⁻¹) est de 1.2 jours.

La fonction de cohérence présente des valeurs moyennes élevées (de l'ordre de 0.8-0.9), relativement stables pour les fréquences inférieures à la fréquence de coupure (fc = 0.16 j⁻¹) ce qui indique (1) que le système est bien drainé ; (2) que le système réagit globalement de la même façon à chaque impulsion de pluie. La fonction de gain montre une forte amplification

(>1) pour les très basses fréquences ($f < 0.025 \text{ j}^{-1}$) et une atténuation significative (0.3 - 0.4) à moyen terme (fréquence comprise entre 0.1 et la fréquence de coupure $f_c = 0.16 \text{ j}^{-1}$) ce qui indique (1) que la variabilité intra-annuelle des précipitations est amplifiée par le système en période d'étiage et en période de crue, (2) que les événements de courte durée influent peu sur les débits du système.

5.2.3. Caractérisation hydrochimique du fonctionnement de l'hydrosystème

Outre les sources des Fontanilles et des Cent Fonts, le suivi chimique a également porté sur les autres sources des systèmes karstiques étudiés. Toutefois, dans la synthèse, on présentera uniquement les résultats relatifs à aux deux sources principales. Pour plus de précisions, on se reportera au volume IV.

Evolution chimique durant l'étiage

Les espèces chimiques qui n'interagissent pas avec le milieu carbonaté (chlorures et isotopes de l'eau) gardent la trace de leur signature d'origine. Cette signature est suffisamment typée et permet

La géochimie appliquée aux transferts

La géochimie est née au début du siècle. Elle s'est tout d'abord intéressée à ce qui fait son nom : la chimie de la Terre et de ses matériaux. Très vite il est apparu que l'eau est un agent de la dissolution et que c'est elle qui régit les équilibres à la surface de la Terre. Ainsi est née l'hydrogéochimie ou hydrochimie.

L'eau est une substance qu'on qualifierait presque de vivante, de par sa mobilité, sa capacité à échanger et du fait qu'elle est à la base de toute forme de vie. Dans le milieu naturel, elle subit le poids de la gravité et elle circule au sein des milieux rocheux pour se frayer un chemin vers le point d'exutoire. Ce faisant, l'eau interagit avec les minéraux des roches à travers une série d'équilibres chimiques qui la poussent soit à les dissoudre, soit au contraire à précipiter de nouveaux minéraux à partir de ses éléments dissous.

Dans le milieu karstique, cette double nature est particulièrement bien exprimée, puisque c'est l'eau elle-même qui creuse son chemin jusqu'à l'exutoire grâce à sa capacité à dissoudre le milieu carbonaté au sein duquel elle s'est infiltrée en se chargeant de CO₂ dans l'atmosphère et dans le sol (CO₂ d'origine biogénique). Elle agrandit, développe, toutes les fissures et les défauts de la cuirasse calcaire, dans le sens qui lui est favorable. Elle développe son réseau d'écoulement dont parfois une partie devient fossile et visitable et s'orne alors des merveilleux produits (stalagmites, stalactites) qu'elle a précipité en s'infiltrant lentement à travers le massif calcaire.

Le contenu en éléments dissous, obtenu par l'analyse chimique, est la base de l'hydrochimie. En effet, c'est à partir de la composition chimique que l'on va chercher à retracer l'histoire de l'eau. Cette composition chimique constitue une signature d'un environnement naturel.

de montrer que l'essentiel de la reconstitution des réserves des aquifères se produit lors des épisodes de crue d'automne, et notamment lors de l'épisode de crue majeure de décembre 1997 - janvier 1998. En terme de fonctionnement, les informations apportées par ces traceurs 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 (zone capacitive) ; la reconstitution des réserves assurée par l'infiltration lente à travers la zone d'infiltration étant faible, voire négligeable.

Les autres espèces, telles le sodium, la silice ou les sulfates, sont au contraire les témoins de l'évolution de l'eau au cours de son transfert dans le milieu. Ces espèces sont apportées en partie par le système lui même et permettent de caractériser les interactions lentes entre l'eau et la matrice minérale, en particulier avec les minéraux argileux des inter-bancs et des remplissages mais surtout, aux Fontanilles, avec les niveaux du Callovo-Oxfordien. Ces espèces permettent de montrer que l'eau des sources a séjourné plus ou moins longtemps dans le système (de quelques semaines à quelques mois) avant de sortir à l'exutoire.

L'eau de la zone noyée est donc caractérisée par des eaux infiltrées au cours des épisodes pluvieux d'automne et présente des marques d'interactions importantes avec la matrice argileuse et silicaté, ce qui implique des temps de séjour longs.

Les espèces du système carbonaté reflètent elles aussi les temps d'interaction prolongée des eaux avec les roches. En fin d'étiage, les eaux sont caractérisées par un équilibre prononcé avec les minéraux carbonatés, y compris les minéraux dolomitiques. On observe peu ou pas de dégazage, ni de venue de CO₂ profond. L'évolution des teneurs en magnésium permet de caractériser la plus ou moins grande extension de la zone noyée au sein de l'aquifère des formations dolomitiques du Jurassique moyen. Ce sont ces formations qui constituent la zone noyée dans le cas des Fontanilles.

Enfin, on montre que les nitrates sont présents en quantité plus importante aux Fontanilles (2.3 - 3.1 mg/l) par rapport aux autres sources du secteur (0.6 - 1.2 mg/l) mais ils restent néanmoins globalement inférieurs à la quantité

d'eau dans les karsts

Par exemple, le séjour dans un milieu calcaire chargera l'eau en calcium et en bicarbonates, produits de la dissolution de la calcite. Dans le sol, elle entraînera dans son trajet une partie du CO₂ produit par l'activité biologique. Ainsi on peut retrouver à travers la composition chimique d'une eau les environnements dans lesquels elle a séjourné.

L'application à l'hydrologie consiste à individualiser les signatures des différents réservoirs dans lesquels l'eau est contenue. Si l'on peut ainsi les distinguer, on pourra reconnaître à l'exutoire l'origine des eaux qui émergent, même si elles se mélangent entre elles. On peut dire qu'une partie de l'application de l'hydrochimie consiste à faire un traçage naturel des différents milieux. Tout comme on utilise des colorations à partir de produits artificiels, les différentes matrices rocheuses « colorent » les eaux qu'elle contiennent et l'on peut interpréter les indications obtenues.

De plus, ces traçages naturels donnent des indications sur les temps de résidence de l'eau et sur

l'influence plus ou moins grande des niveaux de production. Ces éléments sont particulièrement importants en terme de définition de la vulnérabilité des aquifères étudiés.

L'hydrochimie isotopique

On utilise beaucoup de nos jours les analyses isotopiques. Les atomes d'un même élément chimique (caractérisé par ses charges électriques) peuvent posséder un nombre différent de neutrons dans leur noyau et donc présenter une masse différente. On les appelle des isotopes de l'élément chimique. Ceci n'entraîne pas de modification majeure des réactions chimiques, mais de très faibles variations lors de processus physiques, comme l'évaporation, ou simplement, du fait de l'origine et de l'histoire différentes des formations géologiques, se marqueront par des signatures différentes.

On utilise leur analyse pour caractériser soit les processus (hydrogène, oxygène de l'eau) ou des roches (strontium). Ce sont des outils extrêmement performants pour l'analyse hydrochimique.

totale d'azote apporté par les précipitations (2.5 – 6.8 mg/l) et les éventuels apports anthropiques (non quantifiés), ce qui traduit la capacité du système à absorber les flux actuels.

Evolution au cours des crues

Un des traits extrêmement marqué des sources des systèmes des garrigues nord-montpelliéraines est le changement abrupte de signature chimique observé lors des crues. Pour les éléments comme les chlorures et les éléments fournis par l'interaction longue avec la roche, on observe une chute brutale des teneurs lors de la montée de crue. On qualifie ce phénomène d'effet de dilution, résultat d'un mélange entre les eaux de la zone noyée et des eaux d'infiltration rapide peu minéralisées. Le facteur dilution peut atteindre des valeurs de 30 % (cas de la première crue de novembre 1997). Ce phénomène se produit dans les drains majeurs des réseaux karstiques. Cette évolution, confirmée par les isotopes du carbone, montre que l'on est en présence d'eaux à faible temps de séjour. On montre par ailleurs à l'aide des isotopes stables de l'eau (^2H , ^{18}O), que l'eau qui émerge à l'exutoire au cours d'une crue donnée n'est pas issue de l'événement pluvieux qui a provoqué ladite crue. Ce phénomène est clairement visible, lors d'une succession d'épisodes pluvieux. En effet, lors de deux crues successives, on montre que la seconde crue est générée par l'eau de pluie précipitée lors du premier épisode pluvieux. Certains éléments montrent également, que cette ancienne eau de pluie qui contribue à l'écoulement de crue est marquée chimiquement par le processus d'évapotranspiration qui s'est produit dans un réservoir de type épikarstique, proche du sol.

On démontre ainsi que lorsqu'un événement pluvieux survient, il provoque une forte diminution de la production d'eau de la zone noyée qui est remplacée par de l'eau issue de la surface, caractérisée par un faible temps de résidence dans le système. L'eau qui contribue à la genèse de l'écoulement de crue ne vient pas directement de la pluie mais est issue d'un réservoir tampon situé près de la surface, interprété comme un réservoir épikarstique. L'eau drainée de ce

réservoir épikarstique, par des drains plus ou moins bien connectés avec la zone noyée, met en charge l'ensemble du réseau de conduit de la zone noyée. Le décalage entre la réponse hydrologique et la réponse hydrochimique est de l'ordre de 1 à 1.5 jour, ce qui indique que le système possède un réseau de conduits karstiques fonctionnels bien développés entre la surface et la zone noyée, et que cette zone noyée (ou du moins la partie traversée par l'eau de crue) représente un volume faible. L'approche géochimique corrobore donc les résultats de l'analyse hydrogéologique.

Evolution lors de la crue majeure de l'automne - hiver 1997/1998

Les variations hydrochimiques dessinent un schéma très cohérent avec les analyses hydrologiques. Elles confirment le comportement double des systèmes caractérisé (1) par un écoulement rapide au moment des crues, avec un temps de transfert de l'ordre d'une journée et demi ; (2) un écoulement plus lent à partir de la zone noyée. Elles permettent de montrer le rôle important joué par le réservoir épikarstique lors des crues. Les données géochimiques permettent également de montrer que le système possède des réseaux de conduits karstiques fonctionnels bien développés depuis la surface jusqu'à la zone noyée. La similitude de comportement entre la source des Fontanilles et les sources du secteur (Frouzet, Rastel) est également un argument qui confirme la relative homogénéité de l'infiltration sur la totalité du causse de la Cellette.

Un événement pluvieux particulièrement important (320 mm, station météo de St-Martin de Londres) a marqué la fin décembre 1997. Cet événement majeur a entraîné durant la décrue qui l'a suivi (courant janvier 98) une réponse chimique du système clairement identifiable et différente de celles observées précédemment.

L'eau qui s'écoule aux exutoires lors de cette crue est caractérisée par de très faibles rapports Na/Cl et des concentrations élevées en chlorure,

sulfate et silice et présente des rapports isotopiques en strontium élevés. Cette réponse est particulièrement visible sur le site des Fontanilles et au niveau des sources associées (Frouzet, Rastel). L'eau évacuée présente donc une signature de type épikarstique, à savoir marquée chimiquement par les processus liés à un temps de résidence de l'eau à proximité du sol (marquée par le phénomène d'évapotranspiration), mais de nature différente de celle qui s'est écoulée lors des crues précédentes dans la mesure où l'eau présente également des marques d'interactions importantes avec les minéraux silicatés et argileux (fortes teneurs en silice et sulfate, rapports isotopiques en strontium élevés).

L'absence de synchronisme entre la réponse géochimique, notamment du rapport Na/Cl, et le débit indique que la contribution maximale de l'eau issue de ce réservoir se produit lors de la décrue. Le décalage important entre la réponse géochimique et le débit (environ 20 jours) indique que ce réservoir est globalement mal

connecté à la zone noyée du système. La confrontation des résultats géochimiques avec les informations hydrogéologiques permet de suggérer pour le système des Fontanilles, que ce réservoir est localisé dans les zones du bassin d'alimentation où la barrière peu perméable des marno-calcaires du Callovien-Oxfordien est proche de la surface du sol.

Les évolutions géochimiques observées lors d'une crue de forte ampleur, générée par un épisode pluvieux de forte ampleur dans un contexte de hautes eaux, montrent qu'un réservoir de type épikarstique de nature différente de celui identifié lors des crues « normales » contribue de manière significative à l'écoulement de crue. Ce réservoir, mal connecté à la zone noyée du système, ne contribue de manière active que lors des épisodes de crue majeure, lorsque la charge dans le système est importante.

Synthèse

Les interprétations permettent de préciser l'origine de la reconstitution des réserves de la zone noyée qui se fait principalement lors des crues, à partir des réseaux de drains mis en charge, comme on l'a vu à partir de l'évolution des signatures chimiques et isotopiques.

Ce schéma correspond à une alimentation temporaire des systèmes annexes au drainage (bloc capacitif) par les drains du réseau karstique mis en charge lors des crues. En période de basses eaux ce sont les blocs capacitifs qui assurent l'écoulement dans les drains. La reconstitution des réserves de la zone noyée par percolation retardée à travers la zone d'infiltration du système est faible, voire négligeable. La reconstitution des réserves est limitée dans le temps aux événements d'automne. Lors du cycle 97/98, de nombreux arguments laissent penser que c'est l'événement majeur de fin décembre qui assure l'essentiel de la reconstitution des réserves.

Les teneurs en magnésium et leur évolution au cours des cycles hydrologiques montrent que la zone noyée est fortement étendue au sein des niveaux dolomitiques du Jurassique moyen.

Le rôle joué par le réservoir épikarstique lors de la genèse des crues est important, l'essentiel de l'écoulement de crue est assuré par l'eau jeune issue de ce réservoir, la contribution de l'eau de la zone noyée étant faible, de l'ordre de 30 %.

La zone épikarstique constitue pour le système un réservoir tampon. En effet, on montre que l'écoulement rapide n'est pas composé de l'eau de pluie qui génère la crue : la signature isotopique de l'eau des sources ne peut pas être expliquée comme le résultat d'un simple mélange entre l'eau initialement présente dans le système (eau de la zone noyée) et l'eau de pluie infiltrée. On montre, notamment lors des successions de crues, que la pluie d'un épisode « n » contribue à chasser par effet piston l'eau de pluie de l'épisode « n-1 » stockée dans le réservoir épikarstique. Ces résultats sont corroborés à l'aide des isotopes du carbone et du calcium qui indiquent d'une part que l'écoulement de crue est principalement composé d'une eau « jeune » ayant fortement dissous les formations calcaires et d'autre part, que la contribution en eau issue de la zone noyée est faible. Ces résultats permettent également de

suggérer que l'essentiel du calcium exporté lors des crues provient de la zone épikarstique.

L'analyse de certains éléments comme le sodium et les sulfates, ainsi que l'analyse isotopique du strontium, met en évidence le rôle des niveaux argileux dans les évolutions géochimiques des

eaux dans le système. Ce signal est particulièrement bien mis en évidence à la source des Fontanilles. Cette influence des niveaux argileux est à relier aux formations du Callovo-Oxfordien qui jouent un rôle déterminant dans la structure et le fonctionnement de la source des Fontanilles.

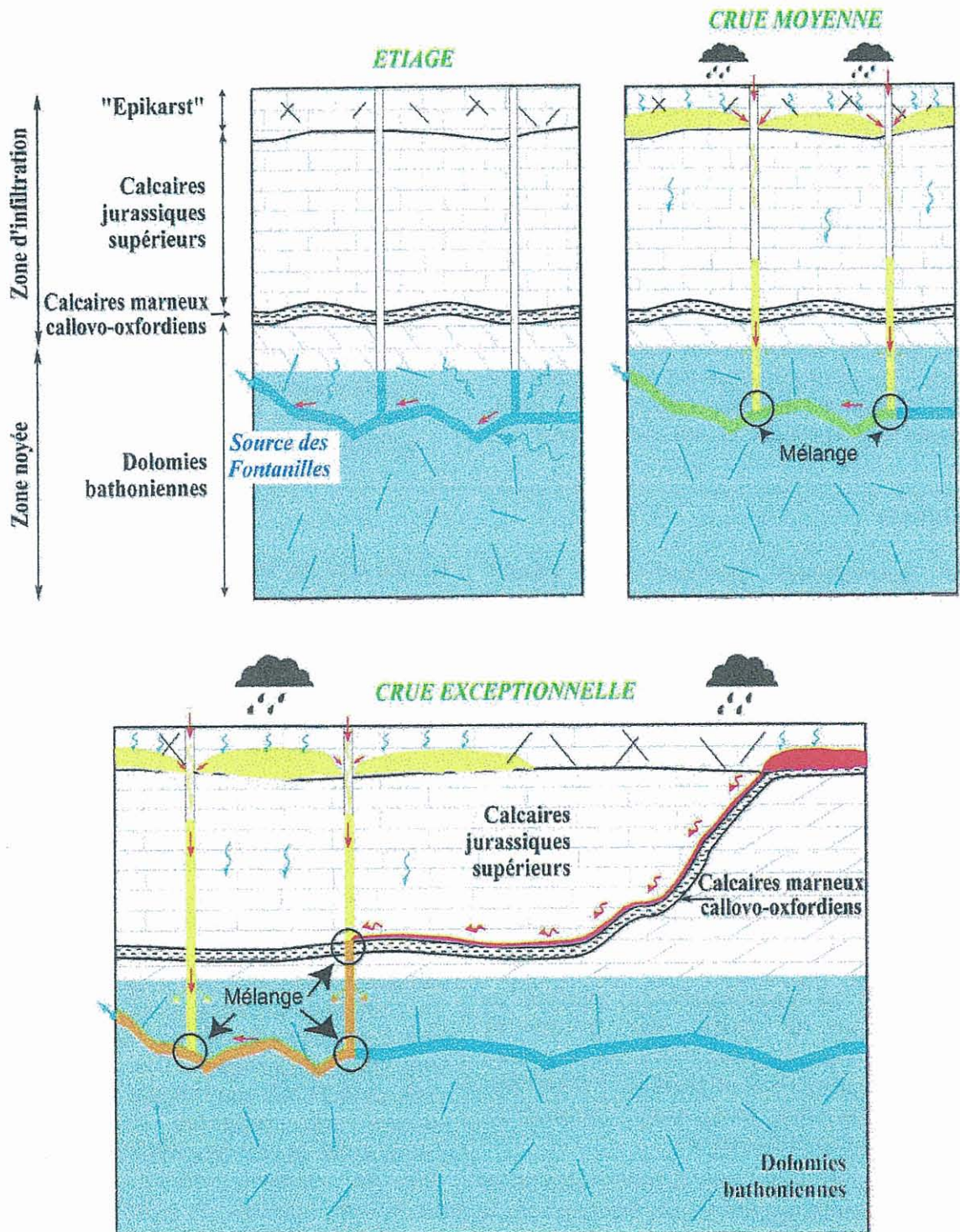


Figure 6 : Schéma de fonctionnement du système des Fontanilles

5.3. Système karstique des Cent-Fonts

5.3.1. Caractéristiques générales de l'aquifère

La source des Cent Fonts est l'une des deux principales émergences karstiques de la rive droite de l'Hérault (l'autre étant la source de la Clamouse, à quelques kilomètres en aval). Elle est en fait composée de huit griffons pérennes et trois exutoires temporaires dont le débit global varie entre 200 l/s lors des étiages prononcés de l'automne 1998 et plus de 10 m³/s en crue. Les contours présumés du système drainé par la source des Cent Fonts forment grossièrement un triangle d'environ 10 km de long pour une largeur moyenne de 5 km. La surface de ce système, correspondant à peu près au Causse de la Selle, est d'environ 50 km². Le système karstique de la source des Cent Fonts est également en partie alimenté par les pertes de la Buèges.

Le système karstique de la source des Cent Fonts s'inscrit dans la partie ouest des garrigues nord-montpelliéraines, formées par les massifs calcaires et dolomitiques situés entre Montpellier et les Cévennes, et présentant trois morphologies différentes :

- au Nord-Est : un plateau à déclivité orientée vers le nord-est et fortement entaillé par quelques vallées sèches dont les altitudes générales varient entre 200 et 300 m.
- au Nord-Ouest : un relief plus accentué dont le point culminant est la butte témoin du Monthaut (altitude 656 m).
- au Sud : un relief morcelé par de nombreuses combes sinueuses isolant de petits massifs aux aspects parfois ruiniformes (point culminant : Roc de la Vigne, 709 m).

Ce plateau est bordé au Nord-Ouest par la faille des Cévennes et l'important massif carbonaté de la Séranne et au Sud par la structure anticlinale faillée du Pic St-Loup – Viols-le-Fort et la plaine tertiaire de l'Hérault. Le système a été limité à l'Est aux gorges de l'Hérault qui constituent une frontière géomorphologique et hydrogéologique reconnue.

Phénomènes karstiques

Les différents phénomènes karstiques inventoriés sur le système des Cent Fonts sont des reliefs ruiniformes dans les calcaires dolomitiques ; des dolines et des dépressions karstiques, essentiellement concentrées dans la partie nord du massif entre l'Hérault et St-Jean de Buèges ; des lapiaz, uniquement dans les formations calcaires du Jurassique supérieur, souvent masqués par des éboulis ou en partie démantelés ; des thalwegs et vallons secs, développés sur la surface aplanie et favorisant la concentration des eaux de surface et leur infiltration dans des dépressions.

Un inventaire des cavités souterraines réalisé en 1998 par le Comité Départemental de Spéléologie de l'Hérault en a répertorié 243. Les cavités de ce massif sont en général peu importantes, tant par leur profondeur que par leur développement. Ainsi seuls trois avens dépassent 100 m de profondeur, et deux cavités dépassent 1000 m de développement. La vingtaine de cavités majeures inventoriées sur le système (longueur et profondeur supérieure à 50 m) est concentrée dans la moitié est du massif karstique, essentiellement au droit des séries carbonatées du *Jurassique supérieur*.

Trois pertes ont été recensées sur le domaine d'extension probable du système karstique des Cent Fonts :

- 1) La perte de la Buèges, dans le lit même de la rivière de la Buèges à environ 3 km à l'est de St Jean de Buèges, est une perte pérenne, mais se déplaçant sur une distance d'environ 1 km suivant le débit d'étiage de la rivière. La relation entre cette perte et la source des Cents Fonts a été validée par un traçage quantitatif réalisé en 1997 au cours de cette étude.
- 2) La perte de Boisseron, située aussi dans le lit de la Buèges à environ 1 km au sud-est de St André de Buèges, n'est active qu'en moyennes et hautes eaux lorsque la rivière n'est pas totalement absorbée au droit de la perte de la Buèges. Aucun traçage n'a été réalisé à ce jour à partir de cette perte.
- 3) La perte des Colons, dans le thalweg visible au sud-ouest du village de Causse-de-la-Selle, est temporaire ; elle draine une partie des

eaux ayant transité sur l'ancien dépôt d'ordures du village qui occupe une partie de ce thalweg. Une coloration réalisée en 1966 aurait montré une relation avec la source de la Combe de Marrou.

Treize sources, 5 pérennes et 8 temporaires, ont été inventoriées dans le secteur étudié. En rive droite de l'Hérault : 5 sources pérennes et 5 sources temporaires. Dans la Combe du Buis : 3 sources temporaires. Seule la source des Cent Fonts présente un débit d'étiage important et a fourni une chronique de débit. Le débit d'étiage des sources secondaires est faible, de l'ordre de quelques l/s au maximum. Ces sources temporaires ou pérennes de faible débit sont essentiellement liées à des particularités locales (drainage en périphérie du massif au droit des gorges) ou à la réactivation temporaire, lors des hautes eaux, d'anciens drains karstiques perchés au dessus du niveau de base de l'Hérault.

Les conditions d'infiltration, et donc d'alimentation de la zone noyée, sont variées, conformément à ce qui est connu dans le karst. On distingue en surface du système :

- Une infiltration directe, dispersée sur les surfaces rocheuses lapiazées calcaires ou chaotiques dolomitiques,
- Une infiltration concentrée à partir d'écoulements temporaires superficiels (ravins, vallons, dépressions) par des cavités situées dans des dépressions (exemple de la perte des Colons).
- Une infiltration concentrée par pertes de cours d'eau permanents (pertes de la Buèges).

Dans le cas du système karstique des Cent Fonts, l'analyse microstructurale ne permet pas de faire une analyse sommaire de la direction des plans de drainage du fait de la dispersion des données dans un compartiment très fortement tectonisé, limité par des failles importantes. Ce sont donc plutôt les directions de ces grandes failles, découpant ce secteur en lanières, qui commandent les contours du système des Cent Fonts. Dans ce cas, la direction d'ouverture et celle du gradient hydraulique ne sont plus en coïncidence : la karstification est probablement moins bien développée que pour les Fontanilles

et doit probablement se produire sous le niveau de l'exutoire.

5.3.2. Fonctionnement hydrologique de l'aquifère

Contours du système

L'évolution géomorphologique de la région, depuis la surrection de la région, a permis le développement d'écoulements souterrains se raccordant aux niveaux de base successifs, commandés par l'Hérault. Ainsi, jusqu'au Quaternaire ancien, les circulations souterraines devaient aboutir à des émergences en rive gauche de la Combe du Buis qui devait constituer le niveau de base du système. Ces anciens cheminements souterrains sont attestés par les sources temporaires, dont le réseau spéléologique du Tunnel sous la route, et par la plus importante cavité du système (aven de la Combe du Buis), actuellement en position de regard sur la zone noyée. L'enfoncement rapide de l'Hérault, au Quaternaire, a augmenté fortement le gradient hydraulique, en maintenant les combes latérales suspendues. Cette nouvelle disposition hydraulique a forcé l'ensemble des écoulements souterrains vers l'Hérault au détriment de la Combe du Buis.

La continuité apparente du réservoir carbonaté vers le sud pourrait être responsable d'écoulements transitant plus vers le sud en passant sous les combes du Cor et du Buis. Toutefois, aucune preuve d'une telle continuité hydraulique n'a jusqu'à présent été apportée. Au contraire, la position actuelle de l'exutoire principal (sources des Cent Fonts) paraît liée à une structure ancienne transversale des dolomies, sur laquelle viennent buter les écoulements souterrains.

Traçages

Traçage réalisé à l'exutoire : évolution du niveau de base

Un traçage a été réalisé à l'exutoire de la source des Cent Fonts, l'injection ayant été effectuée environ 200 m en amont des sources dans un forage recoupant le drain principal. Les caractéristiques de ce traçage exutoire, courbe de

restitution bimodale et étalée pour le second mode, avec taux de dilution élevé, dénotent un écoulement complexe : en partie, rapide et peu dispersif, l'autre partie dans un milieu moins ouvert et plus dispersif. Une partie du traceur a manifestement été entraînée rapidement vers l'exutoire, dans un conduit karstique assez bien développé ; c'est ce qu'indique le premier pic étroit de la courbe de restitution. Le second pic, plus étalé correspond à la restitution du traceur après passage dans un milieu plus dispersif, de type fissuré. Lors des conditions de réalisation du traçage, le débit de la source était de 350 l/s.

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

Traçage sur le système : caractérisation des limites du système

Le traceur a été injecté au niveau des pertes de la Buèges et est ressorti aux Cent Fonts. Ce traçage confirme le fait que les pertes de la Buèges participent à l'alimentation de la source. Au temps de première apparition (30/10/97 à 6 h 00, soit 565,33 h) correspond une vitesse maximale de 14,5 m/h. Le temps modal, estimé à 686 heures, donne une vitesse modale de 12 m/h. Ces valeurs sont cependant dépendantes des conditions d'entrée, puisque l'eau et le traceur doivent s'écouler au travers de la masse de travertin poreux qui colmate le lit du ruisseau et, de ce fait, retarde l'entrée du traceur et contribue à sa dispersion. Au mode, la dilution est très forte (environ 2.10^{-9}). La restitution du traceur n'a pu être suivie jusqu'à son terme en raison de l'arrivée d'une crue peu après le mode de la

courbe, empêchant un suivi régulier par la suite. Jusqu'à l'arrivée de la crue le taux de restitution est de 15 %.

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

Bien que la restitution ait été tronquée par la crue du 4/11/1997, on peut tenter une évaluation du volume tracé (volume du « nuage » de traceur), avant l'arrivée de la crue, donc en régime permanent. Ce volume, de l'ordre de $123\ 000\ m^3$, est très important ; il rend compte de la dispersion du nuage de traceur dans un volume d'eau considérable.

Ce traçage informe à la fois sur les conditions d'écoulement dans le système des Cent Fonts et sur ses contours. L'écoulement de surface de la Buèges ne participe que partiellement à l'alimentation de cette source. Cette participation est notable en basses eaux (à 45 l/s pour un débit total de 270 l/s, soit 16 %), mais en hautes eaux elle est impossible à évaluer sans jaugeages différentiels sur la Buèges. Enfin, le système karstique des Cent Fonts ne présente pas un degré de karstification fonctionnelle très poussé, tout du moins entre les pertes de la Buèges et la source et au voisinage de la source pour l'écoulement permanent. Mais il n'est pas possible de dire si c'est la conséquence d'un stade de développement initial, ou bien si c'est à cause du colmatage des conduits issus des pertes par des dépôts épais de travertin.

Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique a été réalisé sur la période du 01/10/97 au 31/12/98, que l'on peut assimiler à un cycle hydrologique complet. Les volumes écoulés au cours des lacunes ont été estimés par interpolation linéaire. Le volume (V) écoulé à l'exutoire est évalué à 31,8 millions de m^3 . La lame d'eau correspon-

dante, précipitée à la station de St-Martin-de-Londres est 1417 mm (P).

Sur cette période, le total des pluies efficaces calculé à l'aide des données d'évapotranspiration réelle (ETR) de la station météo de Fréjorgues est estimé à 811 mm, tandis que le déficit d'écoulement calculé est de 634 mm, ce qui représente une lame d'eau infiltrée de 783 mm. Selon ces données, la superficie du bassin d'alimentation calculée par deux méthodes est respectivement de 39,2 km² et 40,6 km². Compte tenu d'une part du contexte hydrogéologique, et d'autre part des résultats d'anciens essais de traçage, on montre que le bassin d'alimentation sur le Causse de la Selle est probablement de l'ordre de 30 km², la surface complémentaire de l'ordre de 10 km² étant à attribuer à l'alimentation par les pertes de la Buèges.

Analyses des débits classés

L'analyse des débits classés montre deux ruptures de pentes successives en hautes eaux (1,85 et 2,3 m³/s) avec une augmentation de la pente, traduisant la mise en fonction de trop-pleins échappant à la station de jaugeage. En basses eaux, on remarque une nette rupture de pente ($Q < 0.65$ m³/s), qui correspond à un soutien du débit. Ce soutien est à mettre en relation avec les pertes pérennes de la Buèges qui continuent d'alimenter le système en étiage.

Analyse des courbes de récession

Les principaux résultats de l'analyse des récessions des cycles 1996/1997 et 1997/1998 sont récapitulés dans le tableau n°4.

	1997	1998
Coef. de tarissement α	0.035	0.0009
Vitesse d'infiltration η	0.0175	0.0084
Hétérogénéité d'infiltration ε	0.624	0.263
Durée de l'infiltration T_i (j)	57	119
Volume dynamique V_d (Mm ³)	8.1	28.2

Tableau 4 : paramètres de la récession aux Cent-Fonts

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

La superficie du bassin d'alimentation du système des Cent Fonts est de l'ordre de 40 km².

Concernant les modalités d'infiltration des eaux, on montre que la vitesse de l'infiltration est lente pour les deux cycles, avec une faible hétérogénéité d'écoulement, l'infiltration lente primant sur l'infiltration rapide. Ceci est confirmé par la durée de l'infiltration qui est très importante (57 à 119 j).

Deux caractéristiques de fonctionnement du système expliquent cette dominance de l'infiltration lente :

- ◇ l'effet de l'alimentation du système par les pertes de la Buèges qui soutient la phase de décrue ;
- ◇ l'existence probable d'une zone épikarstique importante, qui diffère l'infiltration dans le temps.

Analyses corrélatoire et spectrale

Analyse simple de la chronique des débits

De manière similaire au système des Fontanilles, le système des Cent Fonts présente une fréquence de coupure moyennement haute (0.155 j⁻¹) ce qui indique que les événements pluvieux de courte durée (< 3 j) n'ont pas une influence significative sur les débits à l'exutoire. L'influence d'un événement pluvieux donné sur le débit à l'exutoire se fait sentir pendant 50 jours (effet mémoire), ce qui indique que le système des Cent fonts présente une inertie plus importante que celui des Fontanilles (32 jours). Le temps de régulation du système est d'environ 44 jours contre 32 jours pour les Fontanilles. L'importance du temps de régulation et de l'effet mémoire du système par rapport au Fontanilles est probablement à attribuer à la présence des pertes de la Buèges en amont du système, qui soutient le régime d'écoulement de la source des Cent Fonts.

Analyse croisée pluie - débit

Le corrélogramme croisé montre une réponse de type composite, avec une réponse rapide marquée sur 2 à 3 jours, puis un amortissement de la réponse sur 30 à 40 jours. L'amortissement est assez rapide si l'on compare les résultats avec ceux des Fontanilles. Le déphasage entre l'entrée (pluie) et la sortie (débit) pour la fréquence de coupure de (0.155 j^{-1}) est de 1.3 jours.

De manière similaire au Fontanilles, la fonction de cohérence du système des Cent Fonts présente des valeurs moyennes élevées (0.8-0.9), globalement stables pour les fréquences inférieures à la fréquence de coupure ($f_c = 0.155 \text{ j}^{-1}$), ce qui indique également que le système est dans son ensemble bien drainé, et qu'il réagit sensiblement de la même manière aux précipitations quelle que soit leur importance.

La fonction de gain montre une forte amplification (>1) pour les très basses fréquences ($f < 0.0175 \text{ j}^{-1}$) et une atténuation significative (0.5 - 0.6) à moyen terme (fréquence comprise entre 0.1 et la fréquence de coupure $f_c = 0.16 \text{ j}^{-1}$) ce qui indique (1) que la variabilité intra annuelle des précipitations est amplifiée par le système en période d'étiage et en période de crue, (2) que l'atténuation du signal à moyen terme peut s'interpréter comme une mise en réserve des événements pluvieux de courte durée et leur restitution lors du cycle annuel.

5.3.3. *Caractérisation hydrochimique du fonctionnement de l'hydrosystème*

Evolution chimique de la zone noyée

La tendance globale est identique à celle observée pour la source des Fontanilles. La reconstitution des réserves est principalement assurée lors des épisodes de crue d'automne - hiver, interprétation basée sur les résultats de isotopes stables et des rapport Na/Cl de l'eau. On note de même le rôle prépondérant des interactions prolongées de l'eau avec les minéraux argileux et silicatés dans l'acquisition de la signature géochimique.

Les teneurs en chlorures et en nitrates sont inférieures à celles des Fontanilles (5.6 mg/l et

1.2 mg/l, respectivement contre 8.5 mg/l et 2.5 mg/l pour les Fontanilles), ce qui est lié d'une part aux variations spatiales du chimisme de la pluie mais aussi à un taux d'évapotranspiration plus important aux Fontanilles [2.8 contre 1.9 pour les Cent Fonts en 96/97, valeurs calculées à partir des données chlorures] et une capacité de consommation de l'azote du système plus importante aux Cent-Fonts.

A l'inverse des Fontanilles, les teneurs en chlorures restent stables au cours des deux cycles, ce qui dénote une plus grande inertie pour le système des Cent-Fonts, qui peut être expliquée par l'un et/ou l'autre des caractères suivants : (1) volume important des réserves d'eau de l'aquifère (2) importance du mélange entre eaux anciennes et eaux jeunes.

Les teneurs en magnésium lors de l'étiage restent faibles pour la source de la Buèges (7 - 9 mg/l) et sont légèrement plus élevées pour les Cent-Fonts (12 - 13 mg/l). Les teneurs en magnésium des Cent Fonts sont nettement inférieures à celles des Fontanilles (15-17 mg/l). Une partie de la zone noyée des Cent Fonts est donc développée au sein des dolomies du Jurassique moyen. Par ailleurs, la dynamique d'augmentation des teneurs en magnésium des Cent Fonts au cours de l'étiage est moins importante qu'aux Fontanilles. Les différences observées avec le système des Fontanilles peuvent être expliquées (1) soit par le fait que la zone noyée des Cent Fonts est probablement moins développée dans les dolomies par rapport aux Fontanilles, compte tenu de la position respective des émergences dans la série sédimentaire (cf. figure 6 et 7), (2) soit par le rôle des pertes de la Buèges qui fournissent continuellement au système des eaux faiblement chargées en magnésium.

Evolution chimique lors des crues

Au cours des crues, on observe les mêmes phénomènes que ceux rencontrés sur les Fontanilles. La production de l'eau issue du drainage des systèmes annexes au drainage dans la zone noyée diminue fortement (jusqu'à 30 %, contribution calculée à partir du couple Ca-Mg) au profit d'eau jeune qui a transité dans le réservoir épikarstique (effet de dilution). On note toutefois que l'effet de dilution est globalement

moins marqué qu'aux Fontanilles. On montre de même, à l'aide des isotopes stables de l'eau (^2H , ^{18}O), que l'eau qui émerge à l'exutoire au cours d'une crue donnée n'est pas issue de l'événement pluvieux qui a provoqué ladite crue. Lors des successions de crues, il existe en effet un décalage entre la réponse isotopique de la source et l'eau nouvelle apportée par les pluies, ce qui permet de mettre en évidence le rôle du stockage temporaire de l'eau de pluie infiltrée dans le réservoir épikarstique.

Par ailleurs, comme aux Fontanilles, l'eau qui génère les crues est fortement marquée par

l'empreinte du sol et possède donc une forte teneur en CO_2 . Elle provoque un important effet de dissolution des carbonates, bien marqué par un pic des teneurs en calcium.

Evolution chimique lors de la crue majeure de l'automne-hiver 1997/1998

De même qu'aux Fontanilles, l'eau qui s'écoule lors de la crue majeure présente à la fois, une signature de type épikarstique et des marques d'interaction importantes avec les minéraux silicatés et argileux contenus dans les roches.

Les systèmes des Cent Fonts et des Fontanilles présentent dans l'ensemble des caractéristiques très voisines et néanmoins différentes de celles d'autres systèmes karstiques connus par ailleurs en France.

La reconstitution des réserves des deux sources se produit lors des épisodes de crue majeures, lorsque la charge dans le système au niveau de la zone noyée est suffisante pour vaincre les pertes de charges qui existent entre les systèmes annexes au drainage (zone capacitive) et les drains du réseau karstiques (les gradients hydrauliques entre les systèmes annexes et les drains s'inversent : le drains rechargent les blocs capacitifs).

Lors des crues, la zone épikarstique constitue pour les systèmes étudiés, le siège d'un réservoir « tampon » qui diffère dans le temps l'écoulement de l'eau de pluie infiltrée dans le système.

La partie drainante des systèmes karstiques est bien développée entre la zone épikarstique et la zone noyée. Lors des crues, le transfert de l'eau issue de la zone épikarstique jusqu'à l'exutoire

s'effectue rapidement (en 1 jour environ). L'essentiel de l'écoulement de crue est assurée par l'eau issue du réservoir épikarstique. La source des Cent-Fonts présente une inertie chimique beaucoup plus marquée. La source réagit de manière moins marquée à la crue majeure de décembre - janvier (97/98) et les concentrations moyennes des eaux restent stables d'un étiage à l'autre. Ces informations nous indiquent la présence d'une importante zone noyée aux Cents Fonts, contrairement au Fontanilles.

Les variations des teneurs en calcium et magnésium indiquent que c'est lors des crues que se produit l'exportation majeure des carbonates, via une dissolution de calcite.

Durant l'étiage, ce sont les dolomies qui sont dissoutes lentement, mais les quantités exportées restent faibles, ce qui se traduit par un lent développement de la karstification au sein de la zone noyée des aquifères. Ceci permet d'expliquer le fait que le réseau karstique s'est mal développé à proximité des exutoires, depuis l'abaissement récent du niveau de base imposé par le fleuve Hérault.

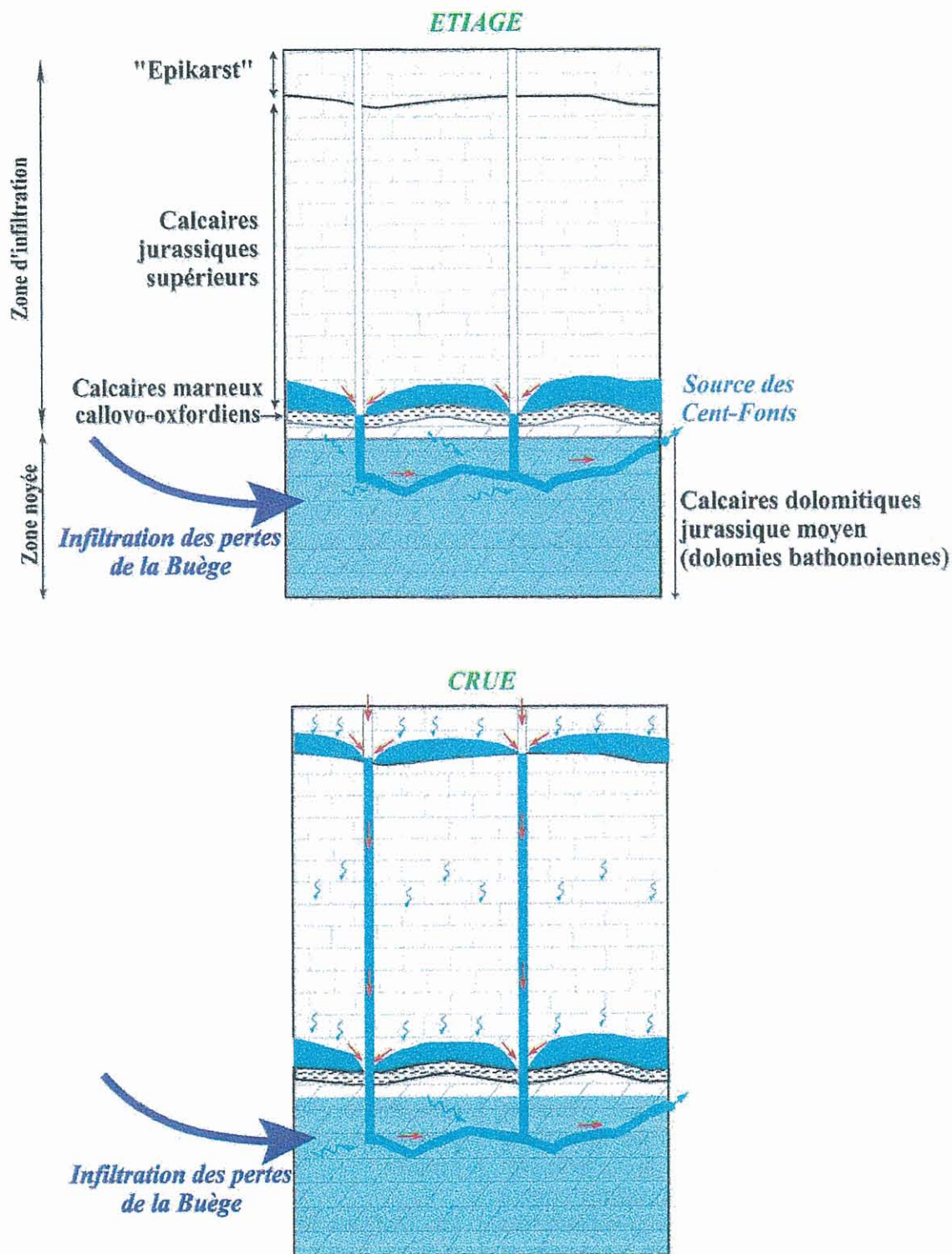


Figure 7 : Schéma de fonctionnement du système des Cent-Fonts

5.4. Conclusion sur le mode de fonctionnement des aquifères

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

Les principaux résultats quantitatifs obtenus par l'analyse hydrologique sont récapitulés dans le tableau 5.

Nom	Effet mémoire (jour)	Temps de régulation (jour)	Fréquence de coupure (jour ⁻¹)
Cent Fonts	50	44	0.155
Fontanilles	32	31	0.16

Tableau 5 : Principaux paramètres des analyses corrélatoires et spectrales

L'ensemble des traitements effectués met en évidence un double comportement des systèmes étudiés. La réponse à une pluie s'effectue d'abord par un pic bien marqué avec une réponse rapide soulignant le caractère transmissif des systèmes, suivie d'une réponse amortie dans le temps traduisant le comportement inertiel du karst noyé, avec lente décroissance sur 30 jours (Fontanilles) à 40 jours (Cent Fonts).

Cette dualité de comportement est également clairement identifiable par les réponses chimiques qui permettent d'identifier deux types de signatures dont les proportions s'inversent lors des crues. L'écoulement rapide est à rattacher à l'eau issue d'un réservoir épikarstique proche de la surface tandis que la réponse lente est à rattacher au drainage de l'eau issue des systèmes annexes au drainage de la zone noyée.

Pour les deux systèmes, les analyses hydrologiques et hydrochimiques indiquent que le réseau drainant est bien développé depuis la surface jusqu'à la zone noyée et permet d'assurer

un transfert rapide de l'eau jusqu'à l'exutoire lors des crues (1 jour à 1 jour et demi).

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

On observe en outre sur la courbe des débits classés des Fontanilles, une faible rupture de pente qui peut être attribuée à un piégeage de réserves en basses eaux. Ceci est cohérent avec la structure présumée du système. Lors de la décrue, il est probable qu'une partie des réseaux supérieurs de la zone noyée piègent une certaine masse d'eau sous la forme de réservoirs perchés. Ce phénomène est à relier d'une part aux observations chimiques qui montrent le rôle joué par le réservoir épikarstique lors de la genèse des crues, et d'autre part, au rôle important attribué au niveau plus ou moins imperméable du Callovo-Oxfordien. Au niveau de ce dernier, du fait du contraste de perméabilité qui existe entre le calcaire du jurassique et les marno-calcaires sous-jacents, des conditions de saturation peuvent se développer créant des aquifères perchés.

Les analyses hydrologiques et hydrochimiques sont en bonne concordance pour attribuer au système des Cent Fonts, un réservoir épikarstique important, favorisant une infiltration plus lente qu'aux Fontanilles. Le fort caractère inertiel du système des Cent Fonts est à relier d'une part à la présence d'une importante zone noyée, mais également (1) à la présence des pertes de la Buèges en amont du système, qui

soutiennent le régime d'écoulement de la source, (2) à la vidange plus lente du réservoir épikarstique.

La similitude de comportement qui existe entre les deux systèmes est en partie liée à la même évolution récente du niveau de base de l'Hérault. Néanmoins, lorsqu'on compare les données

hydrochimiques de l'ensemble des sources, deux familles de comportement correspondant aux deux secteurs étudiés sont mises en évidence. La confrontation des différents résultats géochimiques permet ainsi de confirmer le rôle joué par la tectonique dans l'organisation et le développement des écoulements au sein des formations calcaires.

6. Potentialités des réserves en vue d'une exploitation

6.1. Importance des réserves du système des Fontanilles

L'analyse des courbes de récession permet de montrer que les coefficients de tarissement sont faibles, caractéristiques de systèmes où la zone noyée est mal drainée. Toutefois, ce mauvais drainage ne profite pas à l'accumulation de réserves puisque les volumes dynamiques restent peu importants (*entre 0.2 et 0.5 millions de m³*). Dans la classification issue de l'analyse des courbes de récession (figure 8), le système des Fontanilles se place dans le domaine des systèmes complexes à forts retards à l'alimentation et présente un faible pouvoir régulateur (peu d'accumulation de réserves).

Cette faiblesse des réserves est également démontrée par le suivi hydrochimique de la source, et des précipitations. La répercussion de la crue majeure sur l'ensemble de l'étiage indique un volume de l'ordre de grandeur de la lame d'eau précipitée lors de cet événement, cohérent avec le volume déduit de l'analyse hydrologique.

Le bassin d'alimentation du système des Fontanilles est de l'ordre de 15 km² et est de type unaire, c'est à dire qu'il n'y a pas de concentration d'écoulement de surface en des points privilégiés. Les réserves du système sont donc alimentées de manière homogène sur tout le bassin d'alimentation par une zone d'infiltration où domine l'infiltration rapide. L'eau qui traverse la zone d'infiltration a préalablement séjourné plus ou moins longtemps dans l'épikarst. L'essentiel de la recharge se produit au cours des crues importantes de la période automnale.

6.2. Importance des réserves du système des Cent-Fonts

L'analyse hydrologique indique que les coefficients de tarissement sont très faibles et les

volumes dynamiques importants, compris entre 8 et 28 millions de m³.

La valeur de 28 millions de m³ pour le cycle 97/98 est aberrante comme le montre la compa-

La valeur de 8 millions de m³ paraît la plus réaliste et fournit a priori un ordre de grandeur du volume des réserves des Cents Fonts.

raison avec le volume moyen ayant circulé dans le système en 1998 et qui était de 31.1 millions de m³. L'estimation précise du volume dynamique est rendue problématique en raison des pertes la Buèges qui soutiennent les débits de la source des Cent Fonts.

Le système des Cent Fonts semble donc posséder des réserves significatives, nettement plus importantes que celle des Fontanilles.

Le bassin d'alimentation du système des Cent Fonts est de l'ordre de 40 km² et est de type binaire en raison de l'alimentation par les pertes de la Buèges. Les réserves du système sont donc à la fois alimentées par l'eau des pertes de la Buèges et l'eau d'infiltration rapide issue du réservoir épikarstique de manière similaire aux Fontanilles. L'essentiel de la recharge se produit également au cours des crues importantes de la période automnale.

Dans la classification issue de l'analyse des courbes de récession (figure 8), le système des Cent Fonts possède un pouvoir régulateur notable (la position du système est soulignée par des flèches pour figurer l'incertitude existant sur la détermination du volume des réserves et de la fonction d'infiltration, en raison de l'alimentation par les pertes de la Buèges) et avec des retards à l'infiltration dus en partie au soutien de la décrue par la Buèges.

6.3. Perspectives

En terme de perspective pour l'alimentation en eau potable, ces différences amènent à envisager des possibilités différentes pour les deux systèmes.

Le volume des réserves des Fontanilles est estimé entre 0.2 et 0.5 millions de m³.

Pour les Fontanilles, la faible importance des réserves amène à ne pas envisager d'exploitation importante directe par forage. Outre le faible intérêt économique (rapport dépenses/ressources en eaux élevés), les risques de ne pas rencontrer de vides importants permettant de garantir la pérennité de la ressource est grand. Dans ce type de système, possédant une structure bien développée dans la partie supérieure du karst noyé (et probablement dans la partie inférieure de l'actuelle zone d'infiltration), le type d'exploitation à envisager serait plutôt de type « barrage ».

Pour les Cents Fonts, les perspectives d'exploitation sont bien meilleures et l'ordre de grandeur du volume dynamique permet d'envisager une exploitation avec pérennité de la ressource. Il faudra cependant prendre en compte deux paramètres :

- le système est un système binaire, alimenté en partie par les pertes de la Buèges. Il importe donc en terme de vulnérabilité et de protection

de la ressource de prendre en compte un domaine beaucoup plus vaste que le domaine du système lui-même.

- Compte tenu des différences attendues de karstification de la zone noyée à l'aval du système, le positionnement de l'exploitation devra être judicieusement choisi pour atteindre une partie du karst noyé permettant de solliciter la plus grande partie possible des réserves.

6.4. Vulnérabilité globale des systèmes

Du fait de ses réserves plus importantes et de son inertie, on peut considérer que le système des Cent-Fonts est globalement moins vulnérable aux pollutions (ponctuelles) que le système des Fontanilles (effet de dilution plus important). Toutefois, dans le cas de pollutions chroniques, l'effet de dilution n'existe plus. Ce caractère est renforcé par le rôle important des réserves situées à proximité du sol sur toute la surface du système des Fontanilles. Les teneurs en nitrates et en CO₂ sont déjà une indication d'une sensibilité aux processus de surface plus marquée aux Fontanilles.

A l'inverse, on doit souligner aux Cent Fonts, l'importance des pertes de la Buèges, particulièrement en étiage, qui constituent une entrée dans le système qui doit être intégrée dans le périmètre à protéger en vue d'une exploitation.

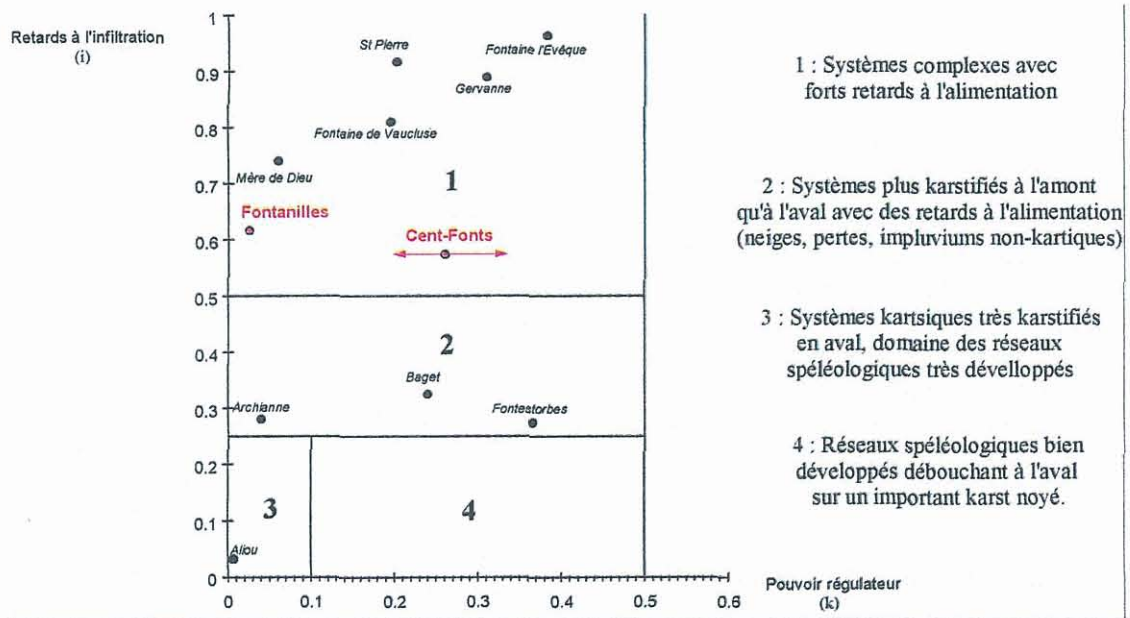


Figure 8 : Classification des systèmes aquifères des Cent Fonts et des Fontanilles dans le référentiel de Mangin (1975)

7. Conclusion :

Intérêt des études pour la gestion des ressources en eau à l'échelle du département

Le secteur des garrigues nord-montpelliéraines est une vaste entité calcaire au Nord du département de l'Hérault, répartie autour du fleuve Hérault. Cet ensemble constitue un potentiel de ressources en eau souterraine.

A l'horizon 2010, pour alimenter l'ensemble de la population, en forte croissance, sans risquer de mettre en péril les équilibres des systèmes exploités jusqu'à présent comme la nappe souterraine de l'Astien ou la nappe alluviale de l'Hérault, le potentiel karstique doit être exploré.

L'étude menée par le BRGM avait pour objectif de caractériser le fonctionnement de deux sources principales, les résurgences des Fontanilles et des Cent Fonts, et d'en évaluer les réserves et la vulnérabilité. Cette étude prend place au sein d'un programme de recherche sur le fonctionnement et la gestion des hydrosystèmes. On pourra ainsi mettre en relief la comparaison entre le fonctionnement de systèmes comme celui du Larzac ou celui du Causse d'Aumelas pour évaluer à grande échelle les grands traits régionaux du fonctionnement de ces hydrosystèmes et la liaison avec les grandes structures tectoniques, l'évolution géologique et géomorphologique, ainsi que le rôle des évolutions du niveau de base du fleuve Hérault au cours du temps.

Au cours de cette étude, on a pu tester et développer les méthodes d'étude des systèmes karstiques, en particulier l'analyse hydrogéologique et hydrochimique, qui permettent une compréhension globale du système, non seulement de sa structure, mais aussi en terme de fonctionnement.

Cette compréhension globale des hydrosystèmes étudiés et de leur contexte régional est un élément important pour la mise en œuvre de la politique de gestion patrimoniale des ressources en eau à l'échelle du département par le Conseil Général de l'Hérault.

Glossaire

Analyses corrélatoire et spectrale : Ces traitements mathématiques permettent de caractériser la réponse impulsionnelle des systèmes. L'application des analyses spectrale et corrélatoire à l'étude des systèmes karstiques repose sur le fait qu'un système possède un comportement de filtre, c'est à dire que l'état hydrologique d'un système dépend principalement des entrées (pluies) les plus récentes. En d'autres termes, le système garde en « mémoire » plus ou moins longtemps les entrées antérieures, ce qui permet de caractériser le caractère inertiel du système.

Aquifères karstiques : ils se développent dans les roches carbonatées principalement. Ils sont caractérisés par des particularités géomorphologiques et des phénomènes hydrauliques spécifiques : sources de débit important, pertes, absence fréquente de réseau de drainage des eaux de surface et existence de réseaux de conduits résultant de la dissolution. L'eau circule de manière rapide au sein de vides de taille variable pouvant provoquer de violentes crues ; ces réseaux sont drainés ou alimentés par l'eau circulant dans les volumes de roche peu perméable au profit de fractures. Certains de ces vides, actifs ou fossiles vis-à-vis des écoulements, peuvent parfois être visités par les spéléologues lorsqu'ils ont atteint une taille suffisante.

Drains (ou axe de drainage) : ils sont constitués d'un ensemble de conduits qui se développent soit dans la partie supérieure de la zone noyée (karst de type jurassien ou drainage épiphréatique), soit en profondeur (karst de type vauclusien ou drainage phréatique profond). Ils assurent la fonction transmissive du système, les écoulements y étant très rapides (plusieurs dizaines de mètres par seconde). Le drain principal du réseau karstique constitue l'élément de base autour duquel s'organisent les écoulements dans la zone noyée. Sa position par rapport à l'ensemble du système est prépondérante dans le fonctionnement de l'aquifère.

Effet mémoire : Ce paramètre est déterminé à l'aide du corrélogramme simple pour la valeur du coefficient de corrélation r_k égal à 0.2. La

valeur de l'effet mémoire peut être rapprochée du degré de karstification, l'effet mémoire est d'autant plus important que le filtrage introduit par le système est important.

Epikarst : appelé également zone sous-cutanée, est une zone d'absorption des eaux, située directement dans les premiers mètres au-dessous du sol recouvrant les calcaires. Cette zone est fracturée, du fait de la décompression des terrains provoqués par le relâchement des contraintes tectoniques liées à leur mise en place ; elle est par conséquent favorable aux processus d'altération et à la karstification. Il constitue un aquifère perché temporaire (*réservoir épikarstique*) ; à travers sa limite inférieure marquée par un contraste de conductivité hydraulique, l'eau stockée peut soit percoler à travers les fissures, soit être drainée rapidement au profit de conduits verticaux (cheminées, puits naturels). L'eau stockée dans la zone épikarstique peut être soumise au processus d'évapotranspiration. L'eau circulant dans le réservoir épikarstique possède une composante horizontale importante (écoulement des eaux par des fractures ou conduits en direction des conduits verticaux) et une composante verticale plus réduite correspondant aux suintements lents dans les fissures et les écoulements dans les conduits.

Fréquence de coupure (f_c) : ce paramètre, déterminé à partir du spectre de densité de variance des débits journaliers (spectre simple), permet de quantifier la régulation introduite par le système. La fréquence de coupure correspond à la fréquence pour laquelle la densité de variance devient nulle ou négligeable. Le spectre simple permet de savoir, fréquence par fréquence, comment le système modifie l'information pluie. L'information à court terme (quelques jours) est d'autant plus filtrée que le système est inertiel.

Réserves : définies en terme de volume, les réserves correspondent au volume d'eau total contenu dans la nappe ou un aquifère à un instant donné.

Ressources : les ressources renouvelables représentent pour une période déterminée l'alimentation totale de l'aquifère, sa recharge. Elles s'expriment en débit ou en volume pour une période donnée qui peut être l'année ou le mois. Elles sont constituées par l'infiltration des pluies, par l'alimentation éventuelle par un aquifère voisin et par l'alimentation éventuelle par un cours d'eau.

Les ressources renouvelables exploitables correspondent au débit maximal qui peut être prélevé dans l'aquifère, non seulement sans puiser dans les réserves permanentes, mais également compte tenu de contraintes ou d'objectifs particuliers tels que le maintien de certains niveaux d'eau ou du cours d'eau, le maintien de la qualité chimique ou biologique ou d'ordre socio-économique lié au coût de l'eau en fonction du taux d'exploitation.

Systèmes Annexes au Drainage : ils sont constitués par les vides et les fissures de plus ou moins grande taille, situés de part et d'autre du drain principal, organisés en ensembles indépendants bien individualisés. Ils assurent la fonction capacitive (stockage de l'eau) de l'aquifère. Les écoulements y sont lents, et les temps de séjour de l'eau longs.

Système unaire : l'ensemble de l'impluvium est constitué de terrains karstifiables. Le drainage s'effectue principalement à l'aval (système karstique = aquifère karstique)

Système binaire : une partie de l'impluvium est constituée de terrains non karstifiables qui concentrent l'infiltration des eaux en un point (perte). Le drainage est très développé. (système karstique = aquifère karstique + bassin de surface drainé par des pertes)

Temps de régulation (t_r) : ce paramètre permet de définir la durée d'influence du signal d'entrée, c'est à dire la longueur de la réponse impulsionnelle du système. Sur le spectre simple, le temps de régulation est égal à l'ordonnée maximale du spectre divisé par 2. Plus le temps de régulation est important, plus le système possède un comportement inertiel et moins le système est karstifié.

Zone d'infiltration : elle représente la zone non saturée de l'aquifère ; elle assure l'infiltration au travers du massif karstique. Dans la partie la plus proche de la surface (*épikarst*), les eaux d'infiltration peuvent être momentanément retenues dans une zone temporaire et discontinue. C'est l'aquifère épikarstique.

Zone noyée (ou zone saturée) : cette zone se développe principalement à l'aval des systèmes (à proximité de l'exutoire) et n'est pas nécessairement présente dans tout l'ensemble carbonaté. On y distingue deux types de structure : *les drains* ou axes de drainage et *les systèmes annexes au drainage*.

Bibliographie

ALBAREDE F., MICHARD A., 1987 - Evidence for slow changing $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in runoff from freshwater limestone of Southern France. *Chem. Geol.*, 64 : 55-65.

AQUILINA, L., DELUCHAT, V., BRACH, M., BAKALOWICZ, M., LE STRAT, P., GIRAUD, F., 1997. Etude géochimique des eaux souterraines autour du bassin de Thau. Rapport BRGM R 39530.

ARTHAUD, LAURENT, 1995. Contraintes, déformation et déplacement dans l'avant pays nord-pyrénéen du Languedoc méditerranéen. *Geodynamica Acta*, 8 : 142-157.

AVIAS J.V., 1992. Contrôles géologiques des systèmes aquifères karstiques (s.a.k.) de type Méditerranéen : l'exemple du s.a.k. de la source du Lez. *International Contributions to Hydrogeology*, Vol 13 : Hydrogeology of selected karst regions.

BAKALOWICZ M., 1979. Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse d'Etat, Paris IV.

BAKALOWICZ M., 1995. La zone d'infiltration des aquifères karstiques. Méthodes d'étude. Structure et fonctionnement. *Hydrogéologie*, n°4, 1995, pp. 3-21.

BAKALOWICZ M., 1997. Hydrogéologue versus spéléologue, ou de qui relève l'étude et l'exploration des eaux souterraines karstiques ? Colloque "Hydrologie en pays calcaire", Association de spéléologie, La Chaux de Fonds 1997."

BAKALOWICZ M., 1996 - Les processus de karstification et les différents types de karst associés. *Mém. Soc. géol. France*, 1996, N.S., n°169, pp.363-371 ; Séance spécialisée : carbonates intertropicaux, Paris, 3-4 mai 1993."

BEAUDOIN G., ASTRUC, BARADAT, BOUZIGUES, CHARENTUS, COUSTOU, GETTO, MOUYON, RICARD, SAUTY, TARRISSE, VICENTE, 1989. Traçages et protection des captages dans le karst : détermination des paramètres de transfert et prévision de la propagation des pollutions dans le réseau karstique de l'Ouyse Causse de Gramat (Lot, France). *Hydrogéologie*, n°4, 1989, pp. 279-292.

BEN OTHMAN, D., LUCK, JM., TOURNOUD, MG., 1997. Geochemistry and water dynamics : application to short time-scale flood phenomena in a small Mediterranean catchment. I- Alkalis, alkali-earths and Sr isotopes. *Chem. Geol.*, 140 : 9-28.

BLAVOUX B., MUDRY J., 1983. Séparation des composantes de l'écoulement d'un exutoire karstique à l'aide des méthodes physico-chimiques. *Hydrogéologie-Géologie de l'ingénieur*, n°4, 1983, pp.269-278.

BONI C.F., 1992. Checklist for hydrogeological assessments in karst areas. *International Contributions to Hydrogeology*, Vol 13 : Hydrogeology of selected karst regions.

BONIN H., 1980. Contribution à la connaissance des réservoirs aquifères karstiques. Un exemple : le causse de l'Hortus. Un site : le site du Lamalou. Thèse Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc.

BONNET M., LALLEMAND-BARRES A., THIERY D., BONIN H., PALOC H., 1980. Etude des mécanismes de l'alimentation d'un massif karstique à travers la zone non saturée. Application au massif de l'Hortus. Rapport BRGM 80 SGN 095 HYD.

CHEVALIER J., 1987. Hydrodynamique de la zone non saturée d'un aquifère karstique : étude expérimentale (site du Lamalou - Languedoc). Thèse Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc.

DELAROZIERE-BOUILLIN O., 1969. Contribution à l'étude des circulations karstiques par la méthode des bilans hydrologiques partiels. Rapport BRGM 69 SGL 123 HYD.

DESANTI E., 1985. Etude des sources alimentant la ville de Lodève (vallée de Laurounet). Rapport DEA USTL.

DROGUE C., 1980. Essai d'identification d'un type de structure de magasin carbonaté fissuré. Application et interprétation de certains aspects du fonctionnement hydrogéologique. Mem. H. Sér. Soc. Géol. Fr., n°11.

DROGUE C., 1992. Hydrodynamics of karst aquifers : experimental sites in the mediterranean karst, southern France. International Contributions to Hydrogeology, Vol 13 : Hydrogeology of selected karst regions.

DUBOIS P., 1969. Sur la morphologie et l'évolution souterraine de la région calcaire Nord-Montpellieraine. Etudes et travaux de "MEDITERRANEE" N°7, Revue géographique des pays méditerranéens."

DUBOIS P., 1972. Notes karstologiques sur le Causse de l'Hortus. Etudes Quaternaires, mémoire N°1.

DURAND V., 1992. Structure d'un massif karstique. Relations entre déformations et facteurs hydro-météorologiques. Causse de l'Hortus - Site des sources du Lamalou (Hérault). Thèse Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc.

DUREPAIRE P., 1985. Inventaire et étude géologique, hydrologique et géomorphologique détaillés des cavités naturelles du bassin d'alimentation de la source du Lez, Hérault. I - Texte, II - Atlas. Mémoires du CERGH, Tome X, Fasc. IV.

FONTES, J.C., 1976 - Les isotopes du milieu dans les eaux naturelles. La Houille Blanche, 3/4, 205-221.

FORD, D.C., WILLIAMS, P.W., 1989. Karst geomorphology and hydrology (1^{ère} édition). Academic Division of unwin Hyman Ltd., London.

GOACHET E., 1978. Carte hydrogéologique de la région montpellieraine entre Hérault et Rhône. Grands Causses, Bassin de Lodève, Garrigues montpellieraine et nîmoise, Costières du Gard, Camargue et plaines littorales. Notice explicative. Edition CERGA.

GRILLOT, J.C., 1979. Structure des systèmes aquifères en milieu fissuré. Contribution méthodologique à cette connaissance. Thèse d'Etat, Université de Montpellier, 212p.

GUIZERIX, J., MARGRITA, R., MOLINARI, J., GAILLARD, B., CALMELS, P., COROMPT P., 1970. Contribution à la mesure des débits en régime variable par une méthode de dilution des traceurs radioactifs. IAEA, Vienne, 441-459.

KOEPNICK, R.B., DENISON, R.E., BURKE, W.H., HETHERINGTON, E.A., DAHL, D.A., 1990. Construction of the Triassic and Jurassic portion of the Phanerozoic curve of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, 80 : 327-349.

LADOUCHE B., AQUILLINA L., CUBIZOLES, J. and NÈGREL P. (1998). Rainfall chemistry in the south of France (Hérault 1996-1997). Goldschmidt Conference, Toulouse (30 août-4 sept.). *Mineralogical Magazine*, vol. 62A (2), 842-843.

LALLEMAND A., PALOC H., 1964. La méthode de détection au charbon actif pour les opérations de traçage à la fluorescéine. Quelques exemples d'application. *Rapport BRGM DS 64 A 47 (174)*.

LALLEMAND A., PALOC H., 1964. Conditions d'utilisation d'un nouveau colorant, le "Pontacyl Brilliant Pink B" pour l'étude des circulations karstiques. Résultats d'une expérience effectuée sur le réseau souterrain de la Clamouse (Hérault). *Rapport BRGM DS 64 A 83*.

LEPILLER M., MONDAIN P.H., 1986 - Les traçages artificiels en hydrogéologie karstique : mise en œuvre et interprétation. *Hydrogéologie*, n°1, 1986, pp. 33-52.

MANGIN A., 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse de Doctorat, Univ. Dijon.

MANGIN A., 1984. Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatrice et spectrale. *J. Hydrol.* 67 : 25-43.

MARSAUD B., 1996 - Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Thèse de l'Université de Paris XI Orsay.

MARSAUD B., 1997. Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. *Documents du BRGM 268*.

MAURIN Y., 1985. Contribution à l'étude de l'hydrologie karstique des formations carbonatées de la bordure orientale des grands Causses français. Thèse Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc.

MUDRY J., BLAVOUX B., 1986 - Utilisation de l'analyse en composantes principales (sur variables centrées réduites) pour l'étude du fonctionnement hydrocinématique de trois aquifères karstiques du Sud-Est de la France. *Hydrogéologie*, n°1, 1986, pp. 53-59.

PALOC H., 1967. Carte hydrogéologique de la France: région karstique Nord-Montpellieraine - Notice explicative. *Rapport BRGM, N°50*.

PALOC H., 1972. Carte hydrogéologique de la région des Grands Causses - Notice explicative. CERGA - BRGM.

PALOC H., 1979. Alimentation en eau de la ville de Montpellier ; captage de la Source du Lez, commune de St Clément (Hérault) ; Etude documentaire préalable à l'établissement de périmètres de protection ; Note de synthèse. *Rapport BRGM 79 SGN 319 LRO*.

PALOC H., 1986 - Inventaire des circulations d'eau souterraine démontrées par traçages dans les calcaires des départements de l'Hérault et du Gard. Essai de recensement au 31 octobre 1986 - *Rapport BRGM 86 LRO 672 PR*.

PANE-ESCRIBE M.B., 1995. Utilisation des éléments en trace comme traceurs des circulations souterraines en milieu karstique (site du Lamalou, Hérault). Thèse Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc.

PETELET E., 1998. Application de la géochimie à l'étude des mouvements d'eaux à moyenne et petite échelle : Les bassins versants de l'Hérault et de la Peyne (S. France). Utilisation des éléments majeurs, traces et des isotopes du Sr et du Pb. Thèse Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc.

PETELET, E., LUCK, JM., BEN OTMAN, D., NEGREL, P., AQUILINA, L., 1998. Geochemistry and water dynamics on a medium-sized watershed : the Hérault, S. France. I- Organisation of the different water reservoirs as constrained by Sr isotopes, major and trace elements. *Chem. Geol.*, 150 (1-2) : 63-83.

PLAGNES V., 1997. Caractérisation des apports karstiques par les isotopes du Sr. Application au champ captant de Comps (Gard). *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 324, série IIa, p. 229 à 235.

PLAGNES V., 1997. Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie des eaux. Thèse Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc.

PURADIMAJA D.J., 1991. Différenciation hydrochimique et isotopique des émergences karstiques du Languedoc-Rousillon (France). Thèse Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc.

SALVAYRE H., 1964. Les lacs temporaires du Larzac et de son avant-cause. *Spelunca* (4e série) Mémoires N°4, Actes du VIe congrès national de spéléologie.

SCHOEN R., AQUILINA L., BAKALOWICZ M., CUBIZOLLES J., 1997. Système karstique nord-montpelliérain. Résurgence des Fontanilles, Département de l'Hérault. Rapport de l'exercice 1996 - Rapport BRGM R39726.

SCHOEN R., AQUILINA L., BAKALOWICZ M., CUBIZOLLES J., 1997. Système karstique nord-montpelliérain. Résurgences des Fontanilles et des Cent Fonts, Département de l'Hérault. Rapport d'étape de l'exercice 1997. Compte-rendu BRGM CR DR/HGT PRR301 145/97.

VILA G., 1963. La grotte de Clamouse (Hérault). *Spelunca* (4e série) Mémoires N°3, Actes du Ve congrès national de spéléologie.

XU GAO, 1990. Etude de certains caractères des zones saturées et non saturées de l'aquifère karstique (sites expérimentaux du Terrieu et du Lamalou, Hérault, France). Thèse Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc.

Annexe

NOTE TECHNIQUE COMPLÉMENTAIRE SUR L'APPROCHE RETENUE

L'approche adoptée repose sur le concept de base que la structure du milieu ne peut pas être déterminée a priori. En conséquence, elle s'oriente d'abord vers une compréhension du fonctionnement du système reposant sur des méthodes globales (approche *fonctionnelle*). Les résultats sont ensuite interprétés en terme de structure à partir de la géométrie du milieu, celle-ci étant définie à l'aide de méthodes traditionnelles mises en œuvre parallèlement (approche *structurelle*).

La méthodologie repose sur une stratégie d'étude par étapes comprenant quatre phases (cf. figure 3). Cette démarche est justifiée par l'originalité de la structure et du fonctionnement des karsts. Elle présente l'intérêt de faire appel de façon progressive aux différentes méthodes d'étude de manière à répartir et optimiser les moyens à mettre en œuvre pour exploiter ce type d'aquifères. Chaque étape constitue en quelque sorte une étude de faisabilité qui conditionne l'exécution de la phase suivante.

⇒ Phase 1 : identification du système

Cette phase constitue une étape préliminaire dont le but est d'étudier le fonctionnement d'un système karstique à partir de l'étude du transfert d'énergie. Elle s'appuie sur différentes méthodes dont certaines, spécifiques à l'hydrogéologie karstique, reposent principalement sur le traitement des chroniques de débits aux exutoires du système :

- calcul du bilan hydrologique (cohérence entre les flux d'entrée et de sortie du système),
- analyse des débits classés (description du régime d'écoulement de l'exutoire),
- analyse des courbes de récession (classification du système et évaluation du volume dynamique),

- analyse spectrale et corrélatoire afin de déterminer l'importance des fonctions transmissives (drainage) et capacitives (réserves) au travers de l'inertie du système.

Les méthodes plus traditionnelles (études géologiques, structurales, lithologiques et éventuellement géomorphologiques) ainsi que la reconnaissance directe de réseaux karstiques (explorations spéléologiques) sont engagées conjointement durant cette phase. Les informations qu'elles fournissent sur la structure du milieu doivent être comparées à son fonctionnement afin de mieux appréhender et valider le comportement hydraulique des systèmes.

⇒ Phase 2 : caractérisation du système

Cette phase renseigne sur les caractéristiques de la zone noyée à partir de l'étude du transfert de masse. Elle fait principalement appel à deux méthodes qui, dans la mesure où elles reposent sur une approche fonctionnelle, sont un prolongement de la phase de caractérisation :

- expériences de traçages (méthode quantitative),
- hydrogéochimie (modalités du parcours de l'eau au travers de l'aquifère).

⇒ Phase 3 : démonstration de la ressource

Cette phase a pour objectif d'étudier le comportement de la zone noyée sous l'influence d'une sollicitation artificielle (pompage) afin d'évaluer la ressource exploitable et sa disponibilité.

Elle fait appel aux techniques des pompes d'essai qui, dans le cas du karst, peuvent être réalisés en différents points : exutoires, regards naturels (gouffres) ou forages.

⇒ Phase 4 : évaluation de l'exploitation

Cette phase permet d'appréhender le fonctionnement de l'ensemble du système en condition d'exploitation afin d'optimiser la gestion de la ressource. Elle s'appuie sur un suivi de longue durée pouvant déboucher sur la mise en œuvre de simulateurs hydrodynamiques des écoulements (modèle mathématique). Elle permet de définir en

fonction des contraintes locales (exploitations déjà présentes, environnement industriel et agricole) et des besoins (AEP, irrigation, soutien d'étiage), le mode d'exploitation optimal (exploitation ou surexploitation temporaire) tout en précisant la vulnérabilité de l'aquifère et les mesures de protection à prendre.

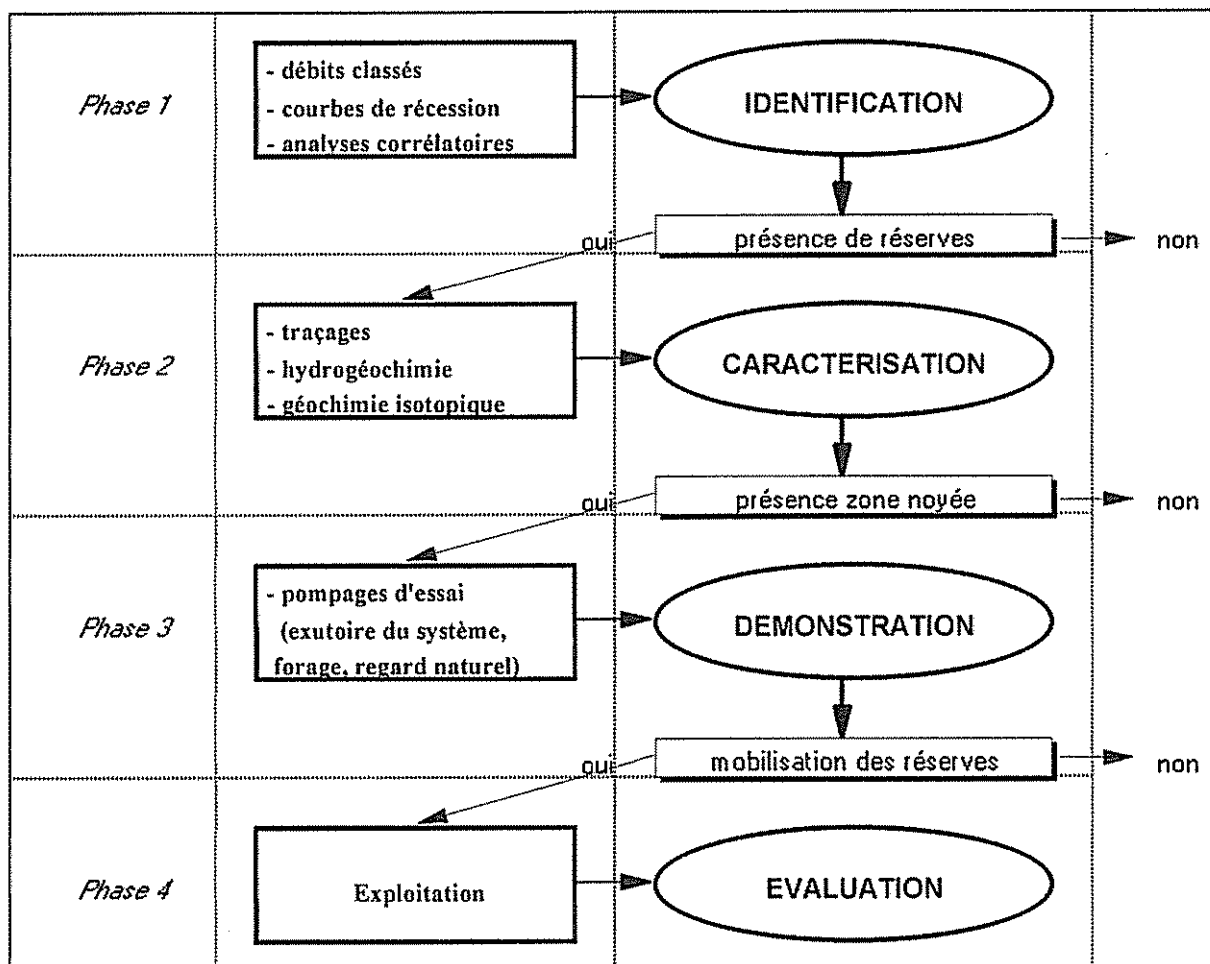


Tableau 1 - Enchaînement des différentes étapes d'étude des aquifères karstiques

Etapes	Méthodes mises en oeuvre	Données nécessaires	Résultats fournis
Géométrie	Géologie	Bibliographie	Géométrie de l'aquifère
	Analyse litho-stratigraphique	Relevés de terrain	
	Analyse structurale	Photo interprétation	
Identification	Débits classés	Chroniques de débits	Fonctionnement exutoire
	Courbes de récession	à l'exutoire	Volume dynamique
	Analyse corrélatoire et spectrale	Débits et précipitations	Fonctionnement système
Caractérisation	Traçages (quantitatifs)	Concentrations, débits	Fonctionnement système
	Hydrogéochimie	Analyses chimiques	Transferts de masse
	Géochimie isotopique	Analyses isotopiques	Temps de séjour des eaux
Démonstration	Pompage à l'exutoire	Rabattements	Structure et fonctionnement de la zone noyée
	Pompage sur regard naturel	Débits pompés	
	Pompage sur forage	Débits aux exutoires	
Evaluation	Modélisation	Suivi de l'exploitation Suivi des rabattements Pluviométrie - recharge	Mode d'exploitation

Tableau 2 - Détail des méthodes mises en oeuvre pour l'étude des systèmes karstiques