



HYDROGEOLOGIE ET KARST au travers des travaux de Michel Lepiller

**Journées techniques du Comité Français
de l'Association Internationale des hydrogéologues**

16-17 mai 2008

Ecole Polytechnique, Université d'Orléans





Hydrogéologie et Karst au travers des travaux de Michel Lepiller

**Journées techniques du Comité Français
de l'Association Internationale des hydrogéologues**

16-17 mai 2008

Ecole Polytechnique, Université d'Orléans

Secrétaire du colloque

Nevila JOZJA

Comité d'organisation

ALBERIC Patrick	Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO)
BARAN Nicole	BRGM, secrétaire adjointe CFH-AIH
BATTU Julie	Etudiante de Polytech'Orléans
BINET Stéphane	Polytech'Orléans/ISTO
BOUCHERY Heidi	Etudiante de Polytech'Orléans
CHERY Laurence	BRGM, secrétaire CFH-AIH
CHIRON Claudie	Etudiante de Polytech'Orléans
DEFARGE Christian	Polytech'Orléans/ISTO
GROENINCK Denis	Orléans Val de Loire Technopole, pôle DREAM
JOZJA Nevila	Environnement, Traçage et Détection, Polytech'Orléans
LECLERC Bruno	Géo-Hyd, Trésorier du CFH-AIH
LELONG François	Ancien Professeur de l'Université d'Orléans
MAGET Philippe	Secrétaire adjoint CFH-AIH
MARCHET Pierre	Agence de l'Eau Adour-Garonne
MONDAIN Paul-Henri	Calligée
MUET Philippe	Ginger Environnement & Infrastructures
ROUX Jean-Claude	Président du CFH-AIH

Parrainages :

Lyonnais-des-eaux
EDF
BRGM
Agence de l'Eau Loire-Bretagne
Orléans Val de Loire Technopole

Actes des journées techniques du Comité Français de l'Association Internationale des hydrogéologues « Hydrogéologie et Karst au travers des travaux de Michel Lepiller », 16-17 mai 2008. ISBN 978-2-9530816-1-9, ISSN 1958-5365

Hydrogéologie et Karst au travers des travaux de Michel Lepiller

Michel Lepiller, hydrogéologue, enseignant-chercheur à l'Université d'Orléans (Polytech'Orléans et Institut des Sciences de la Terre d'Orléans), décédé accidentellement le 30 octobre 2006, a consacré l'essentiel de ses travaux à l'étude des écoulements des eaux souterraines dans les milieux karstiques, en prêtant une attention particulière aux problèmes de dégradation de la qualité de la ressource.

Ses terrains de prédilection furent d'abord le Massif des Bauges, dont le Semnoz où il a effectué sa thèse de 3^{ème} cycle et a accumulé plus de 25 ans de mesures et d'observations, puis la Région Centre, avec notamment le système du Val d'Orléans et l'aquifère crayeux du Gâtinais, ainsi que plus récemment le Causse de Sauveterre et la Nouvelle-Calédonie.

Dans ces régions, il a dirigé plusieurs thèses de spécialité en hydrogéologie et hydrogéochimie. Spécialiste des traçages, il a formé de nombreuses générations d'étudiants à ces méthodes lors d'écoles de terrain dans le Gâtinais et les Grands Causses.

Par ailleurs, Michel Lepiller fut un membre fidèle, participatif et très actif du Comité Français d'Hydrogéologie de l'AIH, organisant notamment plusieurs visites techniques très instructives sur le terrain.

En son hommage, et au travers de ses travaux, pour certains inachevés, ses collègues, collaborateurs, anciens étudiants, et tous ses amis, ont tenu à lui consacrer ce colloque afin de mieux faire connaître ses contributions à la connaissance des milieux karstiques.

Cette journée est l'occasion, non seulement d'honorer sa mémoire, mais aussi de présenter les connaissances acquises à ce jour sur ces terrains, et de poser les questions fondamentales sur les nécessaires développements de la recherche scientifique et technique sur l'hydrogéologie des milieux carbonatés fissurés, ainsi que sur l'impact de l'Homme sur le Climat et le fonctionnement du milieu naturel.

La diffusion des connaissances acquises est traitée en évoquant les principaux systèmes et sujets sur lesquels Michel Lepiller a travaillé. Un temps est réservé aux débats pour dégager des axes d'études et de recherches complémentaires. La journée du 17 mai est consacrée à une visite technique dans le Val d'Orléans.



Hydrogéologie et Karst au travers des travaux de Michel Lepiller

16-17 mai 2008

Ecole Polytechnique, Université d'Orléans

Programme de la Journée technique

- 08h15 **Accueil des participants**
- 09h00 **Ouverture du Colloque**
Représentants officiels : *Université d'Orléans, Polytech'Orléans, ISTO*
Jean-Claude ROUX, *Président du Comité français de l'AIH*
- 09h30 **Conférences introductives** *Président de séance : Jean-Claude ROUX*
- 09h30-09h50 Le milieu karstique : études et perspectives, identification et caractérisation de la ressource.
Michel BAKALOWICZ, *Hydrosciences CNRS, Montpellier.*
- 09h50-10h10 Une gestion active des systèmes karstiques, pourquoi ? Exemples et perspectives.
Nathalie DORFLIGER, *BRGM.*
- 10h10-10h30 Stratégies de protection des ressources en eau dans le karst : où en est-on ?
Pierre MARCHET, *Agence de l'eau Adour-Garonne & Laurent CADILHAC, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse.*
- 10h30-10h50 Caractérisation des propriétés des systèmes karstiques d'après l'étude des écoulements.
Alain MANGIN, *CNRS, Moulis.*
- 10h50-11h15 *Pause café*
- 11h15 **Session 1 - Hydrogéologie et karst dans des contextes bioclimatiques et structuraux variés. Monographies sur les secteurs d'étude de Michel Lepiller**
Présidents de séance : Valérie PLAGNES (Université Paris VI) et Philippe CROCHET (ANTEA)
- Alpes - Massifs des Bornes et des Bauges (Haute-Savoie)*
- 11h15-11h25 Contexte stratigraphique, lithologique et structural des massifs subalpins des Bornes et des Bauges : Localisation des aquifères et circulation des eaux souterraines. Jean-Paul RAMPNOUX, *EDYTEM, Université de Savoie.*
- 11h25-11h45 Hydrogéologie karstique du massif des Bauges : état des connaissances et contributions de M. Lepiller aux recherches fondamentales et appliquées.
Fabien HOBLEA, *EDYTEM, Université de Savoie.*

11h45-12h05 Etude des tendances à moyen terme de l'exportation carbonatée : relation avec les variations climatiques (système karstique de Bange-l'Eau-Morte). Valorisation des travaux de terrain, suivi de chroniques.

Thibault MATHEVET, *EDF Grenoble* & Nevila JOZJA, *ETD*.

Béarn, Pyrénées

12h05-12h25 Géométrie et fonctionnement de quatre aquifères carbonatés des chaînons béarnais (Pyrénées Atlantiques). Joëlle RISS, *Université de Bordeaux*.

12h30 -14h00

Déjeuner

14h00

Val d'Orléans, un système hydrogéologique original, à haute potentialité et très forte vulnérabilité

14h00-14h20 Fonctionnement du système karstique du Val d'Orléans.

François LELONG, *Ancien professeur de l'Université d'Orléans*.

14h20-14h40 Les trois pertes-émergences (ou inversacs) du domaine de la Source (Loiret).

Patrick ALBERIC, *ISTO*.

14h40-15h00 Protection des captages du val d'Orléans : action dans le périmètre.

Dominique CHIGOT, *Eau et Industrie*.

Gâtinais, terrain d'observation exceptionnel de la naissance et du développement de systèmes karstiques

15h00-15h20 Pollutions diffuses et karst : exemple du système des 3 Fontaines (Loiret).

Nicole BARAN, *BRGM*

15h20-15h40 Étude des limites et du fonctionnement des systèmes hydrogéologiques du Gâtinais par l'utilisation de traceurs fluorescents.

Bruno LECLERC, *Géo-Hyd*.

Causses de Sauveterre

15h40-16h00 Apport des traçages à l'étude hydrogéologique de la partie Ouest du Causse de Sauveterre.

Laurent DANNEVILLE, *Parc Naturel Régional des Grands Causses*.

16h00-16h30

Pause café – séance posters

16h30

Normandie

16h30-16h50 Le système karstique de la craie de Haute Normandie et son fonctionnement hydrologique.

Jean-Paul DUPONT, *Université de Rouen*.

16h50-17h10 Impact des aménagements de bétouilles sur la turbidité des eaux destinées à l'alimentation en eau potable : exemple du forage des Varras (Eure, France).

Mathieu FOURNIER, *Université de Rouen*.

Nouvelle Calédonie

17h10-17h30 Synthèse des travaux sur les îles Loyauté (Nouvelle Calédonie). Problèmes de la gestion de la ressource en eau. François ORANGE, *ISTO-CBM*.

17h30

Session 2 – Traçages artificiels : méthodologie, technique, outils, interprétation

Présidents de séance : Christian DEFARGE (Polytech) et Jean-Pierre FAILLAT (Université de Nîmes)

17h30-17h50 Proposition d'une grille d'évaluation des résultats de traçage (au moyen de traceur fluorescent).

Philippe MUET, *Ginger Environnement* & Paul-Henri MONDAIN, *Calligée*.

17h50-18h10 Importance de la composante analytique dans la fiabilité de l'interprétation d'un traçage.

Nevila JOZJA, *ETD*.

18h15

Interventions de collègues, collaborateurs, étudiants et amis de M. Lepiller sur sa personnalité et sa carrière.

18h15-18h25 François LELONG, *Professeur honoraire, Université d'Orléans*.

18h25-18h35 Joël RODET, *Université de Rouen*.

18h35-18h45 Philippe MUET, *Ginger Environnement* & Paul-Henri MONDAIN, *Calligée*.

18h45-18h55 Vincent BAILLY, *Université de Montpellier*.

19h00-19h45

Présentation du documentaire « Loiret souterrain », réalisé par Philippe BOISMOREAU, Association Spéléo Subaquatique Loiret, avec le support scientifique de Michel LEPILLER.

19h45

Fin de la journée technique



Hydrogéologie et Karst au travers des travaux de Michel Lepiller

16-17 mai 2008

Ecole Polytechnique, Université d'Orléans

Table des Matières

Conférences introductives	Page
Le milieu karstique : études et perspectives, identification et caractérisation de la ressource (Michel BAKALOWICZ, <i>Hydrosciences CNRS, Montpellier</i>)	11
Une gestion active des systèmes karstiques, pourquoi ? Exemples et perspectives. (Nathalie DORFLIGER, <i>BRGM</i>)	29
Stratégies de protection des ressources en eau dans le karst : où en est-on ? (Pierre MARCHET, <i>Agence de l'eau Adour-Garonne & Laurent CADILHAC, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse</i>)	39
Caractérisation des propriétés des systèmes karstiques d'après l'étude des écoulements. (Alain MANGIN, <i>CNRS, Moulis</i>)	47
Session 1 - Hydrogéologie et karst dans des contextes bioclimatiques et structuraux variés. Monographies sur les secteurs d'étude de Michel Lepiller	
<i>Alpes - Massifs des Bornes et des Bauges (Haute-Savoie)</i>	
Contexte stratigraphique, lithologique et structural des massifs subalpins des Bornes et des Bauges : Localisation des aquifères et circulation des eaux souterraines. (Jean-Paul RAMPNOUX, <i>EDYTEM, Université de Savoie</i>)	61
Hydrogéologie karstique du massif des Bauges : état des connaissances et contributions de M. Lepiller aux recherches fondamentales et appliquées. (Fabien HOBLEA, <i>EDYTEM, Université de Savoie</i>)	71
Etude des tendances à moyen terme de l'exportation carbonatée : relation avec les variations climatiques (système karstique de Bange-l'Eau-Morte). Valorisation des travaux de terrain, suivi de chroniques. (Thibault MATHEVET, <i>EDF Grenoble & Nevila JOZJA, ETD</i>)	83
<i>Béarn, Pyrénées</i>	
Géométrie et fonctionnement de quatre aquifères carbonatés des chaînons béarnais (Pyrénées Atlantiques). (Joëlle RISS, <i>Université de Bordeaux</i>)	97

Val d'Orléans, un système hydrogéologique original, à haute potentialité et très forte vulnérabilité

Fonctionnement du système karstique du Val d'Orléans. (François LELONG, *Ancien professeur de l'Université d'Orléans*) 107

Les trois pertes-émergences (ou inversacs) du domaine de la Source (Loiret). (Patrick ALBERIC, *ISTO*) 117

Protection des captages du val d'Orléans : action dans le périmètre. (Dominique CHIGOT, *Eau et Industrie*) 127

Gâtinais, terrain d'observation exceptionnel de la naissance et du développement de systèmes karstiques

Pollutions diffuses et karst : exemple du système des 3 Fontaines (Loiret). (Nicole BARAN, *BRGM*) 139

Étude des limites et du fonctionnement des systèmes hydrogéologiques du Gâtinais par l'utilisation de traceurs fluorescents. (Bruno LECLERC, *Géo-Hyd*) 149

Causses de Sauveterre

Apport des traçages à l'étude hydrogéologique de la partie Ouest du Causse de Sauveterre. (Laurent DANNEVILLE, *Parc Naturel Régional des Grands Causses*). 157

Normandie

Impact des aménagements de béttoires sur la turbidité des eaux destinées à l'alimentation en eau potable : exemple du forage des Varras (Eure, France). (Mathieu FOURNIER, *Université de Rouen*) 169

Nouvelle Calédonie

Synthèse des travaux sur les îles Loyauté (Nouvelle Calédonie). Problèmes de la gestion de la ressource en eau. (François ORANGE, *ISTO-CBM*) 179

Session 2 – Traçages artificiels : méthodologie, technique, outils, interprétation

Proposition d'une grille d'évaluation des résultats de traçage (au moyen de traceur fluorescent). (Philippe MUET, *Ginger Environnement & Paul-Henri MONDAIN Calligée*) 191

Importance de la composante analytique dans la fiabilité de l'interprétation d'un traçage. (Nevila JOZJA, *ETD*) 207

Conférences introductives

Le milieu karstique : études et perspectives, identification et caractérisation de la ressource

Michel Bakalowicz^{(1) (2)}

⁽¹⁾CNRS & IRD, CREEN-ESIB- Riad el Sohl BP 11- 0514 Beyrouth 1107 2050 (Liban)

⁽²⁾HydroSciences, Université Montpellier - 2, c.c. MSE - 34095 Montpellier cedex 5
Michel.Bakalowicz@gmail.com

Résumé

Un point est fait sur l'état des connaissances concernant l'aquifère karstique, quant à sa structure et à son fonctionnement. Les modèles conceptuels résultant de ces connaissances sont présentés, ainsi que les modèles globaux, semi-globaux et distribués mis en œuvre pour représenter l'aquifère karstique et tester certaines hypothèses relatives à son fonctionnement ou à son évolution. Les méthodes d'exploration et d'étude sont très rapidement passées en revues pour rappeler les progrès obtenus. En conclusion, un certain nombre de pistes d'investigation sont suggérées en fonction des avancées récentes.

I. INTRODUCTION

Les civilisations méditerranéennes nous apprennent qu'elles ont su très tôt s'organiser autour de trois types de ressources en eau, les fleuves, les nappes phréatiques alluviales et les grandes sources karstiques. Pour chacune, l'homme a développé des techniques spécifiques d'exploitation et de gestion (32, 120). Égyptiens et Babyloniens ont inventé les chaussées ou barrages alimentant des réseaux de canaux. Perses et Assyriens sont à l'origine des qanats, qui se remarquent par les alignements de tas de déblais, et des chadoufs, les puits à balancier. C'est en Mésopotamie, où co-existent ces deux modes d'exploitation de l'eau que la science hydraulique fut inventée, comme le montre le Livre de l'agriculture nabatéenne de Qûâtâmâ (52). Les civilisations méditerranéennes nous ont aussi apporté les techniques nécessaires à l'exploitation d'une ressource en eau à la fois abondante et mystérieuse, celle des grandes sources karstiques (23). Ressource abondante comme en atteste les centaines de sources déchargeant plus de 2 m³/s en moyenne, dont nous ne retiendrons que les plus remarquables comme Fontaine de Vaucluse (France, 21.8 m³/s) (129), et les sources de Trebinjica (Bosnie Herzégovine, 80 m³/s) (109), Dumanli (Turquie, 50 m³/s) (12), Ljubljana (Slovénie, 39 m³/s) (109), Khabour Ras el Aïn (Syrie, 38.7 m³/s) (76, 53), Stella (Frioul, Italie, 36.6 m³/s) (144, 143), Ombla (Dubrovnik, Croatie, 33.8 m³/s) (109), Pivsko Oko (Yougoslavie, 25.5 m³/s) (109), Buna (Bosnie Herzégovine, 23.7 m³/s) (109), Kirkgözler (Turquie, 22 m³/s) (109), Aïn ez Zarqa, source de l'Oronte (Liban, 12.9 m³/s) , El Sinn (Syrie, 10.5 m³/s) (34, 53) , Fighé (Syrie, 7.5 m³/s) (75, 53) qui alimente en eau la vaste agglomération de Damas, Naraidha (Macédoine, Grèce, 10 m³/s) ou l'Almyros d'Héraklion (Crète, Grèce, 6.55 m³/s). Ressource mystérieuse surtout qui a fait de ces grandes sources des lieux mythiques de culte, au même titre que le Nil. Car comment expliquer qu'au plus fort de la longue sécheresse estivale méditerranéenne un fleuve puisse continuer à sortir de terre ?

Les sources karstiques et leurs rivières souterraines ont ensuite été plus récemment l'objet d'attentions particulières d'explorateurs aux motivations variées. Parmi eux Martel (101) a été l'un des premiers à conceptualiser les écoulements souterrains des régions calcaires. Avec lui sont apparues les polémiques sur la nature du milieu souterrain (aquifère ou simple réseau de

conduits laissant passer rapidement des eaux venues de la surface ?) et des sorties d'eau (véritable source ou simple exutoire aux dénominations variées, émergence, résurgence, exurgence, cherchant à prendre en compte certaines particularités de l'aquifère ?). Pendant longtemps considéré exclusivement comme un paysage, le karst est maintenant reconnu par tous d'abord comme un aquifère, dont la mise en valeur des ressources est indispensable à bien des régions à travers le monde. Au cours du demi siècle écoulé, les hydrogéologues français ont joué un rôle essentiel dans l'évolution des connaissances sur ces aquifères complexes, dans la proposition de concepts nouveaux et dans le développement de méthodes d'étude adaptées à ce milieu complexe et varié (91, 92, 132, 13, 24, 86, 88, 117, 87, 99, 127, 4, 71, 17, 57, 5, 18, 60).

Nous allons faire un tour d'horizon afin de présenter les progrès réalisés, c'est-à-dire les acquis, et les progrès nécessaires à faire dans les années qui viennent, c'est-à-dire des pistes pour les jeunes chercheurs qui s'intéressent au sujet. Seront successivement abordées les connaissances sur le milieu et les méthodes d'exploration et d'étude, y compris l'acquisition des données et les méthodes de leur traitement en vue de leur interprétation.

II. LES PROGRES REALISES

II.1. La connaissance du milieu karstique

II.1.1. Les modèles conceptuels de représentation de l'aquifère karstique

À l'origine deux modèles conceptuels simples se sont opposés pour représenter les écoulements souterrains dans le karst. L'un était hérité des connaissances spéléologiques et considérait uniquement le réseau de grottes comme une simple rivière souterraine ; c'est le fameux « modèle » Bramabiau, érigé en référence mondiale comme « acte de naissance de la spéléologie » (101). L'autre (47) considère que l'aquifère karstique est constitué d'un réseau de fractures et de fissures de différents ordres conduisant les eaux souterraines vers le point bas de l'ensemble carbonaté. Ce dernier modèle présente l'intérêt de pouvoir s'appuyer sur les outils classiques de l'hydrogéologie, forages, essais de pompage, cartes piézométriques et modèles distribués, grâce entre autres à l'hypothèse de continuité hydraulique de la zone noyée.

Grâce à une approche du même type que celle de l'hydrologie de surface, une synthèse de ces deux modèles a permis de passer d'un modèle conceptuel simple, apparenté aux aquifères fissurés, à un aquifère à hétérogénéité organisée par les écoulements, apparenté à un milieu à perméabilités multiples, affecté de discontinuités majeures (91-93, 97). L'aquifère karstique est maintenant admis comme constituant une famille très complexe. Il faut considérer cette famille d'aquifères selon deux angles d'attaque différents et complémentaires du fait que les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère karstique, différentes de tous les autres, sont en permanence et relativement rapidement transformées (14, 99, 17, 18). Il faut distinguer :

a) *Deux pôles extrêmes de structure interne :*

- Le pôle des aquifères non karstifiés, fissuré et/ou poreux, non modifiés par les écoulements souterrains.
- Le pôle des aquifères totalement karstifiés, dans lesquels les écoulements souterrains ont créé un réseau plus ou moins complexe de drainage, que l'on peut illustrer par un plan de réseau spéléologique.

b) *Deux pôles extrêmes de fonctionnement :*

- Un fonctionnement de type aquifère poreux ou fissuré, caractérisé par de faibles variations temporelles de ses caractéristiques, aussi bien localement qu'à ses exutoires, et

par une apparence de continuité hydraulique figurée par des variations piézométriques spatiales faibles.

- Un fonctionnement karstique typique, caractérisé par des variations temporelles de grande amplitude, aussi bien localement qu'à ses exutoires, et des variations piézométriques considérables.

Il ne peut pas y avoir superposition absolue de ces deux visions, précisément parce que l'évolution de l'aquifère karstique est totalement liée à celle des paysages et donc qu'il garde l'empreinte de toutes les transformations subies (14). Par le jeu des changements de niveau de base, c'est-à-dire du niveau d'émergence des eaux souterraines, un aquifère carbonaté qui présente une karstification très poussée, polyphasée, peut se comporter naturellement comme un aquifère sans aucune karstification.

Il en résulte une structure spatiale très complexe n'autorisant pas à considérer deux zones superposées, non saturée et saturée, dans lesquelles les lois d'écoulement seraient relativement simple comme c'est le cas dans les milieux poreux. En effet, il existe très souvent dans la partie supérieure, au moins localement et/ou temporairement une zone saturée perchée, l'épikarst (91-93, 152, 16). Ainsi il convient de considérer une zone d'infiltration, et non plus une zone non saturée, dans laquelle existent des modalités très variées de conditions d'écoulement (écoulement monophasique de type ruissellement et écoulement diphasique typique du milieu poreux) (15). La zone saturée ou karst noyé est également le siège d'écoulements variés : en conduites en charge ou à surface libre, ou en fissures. Certaines de ces modalités d'écoulement peuvent être très rapides et non dispersives, considérées parfois comme écoulement en piston ou en conduit (*conduit flow*), alors que d'autres sont très lentes et fortement dispersives, caractérisées d'écoulement diffus (*diffuse flow*) (140, 7). Ces dernières sont attribuées, selon les auteurs, à des cavités karstiques à connections hydrauliques médiocres ou à des blocs à faible perméabilité (Figure 1).

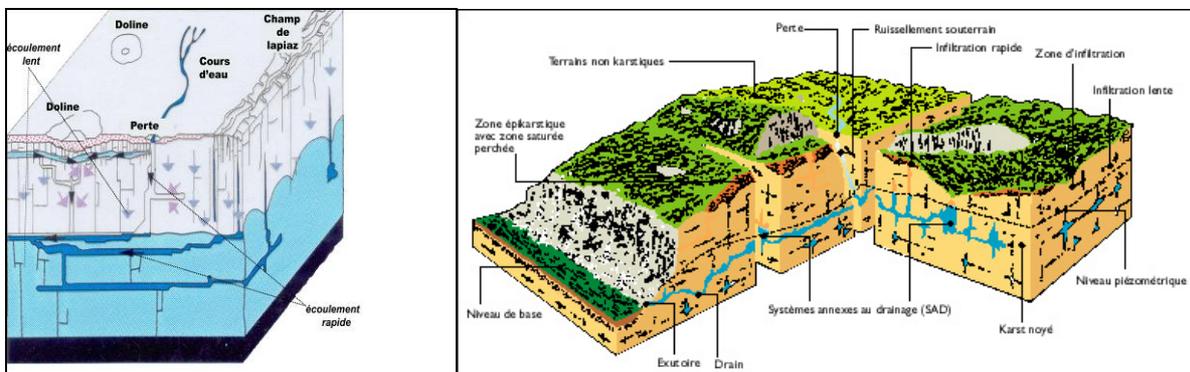


Figure 1. Modèles conceptuels de l'aquifère karstique. À gauche, milieu à double perméabilité avec continuité hydraulique et stockage dans les blocs matriciels d'après (42). À droite, milieu à discontinuités hydrauliques dans la zone noyée, d'après (93).

En se basant sur les caractéristiques de l'hydrogramme, déduites de la courbe de récession, il est possible de classer les aquifères karstiques en prenant en compte les modalités d'infiltration et la capacité de stockage et de renouvellement de la zone noyée (93, 99, 53).

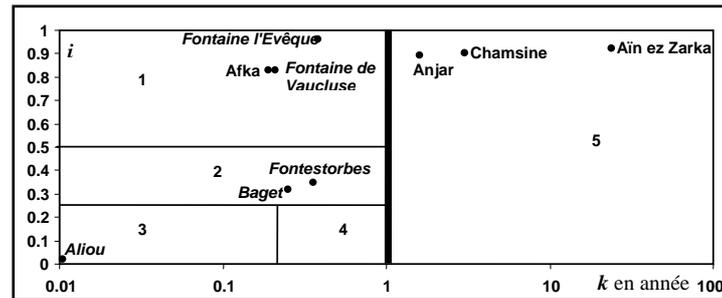


Figure 2. Classification d'aquifères karstiques de France et du Proche Orient, en fonction des caractéristiques de leur infiltration, i , et de leur zone noyée k , temps de séjour moyen de l'eau souterraine (53).

Cette classification (Figure 2) distingue des aquifères karstiques fonctionnels (domaines 1 à 4), à organisation de drainage plus ou moins complexe et plus ou moins développée. Le domaine 5 est celui des systèmes karstiques possédant une zone noyée profonde à karstification multiphasée très développée, partiellement ou totalement captive. Ce sont des systèmes karstiques non fonctionnels, dans lesquels les temps de séjour sont pluriannuels à séculaires. L'existence de réseaux de paléo-conduits fait qu'ils peuvent être localement fonctionnels.

II.1.2. Phases de karstification, structures polyphasées et aquifères littoraux

L'histoire géologique des continents montre que toutes les formations carbonatées sont toutes plus ou moins karstifiées, du fait de la vitesse rapide des processus en jeu (44, 79, 45). Cette généralisation de la « vision » karstique des aquifères carbonatés concerne notamment la craie pour laquelle, il y a encore peu de temps, les phénomènes karstiques n'étaient considérés que comme des accidents locaux sans effet hydrogéologique. Dans un papier quasiment prophétique, Lepiller avait combattu cette conception non karstique de l'aquifère de la craie (87). Les travaux approfondis plus récents (135, 98, 102, 65, 103, 104) démontrent la validité de cette généralisation.

Parmi les avancées récentes, il faut insister sur les aquifères littoraux, et tout spécialement ceux du pourtour de la Méditerranée, car ils tiennent une place importante dans le développement économique de pays soumis à une forte croissance. Ces progrès tiennent d'abord à une révolution dans les connaissances géologiques régionales : la crise messinienne de salinité comme facteur de transformation des paysages à la fin du Miocène et au début du Pliocène, et comme phase de karstification majeure (37, 136, 28, 29, 8, 110). C'est à cette phase qu'il faut attribuer l'existence de karst profond, souvent à grande capacité de stockage, même loin des côtes actuelles, comme ceux de Fontaine de Vaucluse, d'Ardèche ou de la source du Lez. C'est aussi à cet événement, plutôt qu'aux variations eustatiques d'origine glaciaire, qu'il faut attribuer les karstifications littorales qui provoquent naturellement les échanges entre les eaux souterraines douces et les eaux marines. Ces échanges se traduisent soit par des intrusions marines se manifestant par des sources saumâtres (30, 3, 4, 8), soit par des sources sous-marines d'eau douce ou saumâtre (116, 128, 35, 2, 21, 60, 108). Les études détaillées de certaines de ces sources (128, 43, 57, 51, 58, 61) commencent à révéler à la fois les mécanismes en jeu et les structures karstiques responsables de ces phénomènes parfois spectaculaires. L'enjeu est de taille : depuis longtemps ces sources sont supposées délivrer directement en mer des débits considérables, par exemple 10^9 m^3 par an pour les seules côtes libanaises (138, 10, 2), qui en font des enjeux de développement et attisent l'intérêt d'entreprises à la recherche de nouveaux marchés porteurs (voir Nymphéa Water, du groupe Géocéan <http://www.nympheawater.com>). Les travaux en cours (21, 22, 59), dans le

prolongement de ceux de Fleury (57, 60), démontrent que les valeurs de débit publiées pour toutes les sources sous-marines sont très largement surestimées d'un facteur 5 à 10. Comme, de plus, ces sources présentent le plus souvent un fonctionnement typiquement karstique, c'est-à-dire à forte variabilité saisonnière de leur décharge et de leur composition chimique aggravée par l'intrusion marine, ces sources apparaissent de plus en plus comme une ressource qui ne peut pas être directement exploitée. Quant à l'exploitation de ces aquifères par des forages à terre, c'est alors une gageure de recouper une zone productive dans laquelle les prélèvements ne favorisent pas l'intrusion marine.

II.1.3. Les modèles

Le dernier grand domaine des progrès récents des connaissances est celui de la modélisation. L'originalité du karst a contraint à des approches variées, couvrant non seulement la modélisation du fonctionnement de l'aquifère, mais aussi la modélisation de sa structure. En effet, la spatialisation des modèles de fonctionnement ne peut pas, le plus souvent, s'appuyer sur des données spatiales suffisamment nombreuses pour disposer d'une distribution réaliste des paramètres hydrodynamiques, même en deux dimensions.

Trois démarches de modélisation très différentes sont mises en œuvre : i) l'ajustement des hydrogrammes de sources à des lois simples ou composites ; ii) le calage de modèles à réservoirs en cascade ou en série, permettant la simulation des hydrogrammes ; et iii) l'utilisation de modèles numériques distribués. La première démarche permet de caractériser le système (142, 30) ou certains des sous-systèmes, infiltration et zone noyée, ou des modalités d'écoulement qui les parcourent (63, 46, 92, 122). Elle peut être complétée par une analyse statistique globale, consistant à analyser les séries chronologiques de débit à court, moyen et long termes, en les croisant éventuellement avec celles d'une variable supposée faire fonction d'entrée, soit des débits, par exemple d'une perte, soit des précipitations, intégrant le cas échéant un modèle physique de fonte de neige (95, 94, 96, 121, 49, 83, 82, 81, 103).

Cependant, pour certains (50), la simulation numérique conduit à s'interroger sur la signification des résultats de ces méthodes d'analyses statistiques. En effet, la forme des hydrogrammes est déterminée par plusieurs facteurs dont les plus importants semblent être i) le contraste entre écoulement lent et écoulement rapide, et leurs parts respectives ; ii) la répartition et la fréquence des événements hydrologiques au cours du cycle ; et iii) le rapport entre l'infiltration dispersée et l'infiltration concentrée.

C'est pourquoi la simulation numérique est un outil indispensable d'analyse et de test des hypothèses résultant de l'analyse des hydrogrammes. Toutefois, il se pose le problème délicat de représentation spatiale du réseau karstique. Pour y échapper, la seconde démarche de modélisation adopte une approche de type boîte noire ou grise, en représentant le système par des réservoirs, en cascade et/ou en parallèle, liés entre eux par des fonctions de production ou de transfert simples. Cette voie, ouverte dans les années 70 (27, 74), connaît un regain d'intérêt d'abord grâce au modèle Gardenia développé au BRGM (147), et au simulateur VENSIM (57, 62), jusque-là utilisé pour simuler les écoulements de surface (70). Cette approche complète bien celle proposant, à partir de l'analyse de séries chronologiques de débits, croisés avec celles des précipitations, une modélisation inverse, pouvant s'appuyer sur des chroniques de traceurs naturels (125, 124, 126). Ainsi peuvent être approchées les parts relatives des différentes modalités d'écoulement au sein du système, tout en prenant en compte des non linéarités. Par exemple, dans le cas des systèmes karstiques du Larzac, cette modélisation est contrainte de prendre en compte des non linéarités pour simuler le fonctionnement de certains des systèmes (126), qui traduisent l'apparition de courts-circuits entre la surface, inondée par le débordement d'un épikarst ayant dépassé sa capacité d'absorption, et la zone noyée, lors de longs épisodes de fortes précipitations.

Quant aux modèles distribués, les modélisateurs s'appuient sur une représentation du milieu karstique soit équivalente, fictive, soit simulée. L'approche par le recours à des paramètres équivalents a conduit, à l'origine, à une représentation irréaliste de l'aquifère. Par exemple, le fonctionnement du système de Vaucluse a été approché par l'un des premiers modèles maillés, destiné à simuler l'hydrogramme de la source (31). Le calage des paramètres contraignit les auteurs à modéliser une zone de drainage large de plusieurs kilomètres. L'introduction de modèles à double ou triple porosité, ou perméabilité selon les cas, a considérablement rapproché les caractéristiques des modèles de la réalité (113, 114, 145, 153, 38, 137). Cependant, les réseaux de drainage pris en compte sont toujours bien loin de la réalité, qui reste insaisissable.

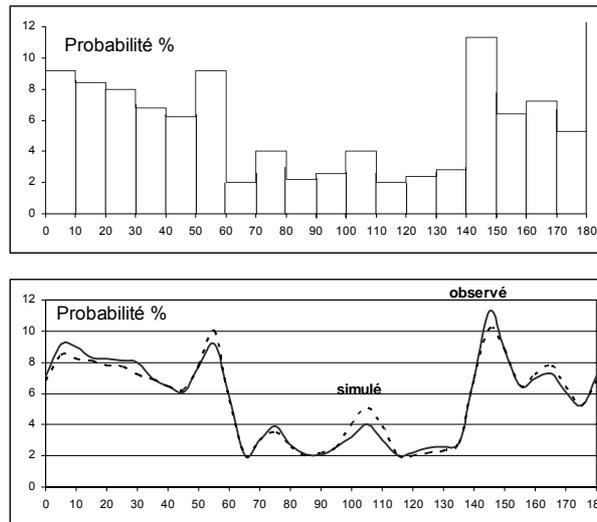


Figure 3. Distribution de la probabilité d'existence d'un conduit karstique selon les directions de l'espace. La distribution simulée est déduite de la détermination des « plans de drainage » à partir de l'analyse microstructurale. La distribution observée est fournie par l'analyse du plan du réseau spéléologique du massif étudié (55).

C'est pourquoi certains ont cherché à simuler ces réseaux karstiques par des approches notablement différentes. La première démarche a consisté à supposer que le réseau de drainage est nécessairement adapté au réseau de fracturation du magasin carbonaté. L'étude détaillée de la distribution des fractures et des failles conduit à identifier des zones de drainage supposées, ainsi que leur ordre d'appartenance (77, 132, 68, 133, 139). Cette approche a été critiquée par Eraso (55, 54, 19) qui, partant de l'hypothèse de Arthaud et Choukroune (6), considère que seules les fractures en distension peuvent laisser circuler l'eau souterraine. Eraso a ainsi montré qu'il est possible de déterminer les « plans de drainage » les plus probables, dans lesquels se mettent en place les conduits. Malheureusement cette démarche reste encore peu connue, peut-être parce qu'elle exige l'acquisition de données nombreuses fournies par une analyse microtectonique détaillée, dont la mise en œuvre n'est pas toujours évidente. Les réseaux de fractures peuvent aussi être générés par simulation pour être ensuite soumis à un écoulement, par exemple provoqué par un pompage (71, 72).

Les progrès les plus intéressants ont certainement été accomplis dans le domaine de la simulation de la genèse et de l'évolution de conduits karstiques (44, 45). Ces modèles couplant écoulement et réactions chimiques de dissolution de la roche carbonatée n'en sont encore qu'à leurs balbutiements, si bien qu'il n'est pas encore question de simuler le réseau de drainage d'un ensemble karstique. Mais ces simulations montrent que les ordres de grandeur de durée pour le développement d'un réseau de drainage bien organisé sont de l'ordre de

10.000 à 50.000 ans, c'est-à-dire comparables à celui tiré d'observations de terrain ou de calcul de bilans de dissolution (14).

II.2. Les méthodes d'exploration et d'étude de l'aquifère karstique

L'approche du fonctionnement et de la structure de l'aquifère karstique s'appuie nécessairement sur un large éventail de méthodes d'exploration et d'analyse. Selon les cas, elles s'appliquent soit à l'échelle locale, soit à celle du système dans son ensemble. Il faut distinguer entre les méthodes qui ont pour but de révéler la structure karstique du milieu et celles analysant le fonctionnement hydrologique du système.

II.2.1. La reconnaissance de la structure du milieu

Toutes les méthodes sont appliquées à l'échelle locale, c'est-à-dire sur des points ou de petites parties du système. Certaines sont des classiques de la reconnaissance géologique ou hydrogéologique. Ce sont les forages et la géophysique. Les forages révèlent les zones karstifiées soit directement par le carottage (Figure 4), soit par la mesure en continu de l'avancement de l'outil ou de sa pression. Ils peuvent mettre en évidence des vides de très petites dimensions ; mais leur développement spatial ne peut être appréhendé que par une multiplication coûteuse des points d'observations, rarement possible dans le cadre d'une étude hydrogéologique. Les méthodes de diagraphies en forage sont nombreuses, mais presque uniquement utilisées par les pétroliers ; elles ne présentent d'intérêt pour le karst que si le nombre de forages explorés est suffisant par rapport à la forte hétérogénéité du milieu. Dans tous les cas, une imagerie 3D peut être tentée (80).



Figure 4. Carottes prélevée dans un aquifère karstique non fonctionnel, sous un gisement de lignite occupant le fond d'un graben miocène de l'est de la Turquie. A gauche, cavité tapissée de calcite déposée en milieu noyé, héritée d'une phase de karstification miocène. À droite, sédiments intrakarstiques typiques et cavités ouvertes.

La géophysique peut dans certains cas aider à révéler l'existence de formes karstiques souterraines, à condition qu'elles offrent un contraste suffisant, c'est-à-dire qu'elles soient de dimensions assez grandes pour fournir une réponse interprétable (106, 26, 33, 40, 105, 1, 146, 149). Les panneaux électriques et le radar géologique (Figure 5) sont deux techniques remarquablement efficaces pour décrire l'épikarst et la zone d'infiltration sous-jacente (1) ; ces techniques peuvent entre autres être mises en œuvre pour la caractérisation de la vulnérabilité de sites à la pollution. Malheureusement, la profondeur d'investigation ne dépasse pas 50 m, ce qui est en général insuffisant pour révéler les conduits et cavités concernés par les écoulements souterrains, intéressants à recouper par forage. Ces méthodes sont pour le moment presque exclusivement du domaine des reconnaissances géotechniques.

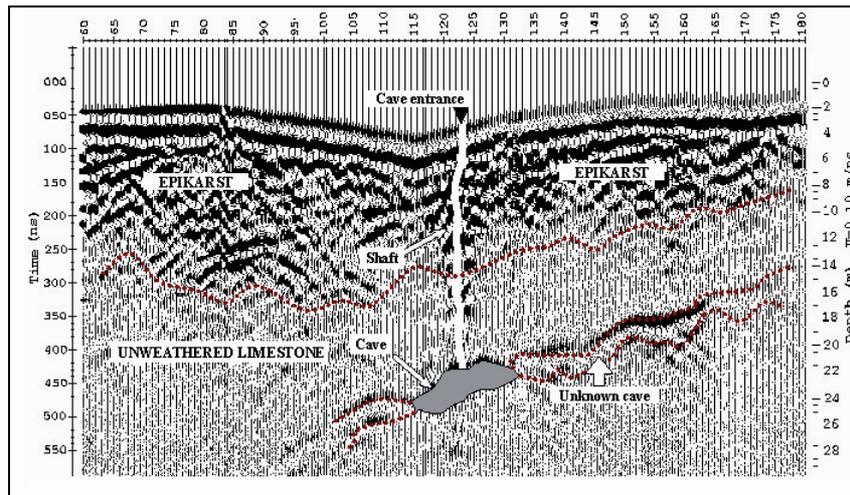


Figure 5. Profil radar obtenu sur le causse de l'Hortus (Hérault), montrant le développement en profondeur de l'épikarst et révélant la grotte, connue, et une grotte inconnue de petites dimensions à environ 25 m sous la surface (1).

La résonance magnétique protonique (RMP ou en anglais magnetic resonance sounding, MRS) est une méthode géophysique de développement récent (85, 150, 151) qui est la seule à révéler l'eau souterraine, alors que toutes les autres révèlent des modifications de nature physique, dont les cavités. L'application au karst n'en est encore qu'à ses débuts. Les résultats, bien qu'intéressants, ne sont pas très encourageants, car la profondeur d'investigation reste limitée à moins de 50 m et le rapport signal/bruit est très faible.

En fait la reconnaissance du milieu à l'échelle d'un massif carbonaté reste encore le domaine presque exclusif de l'exploration spéléologique. L'exploration des réseaux karstiques a fait de façon générale progresser surtout les connaissances sur l'organisation des vides karstiques, une fois que ceux-ci ont été abandonnés par les écoulements souterrains par abaissement de leur niveau de base (voir par exemple le site <http://www.speleogenesis.info/index.php>). Mais l'hydrogéologie est plus concernée par la reconnaissance des réseaux noyés, domaine dans lequel les importants progrès techniques faits en plongée souterraine ont conduit à des découvertes et des observations très intéressantes. L'un des plus remarquables résultats est certainement celui concernant le karst littoral du Yucatan (141) (<http://www.caves.org/project/qrss/qrss.htm>).

II.3. Les méthodes d'étude du fonctionnement et d'analyse des données

De manière générale, les principaux progrès récents sont liés à l'acquisition de données, grâce à des capteurs performants et des chaînes d'acquisition fiables, économes en énergie et à grande capacité de stockage. Ce matériel est particulièrement bien adapté aux études hydrogéologiques en milieu karstique, soumis à une forte variabilité qui exige des mesures fréquentes dans le temps et l'espace. Nous sommes ainsi passés de mesures ponctuelles ou à pas de temps relativement large à des chroniques quasi continues, non seulement de débit et de piézométrie en forage et en cavités naturelles, mais aussi de conductivité, de température, de pH, O₂ dissous, turbidité. L'abondance des données ainsi acquises, d'une part avec le grand nombre de traceurs chimiques et isotopiques disponibles, d'autre part avec les chroniques à pas de temps court, a poussé à rechercher des méthodes d'aide à l'interprétation des données, permettant des traitements variées, de plus en plus complexes, capables de prendre en compte des jeux complexes de données temporelles et/ou spatiales (67, 83, 82, 3, 126, 81, 123, 103, 148, 64). Les aquifères karstiques peuvent maintenant être « mis sur

écoute » presque en permanence, ce qui conduit à mettre en évidence des phénomènes jusque-là supposés ou même ignorés (25, 73, 11).

Parmi les méthodes dédiées au karst, il faut insister sur les traçages artificiels qui offrent les plus grands services. « *One tracer test better than thousand boreholes* » avait coutume de dire l'un des grands spécialistes américains d'hydrologie karstique, J. Quinlan, qui avait ainsi délimité les bassins d'alimentation des principales sources karstiques du réseau de Mammoth Cave, pour définir les conditions de protection des ressources en eau souterraine (131). Michel Lepiller a suivi la même voie en devenant le spécialiste français du traçage artificiel (88) qui a suscité des vocations. Les mesures indispensables de protection des ressources en eau karstique (119) intègrent désormais les données des traçages pour évaluer la vulnérabilité des aquifères. Cependant l'interprétation des courbes de restitution reste encore tributaire de modèles conceptuels qui ne font pas l'unanimité (90, 107, 56, 48, 104).

Les pompages dans le karst restent encore un domaine assez mal exploré, même si un certain nombre de principes sert de base aux essais (100, 99). Différentes approches sont proposées (69, 134, 41, 71, 72) ; sur un plan pratique, il est clair qu'il faut privilégier les essais de longue durée, de plusieurs semaines ou mois à chaque fois que cela est possible, afin de se placer dans des conditions aussi proches que possible de l'exploitation.

III. EN GUISE DE CONCLUSION : LES PROGRES A VENIR

Toutes ces voies ouvertes au cours des dernières décennies proposent des perspectives intéressantes. Pour ce qui est des connaissances, il reste des désaccords entre les différents modèles conceptuels proposés, dont il va falloir déterminer s'ils résultent des conditions de terrain qui ont présidé à leur élaboration (19), ou bien d'interprétations différentes d'observations insuffisantes pour trancher. Ainsi, le stockage dans la zone d'infiltration, sous l'épikarst, joue-t-il un rôle prépondérant dans l'écoulement à la source, comme le concluent certains travaux récents sur le système de Vaucluse (84, 66) ? Est-ce seulement un rôle qualitatif, ou bien également quantitatif ?

La question de la modalité de stockage dans la zone noyée reste toujours pendante. Le modèle conceptuel de Mangin (97) a proposé dès l'origine que le stockage s'effectue essentiellement dans des vides karstiques associés au réseau de drainage par des zones à fortes pertes de charge, constituant une zone noyée discontinue. Des expériences de traçage et de pompage vont dans ce sens (99). Toutefois la plupart des hydrogéologues considère que le stockage est assuré par des zones fissurées, à faible perméabilité, les blocs matriciels (118, 153, 78, 115, 89), constituant un milieu hydrauliquement continu, conformément au modèle proposé initialement par Drogue (47). L'exploration et l'exploitation des aquifères karstiques dépendent en grande partie de la généralisation ou non de ces modèles, ainsi que la détermination de la vulnérabilité (39).

Des karstifications profondes sont révélées de plus en plus fréquemment, en relation soit avec des zones de subsidence, soit avec des régions soumises à des variations eustatiques marquées, dont la crise messinienne de salinité en Méditerranée, soit avec des circulations thermales enrichies en CO₂ ou en d'autres gaz d'origine profonde, soit enfin dans des bassins sédimentaires où les formations carbonatées constituent des aquifères captifs. L'étude de ces phénomènes bénéficie des outils géochimiques variés, dont la panoplie complète des isotopes, pour mieux comprendre les mécanismes en jeu et la distribution des phénomènes karstiques. Elle devrait en outre aider à intégrer la place du karst dans le cycle global du carbone et son rôle éventuel dans le stockage du CO₂.

Enfin, ce sont certainement les aquifères karstiques littoraux qui vont le plus retenir l'attention, car, du fait de l'accroissement de la demande en eau le long des côtes, leurs ressources sont ou vont être très sollicitées, alors qu'elles sont souvent menacées par les

intrusions marines pour le moment incontrôlables, et par les pollutions provoquées par l'intense activité économique. De plus, les usines de dessalement se tournent maintenant de plus en plus vers le prélèvement d'eaux souterraines saumâtres ou salées (130) et donc vers le karst, en Méditerranée. Pour le moment, il semble que les décharges en mer de certains de ces aquifères ne soient pas directement exploitables (21). Mais en même temps il apparaît difficile d'exploiter ces ressources à terre par forages.

C'est pourquoi des développements sont nécessaires en géophysique et en diagraphies en forage, pour aboutir à une représentation en 3D des vides karstiques ainsi reconnus. Ces développements ne concernent pas seulement les ressources en eau souterraine, mais aussi les grands aménagements, dont les barrages, pour lesquels il est clair que l'étude du karst, fonctionnel ou non, doit être menée à l'amont de tous ces projets (109, 111, 112).

Nombre de problèmes de qualité découlent très clairement non pas tant de la surexploitation des aquifères karstiques, mais de leur fonctionnement spécifique, caractérisé par des cheminements préférentiels et des effets de seuil. Les connaissances hydrogéologiques régionales et locales limitées sont souvent à l'origine de plans d'exploitation inadaptés, provoquant parfois des bouleversements irrémédiables (36). Alors que la gestion active de certains aquifères, dont celui de la source du Lez à Montpellier (9, 20), est proposée en exemple, la situation devient dans certaines régions suffisamment critique pour devoir envisager une gestion « proactive » (80), c'est-à-dire une gestion intégrée d'un système karstique, prenant en compte un terme de recharge complémentaire, artificiel et contrôlé, soit pour reconstituer un stockage à l'échelle saisonnière, soit pour repousser une intrusion marine, soit enfin pour stocker saisonnièrement des eaux fournies par des usines de traitement. Cette voie toute nouvelle impose de bien connaître la structure et le fonctionnement locaux des aquifères karstiques pour déterminer les sites et les modes d'injection et ceux d'exploitation.

Références bibliographiques

- (1) **Al-Fares, W., M. Bakalowicz, R. Guérin, and M. Dukhan**, 2002 - Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (Hérault, France) with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*. **51** (2-4): p. 97-106.
- (2) **Al Charideh, A.R.**, 2007 - Environmental isotopic and hydrochemical study of water in the karst aquifer and submarine springs of the Syrian coast. *Hydrogeology Journal*. **15**: p. 351-364.
- (3) **Arfib, B.**, 2001 - Etude des circulations d'eaux souterraines en aquifère karstique côtier: observations et modélisation de la source saumâtre Almyros d'Héraklion, Crète (Grèce), in *Géosciences et Ressources naturelles*. 2001, Paris VI - Pierre et Marie Curie: Paris. p. 343.
- (4) **Arfib, B., G. de Marsily, and J. Ganoulis**, 2002 - Les sources karstiques côtières en Méditerranée: étude des mécanismes de pollution saline de l'Almyros d'Héraklion (Crète), observations et modélisation. *Bulletin de la Société géologique de France*. **173** (3): p. 245-253.
- (5) **Arfib, B., J. Ganoulis, and G. de Marsily**, 2006 - Locating the zone of saline intrusion in a coastal karst aquifer using springflow data. *Ground Water*. **45** (1): p. 28-35.
- (6) **Arthaud, F. and P. Choukroune**, 1972 - Méthode d'analyse de la tectonique cassante à l'aide des microstructures dans les zones peu déformées. Exemple de la plate-forme Nord-Aquitaine. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*. (Sept.-Oct.): p. 715-731.
- (7) **Atkinson, T.C.**, 1977 - Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain). *Journal of Hydrology*. **35**: p. 93-110.
- (8) **Aunay, B., N. Dörfliger, P. Le Strat, B. Ladouche, and M. Bakalowicz**, 2003 - Evolution géologique, mise en place de la karstification et thermalisme des aquifères karstiques périméditerranéens. Exemple du karst des Corbières d'Opoul. *Colloque "Circulations hydrothermales en terrains calcaires", 10^{ème} journée technique*. Carcassonne: CFH-AIH: p.15-22.
- (9) **Avias, J.V.**, 1995 - Gestion active de l'exsurgence karstique de la source du Lez (Hérault, France) 1957-1994. *Hydrogéologie*. (1): p. 113-127.
- (10) **Ayoub, G., R. Khoury, J. Ghannam, A. Acra, and B. Hamdar**, 2002 - Exploitation of submarine springs in Lebanon: assessment of potential. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*. **51** (1): p. 47-64.

- (11) **Bailly-Comte, V., H. Jourde, A. Roesch, S. Pistre, and C. Batiot-Guilhe**, 2008 - Time series analyses for karst/river assessment. Case of the Coulazou River (Southern France). *Journal of Hydrology*. **349**: p. 98-114.
- (12) **Bakalowicz, M.**, 1970 - Hydrodynamique karstique: étude du bassin d'alimentation de la Manavgat (Taurus occidental, Turquie), in *Centre de Recherches Géodynamiques*. 1970, Université Paris 6: Thonon. p. 106.
- (13) **Bakalowicz, M.**, 1979 - Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification, in *Laboratoire de Géologie Dynamique, Laboratoire Souterrain du CNRS*. 1979, P. et M. Curie Paris-6: Paris. p. 269.
- (14) **Bakalowicz, M.**, 1992 - Géochimie des eaux et flux de matières dissoutes. L'approche objective du rôle du climat dans la karstogénèse, in *Karst et évolutions climatiques. Hommage à Jean Nicod*, Presses Universitaires de Bordeaux: Talence. p. 61-74.
- (15) **Bakalowicz, M.**, 1995 - La zone d'infiltration des aquifères karstiques. Méthodes d'étude. Structure et fonctionnement. *Hydrogéologie*. **4**: p. 3-21.
- (16) **Bakalowicz, M.**, 2004 - The epikarst, the skin of karst. *The Epikarst Conference*. Shepherdstown, WVA: The Karts Water Institute: p.16-22.
- (17) **Bakalowicz, M.**, 2005 - Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*. **13** (1): p. 148-160.
- (18) **Bakalowicz, M.**, 2006 - Aquifères karstiques, in *Aquifères et eaux souterraines en France*, J.C. Roux, Editor, Éditions BRGM et CFH-AIH: Orléans. p. 59-73.
- (19) **Bakalowicz, M.**, 2006 - Importance of regional study site conditions in elaborating concepts and approaches in karst science, in *Perspectives on karst geomorphology, hydrology, and geochemistry—A tribute volume to Derek C. Ford and William B. White, Special Paper 404*, R.S. Harmon and C.M. Wicks, Editors, Geological Society of America. p. 15-22.
- (20) **Bakalowicz, M. and N. Dörfliger**, 2005 - Les ressources en eau du karst : un enjeu pour le bassin méditerranéen. *Géosciences, la Revue du BRGM*. **2**: p. 26-31.
- (21) **Bakalowicz, M., A. El-Hajj, M. El Hakim, A.R. Al Charideh, W. Al-Fares, B. Kattaa, P. Fleury, P. Brunet, N. Dörfliger, J.L. Seidel, and W. Najem**, 2007 - Hydrogeological settings of karst submarine springs and aquifers of the Levantine coast (Syria, Lebanon). Towards their sustainable exploitation. *TIAC'07. Coastal aquifers: challenges and solutions*. Almeria, Spain: IGME: p.721-732.
- (22) **Bakalowicz, M., M. El Hakim, and A. El-Hajj**, 2007 - Karst groundwater resources in the countries of eastern Mediterranean. *Environmental Geology*. DOI 10.1007/s00254-007-0854-z.
- (23) **Bakalowicz, M., M. Fleyfel, and A. Hachache**, 2002 - Une histoire ancienne: le captage de la source de Ras el Aïn et l'alimentation en eau de la ville de Tyr (Liban). *La Houille Blanche*. (4/5): p. 157-160.
- (24) **Bakalowicz, M. and A. Mangin**, 1980 - L'aquifère karstique. Sa définition, ses caractéristiques et son identification. *Mémoires hors série de la Société géologique de France*. **11**: p. 71-79.
- (25) **Batiot, C., J.L. Seidel, H. Jourde, O. Hebrard, and V. Bailly-Comte**, 2007 - Seasonal variations of CO₂ and 222Rn in a mediterranean sinkhole – spring (Causse d'Aumelas, SE France). *International Journal of Speleology*. **36** (1): p. 51-56.
- (26) **Benderitter, Y.**, 1997 - Karst et investigations géophysiques. *Hydrogéologie*. (3): p. 19-30.
- (27) **Bezes, C.**, 1976 - Contribution à la modélisation des systèmes aquifères karstiques: établissement du modèle Bemer. Son application à quatre systèmes karstiques du Midi de la France, in *Centre d'études et de recherches hydrogéologiques*. 1976, Université des Sciences et Techniques du Languedoc: Montpellier. p. 135.
- (28) **Blanc, J.J.**, 1997 - Géodynamique et histoire du karst. Application au Sud-Est de la France. *Quaternaire*. **8** (2-3): p. 91-105.
- (29) **Blanc, P.L.**, 2002 - The opening of the Plio-Quaternary Gibraltar Strait: assessing the size of a cataclysm. *Geodinamica Acta*. **15** (5-6): p. 303-317.
- (30) **Bonacci, O. and T. Roje-Bonacci**, 1997 - Sea water intrusion in coastal karst springs : example of the Blaz spring (Croatia). *Hydrological Sciences - Journal des Sciences Hydrologiques*. **42** (1): p. 89-100.

- (31) **Bonnet, M., J. Margat, and D. Thiéry**, 1976 - Essai de représentation d'un système karstique par modèle déterministe : application à la Fontaine de Vaucluse. *Annales Scientifiques Université Besançon, Géologie*. **25**: p. 79-95.
- (32) **Bonnin, J.**, 1984 - L'eau dans l'Antiquité. L'hydraulique avant notre ère. Coll. Direction des études et recherches d'Electricité de France, Paris: Eyrolles. 451 p.
- (33) **Breznik, M.**, 1998 - Storage reservoirs and deep wells in karst regions, Rotterdam: A.A. Balkema p.
- (34) **Burdon, D.J. and C. Safadi**, 1964 - The karst groundwaters of Syria. *Journal of Hydrology*. **2** (4): p. 324-347.
- (35) **Cavalera, T., B. Arfib, and E. Gilli**, 2006 - Ressource karstique côtière en méditerranée : les sources sous-marines de Port Miou et du Bestouan (Marseille - France). *Proc. 8th Conference on Limestone Hydrogeology*. Neuchâtel (Switzerland): Presses universitaires de Franche-Comté, Besançon, France: p.55-58.
- (36) **Ceron-Garcia, J.C. and A. Pulido Bosch**, 1993 - Considérations géochimiques sur la contamination par le CO₂ des eaux thermominérales de l'aquifère surexploité de l'Alto Guadalentin (Murcie, Espagne). *C.R. Acad. Sci. Paris*. **317**: p. 1121-1127.
- (37) **Clauzon, G.**, 1982 - Le canyon messinien du Rhône: une preuve décisive du "dessicated-deep model" (Hsü, Cita et Ryan, 1973). *Bulletin de la Société Géologique de France*. **24** (7): p. 597-610.
- (38) **Cornaton, F. and P. Perrochet**, 2002 - Analytical 1D dual-porosity equivalent solutions to 3D discrete single-continuum models. Application to karstic spring hydrograph modelling. *Journal of Hydrology*. **262**: p. 165-176.
- (39) **COST-Action 620**, 2005 - Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers. Final report. 2005, European Commission: Bruxelles. p. 297.
- (40) **Crawford, N.C., M.A. Lewis, S.A. Winter, and J.A. Webster**, 1999 - Microgravity techniques for subsurface investigations of sinkhole collapses and for detection of groundwater flow paths through karst aquifers. *Seventh Multidisciplinary conference on sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst. Hydrogeology and engineering geology of sinkholes and karst - 1999*. Harrisburg - Hershey, Pennsylvania: A.A. Balkema: p.203-218.
- (41) **Debièche, T.H., Y. Guglielmi, and J. Mudry**, 2002 - Modeling the hydraulical behavior of fissured-karstic aquifer in exploitation conditions. *Journal of Hydrology*. **257**: p. 247-255.
- (42) **Doerfliger, N.**, 1996 - Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multiattribute vulnerability mapping (EPIK method), in *Centre d'Hydrogéologie*. 1996, Université de Neuchâtel: Neuchâtel (Suisse). p. 308.
- (43) **Dörfliger, N., B. Ladouche, J.L. Pinault, J. Grévellec, L. Aquilina, and M. Bakalowicz**, 2005 - French test sites: the north-eastern part of the Thau basin (Hérault, Southern France), in *Groundwater management of coastal karstic aquifers, COST Action 621, Final report*, L. Tulipano, D. Fidelibus, and A. Panagopoulos, Editors, European Union Library: Brussels. p. 294-300.
- (44) **Dreybrodt, W.**, 1998 - Limestone dissolution rates in karst environments. *Bulletin d'Hydrogéologie du CHYN*. **16**: p. 167-183.
- (45) **Dreybrodt, W., F. Gabrovsek, and D. Romanov**, eds. 2005 - Processes of speleogenesis: a modeling approach. ZRC Publishing: Ljubljana. 376 p.
- (46) **Droque, C.**, 1972 - Analyse statistique des hydrogrammes de décrues des sources karstiques. *J. Hydrol.* **15**: p. 49-68.
- (47) **Droque, C.**, 1974 - Structure de certains aquifères karstiques d'après les résultats de travaux de forage. *C.R. Acad. Sci. Paris, série III*. (278): p. 2621-2624.
- (48) **Einsfield, F.**, 2005 - Flow system dynamics and water storage of a fissured-porous karst aquifer characterized by artificial and environmental tracers. *Journal of Hydrology*. **279** (1-4): p. 312-321.
- (49) **Eisenlohr, L.**, 1995 - Variabilités des réponses naturelles des aquifères karstiques, in *Centre d'Hydrogéologie*. 1995, Université de Neuchâtel: Neuchâtel. p. 184.
- (50) **Eisenlohr, L., M. Bouzelboudjen, L. Kiraly, and Y. Rossier**, 1997 - Numerical versus statistical modelling of natural response of a karst hydrological system. *Journal of Hydrology*. **202**: p. 244-262.
- (51) **El-Hajj, A., M. Bakalowicz, and W. Najem**, 2006 - Hydrogéologie des calcaires crétaqués du Nord Liban. *Conference on the « Water Resources in the Mediterranean Basin », WATMED 3*. Tripoli (Lebanon),

- (52) **El Faïz, M.**, 2005 - Les maîtres de l'eau. Histoire de l'hydraulique arabe, Arles: Actes Sud. 363 p.
- (53) **El Hakim, M. and M. Bakalowicz**, 2007 - Significance and origin of very large regulating power of some karst aquifers in the Middle East. Implication on karst aquifer classification. *Journal of Hydrology*. **333**: p. 329-339.
- (54) **Eraso, A.**, 1986 - Aplicacion del metodo de prediccion de las direcciones de drenaje al karst de Larra (Navarra, Francia) y el karst del complejo de Go Guarena (Burgos). *Karst Euskadi* 86. San Sebastian: p.229-254.
- (55) **Eraso, A.**, 1986 - Metodo de prediccion de las direcciones principales de drenaje en el karst. *Kobie*. **15**: p. 15-122.
- (56) **Field, M.**, 2002 - The QTRACER2 program for tracer-breakthrough curve analysis for tracer tests in karstic aquifers and other hydrologic systems. 2002, National Center for Environmental Assessment, U.S. EPA: Washington. p. 179.
- (57) **Fleury, P.**, 2005 - Sources sous-marines et aquifères côtiers méditerranéens. Fonctionnement et caractérisation, in *Sciences de la Terre*. 2005, Université Paris 6: Paris. p. 286.
- (58) **Fleury, P., M. Bakalowicz, and P. Becker**, 2007 - Caractérisation d'un système karstique à exutoire sous-marin, exemple de la Mortola (Italie). *Comptes Rendus Geosciences*. **339**: p. 407-417.
- (59) **Fleury, P., M. Bakalowicz, P. Brunet, and N. Dörfli**, soumis - Mediterranean coastal karst aquifers and their submarine discharge. *Ground Water*.
- (60) **Fleury, P., M. Bakalowicz, and G. de Marsily**, 2007 - Submarine springs and coastal karst aquifers: a review. *Journal of Hydrology*. **339**: p. 79-92.
- (61) **Fleury, P., M. Bakalowicz, G. de Marsily, and J.M. Cortes**, 2007 - Functioning of a coastal karstic system with a submarine outlet, in southern Spain. *Hydrogeology Journal*. DOI **10.1007/s10040-007-0215-8**.
- (62) **Fleury, P., V. Plagnes, and M. Bakalowicz**, 2007 - Modelling of the functioning of karst aquifers and flow-rate simulation: Fontaine de Vaucluse. *Journal of Hydrology*. **345**: p. 38– 49.
- (63) **Forkasiewicz, J. and H. Paloc**, 1967 - Le régime de tarissement de la Foux de la Vis. Etude préliminaire. *Chronique d'hydrogéologie*. **10**: p. 60-73.
- (64) **Fournier, M., N. Massei, M. Bakalowicz, and J.P. Dupont**, 2007 - Use of univariate clustering to identify transport modalities in karst aquifers. *Comptes Rendus Geosciences*. **339** (9): p. 622-631.
- (65) **Fournier, M., N. Massei, L. Dussart-Baptista, M. Bakalowicz, J. Rodet, and J.P. Dupont**, 2006 - Characterization of karst aquifer vulnerability by means of univariate clustering on electrical conductivity, turbidity and discharge datasets. *Proc. 8th Conference on Limestone Hydrogeology*. Neuchâtel (Switzerland): Presses universitaires de Franche-Comté, Besançon, France: p.117-120.
- (66) **Garry, B., C. Emblanch, A. Cras, D. Boyer, M. Auguste, A. Cavallou, and M. Daniel**, 2006 - Utilisation du 13CCMTD dans la discrimination des écoulements de la Zone Non Saturée des systèmes karstiques. Cas du système de Vaucluse. *Proc. 8th Conference on Limestone Hydrogeology*. Neuchâtel (Switzerland): Presses universitaires de Franche-Comté, Besançon, France: p.125-128.
- (67) **Grasso, A.D. and P.Y. Jeannin**, 1998 - Statistical approach to the impact of climatic variations on karst spring chemical response. *Bulletin d'Hydrogéologie du CHYN*. **16**: p. 59-74.
- (68) **Grillot, J.C.**, 1979 - Structures des systèmes aquifères en milieu fissuré. Contribution méthodologique à cette connaissance, in *Hydrogéologie*. 1979, Université des Sciences et Techniques du Languedoc: Montpellier. p. 227.
- (69) **Gylling, B., L. Birgersson, L. Moreno, and I. Neretnieks**, 1998 - Analysis of a long-term pumping and tracer test using the channel network model. *Journal of Contaminant Hydrology*. **32**: p. 203-222.
- (70) **Hreiche, A., C. Bocquillon, and W. Najem**, 2003 - Calage d'un modèle conceptuel pluie-débit journalier à partir de bilans annuels. *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions* Montpellier: IAHS: p.87-93.
- (71) **Jourde, H., F. Cornaton, S. Pistre, and P. Bidaux**, 2002 - Flow behavior in a dual fracture network. *Journal of Hydrology*. **266**: p. 99-119.
- (72) **Jourde, H., S. Pistre, P. Perrochet, and C. Drogue**, 2002 - Origin of fractional flow dimension to a partially penetrating well in stratified fractured reservoirs. New results based on the study of synthetic fracture networks. *Advances in water resources*. **25**: p. 371-387.

- (73) **Jourde, H., A. Roesch, V. Guinot, V. Bailly-Comte, and C. Batiot-Guilhe**, 2007 - Dynamics and contribution of karst groundwater to surface flow during Mediterranean flood. *Environmental Geology*. **51** (5): p. 725-730.
- (74) **Karam, Y.**, 1989 - Essais de modélisation des écoulements dans un aquifère karstique. Exemple de la source du Lez (Hérault, France), in *Sciences de l'Eau et de la Terre*. 1989, Université Sciences et Techniques du Languedoc: Montpellier. p. 286.
- (75) **Kattan, Z.**, 1997 - Environmental isotope study of the major karst springs in Damascus limestone aquifer systems: case of the Fighé and Barada springs. *Journal of Hydrology*. **193**: p. 161-182.
- (76) **Kattan, Z.**, 2001 - Use of hydrochemistry and environmental isotopes for evaluation of groundwater in the Paleogene limestone aquifer of the Ras-el-Ain area (Syrian Jezireh). *Environmental Geology*. **41**: p. 128-144.
- (77) **Kiraly, L.**, 1969 - Statistical analysis of fractures (orientation and density). *Geologische Rundschau*. **59** (1): p. 125-151.
- (78) **Kiraly, L.**, 1998 - Modelling karst aquifers by the combined discrete channel and continuum approach. *Bulletin d'Hydrogéologie du CHYN*. **16**: p. 77-98.
- (79) **Klimchouk, A., D.C. Ford, A.N. Palmer, and W. Dreybrodt**, eds. 2000 - Speleogenesis. Evolution of karst aquifers. National Speleological Society: Huntsville p.
- (80) **Kneppers, A., F.P. Ruan, and J.P. Delhomme**, 2006 - Integrated technologies for a better understanding and management of karst aquifer systems. *Proc. 8th Conference on Limestone Hydrogeology*. Neuchâtel (Switzerland): Presses universitaires de Franche-Comté, Besançon, France: p.157-160.
- (81) **Labat, D., A. Mangin, and R. Ababou**, 2002 - Rainfall-runoff relations for karstic springs: multifractal analyses. *Journal of Hydrology*. **256**: p. 176-795.
- (82) **Larocque, M., A. Mangin, M. Razack, and O. Banton**, 1998 - Characterization of the La Rochefoucauld karst aquifer (Charente, France) using correlation and spectral analysis. *Bulletin d'Hydrogéologie du CHYN*. **16**: p. 49-57.
- (83) **Larocque, M., A. Mangin, M. Razack, and O. Banton**, 1998 - Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology*. **205**: p. 217-231.
- (84) **Lastennet, R., J.M. Puig, C. Emblanch, and B. Blavoux**, 1995 - Influence de la zone non saturée sur le fonctionnement des systèmes karstiques. Mises en évidence dans les sources du Nord-Vaucluse. *Hydrogéologie*. (4): p. 57-66.
- (85) **Legchenko, A., J.-M. Baltassat, Y. Albouy, J.-M. Vouillamoz, M. Bakalowicz, and W. Al-Fares**, 2002 - Experience of karst localization using the Magnetic Resonance Sounding method. *EEGS 2002*,
- (86) **Lepiller, M.**, 1980 - Contribution de l'hydrochimie à la connaissance du comportement hydrogéologique des massifs calcaires. Etude de quelques systèmes karstiques du massif du Semnoz et de la région d'Annecy (Savoie, Haute-Savoie, France), in *Sciences de la Terre*. 1980, Université de Grenoble: Grenoble. p. 478.
- (87) **Lepiller, M.**, 1993 - Réflexions sur l'hydrogéologie karstique de la Craie du bassin de Paris à partir d'exemples régionaux (Normandie, Gâtinais). *Hydrogéologie*. **2**: p. 151-161.
- (88) **Lepiller, M. and P. Mondain**, 1986 - Les traçages artificiels en hydrogéologie karstique; mise en oeuvre et interprétation. *Hydrogéologie*. **1**: p. 33-52.
- (89) **Maloszewski, P., W. Stichler, A. Zuber, and D. Rank**, 2002 - Identifying the flow systems in a karstic-fissured-porous aquifer, the Schneealpe, Austria, by modelling of environmental ^{18}O and 3H isotopes. *Journal of Hydrology*. **256**: p. 48-59.
- (90) **Maloszewski, P. and Z. A.**, 1998 - A general lumped parameter model for the interpretation of tracer data and transit time calculation in hydrologic systems. Discussion (Journal of Hydrology Vol. 179, 1996: 1-21). *Journal of Hydrology*. **204**: p. 297-300.
- (91) **Mangin, A.**, 1974 - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. 1ère partie. Généralités sur le karst et les lois d'écoulement utilisées. *Annales de Spéléologie*. **29** (3): p. 283-332.
- (92) **Mangin, A.**, 1974 - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. 2ème partie. Concepts méthodologiques adoptés. Systèmes karstiques étudiés. *Annales de Spéléologie*. **29** (4): p. 495-601.

- (93) **Mangin, A.**, 1975 - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. 3ème partie. Constitution et fonctionnement des aquifères karstiques. *Annales de Spéléologie*. **30** (1): p. 21-124.
- (94) **Mangin, A.**, 1981 - Apports des analyses corrélatoire et spectrale croisées dans la connaissance des systèmes hydrologiques. *Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris, D.* **293** (2): p. 1011-1014.
- (95) **Mangin, A.**, 1981 - Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. *Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris, D.* **293** (2): p. 401-404.
- (96) **Mangin, A.**, 1984 - Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales. *Journal of Hydrology*. **67**: p. 25-43.
- (97) **Mangin, A.**, 1994 - Karst hydrogeology, in *Groundwater Ecology*, J. Stanford, J. Gibert, and D. Danielopol, Editors, Academic Press. p. 43-67.
- (98) **Maqsoud, A.**, 1996 - Approche hydrologique et hydrochimique du caractère karstique éventuel d'hydrosystèmes souterrains de la craie du Bassin de Paris. 1996, Université des Sciences et technologies de Lille: Lille. p. 324.
- (99) **Marsaud, B.**, 1997 - Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Documents du BRGM. Vol. 268, Orléans: BRGM. 306 p.
- (100) **Marsaud, B.**, 1997 - Une démarche d'interprétation des essais de pompage adaptée aux aquifères karstiques. *Hydrogéologie*. (3): p. 31-42.
- (101) **Martel, E.A.**, 1921 - Nouveau traité des eaux souterraines, Paris: O. Doin. 838 p.
- (102) **Masséi, N.**, 2001 - Transport de particules en suspension dans l'aquifère crayeux karstique et à l'interface craie/alluvions, in *Morphodynamique Continentale et Côtière*. 2001, Université de Rouen: Rouen. p. 199.
- (103) **Massei, N., J.P. Dupont, B.J. Mahler, B. Laignel, M. Fournier, D. Valdes, and S. Ogier**, 2006 - Investigating transport properties and turbidity dynamics of a karst aquifer using correlation, spectral, and wavelet analyses. *Journal of Hydrology*. **329** (1-2): p. 244-257.
- (104) **Massei, N., H.Q. Wang, M. Field, J.P. Dupont, M. Bakalowicz, and J. Rodet**, 2006 - Tracer breakthrough tailing in a conduit-dominated karstic aquifer. *Hydrogeology Journal*. **14**: p. 849-858.
- (105) **McDonald, R.C., L. Russill, and R. Davis**, 1999 - Integrated geophysical surveys applied to karstic studies. *Seventh Multidisciplinary conference on sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst. Hydrogeology and engineering geology of sinkholes and karst - 1999*. Harrisburg - Hershey, Pennsylvania: A.A. Balkema: p.243-246.
- (106) **McDowell, P.W. and V. Hope**, 1993 - The location and delineation of karst and solution collapse features by acoustic tomography. *Fourth Multidisciplinary conference on sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst. Hydrogeology and engineering geology of sinkholes and karst - 1993*. Panama City, Florida: A.A. Balkema: p.123-129.
- (107) **Meus, P. and C. Ek**, 1999 - Tracing technique as a contribution to karstology : past experiences, new directions. *1st Nerja cave Geology Symposium*. Malaga,
- (108) **Mijatovic, B.**, 2007 - The groundwater discharge in the Mediterranean karst coastal zones and freshwater tapping: set problems and adopted solutions. Case studies. *Environ Geol.* **51**: p. 737-742.
- (109) **Milanovic, P.**, 2000 - Geological engineering in karst, Belgrade: Zebra. 347 p.
- (110) **Mocochain, L., G. Clauzon, and J.Y. Bigot**, 2006 - Réponses de l'endokarst ardéchois aux variations eustatiques générées par la crise de salinité messinienne. *Bulletin de la Société Géologique de France*. **177** (1): p. 27-36.
- (111) **Mohammadi, Z., E. Raeisi, and M. Bakalowicz**, 2007 - Evidence of karst from behaviour of the Asmari limestone aquifer at the Khersan 3 Dam site, southern Iran. *Hydrological Sciences Journal*. **52** (1): p. 206-220.
- (112) **Mohammadi, Z., E. Raeisi, and M. Bakalowicz**, 2007 - Method of leakage study at the karst dam site. A case study: Khersan3 Dam, Iran. *Environmental Geology*. **accepté**.
- (113) **Mohrlök, U. and M. Sauter**, 1997 - Modelling groundwater flow in a karst terrane using discrete and double-continuum approaches. Importance of spatial and temporal distribution of recharge. *6th Conference on limestone hydrology and fissured aquifers*. La Chaux-de-Fonds: Université de Franche-Comté, Sciences et Technique de l'Environnement: p.167-170.
- (114) **Mohrlök, U. and G. Teutsch**, 1997 - Double continuum porous equivalent (DCPE) versus discrete modelling in karst terranes. *Karst Water & Environmental Impacts: Günay & Johnson*. 319-326 p.

- (115) **Motyka, J.**, 1998 - A conceptual model of hydraulic networks in carbonate rocks, illustrated by examples from Poland. *Hydrogeology Journal*. (6): p. 469-482.
- (116) **Moulard, L., B. Mijatovic, R. Kareh, and B. Massaad**, 1965 - Exploitation d'une nappe karstique captive à exutoire sous-marins. Problèmes posés et solution adoptée côte libanaise. *Conference on ground water resources*. Dubrovnik: UNESCO, Paris: p.237-250.
- (117) **Mudry, J.**, 1987 - Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés, in *Géologie appliquée*. 1987, Université de Besançon: Besançon. p. 381.
- (118) **Mudry, J.**, 1990 - Les courbes flux chimique-débit et le fonctionnement des aquifères karstiques. *Journal of Hydrology*. **120** (1-4): p. 283-294.
- (119) **Muet, P., E. Vier, L. Cadilhac, and P. Marchet**, 2006 - Procédures de protection des captages d'alimentation en eau potable en milieu karstique en France : Bilan et préconisations. *Proc. 8th Conference on Limestone Hydrogeology*. Neuchâtel (Switzerland): Presses universitaires de Franche-Comté, Besançon, France: p.191-196.
- (120) **Nordon, M.**, 1991 - Histoire de l'hydraulique. L'eau conquise. Les origines et le monde antique, Paris: Masson. 181 p.
- (121) **Padilla, A. and A. Pulido Bosch**, 1992 - Consideraciones sobre la aplicación de los análisis de correlación y espectral al estudio de los acuíferos karsticos. *Taller internacional sobre cuencas experimentales en el karst*. Matanzas, Cuba: GTICEK: p.149-160.
- (122) **Padilla, A., A. Pulido Bosch, and A. Mangin**, 1994 - Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karstic springs. *Ground Water*. **32** (2): p. 267-277.
- (123) **Pinault, J.L., N. Doerfliger, B. Ladouche, and M. Bakalowicz**, 2004 - Characterizing a coastal karst aquifer using an inverse modeling approach. The saline springs of Thau, Southern France. *Water Resource Research*. **40**.
- (124) **Pinault, J.L., B. Ladouche, N. Doerfliger, and M. Bakalowicz**, 2001 - Etude du fonctionnement hydrogéologique du karst nord-montpelliérain à l'aide d'analyse du signal hydrologique et hydrochimique. *Hydrologie en Pays calcaires*. Besançon,
- (125) **Pinault, J.L., B. Ladouche, V. Petit, N. Doerfliger, and M. Bakalowicz**, 2000 - Investigation hydrochimique des systèmes karstiques nord-montpelliérains. Modélisation inverse des relations pluie-débit et des variations temporelles des concentrations. *Hydrologie en régions méditerranéennes*. Montpellier,
- (126) **Pinault, J.L., V. Plagnes, M. Bakalowicz, and L. Aquilina**, 2001 - Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems. Characterization of karst system functioning. *Water Resource Research*. **37** (8): p. 2191-2204.
- (127) **Plagnes, V.**, 1997 - Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la chimie des eaux, in *Géofluides Bassins Eau*. 1997, Université Montpellier II: Montpellier. p. 372.
- (128) **Potié, L. and J. Ricour**, 1973 - Etudes et captage de résurgences d'eau douce sous-marines. *Bulletin du B.R.G.M. (deuxième série)*. p. 1-18.
- (129) **Puig, J.M.**, 1987 - Le système karstique de la Fontaine de Vaucluse, in *Laboratoire d'Hydrogéologie*. 1987, Université d'Avignon: Avignon. p. 205.
- (130) **Pulido Bosch, A., J.A. Lopez Geta, and G. Ramos Gonzalez**, eds. 2007 - TIAC'07. Coastal aquifers: challenges and solutions. Proceedings of the Conference held in Almeria, Spain. IGME: Madrid p.
- (131) **Quinlan, J.F. and R.O. Ewers**, 1985 - Ground water flow in limestone terranes: strategy rationale and procedure for reliable, efficient monitoring of ground water quality in karst areas. *5th National Symposium and Exposition on aquifer restoration and ground water monitoring*. Columbus, Ohio: National Water Well Association: p.197-234.
- (132) **Razack, M.**, 1978 - Sur la contribution de méthodes d'analyse numérique appliquées à l'étude d'un champ de fractures pour une meilleure connaissance de la structure des réservoirs fissurés. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, série D*. **286**: p. 1577-1580.
- (133) **Razack, M.**, 1980 - Approche quantitative de l'effet d'échelle sur le relevé de la fracturation par photo-interprétation dans l'étude de la géométrie des réservoirs fissurés. *Mémoires hors série de la Société géologique de France*. **11**: p. 81-90.

- (134) **Reynaud, A., Y. Guglielmi, J. Mudry, and C. Mangan**, 1999 - Hydrochemical approach to the alterations of the recharge of a karst aquifer consecutive to a long pumping period : example taken from Pinchinade Graben (Mouans-Sartoux, French Riviera). *Ground Water*. **37** (3): p. 414-417.
- (135) **Rodet, J.**, 1991 - La craie, roche carbonatée poreuse et son karst. *Karstologia*. (18): p. 13-18.
- (136) **Rouchy, J.M. and J.P. Saint-Martin**, 1992 - Late Miocene events in the Mediterranean as recorded by carbonate-evaporite relations. *Geology*. **20**: p. 629-632.
- (137) **Scanlon, B.R., R.E. Mace, M.E. Barrett, and B.D. Smith**, 2003 - Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA. *Journal of Hydrology*. **276** (1-4): p. 137-158.
- (138) **Shaban, A., M. Khawlie, and C. Abdallah**, 2001 - New Water Resources For Southern Lebanon : Thermal InfraRed Remote Sensing of Submarine Springs. *South Lebanon Conference*. Beirut: p.181-189.
- (139) **Sharp, J.M.J.**, 1990 - Stratigraphic, geomorphic and structural controls on the Edwards aquifer, Texas, USA, in *Selected Papers on Hydrogeology, IAH*, Heise. p. 67-82.
- (140) **Shuster, E.T. and W.B. White**, 1971 - Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs : a possible means for characterizing carbonate aquifers. *Journal of Hydrology*. (14): p. 93-128.
- (141) **Smart, P., P. Beddows, J. Coke, S. Doerr, S. Smith, and F.F. Whitaker**, 2006 - Cave development on the Carribean coast of Yucatan Peninsula, Quintana Roo, Mexico, in *Perspectives on karst geomorphology, hydrology, and geochemistry—A tribute volume to Derek C. Ford and William B. White, Special Paper 404*, R.S. Harmon and C.M. Wicks, Editors, Geological Society of America. p. 105-128.
- (142) **Soulios, G.**, 1991 - Contribution à l'étude des courbes de récession des sources karstiques: exemples du pays hellénique. *Journal of Hydrology*. **124**: p. 29-42.
- (143) **Stringfield, V.T. and H.E. LeGrand**, 1969 - Hydrology of carbonate rock terranes. A review with special reference to the United States (1st part). *Journal of Hydrology*. **8** (3): p. 349-376.
- (144) **Stringfield, V.T. and H.E. LeGrand**, 1969 - Hydrology of carbonate rock terranes. A review with special reference to the United States (2nd part). *Journal of Hydrology*. **8**: p. 377-417.
- (145) **Teutsch, G. and M. Sauter**, 1997 - Distributed parameter modelling approaches in karst hydrological investigations. *6th Conference on limestone hydrology and fissured aquifers, session on modelling karst aquifers*. La Chaux-de-Fonds: Université de Franche-Comté, Sciences et Technique de l'Environnement: p.27-40.
- (146) **Thierry, P., N. Debeblia, and A. Bitri**, 2005 - Geophysical and geological characterisation of karst hazards in urban environments: application to Orléans (France). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. **64** (2): p. 139-150.
- (147) **Thiéry, D.**, 1988 - Forecast of changes in piezometric levels by a lumped hydrological model. *Journal of Hydrology*. **97**: p. 129-148.
- (148) **Valdes, D., J.P. Dupont, N. Massei, B. Laignel, and J. Rodet**, 2006 - Investigation of karst hydrodynamics and organization using autocorrelations and T-[Delta]C curves. *Journal of Hydrology*. **329** (3-4): p. 432-443.
- (149) **Van Meir, N., D. Jaeggi, M. Herfort, S. Loew, P. Pezard, and G. Lods**, 2007 - Characterizing flow zones in a fractured and karstified limestone aquifer through integrated interpretation of geophysical and hydraulic data. *Hydrogeology Journal*. **15** (2): p. 225-240.
- (150) **Vouillamoz, J.-M., A. Legchenko, Y. Albouy, M. Bakalowicz, J.-M. Baltassat, and W. Al-Fares**, 2003 - Localization of saturated karst aquifer with magnetic resonance sounding and resistivity imagery. *Ground Water*. **41** (5): p. 578-586.
- (151) **Vouillamoz, J.M.**, 2003 - La caractérisation des aquifères par une méthode non invasive: les sondages par résonance magnétique protonique, in *Sciences de la Terre*. 2003, Université Orsay Paris XI: Orsay. p. 315.
- (152) **Williams, P.W.**, 1985 - Subcutaneous hydrology and the development of doline and cockpit karst. *Zeitschrift für Geomorphologie*. **29** (4): p. 463-482.
- (153) **Zuber, A. and J. Motyka**, 1997 - Hydraulic parameters and solute velocities in triple-porosity karstic-fissured-porous carbonate aquifers: case studies in southern Poland. *Environmental Geology*. **34** (2/3): p. 243-250.

Une gestion active des systèmes karstiques, pourquoi? Exemples et perspectives

Nathalie Dörfliger

BRGM - 1039 rue de Pinville - 34000 Montpellier - n.dorfliger@brgm.fr

I. INTRODUCTION

Les aquifères karstiques sont caractérisés d'une part par l'hétérogénéité des paramètres hydrauliques liés à la présence d'un réseau de conduits karstiques au sein de roches carbonatées fissurées et d'autre part par l'unicité de chaque système karstique. Si le réseau de conduits karstiques assure la fonction transmissive de l'aquifère, la matrice fissurée pouvant renfermer de larges cavités assure le stockage de l'eau. L'aquifère karstique ainsi exprime la dualité des écoulements souterrains (1), avec des écoulements diffus au sein de la matrice fissurée et des écoulements au sein des conduits. L'échange entre ces deux systèmes est contrôlé par les différences de charge hydraulique ainsi que par la variabilité spatiale des paramètres hydrauliques et la géométrie du réseau de conduits (2). Ainsi, le stockage de l'eau de l'aquifère prend place au sein de la zone saturée de l'aquifère karstique dans de grandes cavités ou dans la matrice fissurée, généralement connectée du point de vue hydraulique au réseau de conduits karstiques. Le réseau principal de drainage souterrain présente un certain degré d'organisation, lié à différents facteurs tels que le contexte géologique, le climat et la chimie de l'eau, le potentiel hydraulique et les variations du niveau de base.

Les aquifères karstiques méditerranéens sont ainsi fortement influencés par les variations du niveau de base, notamment celles liées à la crise de salinité du Messinien, durant laquelle le niveau de la mer chuta jusqu'à -1500m sous le niveau de la mer actuelle. Par conséquent, le niveau de base du système karstique s'est accommodé à celui du niveau de la mer ; les réseaux karstiques se sont développés en profondeur, comme le montrent par exemple les réseaux explorés de la Fontaine de Vaucluse (-235m NGF) et de la source du Lez (-47m NGF).

La plupart des aquifères karstiques de type fonctionnel (3) caractérisés par une grande hétérogénéité, des réseaux karstiques présentant un certain degré d'organisation hiérarchique d'amont vers l'aval, sont généralement captés pour l'alimentation en eau potable au niveau de leur exutoire (exploitation gravitaire d'une partie ou de la totalité du débit naturel de la source). Cette méthode traditionnelle ne permet pas de mobiliser l'eau stockée au sein des réserves de l'aquifère sous le niveau d'exhaure du système. De plus, du fait du fonctionnement hydrogéologique de ce type d'aquifère, les variations importantes du débit de la source du système au cours d'un cycle hydrologique constituent une limite d'exploitation lors des périodes d'étiage, périodes où les besoins en eau peuvent être les plus élevés (période de tourisme par exemple). Une interception du réseau karstique à l'amont de l'exutoire et un pompage au sein du réseau constituent les bases d'une gestion active des aquifères karstiques. Les conditions favorables à une telle gestion, ainsi que des exemples d'exploitation et d'interprétation d'essai de pompage au sein d'un conduit karstique font l'objet de cet article. Un exemple détaillé en contexte méditerranéen du Sud de la France est présenté et discuté (Le Lez, Montpellier) ainsi qu'un exemple en Syrie avec la source de Fighé utilisé pour l'alimentation en eau potable de Damas.

I.1. La gestion active d'un système karstique

Pomper dans un forage interceptant le conduit karstique saturé en eau et situé sous le niveau de la source constitue le préalable à la gestion active d'un aquifère karstique. Si l'on distingue des systèmes karstiques jurassiens des systèmes karstiques vaclusiens, ce deuxième type est la deuxième condition. Le conduit karstique doit être situé en profondeur sous le niveau d'émergence; il est connecté à la matrice renfermant les réserves de l'aquifère. Le pompage permet ainsi de solliciter les réserves de l'aquifère. La gestion active d'un aquifère karstique peut être définie comme suit: l'exploitation des eaux souterraines à l'aide d'un pompage à un débit supérieur à celui du débit d'étiage de la source en conditions naturelles permet de solliciter les réserves de l'aquifère particulièrement lors des périodes de basses eaux, les réserves se reconstituant lors des périodes de recharge. Le volume d'eau prélevé à l'échelle d'un ou plusieurs cycles hydrologiques doit être inférieur à la recharge de l'aquifère, afin de ne pas surexploiter ce dernier. Les aquifères karstiques de type vaclusien sont particulièrement adaptés à ce type de gestion, du fait (i) de leur importante réserve accessible à proximité de la source, (ii) un forage interceptant le conduit karstique peut fournir un débit important (100aines de l/s) et solliciter un volume important d'eau issu des réserves de l'aquifère et finalement (iii) la recharge est très efficace du fait que l'essentiel des précipitations va s'infiltrer dans l'aquifère.

I.2. La modélisation des systèmes karstiques en gestion active

La modélisation de tels systèmes en gestion active peut être de deux types, soit de type fonctionnel avec des approches de modèles à réservoirs ou de fonctions de transfert et soit de type semi-global couplé à une solution analytique de type écoulement vers une tranchée (4).

II. EXEMPLES

II.1. Le système karstique du Lez (Hérault)

II.1.1. Contexte hydrogéologique

La source karstique du Lez est l'exutoire principal de l'aquifère karstique du même nom se développant au sein des calcaires jurassiques et crétacés. Les marnes oxfordiennes constituent la limite inférieure de l'aquifère alors que celles de l'Albien la limite supérieure. L'Hérault à l'Ouest et le Vidourle au Nord et à l'Est constituent les limites de l'aquifère (5 et 6). La source du Lez est une source de type Vaclusienne, l'eau émerge au niveau d'une vasque située à une altitude de 65m NGF et donne naissance au fleuve du même nom. La source du Lez est située à 15km au nord de Montpellier, dont l'alimentation en eau potable provient de cet aquifère.

Le bassin d'alimentation de la source du Lez, déterminé à partir d'essais de traçage, des éléments structuraux ainsi que de l'analyse des variations piézométriques est d'une superficie de quelques 380 km² (figure 1) (7). La recharge s'effectue au niveau des calcaires affleurants sur une surface de quelques 100km².

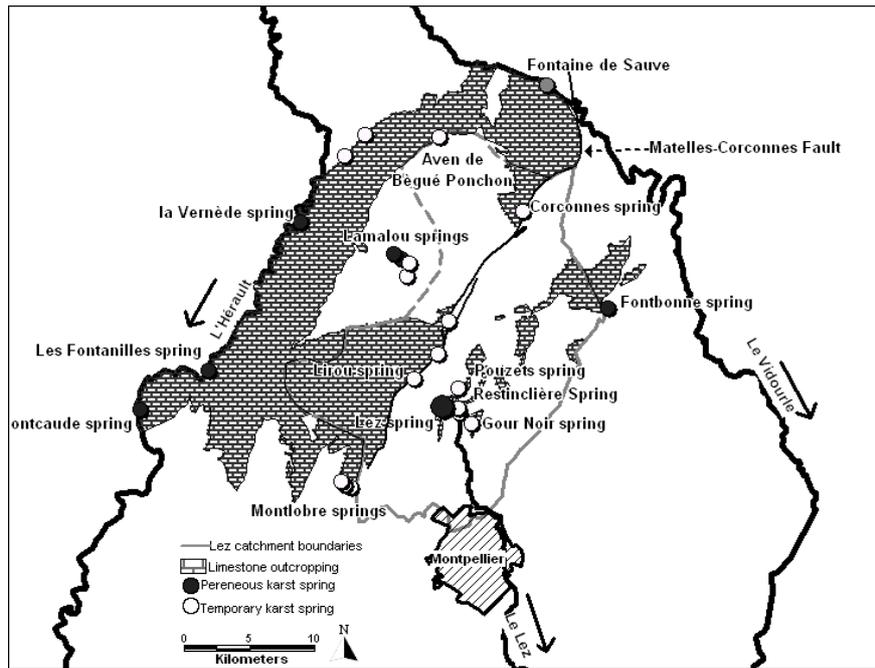


Figure 1. Calcaires affleurant au sein du bassin d'alimentation de l'aquifère karstique du Lez (8).

II.1.2. Conditions d'exploitation

Au cours des périodes de basses eaux, la source tarissait lorsque l'eau était pompée directement au niveau de la vasque. Ainsi, en 1981, suite à des études préliminaires menées dans les années 1960 et 1970 (9), quatre forages ont été implantés au niveau du conduit à l'amont direct de la source, permettant ainsi de pomper jusqu'à 1700 l/s. Le débit autorisé n'excède pas les ressources de l'aquifère. Le captage est situé quelques 400 m à l'amont de la source au sein du massif calcaire. Les pompes sont situées à une profondeur de 48m sous le niveau de la source, soit à une altitude de 17m NGF (Figure 2). Le débit de la source du Lez est ainsi influencé par les pompages. Lorsque le débit naturel de la source est inférieur au débit pompé, un débit réservé est rejeté dans le fleuve à l'aval de la vasque. Le débit réservé est fixé à 160 l/s par la déclaration d'utilité publique du 5 juin 1981.

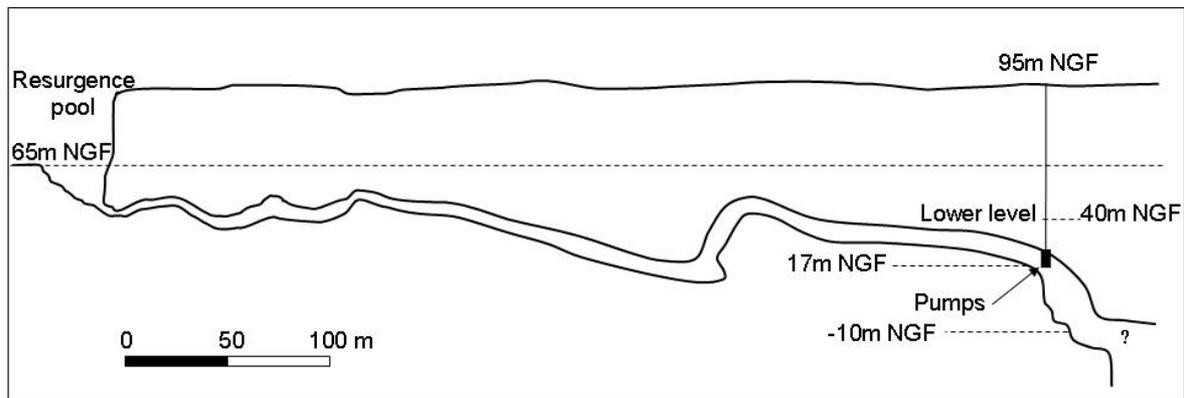


Figure 2. Réseau karstique de la source du Lez, et système de captage (modifié à partir 10 dans (8)).

II.1.3. Données disponibles

Les données utilisées dans le cadre de la caractérisation de l'effet de la gestion active sur le système karstique du Lez sont d'une part les débits mesurés à l'aval du rejet du débit réservé, le niveau piézométrique au niveau du captage pour la période 1946-2006 (soit au niveau de la vasque (1946-1981) et au niveau d'un des forages dès 1982) ainsi que les volumes prélevés par les pompages dès 1968 et les débits du Lez à l'aval au niveau de la station de Lavalette. Les données climatiques sont celles de trois stations situées au niveau du bassin d'alimentation ou à proximité [St-Martin-de-Londres, Valflaunès et Montpellier Fréjorgues]. Du à un certain nombre d'absence de données dans les séries de débits, des reconstructions ont été faites, basées sur des extrapolations à partir des relations entre hauteur d'eau et débits considérant les différentes périodes avant 1982 et post-1982, les débits de débordement et d'écoulement gravitaire, ainsi que les sorties de modèles de transfert pluies-débits. Des comparaisons statistiques ont été menées afin de vérifier la validité des données reconstituées.

II.1.4. Modélisation du système

La méthode de modélisation utilisée est celle basée sur la méthodologie de modélisation inverse (11, 12 et 13). La modélisation inverse a pour objectif de déterminer les fonctions de transfert à partir de l'hydrogramme dans son ensemble permettant de reconstituer celui-ci. Ce type de modèle permet de reconstituer les débits de la source du Lez en conditions naturelles afin de compléter les séries y compris pour les périodes de hautes eaux et d'effectuer une analyse sur l'ensemble de la série sur les périodes avant et après la gestion active.

Le traitement des données est effectué à l'aide du code TEMPO © BRGM (14). Le modèle comprend deux sous-modèles dont la structure peut être expliquée à l'aide des étapes suivantes (15) :

(i) l'entrée du système est définie à l'aide des précipitations qui vont donner lieu à des variations de débits, considérant uniquement les précipitations efficaces, obtenues en utilisant une fonction seuil (Ω) définie à partir des chroniques de pluies brutes et de la température de l'air de telle sorte que

$$P_{\text{efficace}} = P_{\text{brute}} - W(t) \text{ si } P_{\text{brute}} > \Omega(t) ; P_{\text{efficace}} = 0 \text{ si } P_{\text{brute}} \leq \Omega(t).$$

Dans le cas d'un modèle pluie-débit, $W(t)$ peut s'apparenter au déficit de la réserve utile des sols.

(ii) l'entrée est ensuite séparée en deux composantes, une composante rapide et une composante lente à l'aide de fonctions de transfert, traduisant la dynamique des écoulements au sein de l'aquifère,

(iii) la réponse impulsionnelle de chaque composante est déterminée à l'aide d'un processus itératif. La sortie du premier sous-modèle de transfert est le débit naturel de la source du Lez.

Le deuxième sous-modèle de transfert comprend plusieurs entrées telles qu'une fonction de sollicitations associée au pompage, le débit simulé de la source. La sortie de ce deuxième modèle est le niveau piézométrique au niveau du conduit karstique, situé sous le captage. Ce deuxième modèle est utilisé pour valider la vraisemblance des débits simulés de la source du Lez.

Des analyses des récessions ainsi que des débits classes ont été effectuées, tout comme des analyses corrélatoires spectrales sur les données mesurées et issues des modèles.

II.1.5. Résultats et discussion

Les analyses de 18 cycles hydrologiques du débit naturel de la source du Lez (1946-1968) sans reconstitution montrent que l'état naturel du système est caractérisé par un débit journalier moyen de $2\text{m}^3/\text{s}$. Cinquante pourcents des débits de la période d'observation considérée sont compris entre 0.6 and $2.7\text{m}^3/\text{s}$. Le volume interannuel moyen est de $62 \pm 24 \cdot 10^6\text{m}^3$.

Trois types de résolution du premier sous-modèle ont été utilisés pour simuler le débit naturel de la source du Lez, deux modèles paramétriques (deux réservoirs en parallèle avec deux coefficients de récession et un paramètre de répartition ou un réservoir avec deux coefficients de récession) et un modèle basé sur l'équation de "Samani et Ebrahimi (16)" permettant de prendre en considération une fonction homographique et la loi de Maillet. Tous ces modèles permettent de simuler les débits à l'aide de deux fonctions de transfert : (i) une fonction de transfert caractérisant la recharge rapide avec un maximum compris entre le 2ème et 3ème jour, (ii) une réponse impulsionnelle "lente" avec une longue décroissance qui après 60 jours n'est plus influencée par les précipitations. Un coefficient de récession de la zone saturée de l'aquifère globalement égal à $0.028 \pm 0.011\text{ j}^{-1}$ est utilisé par ailleurs. Le modèle calibré sur différentes périodes avant d'être validé sur d'autres et utilisé en mode prévisionnel, donne des résultats satisfaisants (Figure 3).

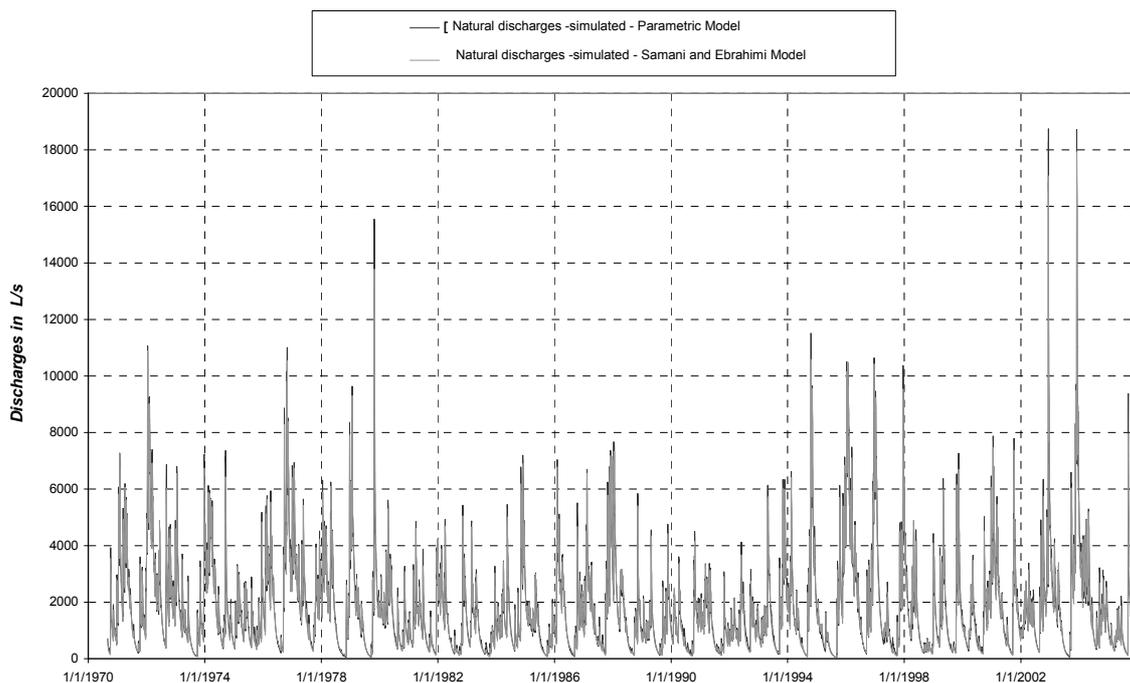


Figure 3: Simulated discharges time series resulting from two different types of models implemented under TEMPO for 1970-2005 period, after calibration phase (17).

Les résultats du deuxième modèle de transfert concernent la simulation des niveaux piézométriques au niveau du conduit intercepté par les forages pour le pompage. De manière générale, ce modèle permet de reproduire les importantes variations du niveau piézométrique (environ 30m) par rapport aux variations liées aux précipitations (3 mètres maximum) (Figure 4). Le coefficient de Nash a une valeur comprise entre 0.83 et 0.95 en fonction du modèle de transfert sélectionné et des chroniques de débits naturels considérées. Le paramètre de

sollicitation utilisé, correspondant à la sollicitation des réserves lorsque le débit pompé est supérieur du débit naturel de la source, est variable au cours de la période d'exploitation. Entre 1974 et 1982 la valeur de sollicitation est de 44% alors que pour la période 1982-2005, cette valeur est supérieure, avec 55%. Il y a encore quelques incertitudes à lever concernant les résultats, mais ils ont été considérés de qualité suffisante pour mener les analyses concernant le comportement hydrodynamique du système.

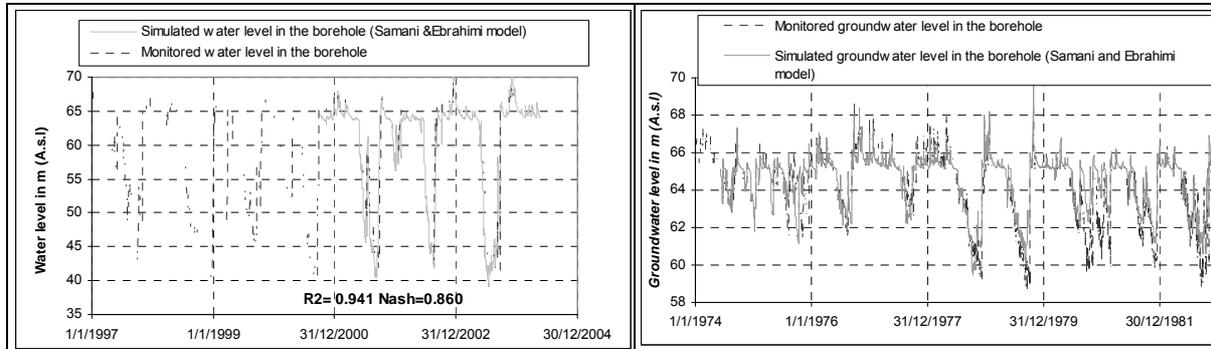


Figure 4: Example of validation of simulated groundwater level and forecasting at the Lez spring (between 1997 and 2005 and between 1974 and 1981 (15)).

Les résultats des analyses des courbes de récession effectuées pour les deux périodes, à savoir (1949-1968) et (1974-2005) sont présentés de manière synthétique dans le tableau suivant:

Paramètres	Minimum	Mean	Maximum	Ecart-type
Période 1949-1968				
Coefficient de tarissement (j^{-1})	0.007	0.0086	0.012	0.005
Volume dynamique ($10^6 m^3$)	2.49	5.2	10.5	2.1
Volume total d'eau lors de la récession ($10^6 m^3$)	10.2	13.88	17.61	2.44
Retard à l'infiltration i	0.635	0.767	0.892	0.081
Pouvoir de régulation K	0.036	0.089	0.158	0.042
Période 1974-2005				
Coefficient de tarissement (j^{-1})	0.026	-	-	0.011
Volume dynamique ($10^6 m^3$)	5.8	-	-	2
Pouvoir de régulation K	0.1	-	-	0.04

L'analyse des débits classes sur les chroniques depuis 1949 jusqu'à 2006 nous renseigne sur une amélioration des écoulements au sein de l'aquifère pour des débits supérieurs à $2 m^3/s$. Les analyses corrélatoires spectrales simples et croisées sur les chroniques de précipitations et de débits, montrent que les précipitations sont caractérisées par une structure aléatoire, que l'effet mémoire du système est de l'ordre de 40 jours. Pour les différentes périodes d'analyses, l'effet mémoire du système est de manière générale plus long (entre 40 et 70 jours) pour la période anté-1982. Pour la période actuelle, il est sensiblement plus court, avec des valeurs comprises entre 35 et 55 jours (17).

Depuis décembre 1982, la source du Lez est soumise à une gestion active; le régime d'écoulement de la source est ainsi influence: le débit moyen de pompage est de $1.1 m^3/s$, ce qui correspond à un volume de $33 * 10^6 m^3$ par année. Les différentes analyses effectuées sur

les chroniques de débits montrent un changement du comportement hydrodynamique du système avant et après 1982. Le coefficient de tarissement calculé sur la série simulé de débits pour la période 1974-2005 est de $0.026 \pm 0.011 \text{ j}^{-1}$, traduisant une amélioration du drainage de la zone saturée de l'aquifère. Ces résultats sont ainsi en cohérence avec les résultats des analyses corrélatoires et spectrales (effet mémoire plus court) et les analyses des débits classés. Cette amélioration des écoulements peut être liée à un déboufrage des conduits karstiques et/ou à une réactivation de conduits par le pompage. Cependant, la capacité de stockage au sein de l'aquifère ne semble pas être modifiée par la gestion active. Le système karstique du Lez est semble-t-il plus transmissive depuis son exploitation par gestion active.

II.2. Le système karstique de la source de Figeh, Damas (Syrie)

II 2.1. Contexte géologique et hydrogéologique

La source de Figeh est située au Nord-Nord-Ouest de Damas en Syrie. Son bassin d'alimentation de quelques 700km² (18) se développe au niveau de l'Anti-Liban. Plus des trois quarts de la surface de recharge du système sont situés à une altitude supérieure à 1900m. Les limites de la zone de recharge sont d'une part au Nord Ouest la vallée de la Bekka, la rivière Barada au Sud et au Sud-Est le grand bassin sédimentaire tertiaire. La structure générale présente au niveau du bassin d'alimentation est monoclinale plongeant vers le Sud-Est, mais perturbée par une succession d'anticlinaux et synclinaux sub-parallèles. La source de Figeh émerge au niveau d'une zone complexe, zone de jointure des anticlinaux de Khadra et de Hassiya, marqué par un accident majeur également. La zone d'émergence comprend également deux autres sources : une source latérale (Side spring) et la source Harouch.

Le système karstique de Figeh se développe essentiellement au sein des formations carbonatées du Crétacé supérieur, avec le complexe Cénomaniens-Turonien, surmontées au niveau de l'exutoire par des dépôts quaternaires. Du point de vue lithologique, le Cénomaniens est caractérisée par des alternances de calcaires massifs compacts à la base, des calcaires fossilifères et des calcaires argileux en plaquettes, ainsi que des marnes jaunâtres au sommet de cette séquence. Des niveaux dolomitiques peuvent également être présents au sein de ces séquences. L'épaisseur maximale du Cénomaniens est environ 600 mètres. Du point de vue lithologique, le Turonien est constitué de calcaires dolomitiques et de dolomites, qui renferment des phénomènes karstiques dans l'environnement immédiat de la source de Figeh, notamment (18). Des cavités se développent parallèlement à la stratification du Turonien, mais peuvent également être influencées par de la fracturation. La partie inférieure de la cavité de la source de Figeh est constituée de brèches.

Du point de vue hydrologique, les débits de la source sont compris entre 1.4 m³/s (année sèche) et 28.3 m³/s pour les périodes humides. Le débit moyen calculé sur plusieurs cycles hydrologiques est de 7.7 m³/s. Les précipitations annuelles sont de quelques 600mm, ces dernières intervenant essentiellement à la fin de l'automne, en hiver (sous forme de couvert neigeux) et au début du printemps (18). La décharge principale de l'aquifère se fait au niveau de la source, mais également au niveau de la rivière Barada où des jaugeages différentiels ont mis en évidence des sorties d'eaux souterraines dans la rivière, apportant des contributions importantes (le débit augmente de 0.5 à 0.9 m³/s au niveau des affleurements du Turonien dans le lit de la rivière (18)).

II.2.2. Conditions d'exploitation

Au vu des débits importants et des besoins grandissant, des explorations ont été effectués avec la réalisation d'une dizaine de forages à proximité de la source de Figeh (rayon de quelques 150m), avec comme objectif la réalisation d'essais de pompage en prenant en considération les relations eaux souterraines- eaux de surface, mais aussi les relations entre source. La durée des essais réalisés en septembre 1982 au niveau de la source de Figeh et de la source latérale (Side spring) est de 7 à 10 jours, de 4 jours en octobre 1983 au niveau de la station pilote. Les débits de pompage sont compris entre 0.5 et 2.2 m³/s.

Une station pilote de pompage a été installée comprenant une batterie de 20 puits interceptant le réseau de conduits de la source de Figeh, avec quatre pompes dans la cavité (18). L'eau est pompée au niveau de la cavité et d'un tunnel connecté à la batterie de puits où trois pompes d'une capacité chacune de 1 m³/s prélève l'eau du système karstique. L'objectif du pompage était de tester une augmentation du débit de la source en période d'étiage. L'effet du pompage sur le réseau d'observation est variable, indiquant que le système karstique de la source de Figeh est hétérogène. Le système karstique de Deir Moukarren situé à l'Ouest (2km environ de la source de Figeh) est indépendant ou mal connecté à celui de Figeh ; un débit additionnel de 2m³/s peut être extrait de ce système. En conclusion, le pompage jusqu'à 4 m³/s au niveau de la station pilote permet d'augmenter le débit en période d'étiage de quelques 600 l/s. Le rabattement maximum observé dans la cavité sous la source latérale avec un pompage de 1m³/s au niveau de la source Ain Harouch et de 3m³/s au niveau de la station est de 1.17m au niveau de la cavité et de 0.27m à la source Ain Harouch. L'exploitation actuelle en plus d'une station d'embouteillage, de la source de Figeh avec un débit de 4m³/s assure l'alimentation en eau potable de Damas.

III. PERSPECTIVES

Les deux exemples présentés mettent en évidence que la gestion active d'un système karstique permet d'exploiter le système à un débit supérieur au débit d'étiage et d'assurer les besoins en eau sans pour autant surexploiter le système à l'échelle d'un ou plusieurs cycles hydrologiques. Ce type d'exploitation s'il ne permet pas d'augmenter les conditions de stockage au niveau de l'aquifère, peut augmenter la fonction transmissive du système.

Un modèle de type fonctions de transfert basé sur le modèle conceptuel de l'aquifère permettant de reconstituer les hydrogrammes ainsi que les niveaux piézométriques du conduit peut être utilisé pour simuler différents scénarios de gestion ou des scénarios liés au changement climatique.

Dans le cadre du système karstique du Lez soumis à des événements pluvieux importants en automne notamment donnant lieu à des inondations à l'aval du système karstique, la gestion active pourrait être un des moyens de réduire l'impact de ces fortes précipitations. L'impact des précipitations dépendant de l'état de saturation du système, deux événements pluvieux ne vont pas avoir le même impact, de plus si le pompage sollicite ou non les réserves de l'aquifère. Une modélisation couplée hydrologie et hydrogéologie permettrait de prendre en compte la contribution du karst par débordement aux écoulements de surface. Le système karstique en gestion active pourrait permettre de réduire les effets des premières crues automnales (150mm par ex.), des simulations sont nécessaires. Le dispositif actuel permettrait de réduire les effets de précipitations d'intensité de 300mm (8).

Considérant la rareté et la surexploitation des eaux de surface dans les pays méditerranéens, l'exploitation par gestion active des aquifères karstiques représente un atout pour le futur. La méthodologie développée de modélisation peut être appliquée à d'autres systèmes karstiques

où la gestion active peut être appliquée. D'autres approches de modélisation pourront être également testées, comme celle développée pour l'interprétation d'essais de pompage par (4).

Remerciements

Nous remercions la ville de Montpellier, Veolia Water pour la mise à disposition des données utilisées dans le cadre de ce projet soutenu par l'IFR ILEE ainsi que par le BRGM dans le cadre du projet cadre EAUR15 COMPLEX'AQUI.

Références bibliographiques

- (1) **Király, L.**, 1998 - Modeling karst aquifers by the combined discrete channel and continuum approach. Bulletin d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, 16, 77-98.
- (2) **Bauer S., Liedl R., Sauter M.** 2005 - Modeling the influence of epikarst evolution on karst aquifer genesis: A time-variant recharge boundary condition for joint karst-epikarst development, Wat. Resour. Res. 41, et al. (2005):
- (3) **Bakalowicz M.**, 1999 - Guide technique N°3, Bassin Rhône Méditerranée-Corse, Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques, 44p. Juin 1999.
- (4) **Maréchal J.Ch., Ladouche B., Dörfliger N., Lachassagne P.**, 2008 - Interpretation of pumping tests in a mixed flow karst system, Water Resources Research, accepté.
- (5) **Droque, C.** 1963 - Essais de délimitation du bassin d'alimentation d'une résurgence des karsts noyés languedociens. Ann. Spéléol., 18, 4, p. 409 -414.
- (6) **Droque, C.** 1969 - Contribution à l'étude quantitative des systèmes hydrologiques karstiques d'après l'exemple de quelques karsts périméditerranéens. Thèse de Doctorat Université des sciences et techniques du Languedoc 482p.
- (7) **Thiery D., Bérard P.**, 1983 - Alimentation en eau de la ville de Montpellier - CAPTAGE DE LA SOURCE DU LEZ - études des relations entre la source et son réservoir aquifère, Rapport n°1, Rapport 83 SGN 167 LRO.
- (8) **Fleury P., Ladouche B., Conroux Y., Jourde H., Dörfliger N.** 2008 - Modelling the hydrologic functions of a karst aquifer under active water management – the Lez spring, Journal of Hydrology (submitted).
- (9) **Avias J.**, 1995 - Gestion active de l'exurgence karstique de la source du Lez (Hérault, France) 1957-1994, Hydrogéologie 1, 113-127
- (10) **Paloc H.** (1979) – Alimentation en eau de la ville de Montpellier – Localisation d'un emplacement de captage dans le réseau souterrain de la source du Lez – Détermination de ses principales caractéristiques en préalable à l'exécution des travaux – Rapport BRGM 79 SGN 654 LRO, 16p.
- (11) **Pinault, J. L., H. Pauwels, and C. Cann.** 2001a - Inverse modelling of the hydrological and the hydrochemical behaviour of hydrosystems: Application to nitrate transport and denitrification. Water Resources Research 37, no 8: 2179-2190
- (12) **Pinault, J. L., V. Plagnes, L. Aquilina, and Bakalowicz M.** 2001b-Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems: characterization of karst system functioning. Water Resources Research 37, no 8: 2191-2204.
- (13) **Pinault, J. L., Dörfliger N., Ladouche B., and Bakalowicz M.** 2004 - Characterizing a coastal karst aquifer using an inverse modeling approach: The saline springs of Thau, southern France. Water Resources Research 40: 17.
- (14) **Pinault, J. L.** 2001 - Manuel d'utilisateur de TEMPO: logiciel de traitement et de modélisation des séries temporelles en hydrogéologie et en hydrogéochimie. Projet Modhydro.BRGM report RP51459-FR, 221p.

- (15) **Dörfliger N., Jourde H., Ladouche B., Fleury P., Lachassagne P., Conroux Y., Pistre S., Vestier A.**, 2008-Active water management resources of karstic water catchment: the example of Le Lez spring (Montpellier, South France), WWC 2008, soumis
- (16) **Samani N.& Ebrahimi B.**, 1996 - Analysis of spring hydrographs for hydrogeological evaluation of a karst aquifer system. *Theor. Appl. Karstol.* 9 (1996), pp. 97–112.
- (17) **Conroux Y.**, 2007 - Caractérisation du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère karstique du Lez (Hérault) à l'état naturel. Mémoire de Master II Pro, Hydrogéologie et environnement Université d'Avignon et du Pays de Vaucluse, BRGM, 225p.
- (18) **LaMoreaux P.E., Hughes T.A., Memon B.A.**, 1989 - Hydrogeologic assessment – Figeh Spring, Damascus, Syria. *Environ. Geol. Water Sci.*, Vol 13, N°2, 73-127.

Stratégie de protection des ressources en eau dans le karst : où en est-on en France ?

Pierre Marchet⁽¹⁾, Laurent Cadilhac⁽²⁾

⁽¹⁾ Agence de l'Eau Adour-Garonne, 90 rue du Férétra 31078 Toulouse Cedex 4 - pierre.marchet@eau-adour-garonne.fr

⁽²⁾ Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée & Corse, Unité méthodes et prospective - 2/4, allée de Lodz 69363 Lyon cedex 07 - laurent.cadilhac@eaurmc.fr

Les deux Agences de l'Eau Rhône-Méditerranée & Corse et Adour-Garonne se sont engagées ensemble dans une démarche visant à protéger les ressources en eau d'origine karstique, très présentes et largement utilisées sur leur territoire.

Elle consiste en deux étapes, dont la seconde est encore en cours :

- *un état des lieux, et de premières préconisations sur les procédures de protection des captages d'eau potable en milieu karstique en France ;*
- *proposer ensuite, à l'aide d'un document largement diffusé, des stratégies pour la protection des ressources en eau dans les secteurs karstiques, s'appuyant sur des guides techniques spécialisés.*

Initiée en 2004, cette démarche encore en cours prend en compte :

- *les évolutions récentes en matière législative et réglementaire ;*
- *les orientations stratégiques de l'action publique ;*
- *les projets de guides techniques spécialisés.*

I. INTRODUCTION

On peut situer au début du 20^{ème} siècle les premières initiatives de protection, avec la loi relative à la santé publique du 15 février 1902 (1), souvent nommée « loi Martel », qui disposait, dans son article 28 : « ... Est interdit...l'abandon de cadavres d'animaux, de débris de boucherie, fumier, matières fécales et, en général, de résidus animaux putrescibles dans les failles, gouffres, bétoires ou excavations de toute nature... »

En effet, le même E.A. Martel écrivait dès 1894, dans « Les abîmes » (2) que "la présence de matière en décomposition au fond d'un gouffre pouvait contaminer une source distante de quelques centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres". Il avait été lui-même victime dans le département du Lot, quelques années avant, d'une intoxication liée à un cadavre de veau en décomposition dans un gouffre ayant pollué une source voisine. Il avait visité le gouffre, bu l'eau de la source, et fait à ses dépens le rapprochement.

La connaissance du karst et sa protection ont progressé, depuis un siècle, mais les sources de pollution potentielle sont aussi devenues plus nombreuses.

Les *pollutions ponctuelles* étaient déjà celles identifiées par le courant hygiéniste du 19^{ème} siècle (dont la loi de 1902 est issue), en particulier les pollutions bactériologiques.

Les *pollutions accidentelles* sont devenues plus fréquentes au fur et à mesure du développement des transports terrestres, et de l'implantation de nombreuses activités et installations de toute nature, jusque chez les particuliers (comme les cuves à mazout).

Les problèmes de *pollutions diffuses* sont apparus de manière notable il y a quelques dizaines d'années, avec la modification des pratiques (agricoles, mais aussi le traitement des espaces « publics » : routes, rues, voies ferrées... et privés : jardins, cours...), pour les nitrates et les

produits phytosanitaires en particulier, mais on peut aussi citer notamment les solvants chlorés.

Dans le même temps, on est passé en un siècle (au moins pour les scientifiques et praticiens de l'hydrogéologie et des géosciences), d'une conception du karst exclusivement tournée vers les vides souterrains pénétrables par l'homme (en 1895, E.A. Martel crée la **Société de Spéléologie** dont le but est l'exploration des cavernes), au concept d'un aquifère particulier, dont les spécificités sont de mieux en mieux appréhendées.

L'une d'entre elles est le fait que l'impact d'une pollution (ponctuelle ou non) n'est pas forcément fonction de la distance par rapport au captage. Cela avait déjà été pressenti par Martel dans son texte des Abîmes (cf. supra). Pourtant, il faudra attendre les années 1990 pour voir apparaître dans notre droit la notion de périmètre de protection immédiat satellite (disjoint de celui situé autour du captage).

Plus globalement, alors que les textes législatifs et les plans d'actions instaurant l'obligation de mise en place des périmètres de protection se succèdent en fixant des échéances (lois sur l'eau de 1964, 1992, Plan National en Santé Environnement...), le constat est que pour les captages en milieu karstique, le retard est nettement plus important que pour les aquifères en milieu poreux ou fissuré.

Pour infléchir la tendance, les deux Agences de l'Eau Rhône-Méditerranée & Corse, et Adour-Garonne, particulièrement concernées, se sont engagées ensemble dans une démarche en deux étapes visant à la protection des ressources en eau karstiques, en portant chacune une phase du projet.

II. PROCEDURES DE PROTECTION DES CAPTAGES D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE EN MILIEU KARSTIQUE EN FRANCE : BILAN ET PRECONISATIONS

Cette première phase, portée par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée & Corse, a été réalisée en 2004-2005 par le bureau d'études GINGER Environnement, sous le contrôle d'un comité de pilotage associant Agences de l'Eau (les 2 porteurs du projet + l'Agence de l'Eau Seine-Normandie), services de l'Etat, collectivités, universités, BRGM (3). Elle fait le point sur la situation existante (état des lieux, analyse des diverses causes du retard ou au contraire des stratégies « gagnantes ») et fait des propositions pour améliorer la situation (3, 4).

II.1. Le bilan

Les procédures de protection comprennent 3 étapes :

- l'étape amont concernant l'organisation et les stratégies départementales ;
- l'étape de procédure aboutissant aux périmètres de protection réglementaires ;
- l'étape d'application des mesures de protection, de gestion et de suivi des périmètres de protection.

Dans ces 3 phases, à partir :

- des retours d'expériences disponibles dans la bibliographie et des témoignages d'une douzaine d'experts rencontrés ;
- d'une quinzaine d'études de cas, essentiellement sur la base d'entretiens avec les acteurs impliqués dans la conduite des procédures, dans le sud de la France, les Alpes, le Jura, et la Normandie ;

on fait le constat que les problèmes ne sont pour la plupart pas spécifiques aux procédures de protection en milieu karstique. Toutefois, certains facteurs tendent à exacerber les difficultés

en domaine karstique : ressources souvent mal connues, analyse de la vulnérabilité et des risques plus délicate du fait de la complexité de la structure et du fonctionnement des aquifères, de la taille des bassins d'alimentation, et donc du nombre de collectivités concernées.

II.2. Les préconisations

En réponse aux difficultés identifiées, la seconde partie propose des pistes d'amélioration dans tous les domaines : organisationnels, administratifs, méthodologiques, réglementaires et techniques.

Ces préconisations concernent tant les procédures réglementaires de protection des captages que les démarches générales de préservation des ressources. Les grands chapitres de ces propositions concernent :

- les objectifs de la protection ;
- l'encadrement des procédures au niveau départemental ;
- l'étape de lancement de la procédure ;
- le contenu des études préalables ;
- la définition des périmètres de protection ;
- les prescriptions dans les périmètres de protection ;
- les actions à l'échelle des aires d'alimentation ;
- les solutions techniques au niveau des installations d'adduction ;
- l'intervention de l'hydrogéologue agréé ;
- la mise en œuvre de la stratégie de protection.

On trouvera plus de détails dans le rapport (3) et la synthèse (4).

Enfin, il a été également clairement identifié la nécessité de mettre à la disposition des praticiens (bureaux d'étude, hydrogéologues agréés...) et des donneurs d'ordre (maîtres d'ouvrage des captages, conseils généraux, services de l'Etat...) des documents faisant le point des méthodes développées depuis une vingtaine d'années par les spécialistes du karst, mais encore peu diffusées hors du cercle des spécialistes.

Il est ainsi préconisé la réalisation de guides techniques et méthodologiques concernant les thèmes suivants :

- identification et caractérisation d'un système karstique ;
- traçages de reconnaissance et traçages quantitatifs en vue de simulations de pollutions dans un système karstique ;
- délimitation des périmètres de protection en milieu karstique, à partir de méthode(s) d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque.

III. UNE ETAPE INTERMEDIAIRE DE DIFFUSION DES CONCLUSIONS

L'année 2006 a été consacrée à faire connaître les préconisations de cette étude, dans des colloques (5,6), et par une large diffusion de la synthèse (4), à la fois par courrier (500 exemplaires) et par voie électronique.

L'objectif était de tester l'accueil réservé à ces propositions, en termes de :

- pertinence ;
- faisabilité (technique, organisationnelle, règlementaire...) ;
- acceptabilité, sociale et financière ;

afin d'orienter la seconde partie de la démarche, celle-ci devant aboutir à un guide méthodologique à destination des différents acteurs impliqués dans les procédures de

protection (maîtres d'ouvrage et leurs exploitants, collectivités territoriales, Agences de l'eau, administration, hydrogéologues agréés, bureaux d'étude).

IV. STRATEGIES DE PROTECTION DES RESSOURCES EN EAU DANS LES SECTEURS KARSTIQUES

C'est l'objectif de la seconde phase de la démarche, lancée au début de 2007, qui est en cours de réalisation. Elle est portée par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, et réalisée par le même bureau d'études que pour la première phase (GINGER Environnement), sous le contrôle d'un comité de pilotage associant de nouveau des membres des 3 mêmes Agences de l'Eau, des services de l'Etat, collectivités, universités et BRGM.

IV.1. Analyse des réactions suite à la publication de l'étude de 2005

Comme souvent, le taux de réponse « spontanées » aux sollicitations d'avis largement diffusées en 2006 a été assez faible.

Il a donc été réalisé, en complément, une enquête téléphonique auprès d'une liste de 20 personnes choisies par les 2 Agences de l'eau, ainsi que des entretiens avec 5 experts nationaux (dont les services des 2 ministères chargés de la Santé et de l'Environnement).

Sur la base de toutes ces réponses, les 31 préconisations de la première étude ont été regroupées en 27, et leur devenir a été examiné par le comité de pilotage :

- retenir en l'état pour le guide méthodologique, avec la même formulation ;
- reformuler et/ou préciser ;
- approfondir (notamment en cherchant des exemples concrets : cela concerne en priorité les dispositions spécifiques au karst ; pour les autres, il est simplement prévu de rechercher et rappeler les éléments disponibles par ailleurs, pour permettre au lecteur d'avoir en un document unique une vision globale du sujet) ;
- renvoi aux 3 guides techniques spécialisés évoqués au II.2 ;
- faire référence au Référentiel à l'usage des hydrogéologues agréés en matière d'hygiène publique par le Ministère chargé de la Santé.

Le rapport d'étape correspondant sera prochainement disponible.

IV.2. Un cadre législatif et réglementaire en évolution

Au moment où le cahier des charges de cette 2^{ème} phase a été rédigé (2006), on était en attente de plusieurs évolutions notables annoncées dans le paysage législatif et réglementaire français, en ce qui concerne la protection des captages et des ressources en eau.

En effet, après un long travail d'audit, le Commissariat Général du Plan avait publié en 2001 un rapport sur la politique de préservation de la ressource en eau destinée à la consommation humaine (7) ; après le constat des difficultés, il synthétisait les idées qui se faisaient jour un peu partout, en affirmant notamment la nécessité de mettre en œuvre d'autres outils que les périmètres de protection pour maîtriser les pollutions diffuses en particulier d'origine agricole, et préconisait également des améliorations pour accroître l'efficacité de ces périmètres.

Les traductions législatives puis réglementaires de ces préconisations se sont échelonnées dans le temps et dans plusieurs textes modifiant le code de la Santé Publique et celui de l'Environnement, le dernier étant la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006 (LEMA), notamment son article 21 (certains décrets ou circulaires sont encore à venir). Les conséquences de ces différentes mesures sur les captages en milieu karstique sont

notables, ceux-ci ayant généralement des bassins d'alimentation de plus grande dimension que les autres.

Parallèlement, le Ministère chargé de la Santé achève l'élaboration d'un document intitulé pour l'instant « Référentiel à l'usage des hydrogéologues agréés en matière d'hygiène publique » qui intègre les toutes dernières évolutions et constitue en quelque sorte un vademecum à l'usage des hydrogéologues agréés et de ceux qui font appel à leurs services.

Il faut évoquer également la prise en compte progressive des différentes dispositions prévues par la Directive Cadre européenne sur l'eau du 23 octobre 2000, selon le calendrier qu'elle définit. En particulier, l'article 10 de l'arrêté du 17 mars 2006 fixant le contenu du SDAGE 2009 prévoit que les futurs SDAGE :

- identifient les zones utilisées actuellement pour l'alimentation en eau potable pour lesquelles des objectifs plus stricts seront fixés afin de réduire les traitements nécessaires à la production d'eau potable ;
- proposent les zones à préserver en vue de leur utilisation future pour des captages destinés à la consommation humaine.

Enfin, on ne peut passer sous silence les suites du Grenelle de l'Environnement, qui se traduisent en particulier par la volonté affirmée de protéger les 500 captages d'eau potable les plus menacés d'ici 2012 (captages dits « prioritaires »), en engageant dès 2008 des actions de l'Etat et des Agences de l'Eau.

Pour cela, des directives ont été données par la Direction de l'Eau du ministère en charge de l'Environnement. Elles précisent le calendrier de mise en œuvre de l'article L211.3, II-5° du Code de l'Environnement (article 21 de la LEMA) et son décret d'application n°2007-882 du 14 mai 2007, qui définissent les conditions dans lesquelles l'autorité administrative peut délimiter des zones où il est nécessaire d'assurer la protection qualitative et quantitative des aires d'alimentation des captages d'eau potable. Ce dispositif prévoit plusieurs étapes :

- Identification des captages prioritaires
- Définition des aires d'alimentation des captages prioritaires
- Délimitation des zones de protection au sein des aires d'alimentation de captages
- Définition des programmes d'action, validés par arrêtés préfectoraux (selon les modalités énoncées aux articles R.114-6 et R.114-7 du code rural).

IV.3. Guide méthodologique « stratégies de protection des ressources en eau dans les secteurs karstiques »

La conception, la réalisation et la publication de ce guide est l'objectif final de la démarche engagée par les deux Agences de l'Eau Rhône-Méditerranée & Corse, et Adour-Garonne.

Il est destiné aux maîtres d'œuvres, maîtres d'ouvrages, administrations, hydrogéologues, et autres acteurs concernés ; il a pour but de proposer :

- une ou plusieurs stratégie(s) de mise en place des périmètres de protection autour des prises d'eau en karst selon les différentes typologies identifiées dans la 1^{ère} étude (selon la nature des ressources captées : petit ou grand système karstique, captage de source ou de forage) mais aussi selon la taille des collectivités concernées ;
- plus généralement des stratégies de prévention contre les pollutions adaptées aux différents types de situations rencontrées, notamment les actions d'accompagnement dans l'aire d'alimentation (visant à protéger la ressource et pas seulement le captage) et le rôle des acteurs (information, sensibilisation, suivi, ...).

Il est prévu de l'accompagner d'une trame de cahier des charges des études préalables (tronc commun et variantes pour satisfaire à l'ensemble des situations) :

- qui intègre les meilleures avancées des différents cahiers des charges existants ;
- qui prenne en compte l'état actuel de l'art ;
- qui comprenne les actions à mettre en oeuvre dans l'aire d'alimentation.

Ce guide méthodologique doit intégrer toutes les évolutions récentes ou en voie de finalisation évoquées au IV.2, et le cahier des charges initial donc doit subir quelques modifications pour s'adapter à ce nouveau contexte.

Il est néanmoins prévu qu'à la fin de l'année 2008, le guide méthodologique soit quasiment achevé.

V. GUIDES METHODOLOGIQUES SPECIALISES

V.1. Guide méthodologique « Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses »

La volonté conjointe de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (pour mieux encadrer techniquement les actions déjà engagées lors de son précédent programme sur les « bassins d'alimentation de captages », dits BAC) et du ministère en charge de l'Environnement (pour mettre en oeuvre l'article 21 de la LEMA), a conduit à la réalisation par le BRGM d'un guide méthodologique traitant de tous les milieux, aquifère continu, discontinu fissuré et discontinu karstique (8).

Il décrit très synthétiquement les méthodes de délimitation de l'aire d'alimentation, et de cartographie de la vulnérabilité pour chaque type de milieu ; il préconise la méthode RISKE 2 pour la cartographie de la vulnérabilité en milieu karstique.

Dès 2005, on faisait le constat (cf. II.2), confirmé par les réactions recueillies ensuite, de la nécessité de mettre largement à disposition, par des guides, les méthodes spécifiques d'étude du karst, en adaptant le discours à un public technique mais pas obligatoirement spécialiste du karst.

La sortie du guide ci-dessus (8) a conforté les 2 Agences de l'Eau Rhône-Méditerranée & Corse, et Adour-Garonne dans la nécessité de mettre en forme très rapidement les guides détaillés identifiés lors de la première phase de leur démarche. Ceux-ci deviennent d'autant plus nécessaires, en tant que compléments pour approfondir les méthodes évoquées et brièvement décrites, qu'il s'agit de les appliquer sur les captages en milieu karstique parmi les 500 captages prioritaires, soit de 30 à 40% très certainement (150 à 200 captages) si cela reste proportionnel à la superficie du territoire concernée par le karst.

Pour cela, elles ont demandé l'inscription de ces projets au programme 2008 de service public du BRGM.

V.2. Guide méthodologique « Cartographie de la vulnérabilité en milieu karstique par la méthode RISKE 2 »

Cette cartographie de la vulnérabilité intrinsèque est indispensable à l'élaboration d'une carte des risques (croisement de l'aléa et de la vulnérabilité), qui constitue elle-même une aide à la décision quant à la mise en place des mesures de protection.

L'Agence de l'Eau Adour-Garonne a souhaité contribuer à accélérer la réalisation de l'opération en lançant une campagne de sites de tests de la méthode dans des contextes différents (en plateau ou en moyenne montagne, en terrain arboré ou pas, avec ou sans sol épais), et en fonction du fait que l'on dispose ou pas d'études préalables sur le site concerné.

Tous ces essais doivent permettre d'aboutir à une application standardisée de la méthode, mais aussi d'optimiser les modes opératoires pour en rendre le coût le plus abordable possible.

Enfin, dans le but de permettre une mise en œuvre aisée de la méthode, un guide méthodologique détaillé et illustré doit être rédigé : il tiendra compte des avancées et problèmes soulevés par les différents sites de tests, et utilisera leurs résultats pour illustrer par des exemples les différents points abordés. Il doit être clair et compréhensible par ceux qui mettent la méthode en œuvre, en répondant aux questions pratiques qu'ils rencontreront sur le terrain et au bureau :

- des tests sont en cours sur 6 sites ou groupes de sites dans le bassin Adour-Garonne, et 3 sites dans le bassin Seine-Normandie, grâce à la contribution de l'Agence de l'Eau de ce bassin. Ils seront tous achevés à l'automne 2008 ;
- le guide va être réalisé d'ici fin 2008 par le BRGM (N. Dörfliger), avec la contribution de V. Plagnes (Université Pierre et Marie Curie, Paris 6). Il prendra également en compte le retour d'expérience de 10 ans d'application en Suisse de la méthode EPIK (dont la méthode RISKE est dérivée).

V.3. Guide méthodologique « Outils de caractérisation de la structure, du fonctionnement et de l'évaluation des ressources des systèmes karstiques »

La rédaction de ce guide devrait être engagée en 2008 par le BRGM. Il traitera également du volet « traçages », dont il avait été initialement envisagé de faire un document séparé.

Plusieurs universitaires et bureaux d'études ont été associés à la conception du cahier des charges de l'opération, et participeront à sa réalisation en tant que co-traitants du BRGM. La plupart d'entre eux sont des intervenants de cette journée en l'hommage à Michel Lepiller, qui aurait été sollicité pour participer à ce travail s'il était encore parmi nous.

Il est prévu de solliciter les remarques des professionnels sur ce document et le précédent, en cours de conception et avant leur édition définitive, en s'appuyant pour cela sur le sous-comité Karst du Comité Français d'Hydrogéologie qui se chargera de l'organisation de la consultation au sein de la profession.

VI. CONCLUSION

On voit qu'en quelques années, des avancées notables se sont produites en matière législative et réglementaire, qui répondent pour certaines aux difficultés que l'on constatait lors de la première phase de la démarche des Agences de l'Eau Rhône-Méditerranée & Corse, et Adour-Garonne.

L'ambition des deux agences reste de contribuer, par les différents moyens à leur disposition, à faire aboutir plus rapidement les démarches de protection en synergie avec les orientations stratégiques de l'action publique. Pour cela, elles sont attachées notamment à l'achèvement du guide méthodologique qu'elles produisent, qui :

- fera référence à ces nouveautés,
- mais également et surtout développera sur la base d'exemples les volets techniques, d'organisation des acteurs, de stratégie et de scénarios de protection...
- et enfin s'appuiera sur les guides spécialisés décrits au V, dont la nécessité est reconnue pour diffuser hors du cercle des spécialistes les méthodes d'étude du karst.

Références bibliographiques

(1) **Loi du 15 février 1902** :

<http://www2.urbanisme.equipement.gouv.fr/cdu/accueil/histoire/loisantepublique.htm>

(2) **Martel E.A.**, 1894 - Les Abîmes. Les eaux souterraines. Les cavernes. Les sources. La spéléologie. Explorations effectuées de 1888 à 1893. Paris. Delagrave. 1 vol. in 4. 4 phototypies et 16 plans h. t. 100 gravures ; 200 cartes. Plans et coupes. 578 p + table. (réédité par Editions Jeanne Laffitte, 1996).

(3) **Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée & Corse**, 2005 - Bilan et analyse de la mise en œuvre des procédures de protection des captages AEP en milieu karstique. Rapport final : Synthèse des phases 1, 2 et 3. 106p.

(www.eaurmc.fr/documentation/files/bilan-karst.pdf).

(4) **Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée & Corse**, 2006 - Bilan et analyse de la mise en œuvre des périmètres de protection des captages AEP en milieu karstique. Synthèse des préconisations en faveur de l'amélioration des démarches de protection. 28p. (www.eaurmc.fr/documentation/files/captages-karst.pdf).

(5) **Muet P., Vier E., Cadilhac L., Marchet P.**, 2006 - Procédures de protection des captages d'alimentation en eau potable en milieu karstique en France : Bilan et préconisations. *Actes du 8ème Colloque d'Hydrologie en pays calcaire et en milieu fissuré*, 2006, Neuchâtel, Suisse : 191-196. (www.univ-fcomte.fr/pufc - thème sciences)

(6) **Muet P., Vier E., Cadilhac L., Marchet P., Humbert D.**, 2006 - Procédures de protection des captages d'alimentation en eau potable en milieu karstique en France : Bilan et préconisations. *Cahiers de l'Association scientifique européenne pour l'eau et la santé*, vol. 11, n°1 : 41-47.

(7) **Villey-Desmeserets F., Ballay D., Tricard D., Henry de Villeneuve C.**, 2001 - La Politique de préservation de la ressource en eau destinée à la consommation humaine : rapport d'évaluation du Commissariat général du Plan. Paris, *La Documentation française* : 402p. (www.ladocumentationfrancaise.fr/brp/notices/014000744.shtml)

(8) **Vernoux J.F., Wulleumier A., Dörfliger N.**, 2007 - Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Guide méthodologique. Rapport BRGM-RP-55874.FR, 75p, 14 illustrations. (www.brgm.fr/publication/pubDetailRapportSP.jsp?id=RSP-BRGM/RP-55874-FR)

Caractérisation des propriétés des systèmes karstiques d'après l'étude des écoulements

Alain Mangin

Station d'Ecologie Expérimentale du CNRS - Moulis - mangin.cnrs@free.fr

I. PROBLEME POSE

Les résultats obtenus ces dernières décennies sur les systèmes karstiques ont bien souligné leurs spécificités [1,2]. Ces dernières sont dues pour l'essentiel à l'organisation des vides dans le karst qui, en raison des mécanismes de leur mise en place, sont répartis de façon extrêmement hétérogène. Il en résulte une perméabilité anisotrope, mais surtout structurée et organisée suivant leur situation au sein du massif karstique. Par ailleurs, tous les vides n'ont pas la même fonction par rapport aux écoulements. En milieu saturé (karst noyé) certains vides (les drains) assurent la propagation des eaux c'est la fonction transmissive, alors que d'autres (systèmes annexes au drainage) rendent compte de leur stockage ce qui correspond à la fonction capacitive. En milieu non saturé (zone d'infiltration), suivant l'ouverture des fissures et leur élargissement par dissolution, il est possible de distinguer les microfissures (inférieures au millimètre) des macrofissures (supérieures au centimètre) où les écoulements ne répondent pas aux mêmes mécanismes. Dans le premier cas eau et air s'écoulent indépendamment l'un de l'autre (type monophasique) et dans le second air et eau sont entraînés simultanément (type polyphasique)[1].

L'ensemble de ces propriétés détermine un comportement fortement non linéaire de l'hydrodynamisme avec toutes ses conséquences : sensibilité aux conditions initiales, très forte imprédictibilité, impossibilité de faire appel à une modélisation déterministe simple [3,4,5]. Encore faut-il bien préciser ce que sous-tend cette notion, pas toujours bien comprise. Souvent il est fait mention de la non validité de la loi de Darcy, sérieux handicap, mais qui n'est pas vraiment le facteur le plus pénalisant. Plus contraignante en milieu non saturé est la variabilité de la perméabilité qui à cause des perméabilités relatives dues à l'écoulement diphasique est une fonction des apports, donc des pluies, et n'est plus une constante. C'est cette constatation qui interdit par exemple d'utiliser la notion d'infiltration efficace puisque « l'évapotranspiration », fait partie intégrante de l'infiltration. Mais c'est surtout en zone noyée que le problème devient insurmontable car, en raison des contrastes de perméabilité entre drains et systèmes annexes, suivant la durée des événements (les crues) certaines parties seulement de l'aquifère sont concernées : l'aquifère possède dans le temps une géométrie variable.

On doit donc faire appel pour rendre compte du fonctionnement de tels aquifères à des méthodes appropriées qui puissent intégrer ces très fortes non linéarités.

II CONCEPTS ET METHODES UTILISES

Les constatations précédentes pourraient laisser supposer que ce type d'aquifère échappe à toute possibilité de compréhension et de ce fait, malgré son énorme potentiel, ne saurait être utilisé et exploité correctement. C'est ce qui c'est passé pendant très longtemps, donnant aux aquifères karstiques une réputation de ressources certes intéressantes, mais très difficiles à solliciter et à protéger. Depuis quelques années de nouveaux concepts ont été proposés

autorisant une vision nettement plus optimiste et fournissant des moyens pour aborder cette complexité.

Le principe de base, introduit dans le début des années 70, est l'analyse systémique. Le comportement global de l'aquifère n'est plus considéré comme résultant de la somme de comportements spatialement individualisés, ce que suppose et impose l'approche différentielle, mais comme la somme des interactions qui la plupart du temps sont inconnues. De ce concept est né la notion de système karstique parfaitement défini à l'époque [1]. Le karst est ainsi conçu comme un ensemble siège d'un processus dynamique (les écoulements) dont l'étude et la compréhension doit conduire à l'identification de ses propriétés, en permettre une description et *in fine* en faciliter son exploitation. Si ce concept est facile à comprendre et paraît pouvoir résoudre les difficultés rencontrées, sa mise en œuvre reste délicate. Elle fait appel à un tout autre état d'esprit que l'approche hydrogéologique classique et nécessite une très abondante récolte de données en continu des différents paramètres qui rendent compte du fonctionnement. En effet, l'approche systémique impose un suivi des différentes grandeurs qui caractérisent la dynamique du système, soit en tant que fonction d'entrée (la pluie par exemple) ou en tant que fonction de sortie (les débits,...), ou encore comme observable physique (la piézométrie, l'infiltration,...). Ces grandeurs doivent être parfaitement définies quant à leur signification comme identifiant de la dynamique du système et leur incidence en terme d'échelle de temps parfaitement comprise et maîtrisée (effet à court, moyen ou long terme). Or souvent ceci n'est possible qu'à *postériori*. L'ensemble de ces données doivent ensuite être traité soit indépendamment, soit en liaison les unes avec les autres. Pour se faire on dispose à l'heure actuelle de tout un ensemble de méthodes adaptées avec des logiciels performants qui permettent d'en extraire l'information, de reconnaître les signatures physiques qui en sont responsables et ainsi, quelle que soit la difficulté rencontrée, notamment les non linéarités, de pouvoir caractériser la dynamique des systèmes et d'en prévoir le comportement. Ces méthodes s'appellent : analyses corrélatoires et spectrales [6 à 10], analyses en ondelettes continues ou discontinues [11 à 22], Rescaled Range Analysis [23], analyses fractales ou multifractales et analyses des attracteurs [23 à 29].

Leurs utilisations depuis quelques années sur de nombreux exemples aux caractères fort différents ont pu démontrer leur efficacité et le bien fondé de cette approche qui au vu des résultats obtenus laissent entrevoir d'énormes possibilités dans la compréhension et la modélisation des aquifères karstiques.

III. EXEMPLE D'APPLICATION

Il était intéressant de prendre un exemple sur lequel avait travaillé de longue date Michel Lepiller adepte de ces méthodes qui l'avaient convaincu et qu'il voulait développer. Il s'agit du système de Bange-l'Eau-Morte dans le massif des Bauges objet d'un mémoire de DEA réalisé par Thibault Mathevet en 2002 et codirigé par Michel et moi-même. L'idée de Michel était d'ailleurs d'essayer d'appliquer aux paramètres physico-chimiques les techniques utilisées pour l'hydrodynamique. Ici ne sera mentionné que ce deuxième aspect.

On trouvera une description de Bange-l'Eau-Morte dans les travaux de Michel Lepiller [30,31] et dans ceux de Thibault Mathevet [32]. Les données dont nous disposons correspondent à des débits moyens journaliers relevés de 1981 à 1998 (fig.1), ainsi que des débits au pas de 30 minutes enregistrés du 19 octobre 2001 au 9 avril 2002. Les quelques traitements présentés ici donneront un exemple d'emploi des méthodes préconisées.

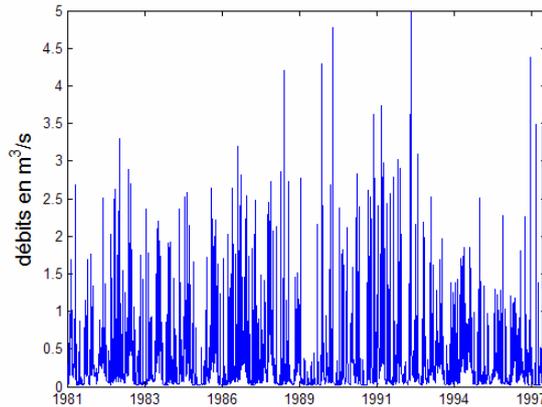


Fig. 1. Débits moyens journaliers de Bange-l'Eau-Morte

- Analyse de la complexité du système et des effets d'échelle.

Au préalable, il est indispensable d'avoir une information précise sur le degré de complexité du système étudié, sur les effets d'échelle et d'en délimiter les intervalles, et sur la validité des données mis à notre disposition. Pour répondre à ces questions, l'analyse multifractale est l'outil approprié en utilisant le formalisme de Frisch et Parisi [33]. Avant de procéder à cette analyse il convient de vérifier que les données fournies traduisent bien le fonctionnement de ce système et que l'on maîtrise la totalité des débits. Pour cela on procède à l'analyse des débits classés au pas de temps journalier [1] qui montre dans l'exemple traité l'absence de rupture dans la répartition des débits (fig.1), indiquant un système unique sans apports supplémentaires ou fuites au cours de son fonctionnement.

La répartition des crues toujours au pas de temps journaliers n'est pas homogène, elle est aléatoire et suit une loi fractale comme le montre le spectre de densité de variances en coordonnées logarithmiques puisque l'on peut aligner une droite dont la pente est de -1,2 (fig.2). On remarque pour les hautes fréquences c'est à dire pour des temps inférieurs à 3j, une pente nulle témoignage d'une forte incertitude sur les données avec un caractère non structuré et qui, de ce fait, ne pourront donc être interprétées en dessous de ces limites.

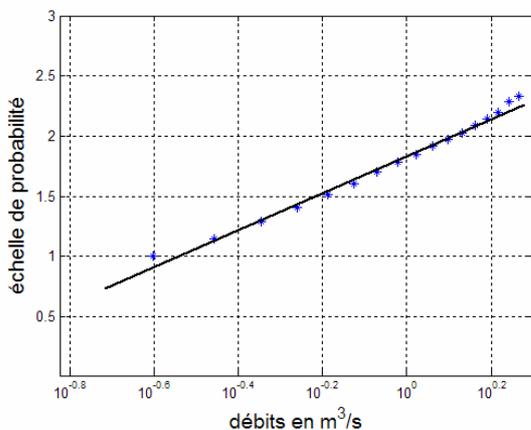


Fig. 1. Analyse des débits classés

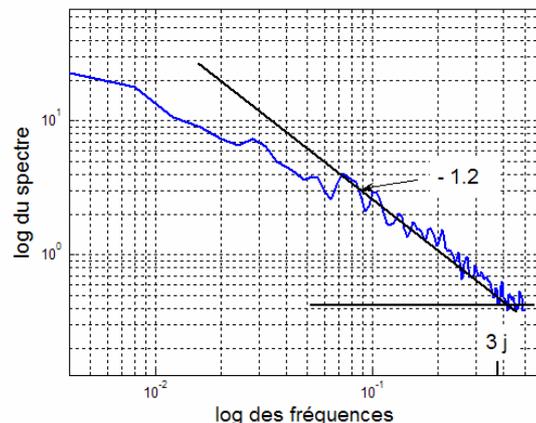


Fig.2. Spectre de densité de variances

Le résultat sur les valeurs au delà de 3j n'est pas surprenant puisque la distribution des crues correspond à la distribution des pluies elle-même aléatoire. Aussi faut-il compléter l'analyse

pour savoir si cette distribution est la même à court, moyen et long terme. Pour ce faire on généralise la procédure précédente en regardant la distribution de tous les moments (la variance correspondait au moment d'ordre deux et fournissait un renseignement global), toujours en coordonnées logarithmiques.

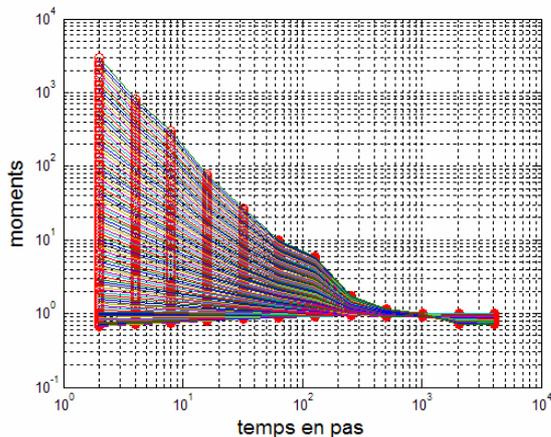


Fig. 3. Distribution des moments

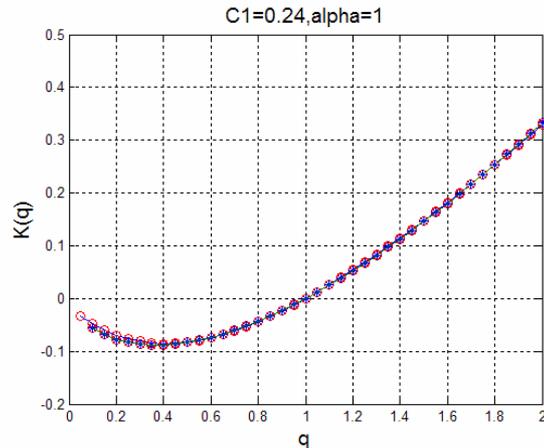


Fig. 4. Spectre multifractale

A partir des abscisses de 1 à 60, on constate que tous les moments s'alignent suivant des droites (fig.3). Dans cet intervalle d'échelle la distribution est fractale donc aléatoire et l'hétérogénéité est continue. Si cette hétérogénéité est identique sur tout cet intervalle, la distribution est monofractale et le spectre multifractale de la distribution des moments serait une droite. Ce n'est pas le cas(fig.4) puisque l'on obtient une courbe qui indique un caractère multifractale . Cela veut dire que la variation des débits ne répond pas aux mêmes mécanismes à court terme et à moyen terme. L'application d'un modèle à cet ajustement permet de calculer deux paramètres $C1$ et α qui respectivement conduisent à caractériser le degré de singularité des événements et à la hiérarchisation de ces singularités. Lorsque $C1$ tend vers zéro la distribution est monofractale c'est à dire que l'hétérogénéité est la même quelle que soit l'échelle, dans ce cas la distribution est stationnaire. Plus $C1$ croit, plus la non stationnarité est forte, les variations à court et long terme sont alors différentes. Ici, les différences restent peu marquées. Ce résultat est proche de celui de la pluie, c'est dire que ce système garde l'hétérogénéité observée au niveau de l'épisode pluvieux (il ne filtre pas l'information) et bien sûr il garde également celle qui correspond à la distribution des pluies. Le coefficient α renseigne sur la loi de variation de cette hétérogénéité par rapport au temps. Lorsque α est égale à 2 la distribution des singularités est lognormale donc variant très fortement suivant l'échelle. Ici, étant égal à 1 la non stationnarité suit une progression linéaire. L'information apportée est intéressante car elle permet de mieux cerner les causes des variations observées sur les débits.

- Nature et comportement du système.

Il convient maintenant d'essayer d'identifier ces causes. L'analyse spectrale montre que ce système karstique est très peu inertiel. En effet, le spectre de densité de variance (fig.5) avec une fenêtre d'observation de deux jours à quelques mois ($k=1$ jour, $m=125$ jours), donc englobant l'hydrogramme unitaire, décroît lentement avec une fréquence de coupure de 0,30.

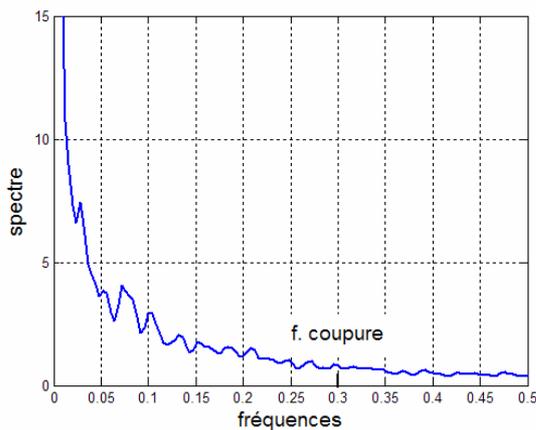


Fig. 5. Spectre de densité de variance

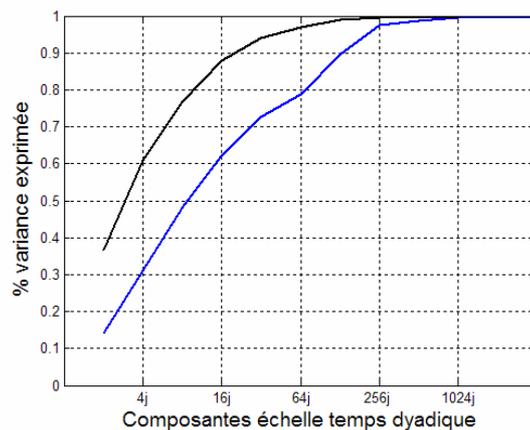


Fig. 6. Répartition de l'énergie suivant l'échelle

A cet égard le système de Bange-l'Eau-Morte se comporte de façon identique au système d'Aliou [2], il est donc très karstifié, sans réserves significatives (résultat confirmé par les volumes dynamiques calculés par T. Mathevet qui sont de l'ordre de 200 000 m³ [32], ce qui pour un karst est négligeable). Cette absence de réserves laisse supposer que le karst ici est très évolué réduit au niveau de l'écoulement aux seuls drains.

La répartition de l'énergie du signal débit en fonction de l'échelle, dont on sait quelle est bien représentée par la variance (théorème de Parseval), en comparaison avec la pluie (fig.6 , la pluie en noir, le débit en bleu) indique la prédominance du court terme au détriment du long terme et un comportement voisin des apports. Ce graphique est obtenu en isolant chacune des composantes du signal à partir de l'analyse en ondelettes orthogonales (multirésolution), et en calculant la variance de chacune d'entre elles.

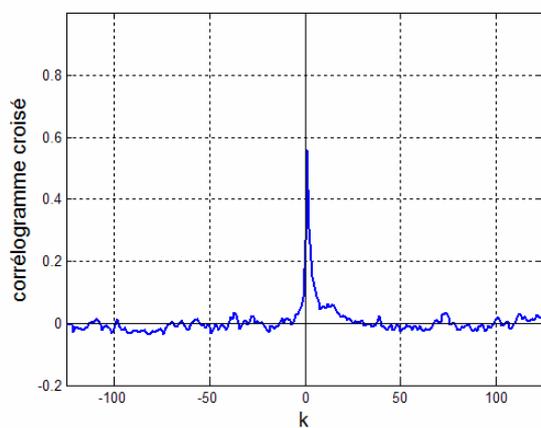


Fig. 7. Image de la réponse impulsionnelle

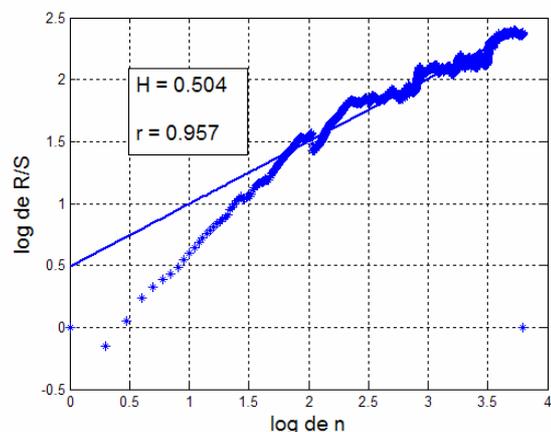


Fig. 8. Analyse R/S

L'analyse croisée pluie-débit, toujours au pas de temps journalier, fournit une bonne image de l' hydrogramme unitaire et corrobore ce résultat avec une réponse très pointue sans soutien des débits à long terme (fig. 7).

L'analyse R/S (Rescaled Range Analysis, [34,35,36] rend compte de la stationnarité de comportement du système à long terme. A partir des débits on construit une statistique appelée R/S dont on regarde la distribution par rapport à l'échelle de temps. Si cette distribution est fractale (les points s'alignent suivant une droite en coordonnées

logarithmiques) il devient alors possible de caractériser le degré de non stationnarité à partir d'une grandeur appelée coefficient de Hurst. Si ce dernier est égal à 0,5 le processus est stationnaire à cette échelle ce qui suggère que le futur et le passé sont indépendants. S'il est égal à 1 le processus est non stationnaire passé et futur sont intimement liés. L'ajustement est bon ($r=0,957$) et le coefficient de Hurst trouvé (0,504) est très voisin de celui obtenu par la pluie, (fig. 8). On peut en déduire qu'une crue n'a pratiquement aucune incidence sur la crue suivante et n'est pas affectée par celle qui la précède.

Cette stationnarité peut être abordée à partir de l'analyse en ondelettes continues (ondelettes de Morlet). Cette analyse permet de regarder par rapport au temps (exprimé en abscisses), comment chaque composante est plus ou moins bien représentée. Si elle est marquée la couleur est rouge, si elle est absente la couleur est bleu foncé, avec bien sûr tous les dégradés. Le graphique obtenu s'appelle un scalogramme.

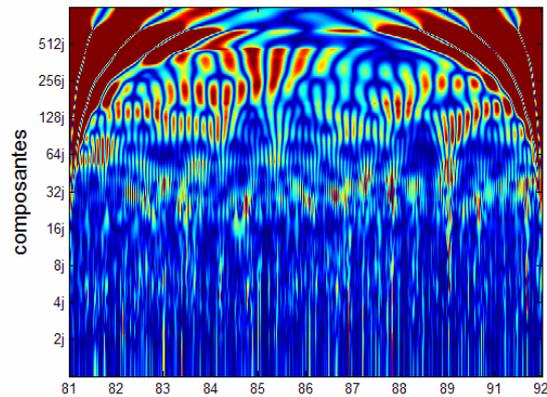
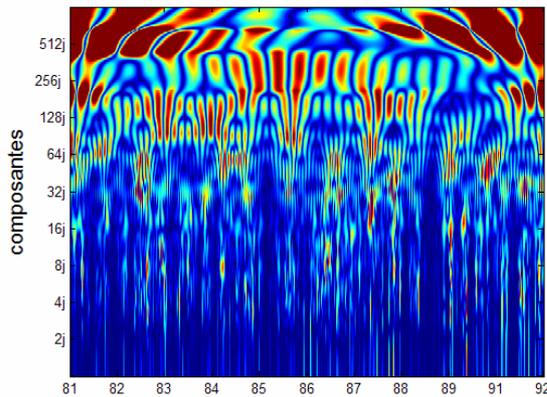


Fig. 9. Analyse en ondelettes des débits Fig. 10. Analyse en ondelettes de la pluie

Les deux scalogrammes (fig. 9 et 10) se ressemblent beaucoup. C'est une preuve une fois de plus que le système de Bange-l'Eau-Morte est très peu inertiel. On retrouve un effet saisonnier annuel mieux marqué malgré tout sur les débits avec un léger dédoublement : étiage d'automne et étiage d'hiver. Le comportement à court terme est très bruité. Il apparaît sur les débits une composante semi annuelle, dont nous allons rechercher l'origine.

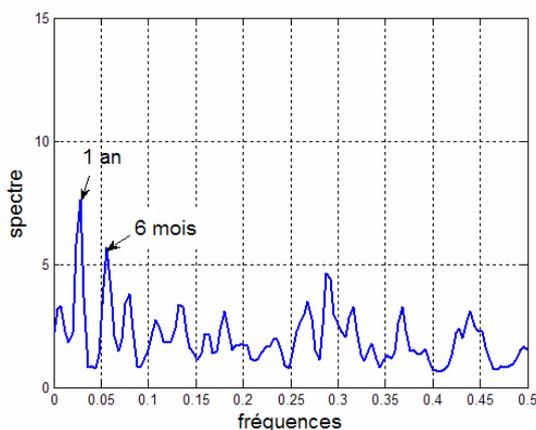


Fig. 11. Spectre sur le long terme débits

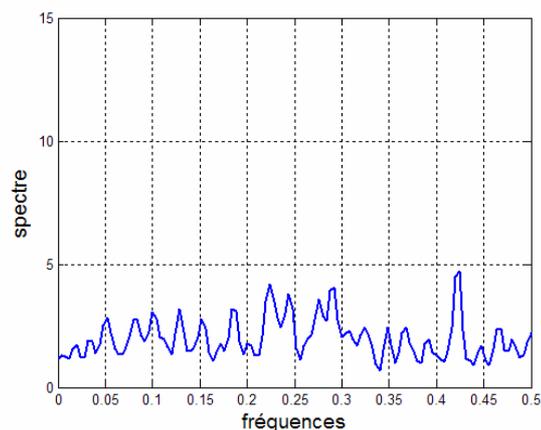


Fig. 12. Spectre sur le long terme pluie

Pour cela, on reprendra l'analyse spectrale en changeant de fenêtre d'observation ($k=10$ jours, $m=1250$ jours, fig.11 et 12).

Sur les débits, apparaissent de façon très claire un pic à 1 ans et un pic à 6 mois, alors qu'ils ne se voient pas sur la pluie, bien que le cycle annuel soit quand même présent sur cette

dernière puisque visible sur le scalogramme. Le spectre fournit une information globale et manifestement le cycle annuel est masqué par une distribution très hétérogène et bien répartie de la pluie. En revanche, bien que les réserves soient faibles, l'effet régulateur du système karstique entraîne une variation saisonnière marquée. Le pic à 6 mois jamais rencontré ne peut être imputé à la pluie et appelle des remarques. Parmi les mécanismes saisonniers qui engendrent un cycle à 6 mois, le seul qui ait pu être identifié, c'est la température. Si cette dernière intervient effectivement sur les débits, cela suppose un régime en partie nival de ce système. Une vérification peut être faite en recherchant la présence d'une fluctuation diurne des débits que seule la température peut justifier.

- Vérification du régime nival.

Pour répondre à cette question il est nécessaire de changer d'échelle et de travailler

sur des données au pas de 30 minutes sur une période hivernale. A court terme, on a vu avec le spectre en coordonnées logarithmiques que le comportement du système est plus complexe et doit donc être interprété avec précautions. Aussi on ne retiendra que la recherche du lien avec la température de l'air. La démarche a consisté à regarder si la signature de la température était présente et notamment la variation journalière. Pour cela il a fallu enlever la tendance, puis débruiter le signal, ce qui a été fait à partir de filtres moyennes mobiles équipondérées [37]. Le résidu a ensuite été traité en analyse spectrale. Le résultat (fig. 13) montre effectivement une composante diurne bien marquée.

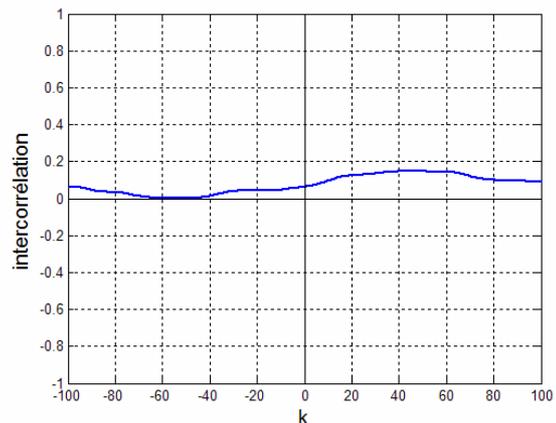
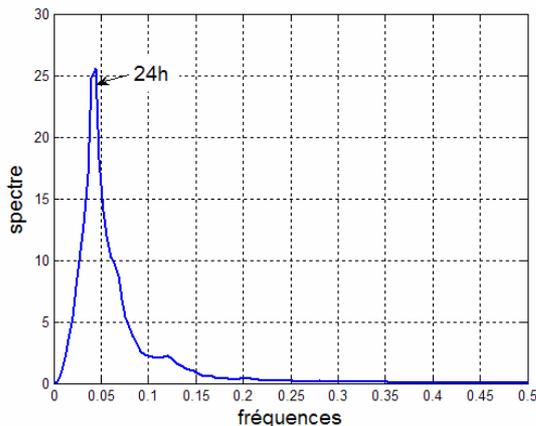


Fig. 13. Spectre de données de débit filtrées

Fig. 14. Relation température-débit

Le corrélogramme croisé température- débit (fig. 14) confirme la liaison entre ces deux grandeurs et montre en outre qu'elle est très atténuée avec un déphasage de l'ordre de 24 heures.

- Information sur le comportement non linéaire de ce système

L'analyse de la fonction de cohérence pluie-débit dans l'intervalle de la réponse impulsionnelle est élevée de l'ordre de 0,76 (réalisée à partir de l'analyse spectrale croisée), indiquant qu'aux fortes pluies correspondent de fortes crues, caractéristique d'un système drainé de façon efficace. Ce résultat montre que la modélisation de la relation pluie-débits pourra se faire dans de bonnes conditions.

En revanche pour modéliser le système à partir de modèles spatiaux, la connaissance de son attracteur serait un atout [38]. Comme sa physique est difficile à appréhender à priori il est fait appel à la méthode de F. Takens [39] qui permet d'avoir accès aux propriétés de l'attracteur à partir des chroniques de débits. La procédure utilisée est la méthode de Grassberger et Procaccia [40], en utilisant le logiciel mis au point par T. Fowler et D. Roach [41,42] et appliqué à l'hydrologie par C Parédès [43]. Grâce à ces méthodes il est possible de connaître le degré de non linéarité du système, le nombre de variables d'état nécessaires pour en assurer une bonne modélisation, l'information apportée par chaque variable d'état (entropie de Komolgorov-Sinai) et la prédictibilité raisonnable que l'on peut en attendre (coefficient de Lyapounov). Toute cette information est contenue dans l'attracteur. Son calcul passe par l'établissement des intégrales de corrélation qui rendent compte de la façon dont est distribuée l'information par rapport à l'échelle.

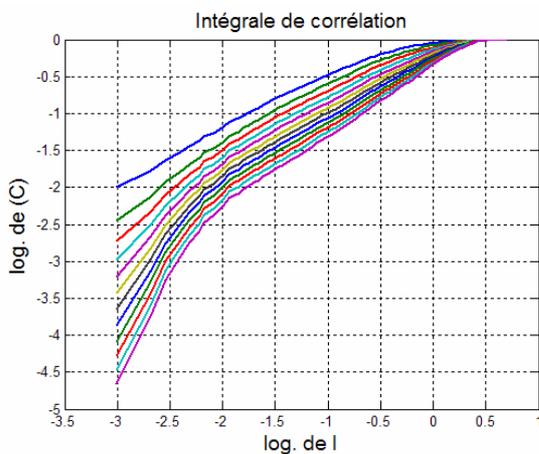


Fig. 15

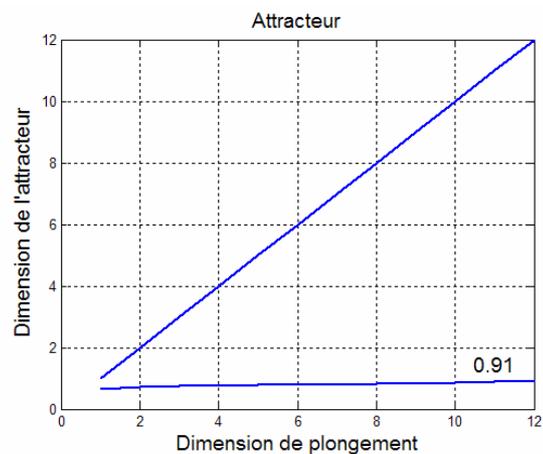


Fig.16

Les intégrales de corrélation en coordonnées logarithmiques doivent suivre des droites dont les pentes permettent de calculer l'attracteur. La distance entre chaque droite définit l'entropie de Komolgorov-Sinai. On constate (fig. 15) que l'on peut diviser le graphique en deux ensembles par rapport à l'échelle de l'amplitude des mesures (correspondant aux abscisses). Pour les amplitudes inférieures à 10 l/s (log. inférieur à -2) on obtient un attracteur qui croît indéfiniment ; cela signifie que les faibles variations sont très aléatoires et difficilement interprétables. Au delà le calcul de l'attracteur est alors possible (fig.16), indiquant qu'il est fractale avec comme dimension 0,91 et que le degré de liberté de ce système est faible (2 à 3 variables d'état seulement). On en conclut que peu de variables sont nécessaires pour modéliser ce système, que son comportement est non linéaire avec une forte sensibilité aux conditions initiales influant sur sa prédictibilité. Il serait bon pour cela d'avoir une idée du coefficient de Lyapounov. Lorsque ce dernier est négatif le système est prédictible. Pour des valeurs positives, il ne l'est plus et d'autant moins que ces valeurs sont élevées.

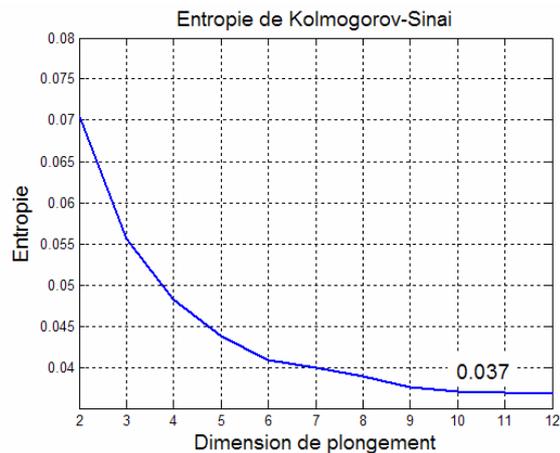


Fig. 17

Il est possible d'avoir une évaluation du coefficient de Lyapounov. Ce dernier est obtenu en calculant l'entropie de Komolgorov-Sinai déduit de l'intégrale de corrélation (fig.17). En effet, avec la dimension de plongement cette entropie tend vers le coefficient de Lyapounov [43]. La valeur obtenue 0,037 est positive mais pas trop élevée de l'ordre de celle de la pluie. Par rapport à l'aléa lié à la distribution de la pluie, le système n'apporte pas de complexité supplémentaire.

- Enseignements apportés

Le suivi des débits dans le temps, analysé conjointement avec les apports, rend compte très exactement du fonctionnement de ce système karstique et de ses propriétés. Les méthodes utilisées pour extraire l'information de ces données sont à l'heure actuelle extrêmement performantes et les quelques applications fournies ici en donnent un bon exemple.

Le système karstique de Bange-l'Eau-Morte constitue une unité bien identifiée. Il correspond à un karst très développé et ayant subi une évolution prolongée, de telle sorte qu'il est réduit actuellement, au niveau fonctionnel, aux seuls drains. Les réserves sont négligeables, les réponses à la pluie instantanées et brutales sans influence à long terme (comportement de type Aliou). Toutefois à la différence d'Aliou il ne présente pas de caractère d'imprévisibilité qui pourrait déterminer des crues catastrophiques. La modélisation des débits à partir de la pluie doit pouvoir fournir de bons résultats. En hiver l'influence de la neige est incontestable et, compte tenu du déphasage observé de 24h qui ne peut être interprété que comme le temps de transfert dans la zone non saturée, il semblerait que la zone d'infiltration soit importante et pas forcément bien karstifiée ce qui assure une certaine protection.

La modélisation spatiale d'un tel karst serait illusoire et une exploitation par forages une erreur. Ces résultats couplés avec la connaissance de l'anisotropie de la perméabilité obtenue à partir de la détermination des plans de drainage donne une image assez complète de l'organisation de ce karst, d'ailleurs en parfait accord avec les données spéléologiques qui nous ont été fournies. Le traitement des informations géochimiques en utilisant ces bases conduit à une vision d'ensemble de ce système et de son fonctionnement extrêmement précise.

IV. CONCLUSIONS

Cette application illustre combien l'approche systémique est particulièrement bien adaptée à l'étude de ces systèmes physiques complexes à comportement fortement non linéaire et non invariant. Ce fait est en grande partie dû aux nombreuses méthodes qui ont vu le jour ces dernières décennies en physique et qui sont parfaitement adaptables aux systèmes hydrauliques que constituent les aquifères karstiques. Il apparaît que sous cette dénomination d'aquifère karstique correspond toute une famille de systèmes aux comportements fort différents. Aussi, avant toute chose il convient d'identifier à quel type de comportement on a affaire, car en fonction des résultats obtenus, la stratégie que l'on va adopter sera totalement différente. Il faut savoir d'abord si l'on maîtrise bien la totalité de l'information débit, si les données en notre possession sont fiables. Ensuite, il faut savoir où en est le système de son évolution : peu karstifié, moyennement karstifié, ou encore réduit aux seuls drains sans réserve. Dans ce cas il est inutile de chercher à l'exploiter par forages ; en revanche il offre des possibilités d'exploitation par barrages souterrains.

Si l'on veut réaliser une modélisation, le problème ne sera pas le même pour une modélisation temporelle (relation pluie-débit) ou une modélisation spatiale (modèle maillé par exemple) et dans ce cas il est nécessaire de bien maîtriser le problème d'échelle afin de focaliser le modèle à la question à résoudre. C'est également dans ce cas que les problèmes de non linéarité, de prédictibilité prennent toute leur importance. L'exemple traité montre clairement que l'on sait répondre à toutes ces questions et que l'on a la possibilité d'ajuster la façon d'agir à la réalité de terrain.

Même si l'étude des aquifères karstiques reste un domaine difficile et délicat, le karst a cessé d'apparaître comme une curiosité inaccessible à nos moyens d'action. Il s'ouvre désormais tout un champ d'investigations dont l'issue réside dans l'exploitation d'un potentiel énorme qui doit pouvoir répondre aux enjeux et aux besoins du 21^{ème} siècle.

Références bibliographiques

- (1) **Mangin A.**, 1975 – Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doctorat d'Etat, Univ. de Dijon. Publiée dans Ann. Spéléol., 1974, 29, 3, p. 283-332 ; 1974, 29, 4, p. 495-601 ; 1975, 30, 1, p. 21-124.
- (2) **Mangin A.**, 1994 – Karst hydrogeology. Groundwater Ecology, p. 43-67.
- (3) **Alligood K. T., T. D. Sauer and J. A. Yorke**, 1996 – Chaos. An introduction to dynamical systems. Springer New-York, 603 p.
- (4) **Manneville P.**, 1990 – Structures dissipatives. Chaos et turbulence, 419 pp.
- (5) **Farmer J. D. et J. J. Sidorowich**, 1987 – Predicting chaotic time series. Phys. Rev. Lett. 59 pp.
- (6) **Box G. E. P. and G. M. Jenkins**, 1976 - Time series analysis, forecasting and control. Revised Edition Holden Day, San Francisco, 575 p.
- (7) **Jenkins G. M. and O. G. Watts**, 1968 – Spectral analysis and its applications. Edition Holden Day, San Francisco, 525 p.
- (8) **Mangin A.**, 1981 – Apports des analyses corrélatoire et spectrale croisées dans la connaissance des systèmes hydrologiques. C.R.A.S. Paris, série II, 293, p. 1011-1014.
- (9) **Mangin A.**, 1981 – Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. C.R.A.S. Paris, Série II, 293, p. 401-404.

- (10) **Mangin A.**, 1984 – Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales. *Journ. of Hydrol.*, 67, p. 25-43.
- (11) **Abry P.**, 1997 – Ondelettes et turbulences ; Multirésolution : algorithmes de décomposition, invariance d'échelle et signaux de pression, Diderot Editeur, Arts et Sciences, 290 pages.
- (12) **Arneodo A., F. Argoul, E. Bacry, J. Elezgary et J. F. Muzy**, 1995 – Ondelettes, multifractales et turbulence de l'ADN aux croissances cristallines, Diderot Editeur, Arts et Sciences, 160 pages.
- (13) **Burke Hubbard B.**, 1995 – Les ondes et les ondelettes : la saga d'un outil mathématique. Pour la Sciences, 235 pages.
- (14) **Daubechies I.**, 1992 – Tenlectures on Wavelets, CSBM-NSF Series Appl. Math., 61, Siem Pub., 357 p.
- (15) **Mallat S.**, 1999 – A wavelet tour of signal processing (Second edition). Academic Press, Sand Diego, 637 p.
- (16) **Labat D., Ababou R. and A. Mangin**, 2000 – Rainfall-Runoff Relations for Karstic Springs: Part 1 : Convolution and Spectral Analyses. *J. of Hydrology*, 238, p. 123-148.
- (17) **Labat D., Ababou R. and A. Mangin**, 2000 – Rainfall-Runoff Relations for Karstic Springs: Part 2 : Continuous Wavelet and Discrete Orthogonal Multiresolution Analyses. *J. of Hydrology*, 238, p. 149-178.
- (18) **Labat D., Ababou R. and A. Mangin**, 2001 – Introduction of wavelet analyses to rainfall/runoffs relationship for karstic basin: the case of Licq-Atherey karstic system (France). *Ground Water*, 39, 4, p. 605-614.
- (19) **Labat D., Mangin A. et R. Ababou**, 2002 – Rainfall-runoff relations for karstic springs : Multifractal analysis. *J. of Hydrology*, 256, p. 176-195.
- (20) **Labat D., R. Ababou et A. Mangin**, 2002 – Analyse multirésolution croisée de pluies et débits de sources karstiques. *Compte Rendus Géosciences*, 334, p. 551-556.
- (21) **Labat D., R. Ababou et A. Mangin**, 1999 – Analyse en ondelettes en hydrologie karstique. 1^{ère} partie : analyse variée de pluies et débits de sources karstiques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 329, p. 873-879.
- (22) **Labat D., R. Ababou et A. Mangin**, 1999 – Analyse en ondelettes en hydrologie karstique 2^e partie : analyse en ondelettes et croisées pluie – débit. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 329, p. 873-879.
- (23) **Yevjevich V.**, 1972 – Stochastic processes in hydrology. Water Resources Publications Fort Collins, Colorado, 276 p.
- (24) **Abarbanel H. D. I.**, 1995 – Analysis of observed chaotic data. Springer, 272 p.
- (25) **Dahan Dalmedico A., J. L.Chabert et K. Chemla**, 1992 – Chaos et déterminisme. Ed. Seuil, 414 p.
- (26) **Eckmann, J. P. et D. Ruelle**, 1985 – Ergodic theory of chaos and strange attractors. *Rev. Mod. Phys.*, 57, p. 617.
- (27) **Lorenz E. N.**, 1963 – Determinic Nonperiodic Flow, *Journal of the Atmospheric Sciences*, volume n° 20, p. 130-141.
- (28) **Malraison B., P. Atten, P. Bergé, M. Dubois**, 1983 – Dimension d'attracteurs étranges : une détermination expérimentale en régime chaotique de deux systèmes convectifs. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 297, p. 209.
- (29) **Solé R. V. et S. C. Manrubia**, 1996 – Orden y caos en sistemas complejos. UPC ed. Barcelona, 594 p.
- (30) **Lepiller M.**, 1980 – Contribution de l'hydrochimie à la connaissance du comportement hydrogéologique des massifs calcaires. Etude de quelques systèmes karstiques du massif du Semnoz et de la région d'Annecy (Savoie, Haute-Savoie, France), Thèse, Univ. Grenoble, 448p.

- (31) **Lepiller M.**, 1976-Résultats et interprétation de cinq opérations de traçage effectuées sur les systèmes karstiques du Semnoz et de la montagne de Bange-Bois de Prépoulin (Massif subalpin des Bauges, Savoie et Haute Savoie, France). 2^e Colloq. Hydrol. en Pays Calcaires, Besançon, pp 251-252
- (32) **Mathevet T.**, 2002 –Analyse du fonctionnement du système karstique de Bange-l'Eau-Morte (Bauges,Savoie&Haute-Svoie,France) , DEA Université Pierre et Marie Curie, 52p.
- (33) **Frisch U. and G. Parisi**, 1985- On the singularity structure of fully developed turbulence. In Turbulence and Predictability in Geophysical Fluid Dynamics and Climate Dynamics, édité par M. Ghil, R. Benzi & G. Parisi, Noerth-Holland, New York, pp. 84-88.
- (34) **Hardy H. H. and R. A. Beier**, 1994 – Fractals in reservoir engineering. Ed. Word Scientific, 359 p.
- (35) **Feder J.**, 1988-Fractals. New York: Plenum Press.
- (36) **Mandelbrot B.**, 1997-Fractales, hasard et finances. Champs, Flammarion, 246p.
- (37) **Barbut M. et C. Fourgeaud**, 1971 – Eléments d'analyse mathématique des chroniques. Collection Hachette Université, 208 p.
- (38) **Bergé P. et Y. Pomeau**, 1988 – Le chaos théorie et expériences. Ed. Eyrolles, Paris,389p
- (39) **Takens F.**, 1981 – Detecting strange attractors in turbulence. Lect. Notes in Mathematical, 898 (Springer), 366 p.
- (40) **Grassberger P. and I. Procaccia**, 1983 – Measuring the strangeness of strange attractors. Physica, 9 D, North Holland Publishing Company, pp. 353-371.
- (41) **Fowler A. D. et D. E. Roach**, 1993 – Dimensionality Analysis of Time Series Data – Non linear Methods, Computers and Geosciences, Volume 79, n° 1, pp. 41-52.
- (42) **Fowler T. and D. Roach**, 1991 – Dimensionality analysis of objects and series data. In « Nonlinear Dynamics, Chaos and Fractals ». Geological Association of Canada, p. 59-81.
- (43) **Paredes C.**, 1995 – Aplicacion de la geometria fractal en las Ciencias de la Tierra. Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Madrid, 285 pages.
- (44) **Shuster H.**, 1988 – Deterministic Chaos. Ed. Verlagsgesellschaft, Weinheim, 270 pp.

Session 1
Hydrogéologie et karst dans des contextes
bioclimatiques et structuraux variés.
Monographie sur les secteurs d'étude de
Michel Lepiller

Contexte stratigraphique, lithologique et structural des massifs subalpins des Bornes et des Bauges. Localisation des aquifères karstiques et circulation des eaux souterraines

Jean-Paul Rampnoux

Université de Savoie, Laboratoire EDYTEM - CNRS UMR 5204. CISM - 73376 La Bourget du Lac cedex - jean-paul.rampnoux@univ-savoie.fr

I. CADRE GEOGRAPHIQUE

Les Bornes et les Bauges appartiennent aux chaînes subalpines septentrionales (fig. 1). Dominant à l'Ouest l'avant-pays savoyard, elles constituent deux massifs montagneux bien individualisés, délimités par des vallées et des cluses façonnées par les glaciers quaternaires avec : -du Nord au Sud, la vallée de l'Arve entre les Bornes et les massifs de Platé et du Haut-Giffre, la cluse de Faverges, d'Ugine au lac d'Annecy, entre les Bornes et les Bauges, la cluse de Montmélian à Chambéry, entre les Bauges et le massif de Chartreuse, à leur arrière oriental, les vallées de l'Arly et de l'Isère (Combe de Savoie), les séparant du massif de Belledonne s.l et constituant à partir d'Ugine le sillon sub-alpin. Le Massif des Bornes se compose, d'Est en Ouest, de trois entités : -la chaîne calcaire des Aravis culminant à la Pointe Percée (2752 m), - la dépression marno-gréseuse allant du Reposoir au Nord, par Thônes, jusqu'à Faverges au Sud, avec les reliefs centraux des Annes (2232 m), de la Tête du Danay (1730 m) et de Sulens (1839 m), -les chaînons calcaires occidentaux (Bornes s.stricto ou Bornes externes) avec, du Nord-Est au Sud-Ouest, la chaîne du Bargy (2299m), la montagne de Sous-Dine (2004 m), le Plateau des Glières (1400 m), Le Parmelan (1832 m) et les reliefs dominant le lac d'Annecy dont le Mont Veyrier (1291 m) et la célèbre Tournette (2351 m). Les vallées du Foron du Reposoir, du Bronze, du Borne, de la Fillière et du Fier recoupent perpendiculairement ces chaînons. Quant aux Bauges, leurs reliefs sont faits d'un faisceau de chaînons calcaires, orientés Nord-Nord-Est - Sud-Sud-Ouest au Nord du Chéran et Nord-Est-Sud-Ouest au Sud de ce dernier dont la vallée recoupe transversalement le massif. L'altitude des sommets croie de l'Ouest vers l'Est, avec : -les Bauges externes se développant d'Annecy à Chambéry avec le Semnoz (1699 m au Crêt de Chatillon), la Montagne de Bange (1434 m), le Mont Revard (1537 m), le Nivolet (1550 m) et le Mont Peney (1356 m), -les Bauges moyennes, aux nombreux chaînons se relayant du Nord au Sud et de l'Ouest à l'Est, avec entre autre, le Mont Margériaz (1845 m), le Mont Julioz (1662 m), le Mont Colombier (2045 m), le Mont Trélod (2181 m), la Pointe de La Sambuy (2198 m), la Pointe d'Arcalod (2217 m), le Mont Pécloz (2197 m), la Dent d'Arclusaz (2041 m), -les Bauges internes, au-delà du col de Tamié, avec la Dent de Cons (2062 m). Les recherches de **Michel Lepiller** et son équipe [1] ont porté pour l'essentiel sur les chaînons calcaires des Bornes externes et sur ceux de l'ensemble des Bauges avec une prédilection pour les Bauges occidentales.

II. CONTEXTE STRATIGRAPHIQUE ET STRUCTURAL

II.1. Généralités

Les massifs sub-alpins des Bornes et des Bauges (fig. 1 et 2) appartiennent au domaine delphino-helvétique des Alpes externes charrié sur l'avant-pays (domaines jurassien et

molassique). Au cœur des Bornes reposent les klippes préalpines des Annes à faciès subbriançonnais et de Sulens constituée de deux unités, une unité inférieure à faciès ultrahelvétiques et une unité supérieure à faciès subbriançonnais. Au Nord de l'Arve, les klippes composites préalpines du Chablais, à matériels internes, débordent très largement le domaine subalpin.

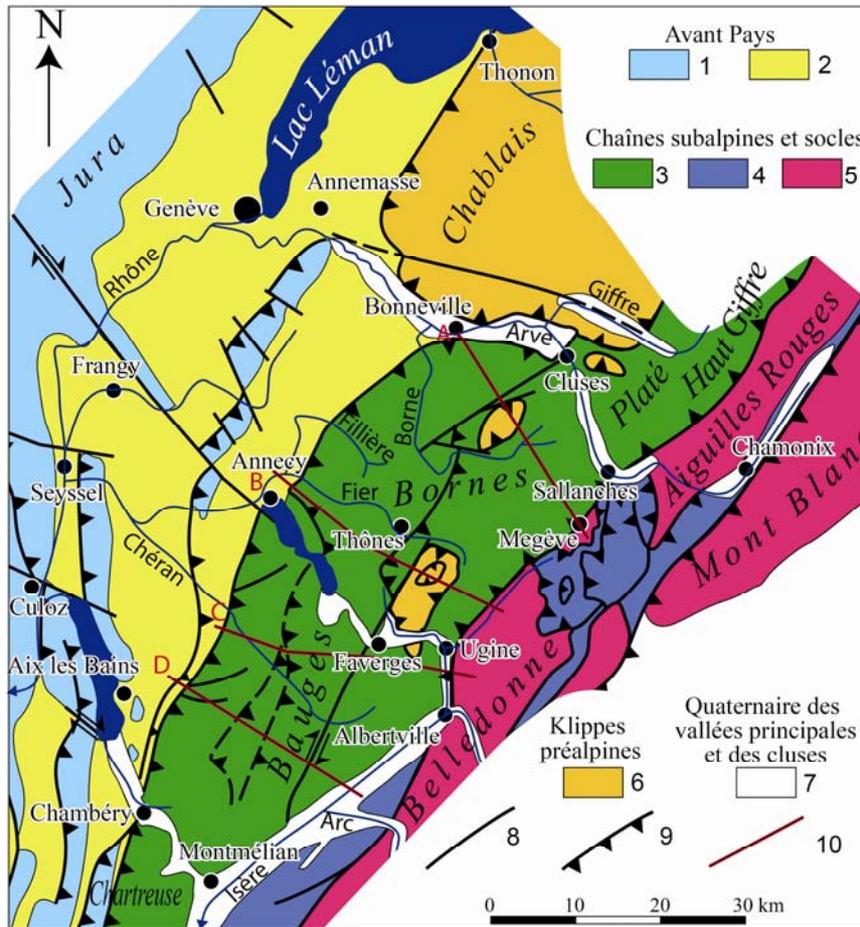


Figure 1 : contexte géologique général des Bornes et des Bauges.

- 1 : chaînons jurassiens à faciès carbonatés mésozoïques,
- 2 : molasses Oligocène supérieur et Miocène,
- 3 : unités delphino-helvétiques,
- 4 : racines des unités delphino-helvétiques (nappes du Mont Joly et collines bordières),
- 5 : socle et tégument,
- 6 : nappes des Annes et de Sulens,
- 7 : dépôts glaciaires et alluviaux,
- 8 : failles,
- 9 : chevauchements et charriages,
- 10 : tracés des profils tectoniques de la figure 3.

II.2. Stratigraphie et lithologie (fig. 2)

Le domaine delphino-helvétique [2, 3, 4] appartient à la partie externe de la marge européenne de l'océan téthysien qui s'est ouvert, à partir du Trias, par la distension de la croûte du « super-continent » de la Pangée paléozoïque, ici représentée par les massifs cristallins de Belledonne, du Mont Blanc. A partir du Lias, cette distension active a créé un bassin marin. Ce bassin est bordé à l'Ouest et au Nord-Ouest par la plate-forme épicontinentale jurassienne et, vers l'Est, par les hauts fonds briançonnais à faciès condensés et pélagiques. Dans ce bassin s'est déposée une épaisse série dite « subalpine » :

↳ Au Jurassique, du Lias supérieur au Malm inférieur, il s'agit de sédiments hemi-pélagiques (argiles, marnes, calcaires argileux) passant à des dépôts pélagiques calcaires au Malm supérieur (Tithonique).

↳ Au Crétacé inférieur, une sédimentation hemi-pélagique se poursuit. Néanmoins, sur sa bordure occidentale (Bauges externes), à partir du Berriasien supérieur et du Valanginien se produit une progradation temporaire de la plate-forme jurassienne et le dépôt de calcaires zoogènes (Valanginien moyen), se poursuivant par celui des « Calcaires Roux, bicolores et à silex » du Valanginien supérieur. Ces apports et dépôts de plate-forme permettent de définir une « Série presubalpine » (Semnoz et du Revard). Il est à remarquer que ces faciès débutent

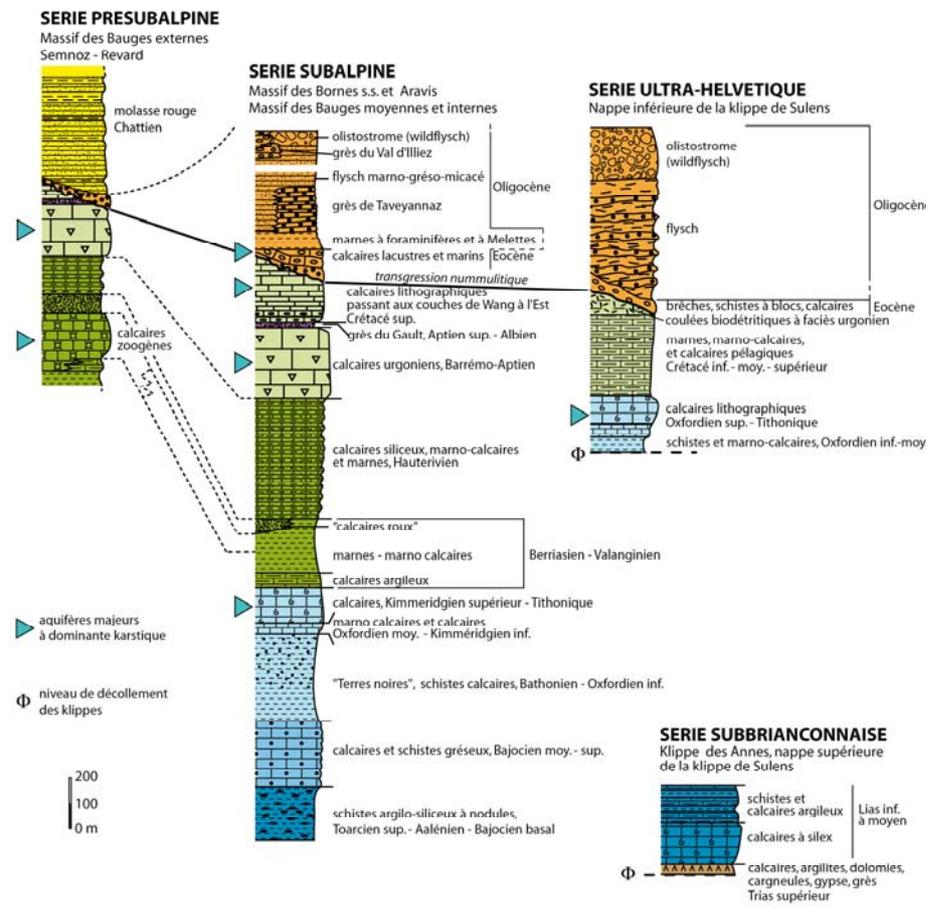


Figure 2 : séries stratigraphiques simplifiées des Bornes et des Bauges.

Légende de la figure 3 ci-dessous :

- 1 : klippes préalpines,
- 2 : molasses Oligocène supérieur (l= lacustres) et miocènes (m= marines),
- 3 : Eocène à Oligocène moyen (à flysch à faciès grès de Taveyannaz),
- 4 : Eocène à Oligocène moyen à flysch indifférents),
- 5 : Urganien à Crétacé supérieur,
- 6 : Crétacé inférieur (a= Valanginien moyen récifal, b= « calcaires rouges » du Valanginien supérieur),
- 7 : Jurassique supérieur (Ti : calcaires tithoniques),
- 8 : Jurassique moyen,
- 9 : Lias supérieur,
- 10 : socle cristallin et tégument.

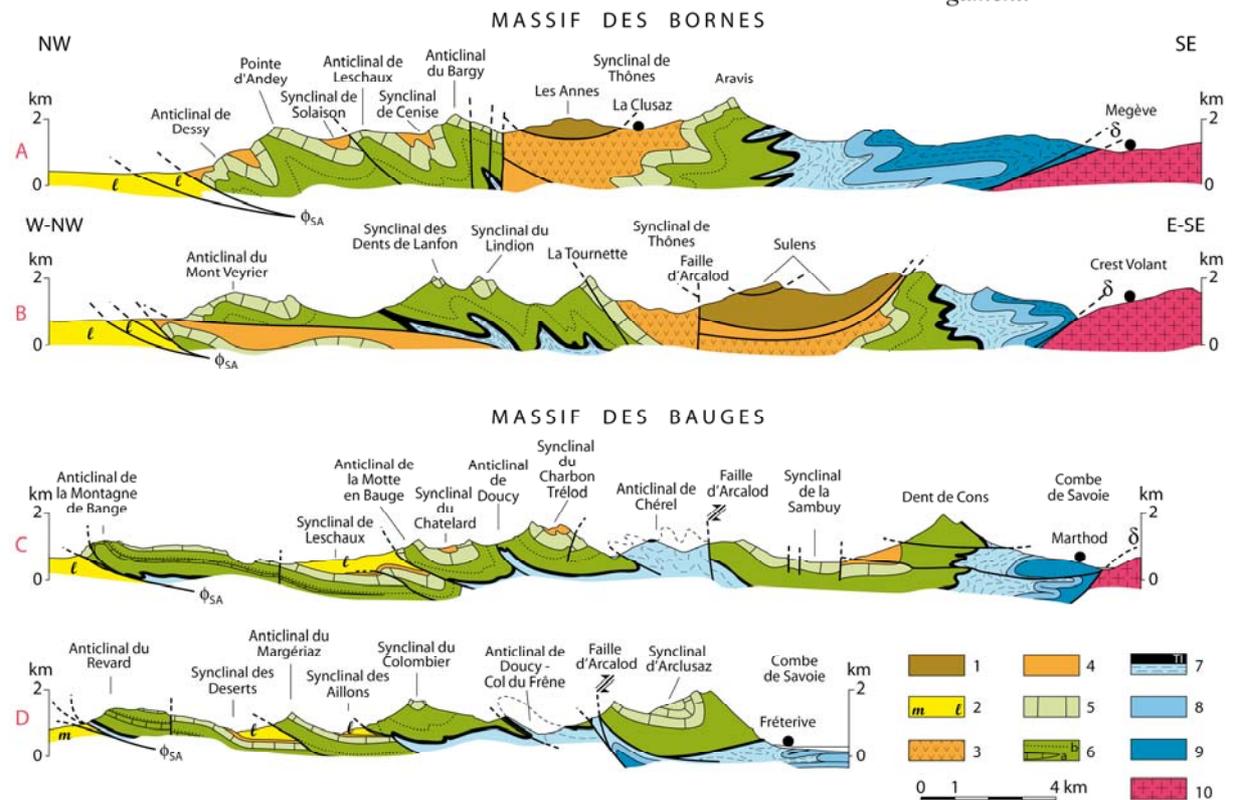


Figure 3 : Coupes synthétiques des massifs des Bornes et des Bauges (d'après B. Doudoux et al. 1982, 1997, 1999) légende ci-dessus à droite.

plus tôt dès le Berriasien moyen au Sud du Revard et qu'ils s'amenuisent puis disparaissent vers l'Est. Seuls persistent, dans les Bornes et les Bauges moyennes, le niveau supérieur des calcaires roux. En définitive on a à faire, hormis dans les Bauges externes, à une épaisse série néocomienne marneuse.

↳ A l'Hauterivien supérieur-Barrémien inférieur et ce jusqu'à l'Aptien inférieur, un nouvel épisode de la progradation de la plateforme se développe, envahissant une grande partie du domaine delphino-helvétique, avec le dépôt des calcaires urgoniens récifaux à périrécifaux. Seule la partie orientale du bassin échappe à cette progradation (Dent de Cons, Sulens).

↳ Au Crétacé moyen et au Crétacé supérieur s'individualise un nouveau cycle sédimentaire. Il débute par une série réduite grésoglaucieuse (faciès Gault) ; la sédimentation devient ensuite pélagique avec le dépôt de calcaires fins, (Cénomaniens-Sénoniens) se terminant par les « Couches de Wang » du Maastrichtien marquant la régression finale du Mésozoïque.

↳ A partir du Paléocène, une émergence généralisée se produit associée à des érosions, à des karstifications, pouvant atteindre les calcaires urgoniens dans les Bauges et à des dépôts pédologiques et fluviolacustres rubéfiés (faciès sidérolithiques) conservés en remplissage.

↳ A la fin de cet épisode continental diachrone, la mer alpine transgresse avec la sédimentation de la trilogie nummulitique : dépôts fluviolacustres à saumâtres et calcaires néritiques de l'Eocène moyen à supérieur, marnes et schistes pélagiques de l'Oligocène inférieur, flyschs à faciès variés de l'Oligocène inférieur à moyen, marqueurs de la tectonisation des zones internes et se terminant, à l'est, par un olistostrome (wildflysch) témoin de l'avancée des nappes. D'un autre côté, dans les Bauges externes, à l'Oligocène supérieur (Chattien), se dépose une formation épaisse marno-gréseuse lacustre, appelée « Molasse Rouge » ; elle est directement transgressive sur les calcaires urgoniens du Semnoz et se développe dans l'avant-pays.

II.3. Aperçu structural et morphologique (fig. 1 et 3)

Un décollement généralisé entre le socle et la couverture est à l'origine première du style tectonique [5]. Ce décollement, bien visible le long de la vallée de l'Arly, s'est produit au niveau des gypses et des cargneules du Trias supérieur, le Trias inférieur à moyen formant un tégument solidaire du cristallin de Belledonne. D'autre part, les structures plissées et chevauchantes des séries mésozoïques des Bornes et des Bauges ont été également dirigées, d'une part, par des décollements différentiels et par des disharmonies au niveau des formations incompetentes et, d'autre part, par les variations lithologiques d'ensemble. En définitive, la couverture subalpine, désolidarisée de son socle, s'est plissée et écaillée en unités en général déversées vers l'Ouest et le Nord-Ouest, l'ensemble étant largement charrié au niveau du front subalpin sur les molasses de l'avant-pays.

- Dans les Bornes, s'observent (fig. 3, coupes A et B) :

- au Nord et à l'Ouest [4], de vastes structures anticlinales, à morphologie conforme, armées par les calcaires urgoniens, comme celles du Bargy, du Parmelan et de Veyrier..., séparées par des synclinaux légèrement en creux comme ceux de Cenise, de Champ Laitier, des Glières, d'Ablon, des Contrebandiers..., à cœur de Crétacé supérieur et de Tertiaire.
- au Sud [2], des reliefs « inverses » avec des synclinaux perchés soulignés par la corniche urgonienne (Dents de Lanfon, du Lindion, replis de la Tournette...).
- à l'Est, le synclinorium de Thônes, très évasé du fait de la présence en son centre des klippen préalpines. Il chevauche les Bornes externes par un contact tangentiel redressé. Quant à son flanc oriental, dessiné dans les calcaires urgoniens, il constitue la chaîne des Aravis avec, sur le versant de l'Arve et de l'Arly, au sein de l'épais talus marneux du Néocomien et du Malm, la corniche calcaire du Tithonique qui plonge axialement vers le Nord – Nord-Est.

L'ensemble du massif est affecté par un réseau de failles soit directionnelles (failles de l'Arcalod et du secteur du Col de la Colombière...), soit transversales ; ces dernières, nombreuses, découpent les chaînons externes et les Aravis et jouent parfois un rôle important dans le compartimentage des aquifères karstiques.

- Dans les Bauges (fig. 3, coupes C et D) [2, 3], se dessine une succession de plis d'axes subméridiens déversés et chevauchant vers l'Ouest. Du fait de la présence dominante des faciès calcaires, les Bauges externes ont un relief conforme avec des anticlinaux en relief (Semnoz-Revard) et des synclinaux en creux à cœur de molasse rouge (Leschaux, Les Déserts, Les Aillons), le monoclinale du Margériaz constituant un pli chevauchant le synclinal des Déserts. Plus à l'Est, la puissance des faciès marneux est à l'origine d'une inversion de relief avec l'individualisation des synclinaux plus ou moins perchés, à cœur tertiaire, d'Entrevernes-Châtelard, du Grand Colombier, du Charbon-Trélod et, à l'Est de la faille dextre d'Arcalod, de la Dent d'Arclusaz et de la Sambuy. Enfin, en bordure de la Combe de Savoie, l'important creusement glaciaire a façonné le rebord subalpin avec la présence, au sein des schistes et des marno-calcaires, de la corniche calcaire du Tithonique dessinant de nombreux replis couchés (Roche Torse). D'autre part, l'ensemble des chaînons est affecté par des accidents tectoniques dont des failles de direction N40° à 80°. Ainsi, les failles du Semnoz dont celle du Crêt de Chatillon et celle de la Puya abaissent l'extrémité nord de l'anticlinal. De même les failles de Prépoulain et de Montagny, sur le revers nord du Revard jouent un rôle hydrogéologique essentiel [6, 7]. D'autre part, certains plis présentent des plongements axiaux. C'est le cas, en direction du Nord, du synclinal d'Entrevernes vers le lac, de celui de la Dent d'Arclusaz vers l'entaille du Chéran et de celui de la Sambuy vers la cluse de Faverges et, en direction du Sud, du chaînon du Revard-Nivolet vers Chambéry.

III. LOCALISATION DES AQUIFERES KARSTIQUES ET CIRCULATION DES EAUX SOUTERRAINES

III.1. Généralités

Dans les Bornes et les Bauges, les aquifères karstiques sont nombreux et se localisent dans les calcaires massifs des séries subalpines et présalpines précitées (fig. 2). A partir des données lithologiques, structurales et morphologiques, ainsi que de celles résultant des observations spéléologiques et des nombreux traçages effectués, il est possible de connaître l'origine des eaux qui parviennent aux exutoires majeurs. Ces études permettent ainsi de comprendre la nature et le mode de fonctionnement des systèmes karstiques. Une synthèse [8, 9] a été récemment publiée à laquelle il est renvoyé pour plus de détails, bibliographie comprise. Il apparaît ainsi que trois groupes d'aquifères principaux sont présents et qu'ils sont associés aux calcaires du Tithonique, du Valanginien et de l'Urgonien s.l. Quant aux calcaires du Crétacé supérieur et du Nummulitique, ils constituent des aquifères limités, souvent en relation plus ou moins directe par le jeu de failles avec ceux de l'Urgonien et ce malgré la présence des faciès du Gault qui peuvent cependant jouer un rôle d'écran. Les figures 4 et 5 illustrent la répartition de ces aquifères, les directions majeures des écoulements souterrains et le positionnement des émergences.

III.2. Aquifères du Tithonique

Les calcaires à faciès pélagiques sont, en général, peu karstifiés et présentent des réseaux étroits, la fracturation l'emportant sur la dissolution. Ce sont des aquifères bien contraints aux affleurements limités à des corniches comprises entre un mur et un toit imperméables. Dans

les Bornes, ces calcaires sont localisés, pour l'essentiel, au rebord oriental de la chaîne des Aravis [10] dessinant des plis couchés affleurant depuis le pied du Mont Charvin au Sud, jusqu'aux hameaux des Vorziers et de Saxel de la vallée de l'Arve au Nord. Par suite d'un plongement axial des couches en cette direction, le drainage souterrain, corroboré par des traçages, est à l'origine d'émergences étagées depuis le col des Aravis jusqu'au niveau des alluvions de l'Arve au hameau de Saxel. Dans les Bauges, cet aquifère affleure : -au front subalpin depuis le Nord du Revard (captage de la Gouille aux Moines) jusqu'à Chambéry (résurgence captée de Saint Saturnin aux apports axiaux septentrionaux), -le long de la combe de Savoie, avec de nombreuses sources souvent captées, -enfin, à l'intérieur du massif, sur les flancs ouest verticalisés à déversés des anticlinaux de Doucy et de Chérel, les marnes berriasiennes formant un mur écran (source de la Fontaine de la Rave au contact des terrasses alluviales du Chéran, captage de la Touvière dans le vallon de Chérel...).

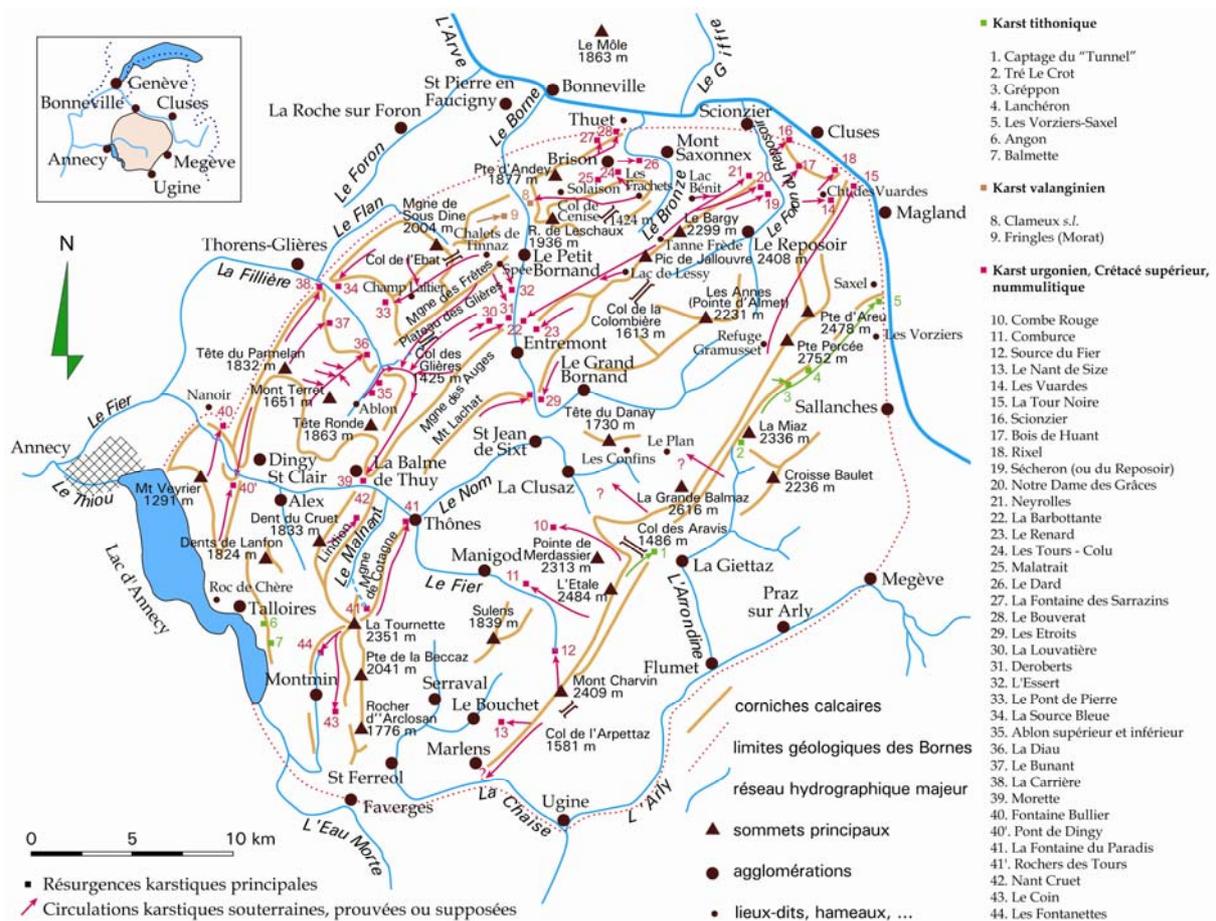


Figure 4 : circulations souterraines et émergences karstiques du massif des Bornes (J.P. Rampoux, 2006).

III.3. Aquifères du Valanginien

Dans les Bornes, seuls sont présents, les calcaires roux du Valanginien supérieur et peu d'émergences karstiques apparaissent. Celle du Clameux [4], perchée en rive droite de la vallée encaissée du Borne est cependant significative ; les traçages montrent que son alimentation se fait à l'Est à partir de l'anticlinal urgonien des Rochers de Leschaux et du rebord septentrional du synclinal de Cenise, sur un bassin topographique différent de celui du Borne, et ce par un réseau de failles et de fractures affectant l'ensemble de la série.

Dans les Bauges, les aquifères majeurs se situent au droit du chaînon occidental du Semnoz-Revard où les faciès subalpins calcaires s'épaississent au détriment du mur et du toit marneux (fig. 2). Deux systèmes karstiques sont bien représentés [6, 7, 9] avec :

- Le système Semnoz-Petit Pont de l'Île Bourbouillon. Il alimente les résurgences situées au pied de la Montagne de Bange, en rive gauche du Chéran, dont la vallée, transversale aux plis, constituée, par enfoncement érosif, un point bas médian. Les traçages montrent que le bassin d'alimentation se développe axialement à la fois au Nord sur le Semnoz jusqu'à la faille transversale du Crêt de Chatillon et, au Sud, jusqu'au secteur du Revard. **Michel Lepiller** a montré toute l'importance du rôle des failles transversales du Bois de Prépoullain et de Montagny, à la limite de la Montagne de Bange, qui drainent vers les calcaires valanginiens sous-jacents une partie des eaux de l'aquifère urgonien de surface.

- Le système du Bout du Monde. Il se développe jusqu'aux émergences du Bout du Monde dans l'entaille du talweg de la Leysse où les eaux débouchent du réseau fissural et karstique du Valanginien inférieur-Berriasien supérieur plus calcaire. Des traçages montrent qu'une partie de leur alimentation se fait à partir des calcaires urgoniens du Sud du Revard par un transfert probable au niveau de la faille de Lachat.

En définitive, une diffluecence majeure axiale est présente entre les deux systèmes, au droit du Mont Revard avec quelques drainages latéraux en direction du petit système karstique de La Meunaz à l'Ouest. Dans le reste des Bauges, comme dans les Bornes, seuls les calcaires roux du Valanginien supérieur sont encore présents en passant progressivement à des calcaires argilo-siliceux plus fracturés que karstifiés. Il en résulte des émergences liées à des aquifères très cloisonnés, en particulier au bord subalpin (Fontaine de Cayan...).

III.4. Aquifères urgoniens s.l.

Ces aquifères, les plus vastes, sont soit perchés à la faveur de l'incision des vallées et/ou des inversions de relief, soit ennoyés à leur aval sous la surface topographique par encapuchonnement au sein des alluvions de vallée ou par plongement sous des formations imperméables: Gault, flysch, molasse... avec la présence d'émergences de débordement. D'autre part, des circulations souterraines se produisent en direction des zones « tectoniquement » basses (axes synclinaux, plongements axiaux...). Enfin, les failles transversales aux structures jouent un rôle essentiel soit de drain soit de barrage. Il en résulte des systèmes karstiques nombreux, très compartimentés, aux origines multifactorielles. Seuls quelques systèmes représentatifs seront proposés comme exemples fig. 4 et 5).

- Dans la chaîne des Aravis, les calcaires dessinent un monoclinale plongeant au Nord-Ouest sous les flyschs et les klippen, formant écran, du synclinal de Thônes ; il est gauchi axialement, à la fois au Nord, vers Cluses et, au Sud, vers la cluse de Faverges. En conséquence, les circulations karstiques se font en fonction de cette déformation générale avec, au Nord-Ouest, quelques sources au contact des formations imperméables et, au Nord comme au Sud, par diffluecence, des encapuchonnements dans les alluvions de la vallée de l'Arve (résurgences de la Tour Noire en bordure de plaine [10] et de la vallée de La Chaise).

- Dans les Bornes occidentales, les systèmes sont multiples [4] avec leurs émergences principales dans le flanc des vallées. Ainsi, dans le massif du Bargy, une diffluecence axiale (traçage de la Tanne Frède) existe, en hautes eaux, entre le système des émergences orientales du Sècheron, de Notre Dame des Grâces et de Neyrolles appartenant au bassin versant de rive gauche du Foron du Reposoir et celui de l'émergence occidentale de la Barbottante appartenant au bassin-versant de rive droite du Borne.

Dans la vallée de la Fillière [11], en rive droite, la résurgence du Pont de Pierre émerge de la terminaison périclinale urgonienne du synclinal de Champ Laitier. Elle est alimentée pour

partie, au-delà du col de l'Ebat, par les pertes totales du ruisseau de Fontaine Froide dont le

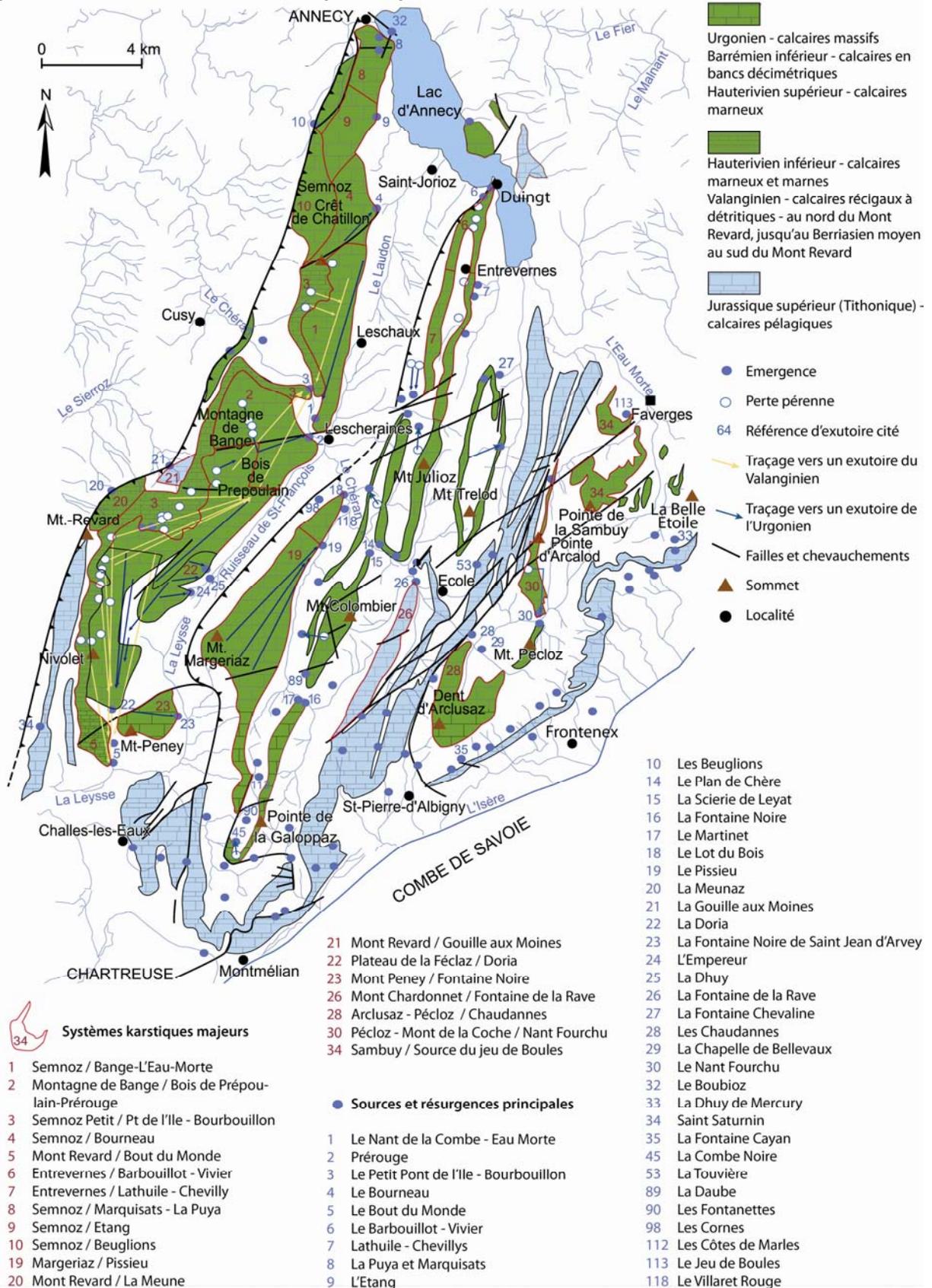


Figure 5 : carte des systèmes karstiques du massif des Bauges (d'après M. Lepiller, 1980).

bassin-versant se raccorde à celui du Borne (coloration des chalets de Tinnaz réalisée sur une faille transversale affectant le Crétacé supérieur). Il y a donc là une claire dissociation des bassins-versants topographiques et hydrogéologiques du fait du plongement axial du synclinal vers le Sud-Ouest et de la présence d'une cassure facilitant le transit en profondeur vers l'Urgonien. D'autre part, en rive gauche de la Fillière, les émergences de la Diau et du Bunant, situées au déboucher de longs réseaux karstiques reconnus, collectent les eaux de la voûte urgonienne du massif du Parmelan-Mont Teret à la faveur de légères ondulations synclinales plongeant au Nord-Est. Enfin, en rive droite du Fier, la résurgence de Morette [11] apparaît à la terminaison aval du synclinal urgonien étroit à fort plongement axial vers la vallée. Les traçages montrent que la faille amont Est-Ouest des Collets a un rôle drainant majeur, concentrant vers l'émergence, à la fois les eaux des réseaux karstiques nord (Montagnes des Frêtes, des Auges, Plateau des Glières) et sud (Mont Teret et gouttière d'Ablon). En conséquence, par le jeu de cette faille transversale et des plongements axiaux convergents vers cette dernière, les bassins-versants topographiques et hydrogéologiques sont loin de coïncider, des diffluences karstiques se faisant très près des vallées du Borne et de la Fillière.

- Dans les Bornes méridionales, du fait de l'inversion de relief, La Tournette constitue une structure plissée et écaillée soulignée par l'Urgonien (synclinal sud-ouest du Casset, anticlinal s.s. de la Tournette, monoclinal oriental et Montagne de Cotagne). Il en résulte des circulations divergentes, en étoile, avec la grosse résurgence de la Fontaine du Paradis à Thônes.

- Dans les Bauges, ces aquifères affleurent largement sur la retombée orientale des anticlinaux du Semnoz et du Revard s. [6, 7, 9], sur le monoclinal du Margérian et dans les synclinaux perchés des Bauges moyennes. Ainsi, le massif du Semnoz et sa carapace urgonienne plonge au Nord vers le lac d'Annecy et, au Sud, vers l'entaille du Chéran, la faille du Crêt de Chatillon constituant une discontinuité hydrogéologique. Il en résulte, d'une part, au Nord, plusieurs petits systèmes karstiques dont ceux des émergences de Bourneau et de l'Etang en bordure du synclinal de Leschaux, des Marquisats et de la Puya en bordure du lac ou du Boubioz sous le lac et, d'autre part, au Sud, en rive droite du Chéran, la résurgence de Bange-l'Eau morte drainant tout le versant sud-est du chaînon. De même, le massif du Revard s.l. est constitué de trois systèmes karstiques, à savoir : -le système de Prérrouge, au Nord, dont l'émergence se fait en rive gauche du Chéran, au déboucher de la faille de Montagny ; il est alimenté par la Montagne de Bange et, pour partie, par le versant nord du Revard, la faille de Prépoullain jouant un rôle essentiel dans la distribution des eaux souterraines entre les aquifères valanginiens et urgoniens (cf. p. 5), -le système de la Doria, donnant la résurgence bien connue perchée au dessus de la cluse de Chambéry, qui draine tout le plateau de la Féclaz, Nivolet compris, -le système de Fontaine Noire qui englobe l'écaille du Mont Peney et alimente, par sa résurgence, Saint Jean d'Arvey. En définitive, comme pour les aquifères valanginiens, une zone de diffluence marquée existe au droit du Mont Revard, avec des écoulements divergents, axiaux, facilités par les cassures transversales.

Le massif du Margérian, pour sa part, très karstifié, est drainé axialement au Nord vers l'importante résurgence du Pissieux au contact du synclinal des Aillons et, à son extrémité septentrionale, par la résurgence du Lot du Bois.

Enfin, dans les synclinaux perchés plus orientaux des Bauges moyennes, les systèmes karstiques sont bien contraints avec des écoulements souterrains se concentrant dans les « fonds de bateau » et circulant principalement vers des émergences localisées dans les points bas (plongements axiaux, entailles transversales du réseau hydrographique). Les exemples sont nombreux et parmi ceux-ci, le système de la Dent d'Arclusaz et du Pécloz, avec la grosse émergence des Chaudannes, en rive droite du Chéran, est tout particulièrement démonstratif.

IV. CONCLUSIONS

Les massifs des Bornes et des Bauges constituent un domaine tout particulièrement adapté aux études portant sur les systèmes karstiques complexes. **Michel Lepiller** en avait compris tout l'intérêt scientifique comme l'ont montré ses travaux. En effet, l'hydrogéologie karstique est, d'une part, conditionnée par les caractéristiques lithologiques de leurs faciès subalpins où les horizons calcaires sont bien contraints et, d'autre part, dirigée par la tectonique alpine. Les plissements et les plongements axiaux associés ainsi que la fracturation dirigent l'alimentation et la circulation des eaux souterraines en favorisant les points d'émergence. Enfin, l'empreinte glaciaire, le creusement des cluses et des vallées, le dégagement différentiel des reliefs entraînent un important compartimentage des systèmes en leur imprimant toutes leurs diversités et leurs originalités.

Références bibliographiques

- (1) **Lepiller M., Mondain P.H., Cardin P.**, 1987 – Les recherches en hydrogéologie karstique menées depuis 10 ans dans les massifs subalpins septentrionaux par le Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Orléans (France). *Bull. Centre d'Hydrogéologie*, Neuchâtel, n° 8, pp. 27-48.
- (2) **Doudoux B., Barféty J.C., Carfantan J.C., Tardy M., Nicoud G.**, 1992 – Notice explicative de la feuille Annecy-Ugine à 1/50.000. *Editions du BRGM*.
- (3) **Doudoux B., Barféty J.C., Vivier G., Carfantan J.C., Nicoud G., Tardy M.**, 1999 – Notice explicative de la feuille Albertville à 1/50.000. *Editions du BRGM*.
- (4) **Charollais J., Busnardo R., Cardin P., Clavel B., Decrouez D., Delamette M., Gorin G., Lepiller M., Mondain P.h., Rosset J., Villars F.**, 1988 – Notice explicative de la feuille Annecy-Bonneville à 1/50.000. *Editions du BRGM*.
- (5) **Doudoux B., Mercier de Lepinay B., Tardy M.**, 1982 – Une interprétation nouvelle de la structure des massifs subalpins savoyards (Alpes occidentales) : nappes de charriage oligocènes et déformations superposées. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 295, II, pp. 63-68.
- (6) **Lepiller M.**, 1980 - Contribution à l'hydrochimie à l'étude des circulations dans les massifs calcaires. Etude de quelques systèmes karstiques du massif du Semnoz et de la région d'Annecy (Savoie – Haute-Savoie). Thèse Doctorat 3^{ème} cycle, Univ. de Grenoble.
- (7) **Lepiller M.**, 1976 - Résultats et interprétation de cinq opérations de traçage effectuées sur les systèmes karstiques du Semnoz et de la Montagne de Bange - Bois de Prépoullain (massifs subalpins des Bauges, Savoie - Haute-Savoie, France). 2^{ème} colloque d'Hydrologie en pays calcaire, Besançon, Ann. Sc. Univ. de Besançon, fasc. 25, 3^{ème} série, pp. 251-262.
- (8) **Rampnoux J.P.**, 2006 - Bornes. Aquifères et eaux souterraines en France. BRGM éditions, t. 2, pp. 611-621.
- (9) **Rampnoux J.P., Lepiller M.**, 2006 - Bauges. Aquifères et eaux souterraines en France. BRGM éditions, t. 2, pp. 622-631.
- (10) **Bocquet F.**, 1983 - Approche de la géomorphologie de la partie nord de la chaîne des Aravis. Mém. Maîtrise, Inst. Géogr. Alpine, Univ. Grenoble, 167 p.
- (11) **Mondain P.-H.**, 1991 - Hydrogéologie des systèmes karstiques de l'Unité dephino-helvétique inférieure entre les vallées du Fier et du Borne (Massif des Bornes, Haute-Savoie, France). Thèse Univ. d'Orléans, Orléans Géosciences, mémoire n° 05.

Hydrogéologie karstique du massif des Bauges : état des connaissances et contributions de Michel Lepiller aux recherches fondamentales et appliquées

**Fabien Hobléa⁽¹⁾, Laurent Cadilhac⁽²⁾, Gérard Nicoud⁽¹⁾, Christian
Dodelin⁽³⁾, Dominique Lasserre⁽³⁾**

⁽¹⁾ Laboratoire Edytem, CISM, Université de Savoie, Technolac -73 376 Le Bourget du Lac
cedex – fabien.hoblea@univ-savoie.fr

⁽²⁾ Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée & Corse / DPP Unité Méthodes et prospective / eaux
souterraines, 2-4 allée de Lodz - 69363 Lyon cedex 07 - laurent.cadilhac@eaurmc.fr

⁽³⁾ Comité Départemental de Spéléologie de la Savoie (CDS 73), Maison des Sports, rue Henri
Oreiller - 73 000 Chambéry

Résumé

Le massif subalpin des Bauges est fortement karstifié et contient un grand nombre de systèmes karstiques de modestes dimensions et de grande vulnérabilité mais que leur omniprésence et l'abondance des débits spécifiques rendent incontournables en termes de ressources en eau. Les caractères de ces systèmes sont bien différenciés dans les parties est et ouest du massif. Michel Lepiller a essentiellement travaillé sur les systèmes les plus importants, situés sur le rebord occidental des Bauges, du Semnoz au Revard, où il a apporté des contributions déterminantes à la connaissance des caractères hydrométriques et physico-chimique des sources (instrumentation, mesures), ainsi qu'à l'organisation des circulations souterraines et la délimitation des bassins d'alimentation (traçages). Ses travaux ont largement servi non seulement la gestion des ressources en eau potable, mais aussi les prospections et découvertes spéléologiques, les recherches géomorphologiques, ainsi que la résolution de conflits d'usage liés à l'activité extractive locale. Après y avoir choisi son terrain de thèse à la fin des années 1970, Michel Lepiller est depuis toujours resté fidèle aux Bauges, amenant dans le massif des générations d'étudiants et de collègues pour des stages et travaux de terrain associant étroitement recherche et pédagogie.

Mots-clefs : Hydrogéologie karstique, Bauges, ressource en eau, Michel Lepiller.

INTRODUCTION

Le massif subalpin des Bauges est situé entre celui des Bornes-Aravis au nord et la Chartreuse au sud (fig. 1). Ce territoire de moyenne montagne culminant au Mt Arcalod à 2217 m d'altitude est un Parc Naturel Régional depuis 1996, regroupant une cinquantaine de communes des départements de la Savoie et de la Haute-Savoie. Agriculture, pastoralisme, exploitation forestière et tourisme été/hiver en sont les principales activités, auxquelles s'ajoute une montée en puissance de la fonction résidentielle périurbaine générée par les villes et agglomérations qui l'encadrent, notamment Annecy, Chambéry, Aix-les-Bains, Albertville, Faverges. Le cœur des Bauges est drainé par le Chéran qui prend sa source dans le vallon de Bellevaux au pied du Pécloz et se dirige vers le nord ouest pour rejoindre le Fier. Les bordures du massif sont drainées par une multitude de petits cours d'eau tributaires des lacs d'Annecy et du Bourget ainsi que de l'Isère.

Les surfaces karstifiées couvrent avec 217 km² un quart de la surface totale des Bauges. Les karsts affleurants sont de type montagnard et renferment les plus longues et les plus profondes cavités de la Savoie. Ces dernières donnent accès à des collecteurs souterrains alimentant d'importantes sources situées pour la plupart dans ou sous la zone de battement de la water-table. Ces eaux karstiques constituent une ressource incontournable mais particulièrement vulnérable pour l'alimentation des populations et activités baujues.

Après avoir dressé un état des lieux général de la connaissance et des usages des eaux souterraines karstiques en Bauges, nous verrons en quoi les travaux de Michel Lepiller ont éclairé significativement certains pans de ces connaissances et aidé à guider la gestion de la ressource.

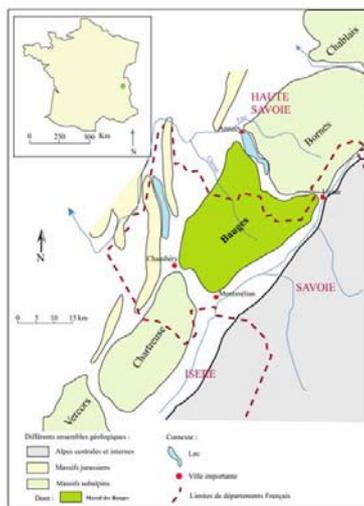


Figure 1 : Carte de localisation du massif des Bauges (d'après G. Denavit, 2005).

I. DES KARSTS MONTAGNARDS AUX CARACTERES DIFFERENCIES ENTRE L'EST ET L'OUEST DES BAUGES

I.1. Un contexte climatique humide et frais

Les précipitations proviennent essentiellement des perturbations océaniques et sont abondantes sur l'ensemble du massif, bien que celui-ci soit en partie protégé de ces flux d'ouest par la terminaison du Jura méridional. En fait c'est au cœur même du massif que les précipitations sont les plus importantes (tabl.1).

Altitude (en mètres)	Station	Précipitations (mm/an)	Période d'observation	Température moy (°C)
590	Lescheraines	1378 mm	1955 - 1994 (40 ans)	8,2
		1423 mm	1975- 1996 (22 ans)	
1030	Les Déserts	1659 mm	1965 - 1994 (30 ans)	6,1
		1688 mm	1975- 1996 (22 ans)	
900	Aillon le Jeune	1844 mm	1955 - 1994 (40 ans)	6,4
		1982 mm	1975- 1996 (22 ans)	
730	Ecole en Bauges	1541 mm	1965 - 1994 (30 ans)	6,7
		1599 mm	1975- 1996 (22 ans)	

Tableau 1 : Précipitations annuelles et températures moyennes dans quelques stations des Bauges (d'après F. Hobléa, 1999).

Ainsi la station d'Aillon le Jeune reçoit 1,9 mètre de précipitations par an, ce qui en fait le second poste le plus arrosé de Savoie. Le gradient pluviométrique moyen est évalué dans les

Bauges à 70 mm/100 m (8). Quant aux températures (tabl. 1), elles présentent un gradient vertical de 0,5°/100 mètres. La niviosité est importante malgré une altitude moyenne relativement faible pour un massif subalpin (< 1000 m)

Sur les impluviums karstiques, le déficit d'écoulement représente environ 25 % des précipitations vers 1000 m d'altitude et moins de 20 % au-delà de 1500 m (tabl. 2).

I.2. Un net contraste morpho-structural est/ouest

Le massif des Bauges possède une structure plissée selon un axe NE-SW (N 20°). On distingue d'ouest en est (fig. 2) :

- un relief plissé plutôt conforme, avec des structures anticlinales déversées et chevauchantes vers l'ouest dont il ne subsiste que les longs flancs normaux sont plus ou moins tabulaires et inclinés vers l'est, délimités à l'ouest par de puissants crêts calcaires. D'où l'aspect dissymétrique de ces reliefs, caractéristique du Semnoz, du Grand-Plateau Nordique de la montagne de Bange au plateau Revard-Féclaz-Peney et du Mont Margériaz, point culminant du secteur avec 1845 m d'altitude.
- Un relief plissé inverse de type subalpin calqué sur un plus grand nombre de plis, de longueurs d'ondes plus courtes. C'est ici que se trouvent les plus hauts sommets du massif des Bauges, dépassant les 2000 m à l'Arcalod, au Trélod, au Péclod, à la Sambuy, à l'Arclusaz, au Colombier d'Aillon... Les pendages, souvent très forts ne favorisent pas le développement de réseaux karstiques pénétrables. Seul le val perché de la Sambuy est connu pour ses phénomènes karstiques abondants, tandis que ceux du val perché de l'Arclusaz sont masqués et défendus par une couche de lauzes sénoniennes peu karstifiée et peu pénétrable.

Ces deux styles morphostructuraux sont nettement délimités et correspondent à la distinction géographique entre Bauges « derrière » et Bauges « devant » (fig. 2).

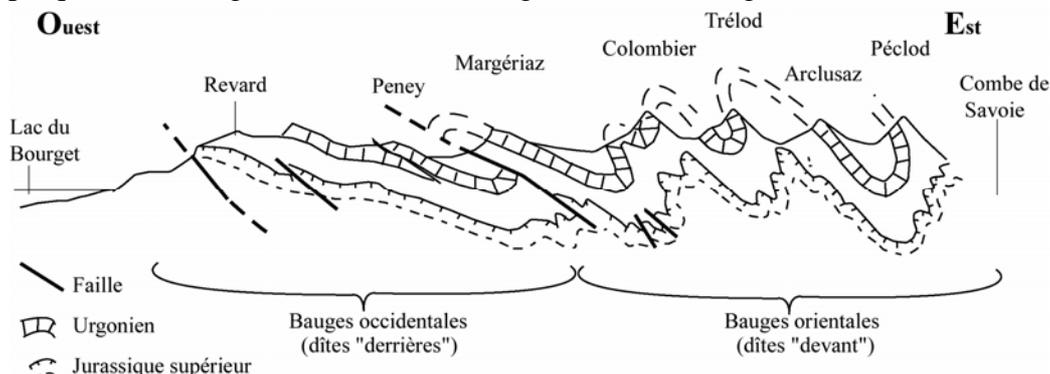


Figure 2 : Coupe simplifiée du massif des Bauges, (d'après M. Gidon (<http://www.alpes-geol.fr>) in Denavit 2005).

Ce relief est compartimenté par l'ensemble des vallées qui maillent le massif, la vallée principale du Chéran correspondant à un ensellement des plis d'orientation transverse (sud-est nord-ouest). De nombreuses petites vallées secondaires se raccordent à celle du Chéran. Ces vallées constituent les niveaux de base locaux et conditionnent le gradient hydraulique des divers systèmes karstiques.

Ces derniers se développent principalement dans trois couches karstifiables (fig. 3) : (i) les calcaires récifaux à faciès Urgonien du Barrémo-aptien, affleurant le plus largement et armant la plupart des crêts sommitaux, ; (ii) les calcaires valanginiens dont le faciès jurassien fortement carbonaté n'est présent que dans la partie occidentale des Bauges ; et (iii) ceux du Malm, notamment à faciès tithonique. Les calcaires à silex sénoniens peuvent être ponctuellement le siège de circulations karstiques bien hiérarchisées, comme au Pic de la

Sauge (émergence de Combe Noire) au sud du massif ou aux grottes de Seythenex au nord-est.

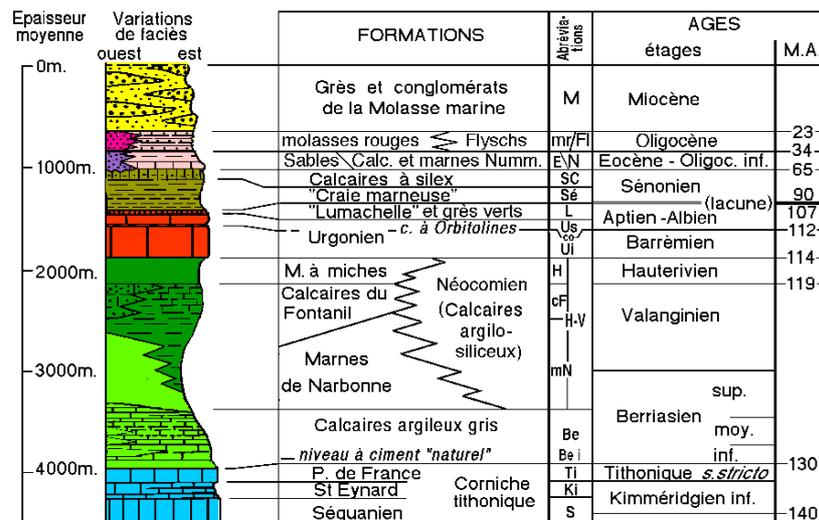


Figure 3 : Colonne stratigraphique synthétique des Bauges (d'après M. Gidon, <http://www.alpes-geol.fr>)

I.3. Etat des connaissances sur les circulations karstiques majeures

L'état des connaissances est, tout comme les caractères des systèmes karstiques, largement tributaire de la dualité morphostructurale entre Bauges devant et Bauges derrière. Les massifs occidentaux, plus vastes et beaucoup plus accessibles, notamment du point de vue spéléologique, ont fait l'objet de nombreuses études (synthétisées in (8) auxquelles s'est ajoutée la thèse (15)). En revanche les Bauges orientales ne comportent pas de points d'infiltration bien définis et n'ont fait l'objet que de peu de traçages : la délimitation des impluviums ainsi que les circulations hydrologiques restent théoriques, et fondées sur les structures géologiques. La carte de la figure 4 représente schématiquement et à petite échelle les principaux systèmes karstiques parmi la centaine de systèmes identifiés ou supposés sur l'ensemble du massif.

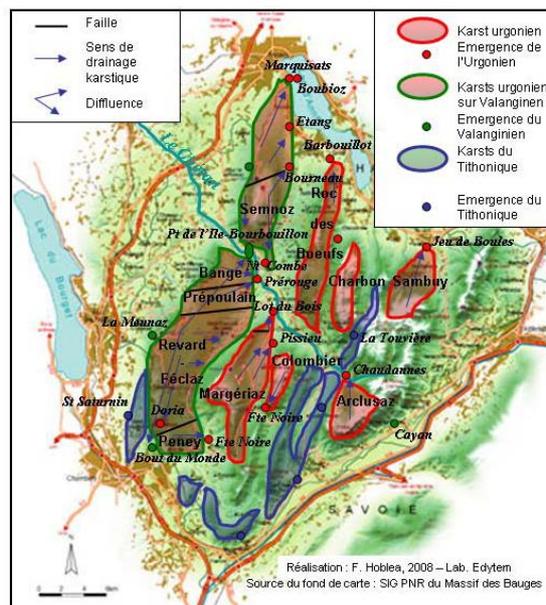


Figure 4 : Carte schématique des principaux karsts des Bauges.

C'est dans la partie ouest des Bauges, où se trouvent les grands karsts tabulaires, que l'on rencontre les émergences karstiques aux débits les plus importants (tabl. 2) : la Doria, Le Bout du Monde, le Pissieu, Prérrouge, Fontaine Noire du Peney, Bourbouillon, Nant de la Combe et Bourneau, toutes issues d'aquifères urgoniens ou valanginiens. Cependant ces systèmes ne présentent pas d'importantes réserves noyées. Ils sont très transmissifs, à forte perméabilité de chenaux et à faible pouvoir régulateur d'où des variations très importantes des débits.

Dans les Bauges orientales, seules les exurgences des Chaudannes et du Jeu de Boule, drainant respectivement les karsts de l'Arclusaz et de la Sambuy, se hissent apparemment au gabarit des émergences occidentales, mais les études et les suivis hydrologiques manquent cruellement pour assurer une comparaison fiable.

Certaines sources situées sur les pourtours du massif où affleurent des bandes plus ou moins chahutées de calcaires valanginiens et jurassiques, sont issues d'aquifères aux limites encore imprécises voire inconnues, mais présentent des débits suffisamment importants pour être captées. C'est le cas par exemple pour la bordure orientale des sources de Cayan sur Frériverie, du Pontet ou du Pré de la Tour sur Montailleir ; ou bien des sources de St Saturnin, de la Meunaz, de la Gouille des Moines côté occidental.

Nom	encaissant	Superficie (en km ²)	Précipitations moyennes annuelles			Q m l.s ⁻¹ (env.)	Qmin/max l.s ⁻¹ (env.)
			Totales (en mm)	Efficaces (en mm)	Volume potentiel (en hm3)		
Revard-Doria	Urgonien	14	1900	1500	21,0	660	20 / 15 000
Revard-Bout du Monde	Valanginien	10,9	1900	1500	16,4	190	25 / 500
Revard-Meunaz	Valanginien	1,74	1900	1500	2,6	40	4 / 500
Margérian-Pissieu	Urgonien	17,6	2000	1615	28,4	1000 (*)	8 / 8 000
Bange-Prérrouge	Urgonien	20,7	1780	1330	27,5	200 ?	15 / 5 000
Colombier- Fontaine Noire	Urgonien	2,82	2432	?	?	?	16 / 560
Peney-Fontaine Noire	Urgonien	3,2	1830	1410	4,5	?	3,5 / 500
Petit pont de l'île- Bourbouillon	Valanginien	34,3	1780	1330	45,6	Non mesurable	? / 10 000 ?
Arclusaz- Chaudanne	Urgonien	?	2210	1860	?	?	2,5 / 600
Sambuy-Jeu de Boules	Urgonien	?	?	?	?	?	?
Bange-l'Eau Morte	Urgonien	12,3	1770	1346	16,6	326	25 / 10 000
Semnoz- Bourneau	Urgonien	7	?	?	?	?	8 / 2500

Tableau 2 : Caractéristiques des principaux systèmes karstiques des Bauges (d'après synthèse Denavit, 2005). (*) : Mesures sur un cycle hydrologique par G. Zamolo (1980)

I.4. Une ressource fragmentée et vulnérable mais incontournable

Les ressources en eau du massif doivent satisfaire les besoins de plus de 50 000 habitants permanents et 7000 têtes de bétail, auxquels s'ajoutent les périodes de fréquentation touristique hiver-été.

On recense en Bauges près de 150 émergences karstiques (8 ; 3, 4), dont près de la moitié sont captées, sans qu'il soit possible, par manque de données, de sommer les volumes prélevés. Le karst alimente plus de 40 % du nombre de captages AEP baujus (tabl. 3). Une étude plus fine sur les Bauges savoyardes (3) a cependant montré que le karst participe majoritairement à l'AEP en termes de débits, tout en restant encore largement sous utilisé (fig. 5).

	AEP	
	Nombre de captages	m3 / an*
Aquifère karstique	69	?
Aquifère non karstique	81	?
Total (dt origine inc.)	159	?
% venant du karst	43%	?

Tableau 3 : Part des aquifères karstiques dans la ressource en eau potable des Bauges (d'après Denavit 2004 et DDASS de la Haute Savoie)

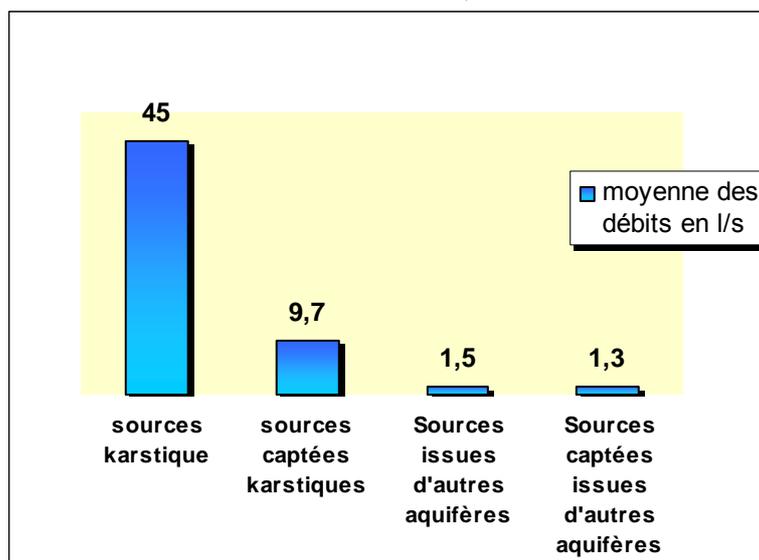


Figure 5 : Moyennes des débits moyens selon les types d'aquifères dans la partie savoyarde des Bauges (calculées d'après 40 sources karstiques sur les 105 recensées, 25 sources captées karstiques sur 60, 61 sources non karstiques sur 98 et 11 sources captées non karstiques sur 42, G. Denavit, 2004).

En effet, paradoxalement, les plus grosses émergences sont délaissées et seules, parmi elles, la source du Nant de la Combe et la Fontaine Noire du Peney sont captées pour l'alimentation en eau potable. Les autres ne servent ou n'ont servi tout au plus qu'à actionner moulins et scierie ou alimenter une pisciculture. C'est essentiellement leur trop grande vulnérabilité, notamment à la turbidité, et les difficultés posées par la protection de leur impluvium qui explique cette situation. Elles sont en effet situées dans la partie la plus anthropisée du massif, avec une qualité menacée par les activités touristiques (stations de ski), résidentielles, agro-sylvo-pastorales ou extractives (4).

Ce sont *a contrario* de multiples sources plus modestes qui sont sollicitées, issues d'aquifères de dimensions plus réduites et souvent mieux préservés des facteurs de contamination, notamment pour les karsts scellés du Valanginien et du Malm, où la contribution fissurale

semble plus prégnante dans les caractères physico-chimiques des eaux (source de la Dhuy de Bellecombe en Bauges...).

Les traitements de potabilisation sont bien sûr partout la règle compte-tenu du type de ressource, la qualité des eaux brutes étant ici très aléatoire et souvent insuffisante. Mais la fréquence des épisodes de forte turbidité lors des crues, entraînant de nombreux franchissements du seuil normatif des 1 NTU, reste problématique et limitante.

Malgré la hausse de la pression démographique, plus importante en périphérie qu'au cœur du massif, les Bauges n'ont pas de problème d'alimentation en eau au point de vue quantitatif, à l'exception des villages et stations placés sur les massifs karstiques : Arith, la Féclaz et le Margériaz. Le site du Margériaz est le plus concerné par le manque d'eau. En effet c'est ce paramètre qui a imposé la formule « stade de neige », l'absence totale de ressource empêchant toute réalisation d'infrastructures d'hébergement sur place. Actuellement l'alimentation se fait par citerne avec une tentative hasardeuse de captage artisanal dans un drain endokarstique de faible débit et chroniquement pollué pour alimenter les sanitaires des bâtiments d'accueil.

Le village d'Arith, sur Bange, dépend de sources situées sur des communes voisines, avec pour l'une un partage régi par une convention qui date des années cinquante et qui ne lui octroie que le trop plein. Or, Arith, dont la position ensoleillée est très convoitée, est en pleine expansion et le manque d'eau pourrait devenir un sérieux problème à l'avenir.

Quant à la station de la Féclaz, sur le Revard, elle a choisi, en 1987, par souci d'assurer son indépendance et de permettre son développement immobilier, de pomper la rivière souterraine de la Cha (système de la Doriaz) à travers 213 mètres d'Urgonien. Cela a été rendu possible grâce au travail de topographie des spéléologues et à la technique, nouvelle à l'époque, de repérage par barreau magnétostatique (6). Le problème d'enfouissement de la ressource a été quantitativement résolu ici grâce à de gros investissements, mais l'assainissement du plateau et la protection de cette ressource ont eu du mal à suivre et le développement immobilier n'a pu se faire que 20 ans après le forage.

II. LES APPORTS DE MICHEL LEPILLER A LA CONNAISSANCE ET LA GESTION DES KARSTS DU MASSIF DES BAUGES.

II.1. Une contribution majeure à la connaissance des systèmes karstiques baujus

Après sa thèse centrée sur les systèmes karstiques du rebord ouest des Bauges de part et d'autres du Chéran (Semnoz, Bange-Prépoullain), qui a fait date et fait toujours référence près de 30 ans après sa soutenance (12), Michel Lepiller, malgré la distance depuis ses bases orléanaises, n'a jamais cessé de travailler sur l'hydrogéologie karstique des Bauges. L'émergence du système de Bange-l'Eau Morte (dit aussi système du Nant de la Combe, du nom de sa source pérenne), équipée d'un limnigraphe dès 1974, a continué d'être suivie sur les plans hydrométriques et physico-chimiques, grâce à la pose de sondes reliées à un data-logger, ce qui lui a permis d'acquérir une des plus longues chroniques de données actuellement disponibles en France, qu'il a pu valoriser récemment par un travail d'équipe avec ses étudiants avancés et collaborateurs (14).

Mais la contribution de Michel Lepiller à la production de données et connaissances hydrogéologiques sur les karsts du massif des Bauges est loin de se limiter au système de Bange-l'Eau Morte. Ses études suivies sur le fonctionnement et l'organisation du drainage karstique du Grand Plateau Nordique (de la montagne de Bange au plateau Revard-Féclaz), fondées sur de nombreux multitraçages (13), ont notamment permis de mieux connaître les phénomènes de diffuence nord-sud et de transfert de l'Urgonien au Valanginien des écoulements souterrains déjà évoqués par Y. Lemordant (9). M. Lepiller a démontré que les limites des deux systèmes du Valanginien, varient en fonction des conditions

hydrodynamiques : en période de crue on a un phénomène de diffluence, les eaux tombant sur le plateau du Revard se partagent entre l'émergence du Bout du Monde et celle de Bourbouillon-Petit pont de l'île, alors qu'en période normale, ces eaux sont drainées uniquement vers l'émergence du Bout du Monde (fig. 4). Ouvert sur les disciplines connexes, Michel Lepiller n'a pas manqué d'attirer l'attention des géomorphologues sur les significations paléogéographiques de ce phénomène, révélateur d'un processus de capture encore en cours des écoulements du bassin-versant karstique de Bourbouillon (émergence côté Chéran) par celui du Bout du Monde (émergence côté Leysse au sud du massif), en raison d'un abaissement différentiel des niveaux de base du Chéran et de la Leysse, cette dernière rejoignant une dépression tectoniquement plus déprimée et plus largement surcreusée par le flux glaciaire isérois qui l'empruntait.

Michel Lepiller s'est également intéressé à d'autres systèmes karstiques situés plus à l'est du massif. Il a apporté une aide et des conseils précieux lors de l'opération de traçage de la Tanne des Biolles au Margériaz en 1995, n'hésitant pas à fournir le logiciel de traitement quantitatif des données (7). Il s'est également passionné pour les karsts des synclinaux perchés orientaux, notamment la très énigmatique Arclusaz, dont il pensait que l'exurgence urgonienne des Chaudannes possède des réserves noyées importantes en observant que les débits restent assez élevés à l'étiage, assortis d'une faible variabilité de température et de conductivité qui résulterait d'une homogénéisation des eaux au niveau du karst noyé. Plus récemment, nous avons élaboré un projet commun de traçage du karst de la Sambuy, reporté en raison des mauvaises conditions d'injection au moment prévu, Michel Lepiller étant, à raison, très exigeant et rigoureux sur les conditions de mise en oeuvre des expériences de terrain comme en laboratoire.

Toutes les connaissances ainsi produites et acquises sur les karsts baujus, Michel Lepiller n'a eu de cesse de les faire partager et de les transmettre, n'hésitant pas à amener depuis Orléans des promotions entières d'étudiants pour des travaux et stages de terrain, en travaillant et échangeant autant que possible avec les spéléologues et karstologues locaux.

II.2. Une aide précieuse aux recherches spéléo-karstologiques

En tant que spéléologue pratiquant depuis son plus jeune âge, Michel Lepiller s'est attaché de longue date à l'exploration des réseaux souterrains baujus (10). Depuis Orléans et lors de ces nombreuses visites sur ses terrains des Bauges, il est resté en contact quasi-permanent avec les spéléologues et karstologues qui étudiaient les grands karsts occidentaux. Ses travaux, idées, visions, hypothèses, et représentations des rapports entre la structure géologique et l'organisation des conduits karstiques ont été d'une grande utilité pour comprendre et découvrir ce qui constitue aujourd'hui des réseaux parmi les plus développés en France (tabl. 4).

Nom	Unité karstique	Développement	Dénivellation	Etage géologique
Benoite-Prér rouge	Prépoulain	53 806 m	-860 m	Urgonien
Garde -Cavale	Revard-Féclaz	42 434 m	-298 m	Urgonien
Biolles-Crolleurs-Squelettes	Margériaz	26 001 m	-563 m	Urgonien
Cochons-T. Froide	Margériaz	17 694 m	-823 m	Urgonien
Doria-Pleurachat	Féclaz	14 745 m	-304 m	Urgonien
Lot du Bois-Pissieu	Margériaz	12 400 m	- 72/+112 m	Urgonien
Grotte de la Scierie	Bange	4 500 m	+80 m	Valanginien
Malitou	Revard	4 057 m	-167 m	Valanginien

Tableau 4 - Spéléométrie des grands réseaux du massif des Bauges

(sources : Durand et Nant, 1998 et R. Durand, B.D. Prospect, décembre 2007)

La collaboration avec les spéléologues trouvait son point d'orgue lors des opérations de multitraçage, lorsqu'il fallait injecter ou surveiller en cavité notamment, ou encore pour la période de prélèvements aux émergences, où un réseau de correspondants locaux de confiance, parmi lesquels plusieurs spéléologues, assurait le nécessaire appui logistique. Les moments passés avec Michel Lepiller à ces occasions étaient toujours aussi enrichissants que conviviaux.

II.3. Applications pratiques du suivi instrumenté du système de Bange l'Eau Morte : une expertise utile à la gestion des ressources liées au karst

Michel Lepiller a œuvré en tant qu'expert scientifique à la mise en place d'une gestion pertinente des ressources en eau de l'ouest des Bauges. Il a participé aux réflexions institutionnelles sur l'avenir du captage du Nant de la Combe, ainsi qu'à sa protection vis-à-vis de l'exploitation de la carrière des Banchets, située dans la zone d'alimentation du système à proximité du collecteur noyé. Sa caution scientifique et son sens du dialogue ont notamment contribué à sortir de la situation conflictuelle entre spéléologues et carrier. Une convention de surveillance des phénomènes karstiques recoupés par l'exploitation a porté ses fruits et un drain actif ainsi découvert a pu être appareillé par Michel Lepiller, avec l'aide des spéléologues, pour suivre le fonctionnement de la zone d'infiltration et ses relations de mise en charge avec la zone noyée.

Enfin, les travaux de Michel Lepiller et de ses étudiants sur cette partie des Bauges (mais aussi sur les Bornes), ont été valorisés dans l'étude des aquifères patrimoniaux karstiques du bassin Rhône - Méditerranée et la mise à jour du référentiel hydrogéologique Rhône-Alpes (cf. encadré «L'inventaire des aquifères patrimoniaux karstiques du bassin RM&C »).

L'inventaire des aquifères patrimoniaux karstiques du bassin RM&C

Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du bassin Rhône-Méditerranée-Corse de 1996, avait identifié trente-deux aquifères karstiques désignés comme *aquifères patrimoniaux, à fort intérêt stratégique pour les besoins en eau actuels ou futurs*.

Le SDAGE préconisait que l'opportunité d'utiliser ces aquifères pour la diversification de la ressource et la sécurisation de l'alimentation soit étudiée.

A cette fin, une étude a été lancée en 1999 sous maîtrise de l'Agence de l'eau avec une association de bureaux d'études [1], elle avait pour objectif :

- 1/ de dresser un état des lieux de la connaissance de ces aquifères et d'en faire la synthèse,
- 2/ d'identifier pour chacun des ensembles karstiques retenus, les systèmes présentant les meilleures potentialités en terme de ressource,
- 3/ sur ces systèmes, en fonction des données existantes et des enjeux, proposer des axes d'étude ou de travaux complémentaires en vue de l'amélioration de la connaissance ou de la mobilisation de la ressource.

Cette étude a été complétée en 2005 et 2007 avec l'Université de Savoie sur les massifs des Bauges, des Bornes et des Aravis largement étudiés par Michel Lepiller et ses étudiants [4].

Les travaux réalisés permettent aujourd'hui de disposer pour l'ensemble des plateaux et massifs karstiques de la région Rhône Alpes et en particulier pour les massifs des Bauges, des Bornes et des Aravis :

- d'un découpage cohérent des unités karstiques en se basant sur le contexte géologique, l'inventaire des sources, et les circulations souterraines reconnues par traçage. Dans la mesure du possible, ces unités constituent des systèmes karstiques au sens strict (unité de drainage) mais ils peuvent aussi correspondre à la notion plus étendue d'aquifère carbonaté sans exutoire individualisé. Le découpage s'appuie alors sur des critères plus géologiques avec la possibilité de regrouper plusieurs sources indépendantes ;
- de fiches descriptives faisant la synthèse des informations disponibles pour chaque unité, système ou source karstique ;

La caractérisation des aquifères est complétée par une approche prenant en compte les contraintes pesant sur ces systèmes, qui peuvent avoir une incidence directe sur leur potentiel réel (qualité des eaux, utilisation actuelle de la ressource, vulnérabilité de l'aquifère, occupation des sols et principales nuisances potentielles), l'objectif étant de disposer d'informations sur l'intérêt réel des aquifères et sur les contraintes identifiées, Ces éléments figurent

sur les cartes et tableaux qui accompagnent les fiches (carte des structures karstiques principales, carte et tableau occupation des sols et pression anthropique).

Les éléments recueillis ont été rassemblés dans une base de données renseignée pour chaque ensemble / sous ensemble / système karstique et source et sous forme de fichiers correspondant aux informations rassemblées sur les volets bibliographie, inventaire des sources, principaux traçages et cavités recoupant une circulation.

Ces données sont aujourd'hui exploitées pour la révision du référentiel hydrogéologique Rhône-Alpes (opération conjointe BRGM / Agence de l'eau s'appuyant sur l'expertise locale (2) et seront valorisées par la publication d'un atlas hydrogéologique régional en cours de mise en forme (avril 2008).

III. CONCLUSION

Si la connaissance de l'hydrogéologie karstique du massif des Bauges a fortement progressé depuis une trentaine d'années, notamment grâce aux contributions d'hydrogéologues comme Michel Lepiller, il subsiste encore, surtout à l'est du massif, des zones d'ombre préjudiciables à la gestion d'une ressource difficilement contournable malgré ses inconvénients manifestes. L'importance relative des enjeux à l'échelle du territoire considéré, jeune Parc Naturel Régional se devant d'être exemplaire en la matière, incite à réfléchir à la manière d'instituer une articulation durable entre recherches scientifiques et spéléologiques et procédures de gestion, de protection et de valorisation des ressources liées au karst. Le thème des eaux et des réseaux karstiques serait tout indiqué en Bauges pour servir de fil directeur et de support à la création d'un outil territorialisé de gestion et de valorisation patrimoniale de la ressource, de type Géoparc par exemple...

Références bibliographiques

- (1) **Antea – Burgeap.** 2001 - Etude préliminaire des aquifères patrimoniaux karstiques du bassin Rhône-Méditerranée : Région Rhône-Alpes. Agence de l'eau.
- (2) **Cadhilac L. et Marchal J.P.** 2002 - Les origines du référentiel hydrogéologique et ses évolutions locales - Exemple sur le bassin Rhône-Méditerranée-Corse. 9^{èmes} journées techniques du Comité Français de l'A.I.H - Bordeaux, 29-30 novembre 2002.
- (3) **Denavit G.** 2004 - *Intérêt de la ressource en eau d'origine karstique pour l'avenir dans la partie Savoyarde des Bauges*, mémoire de maîtrise, Université de Savoie, 76 p.
- (4) **Denavit G.** 2005 - Présentation des aquifères karstiques patrimoniaux du massif des Bauges et des Bornes. Rapport de Stage de DESS Montagne - Université de Savoie - Centre Interdisciplinaire Scientifique de la Montagne, Bauges, 26 p., Bornes, 26 p.
- (5) **Durand R., Nant J.** 1998 - *Atlas des grottes de Savoie*. CDS 73/ éd. Gap, La Ravoire, 216p.
- (6) **Hoblea F.**, 1990 - *Problèmes d'aménagement sur karsts d'altitudes voués au tourisme*, Bulletin du Laboratoire Rhodanien de géomorphologie, n°25/26, pp 67-86.
- (7) **Hoblea F., Dodelin C., Laserre D., Bottazzi J., Maniez P.** 1996 – La tanne des Biolles : un axe de drainage majeur sous le massif du Margériaz (Bauges, Savoie, France). *Karstologia* 27, p. 41-56.
- (8) **Hoblea F.** 1999 - *Contribution à la connaissance et à la gestion environnementale des géosystèmes karstiques montagnards : études savoyardes*, Thèse de doctorat en géographie, Aménagement et urbanisme, Université Lumière-Lyon 2, 2 tomes, Lyon, 995 p.
- (9) **Lemordant.Y.**, 1977 - *Infiltration et transfert des eaux souterraines en pays karstique. Le plateau du Mont Revard (Savoie)*, Thèse de géologie appliquée de l'Université Scientifique et Médicale, Grenoble, 203 p.
- (10) **Lepiller. M.**, 1967 - Le massif du Semnoz, Géologie, Possibilités spéléologiques, *Spelunca* n°3.

- (11) **Lepiller. M.**, 1976 – « Résultats et interprétation de cinq opérations de traçage effectuées sur les systèmes karstiques du Semnoz et de la montagne de Bange–Bois de Prépoullain (massif subalpin des Bauges, Savoie et Haute Savoie, France) ». *Actes du deuxième colloque d'hydrologie en pays calcaire*, Besançon, p. 251-262.
- (12) **Lepiller M.**, 1980 – *Contribution de l'hydrochimie à la connaissance du comportement hydrogéologique des massifs calcaires. Etude de quelques systèmes karstiques du massif du Semnoz et de la région d'Annecy (Savoie, Haute-Savoie, France)*. Thèse Doctorat 3^e cycle, Géologie appliquée, Université Scientifique et Médicale de Grenoble. 478 p.
- (13) **Lepiller.M**, 1989 - *Rapport relatif aux opérations de traçage réalisées dans les massif des Bauges et des Bornes*, Convention passé avec l'agence financière de bassin RMC et l'Université d'Orléans, 65 p.
- (14) **Mathevet T.**, 2002 – Analyse du fonctionnement du système karstique de Bange-L'eau-Morte (Bauges, Savoie & Haute-Savoie, France). Mémoire DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie. Laboratoire souterrain CNRS de Moulis/Université d'Orléans. 59 p.
- (15) **Najib. H.**, 2000 - *Etude de la structure et du fonctionnement hydrologique du bassin versant karstique de la Doria (massif des Bauges Savoie)*, Thèse de Doctorat de Géographie-Hydrologie de l'Université, Louis Pasteur-Strasbourg 1, 273 p.
- (16) **Nicoud G.** 1973 - *Hydrogéologie de la haute vallée du Chéran Massif des Bauges (Savoie)*, Thèse de géologie appliquée, Université Scientifique et Médicale, Grenoble, 181 p.
- (17) **Zamolo G.** 1980 - *Régime des eaux souterraines dans les massifs calcaires. Hydrogéologie du secteur sud-est du massif des Bauges (Savoie). Bassin versant du Ternèze et du nant d'Aillon*, Thèse de Géologie appliquée de l'Université Scientifique et Médicale, Grenoble, 326 p.

Fonctionnement hydrologique et géochimique du système karstique de Bange-L'Eau-Morte

Thibault Mathevet⁽¹⁾, Nevila Jozja⁽²⁾

⁽¹⁾ EDF-DTG - 21, avenue de l'Europe, BP 41 - 38040 Grenoble cedex 9 -
thibault.mathevet@edf.fr

⁽²⁾ Environnement, Traçage et Détection – Polytech'Orléans – 8 rue Léonard de Vinci – 45072
Orléans cedex 2 – nevila.jozja@univ-orleans.fr

I. INTRODUCTION

Michel Lepiller a découvert les Bauges en 1967 [4] et y a consacré sa thèse dès le début des années 1970. Parmi l'ensemble des systèmes karstiques auxquels Michel Lepiller s'est intéressé, le système karstique de Bange-L'Eau-Morte (SKBLM) a été l'objet d'études longues et intensives [2 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; 9 ; 14 ; 15]. Dans le cadre des travaux de recherche, de Michel Lepiller et du laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Orléans, de nombreuses générations d'étudiants sont passées par les bauges et ce système a été l'objet d'études climatiques, hydrologiques, géologiques et géochimiques, auxquelles on peut rajouter de nombreux traçages. Par ailleurs, à partir du début des années 1980, Michel Lepiller a mis en place une station d'acquisition à l'exutoire du SKBLM qui lui a permis de suivre en continue le débit, la température de l'eau et la conductivité électrique de l'eau. Au prix d'un effort constant et de visites régulières à partir d'Orléans, l'acquisition des données s'est faite pendant plus de 20 ans.

L'intérêt de ce système karstique réside dans sa petite taille et sa grande karstification, qui permettent un écoulement très rapide des eaux. Ces deux caractéristiques rendent l'étude de ce système particulièrement intéressante, car les différents signaux hydrologiques et géochimiques enregistrés à l'exutoire de ce système sont particulièrement clairs et nous renseignent sur les différents processus qui ont lieu au sein de ce système karstique. Grâce à la pérennité des observations, nous disposons de chroniques de données inestimables pour l'étude de l'évolution du fonctionnement d'un système karstique au cours du temps, notamment en fonction de l'évolution d'un forçage climatique, comme celle qui concerne la température moyenne de l'air.

Dans cet article nous présenterons les caractéristiques générales de ce système karstique, son fonctionnement hydrologique et géochimique et les tendances récentes observées sur l'exportation carbonatée.

II. LE SYSTEME KARSTIQUE DE BANGE-L'EAU-MORTE

Le système karstique de Bange-L'Eau-Morte est, par sa superficie, le système le plus important du Semnoz (figure 1). Il occupe une superficie de 12.3 km² et s'étend entre 640 et 1699 m d'altitude, avec une altitude moyenne de 1225 m. Sa surface est principalement recouverte par de la forêt. Ce système doit son nom aux deux grottes qui permettent d'accéder directement à la zone saturée, la grotte de Bange et la grotte de L'Eau-Morte, situées proche du seul exutoire pérenne du système, le Nant de la Combe. Le SKBLM est entièrement situé

dans la moitié sud du Semnoz. D'un point de vue stratigraphique et tectonique, ce système est très homogène : sa lithologie est constituée à plus de 90 % par une dalle de calcaire Urgonien et aucune faille majeure ne vient rompre l'homogénéité de la dalle calcaire.

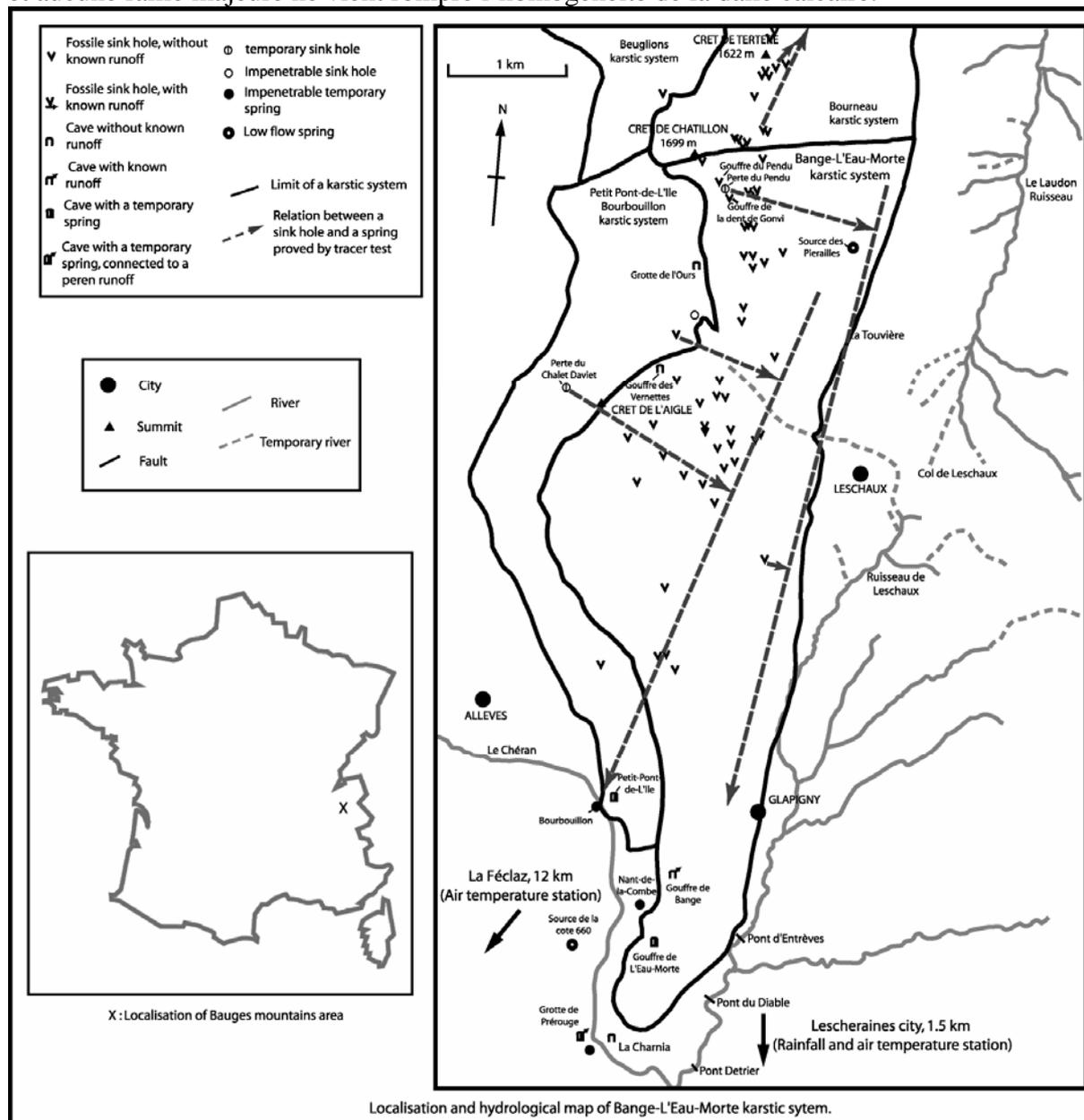


Figure 1 : Localisation et carte hydrogéologique du système karstique de Bange-L'Eau-Morte

Seul un ruisseau issu d'une dépression de type ruz est creusé dans les niveaux marneux et argileux de l'Hauterivien. Les limites latérales du système sont bien connues, car elles ont fait l'objet de campagnes de traçages [4]. A l'est, la limite orientale est constituée par les formations non karstiques (formations de l'Albien au sud et formations tertiaires au nord) qui recouvrent stratigraphiquement les calcaires de l'Urgonien et de l'Aptien. A l'ouest, la limite occidentale est constituée par les affleurements des marnes de l'Hauterivien moyen au sud et par les buttes résiduelles de marnes de l'Hauterivien inférieur au nord du Crêt de l'Aigle. Au sud, la limite méridionale a été placée au niveau de la cote critique de 647 m, surface libre du plan d'eau recoupé par la Grotte de Bange, lorsque le circuit de trop plein de l'Eau-Morte rentre en fonctionnement. Au nord, la limite septentrionale a été déterminée par de nombreux

traçages. Elle se trouve certainement au niveau de la ligne de divergence des pendages de l'Urgonien. Enfin, la limite inférieure, le substratum imperméable, est principalement constituée par les marnes de l'Hauterivien moyen, qui sont continues sur le Semnoz.

Une campagne de terrain récente [14] a permis l'identification des directions principales de drainage [3] par le relevé de tectoglyphes (failles, stylolithes, veines) sur l'ensemble des affleurements du SKBLM. L'interprétation de ces relevés est particulièrement intéressante, car les trois directions principales de drainage (N 15° E, N 75° E, N 120° E) issues de ces analyses sont en accord avec les relevés spéléologiques et la carte du réseau spéléologique explorés par l'entente spéléologique des Bauges.

D'après la classification de Marsaud [13] le système est unaire. La majeure partie de l'alimentation du système (96 % de la surface du bassin versant) est assurée par des apports diffus se réalisant sur les calcaires de l'Urgonien, du Barrémien inférieur et Hauterivien supérieur. Une forte proportion de ces apports diffus est soumise aux différents régimes d'infiltration, qui donnent lieu à un différé plus ou moins long de l'infiltration. Le reste de l'alimentation (seulement 4 % de la surface du bassin versant) se fait sous forme de ruissellement superficiel temporaire sur les affleurements des argiles de l'Hauterivien moyen situés en tête de bassin versant. Ce ruissellement, qui se perd au niveau de l'Hauterivien supérieur et du Barrémien inférieur, alimente en aval le ruissellement souterrain.

D'un point de vue hydrologique (Tableau 1), le SKBLM reçoit une lame d'eau d'environ 1400 mm/an, pour un écoulement de 830 mm/an, ce qui fait un déficit d'écoulement d'environ 570 mm/an. Le SKBLM possède un trop-plein, L'Eau-Morte, située juste au dessus de l'exutoire principal du Nant de la Combe, qui rentre en fonctionnement au cours des principales crues (15% du temps). Sur la surface du SKBLM, le ruissellement des eaux de pluie arrive très rarement et les pluies s'infiltrent majoritairement de manière diffuse dans le karst. Les précipitations, stockées sous forme de neige pendant l'hiver, représente 20% à 50% de l'alimentation en eau du SKBLM qui s'écoule dans le système au printemps.

Site de mesure	Variable	Moyenne inter-annuelle
Nant de la Combe – Allèves (647 m)	Débit	830 mm/an
		320 l/s
Lescheraines (650 m)	Pluie	1400 mm/an
Lescheraines (650 m)	Température de l'air	8.7 °C

Tableau 1 : Bilan hydrologique du système karstique de Bange-L'Eau-Morte

III. FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE DU SYSTEME KARSTIQUE DE BANGE-L'EAU-MORTE

Le fonctionnement hydrodynamique du SKBLM a été étudié par l'analyse des débits classés et des récessions et par l'analyse des séries chronologiques [Mathevet, 2002].

III.1. Analyse des débits classés et des récessions

L'analyse des débits classés [11] permet d'identifier des événements particuliers (fuite, trop-plein) à partir des modifications qu'ils induisent sur l'hydrogramme. L'information obtenue sur le fonctionnement du système est différente selon la position des ruptures et leurs pentes respectives [13]. L'analyse des débits classés présente trois ruptures à 0.8, 2.5 et 2.8 m³/s. La première rupture correspond à la mise en charge des écoulements dans la grotte de Bange et l'entrée en fonctionnement du trop plein de l'Eau-Morte. Les ruptures à 2.5 et 2.8 m³/s sont

plus difficiles à identifier et correspondraient à l'exploitation de réseaux de drainage paléokarstiques plus transmissifs pendant les fortes crues.

L'analyse des récessions [10] permet d'identifier certains paramètres hydrodynamiques du SKBLM, tels que les coefficients de tarissement, d'infiltration et d'hétérogénéité des écoulements, ainsi que le volume dynamique du système. Les analyses réalisées sur la période 1980 – 1996 permettent d'estimer ces paramètres, qui traduisent le caractère bien drainé de ce système, dont les caractéristiques sont proches de celles du système karstique d'Aliou dans les Pyrénées. Le volume dynamique de l'aquifère est très faible, il traduit l'absence de réserve de ce système, qui est d'environ 210 000 m³. D'après la classification des systèmes karstiques de Mangin [12], le SKBLM fait partie des systèmes karstiques possédant un réseau de drainage très développé, avec une zone noyée peu importante, comme celui d'Aliou (Figure 2).

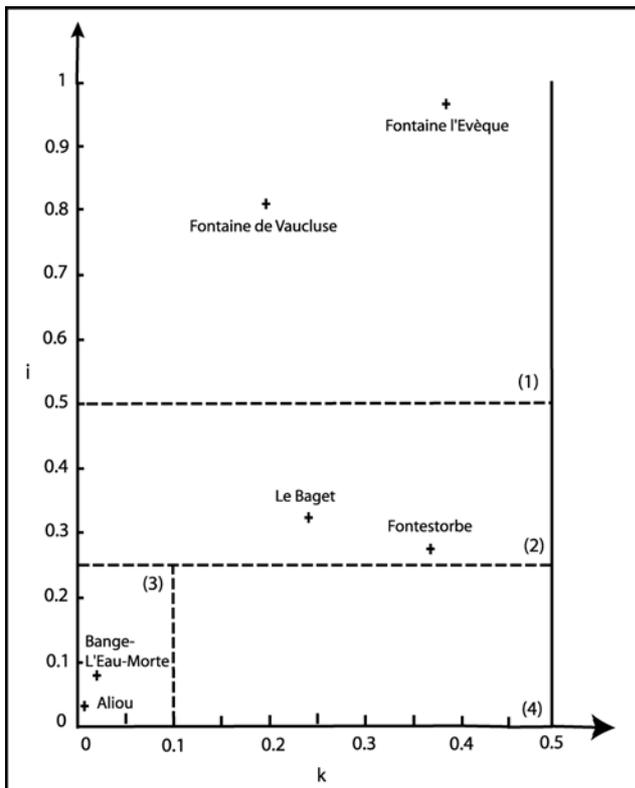


Figure 2 : Classification du système karstique de Bange -L'Eau-Morte dans le diagramme de A. Mangin [1975].

Éléments d'interprétation du diagramme de A. Mangin (1975) :

- 1 : Systèmes complexes ;
- 2 : Systèmes plus karstifiés à l'amont qu'à l'aval, avec des retards à l'alimentation ;
- 3 : Systèmes karstiques possédant un réseau de drainage très développé, avec une zone noyée peu importante ;
- 4 : Réseaux spéléologiques bien développés débouchant en aval sur un important karst noyé ;

III.2. Analyse des séries chronologiques

L'analyse des séries chronologiques, assez classique dans l'étude des systèmes karstiques [Mangin, Labat], nous permet d'explorer les propriétés des différentes variables caractérisant le fonctionnement du SKBLM, tel que la pluie, la température ou le débit, ainsi que les relations entre la pluie ou la température et le débit. L'ensemble des traitements classiques (analyses corrélatoires et spectrales, simples et croisées, analyses en ondelettes) ont été faites pour différentes chroniques du SKBLM [15]. Ces analyses (Figure 3) sont très cohérentes et confirment le caractère très nerveux de ce système avec une très faible autocorrélation des débits (effet de mémoire inférieur à 7 jours, fréquence de coupure inférieure à 5 jours) et une très bonne corrélation croisée pluie-débit pendant la période pluviale (temps de réponse de 1 jour ; $r_{\max} = 0.74$). L'effet de la neige est mis en évidence par la baisse du coefficient de corrélation ($r_{\max} = 0.56$) obtenu sur l'ensemble de la chronique et un effet capacitif traduit par la forme du corrélogramme.

Les caractéristiques de ce système mises en évidence par la très bonne relation pluie-débit sont également révélées par l'analyse de la relation température-débit, pendant la période de fonte (figure 4). En effet, à cette période, la fonte nivale représente une alimentation presque continue en eau du système, rythmée par l'évolution journalière de la température de l'air. Le caractère nerveux de ce système est mis en évidence par la très bonne corrélation température-débit (temps de réponse de 16 heures, $r_{\max} = 0.7$) et la cyclicité à 24 heures très marquée des débits indique sa bonne karstification et de faibles réserves (par sa faible capacité d'atténuation d'un signal d'entrée) (figure 5).

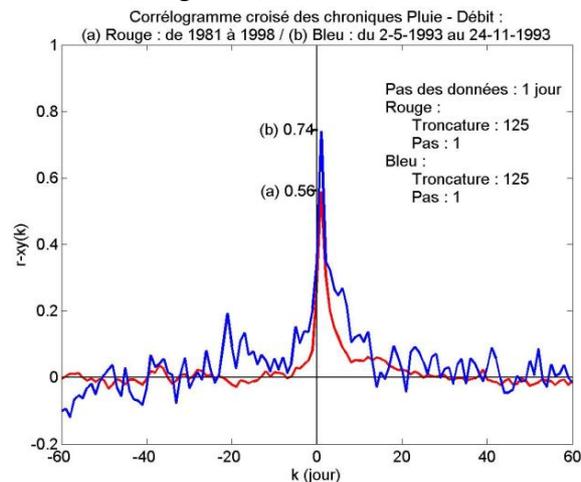


Figure 3 : Corrélogramme croisé pluie-débit, de l'ensemble du cycle hydrologique (a) et de la période pluviale (b).

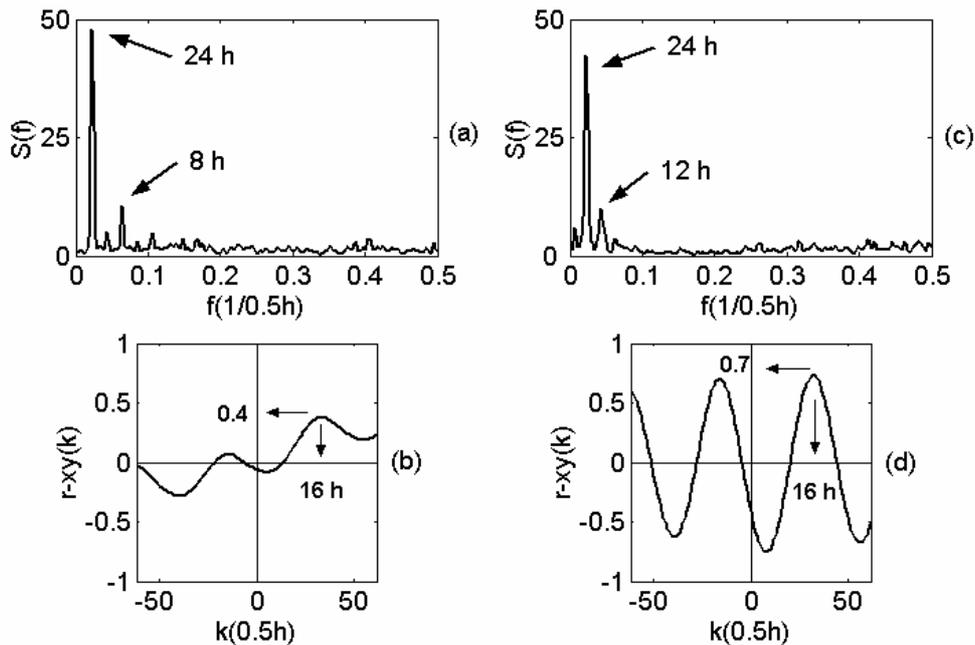


Figure 4 : Pendant la période de fonte (04/2002), (a) Spectre de la chronique de température de l'air ; (c) Spectre de la chronique de débit ; (b) Corrélogramme température-débit ; (d) Corrélogramme température-débit de la composante à 24 h des chroniques, isolées par analyses en ondelettes.

Cette partie a eu pour objet de faire la synthèse de l'ensemble des analyses qu'il est possible de réaliser pour ausculter et comprendre le fonctionnement d'un système karstique. Quel que soit le type d'analyses, le système karstique de Bange-L'Eau-Morte se caractérise donc par une bonne karstification, l'existence de faibles réserves et un caractère très nerveux en réponse à une stimulation par la pluie ou par la température de l'air en période de fonte.

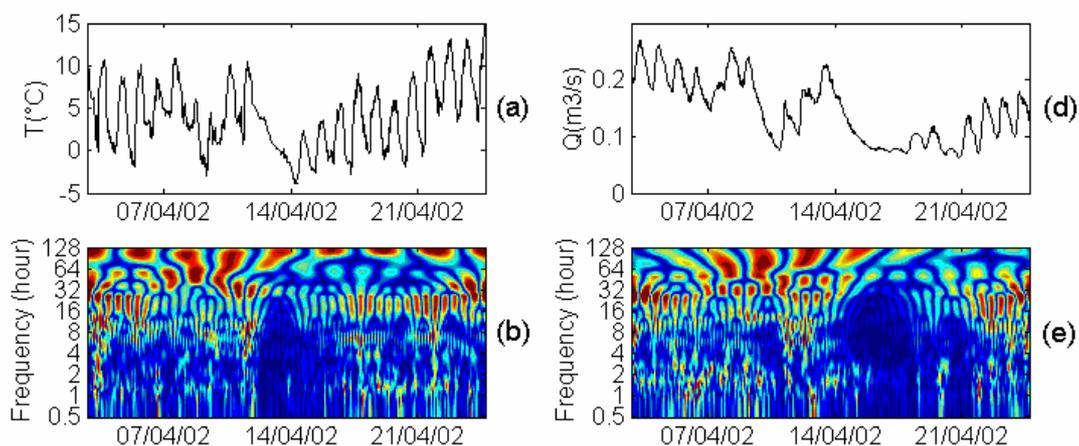


Figure 5 : Pendant la période de fonte (04/2002), (d) Chronique de température de l'air ; (c) Chronique de débit ; (b) Analyse en ondelette de la chronique de température ; (e) Analyse en ondelette de la chronique de débit. La cyclicité de la température et du débit est mise en évidence par l'existence de structures entre 16h et 24h.

IV. FONCTIONNEMENT GEOCHIMIQUE DU SYSTEME KARSTIQUE DE BANGEL'EAU-MORTE

L'analyse du fonctionnement géochimique du SKBLM est la partie la plus intéressante des analyses possibles à partir des données récoltées sur ce système. Ce travail était d'ailleurs le travail préféré de Michel Lepiller, tant les données disponibles et les caractéristiques hydrodynamiques du système permettaient aux signaux géochimiques de délivrer une grande quantité d'information. Sur ce système nous disposons entre autres d'une chronique journalière de plus de 20 ans de conductivité électrique de l'eau (sans lacunes de 1981 à 1996, et avec des lacunes jusqu'en 2002) et d'une chronique de 4 ans (1981-1985) d'ions majeurs (Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Cl^-). Il existe également d'autres chroniques plus ponctuelles (turbidité, pH, température de l'eau, etc.).

IV.1. Analyse de la chronique d'ions majeurs

L'étude hydrodynamique apporte des informations sur la manière dont les transferts d'énergie se font à l'intérieur d'un système karstique. Par contre, l'étude géochimique des eaux, en s'intéressant aux contraintes thermodynamiques et cinétiques de l'acquisition de la charge dissoute et à son transit dans le karst, apporte d'autres informations sur la structure et le fonctionnement des systèmes karstiques, notamment grâce à l'identification des modalités d'infiltration. Les notions de transfert et de transit étant très nettement dissociées dans les systèmes karstiques, la géochimie des eaux apporte donc des renseignements complémentaires sur la structure et le fonctionnement des systèmes karstiques [1 ; 6 ; 17 ; 16 ; 18]. Dans ce cadre, la concentration des ions majeurs à l'exutoire du SKBLM a été mesurée de 1981 à 1985 au pas de temps journalier. Cette chronique, qui représente un travail d'analyse très important, a été malheureusement peu exploitée.

L'analyse de cette chronique d'ions majeurs [14] a été faite grâce à des analyses en composantes principales (ACP) et des analyses factorielles discriminantes (AFD). Ce type d'analyses est classiquement utilisé en hydrogéologie karstique pour traiter de nombreuses données concernant la géochimie des eaux [17].

L'ACP permet de discriminer deux axes de variances principales. Le premier (39.4 % de variance) oppose la conductivité, le Mg^{2+} , le K^+ , la silice au débit, bien que ce dernier soit mal représenté dans le plan F1-F2. Ainsi, cet axe traduit l'opposition entre les eaux peu minéralisées et les eaux très minéralisées, c'est-à-dire les eaux à temps de séjour court (infiltration immédiate) et les eaux à temps de séjour long (infiltration lente), ce qui rend compte des conditions d'écoulement. Le deuxième axe (24.9 % de variance) est représenté par Na^+ et Cl^- . Cet axe traduit, soit les eaux d'origine météorique et/ou anthropique, soit de l'infiltration différée, car ces éléments peuvent être reconcentrés dans la partie supérieure de la zone non saturée. Les variables débit et température sont globalement mal représentées et/ou peu significatives. Leur rôle dans la variation de concentration des ions majeurs n'est pas direct. Par ailleurs, dans l'espace des individus, l'ACP permet de discriminer 6 groupes d'eaux qui confirment le caractère saisonnier du comportement de ce système. Les résultats apportés par l'ACP, vont être testés par une AFD.

En effet, l'AFD est une méthode permettant de discerner des groupes et de tester l'appartenance d'un individu à un groupe, en fonction des valeurs prises par plusieurs variables. Afin de distinguer des groupes choisis a priori, l'AFD consiste à minimiser la variance intra-groupe et à maximiser la variance intergroupe. Dans notre cas, les variables explicatives des groupes sont les variables utilisées précédemment pour l'ACP et les variables

à expliquer sont les groupes d'appartenance à un épisode du cycle hydrologique (groupes 1 à 5).

L'AFD (Figure 6) permet de discriminer deux axes de variances principales, qui représentent la même information que celle apportée par les ACP. Par rapport aux groupes d'individus choisis a priori les résultats de l'AFD sont très intéressants, car seulement 5% des individus sont mal classés. Une aussi bonne discrimination est assez rare pour un système karstique. Cependant, elle ne fait que confirmer les renseignements apportés par l'étude hydrodynamique : le système est très sensible aux conditions extérieures et filtre peu d'informations.

Les cinq groupes se répartissent autour d'un cercle et se succèdent chronologiquement. Les groupes d'eaux de crues (automne, fonte des neiges, printemps), qui sont assez dispersés, se distinguent des groupes d'eaux d'étiages (hiver, été), qui sont assez compactes. La dispersion des eaux de crue est due aux variations extrêmes du chimisme des eaux pendant ces épisodes. Pendant les crues, le chimisme des eaux résulte du mélange d'eau d'infiltration immédiate, d'eau d'infiltration différée et d'eau d'infiltration lente. Pendant les étiages, le système est principalement alimenté par des eaux d'infiltration lente et d'eau provenant du karst noyé, dont le chimisme varie moins fortement que pendant les périodes de crue.

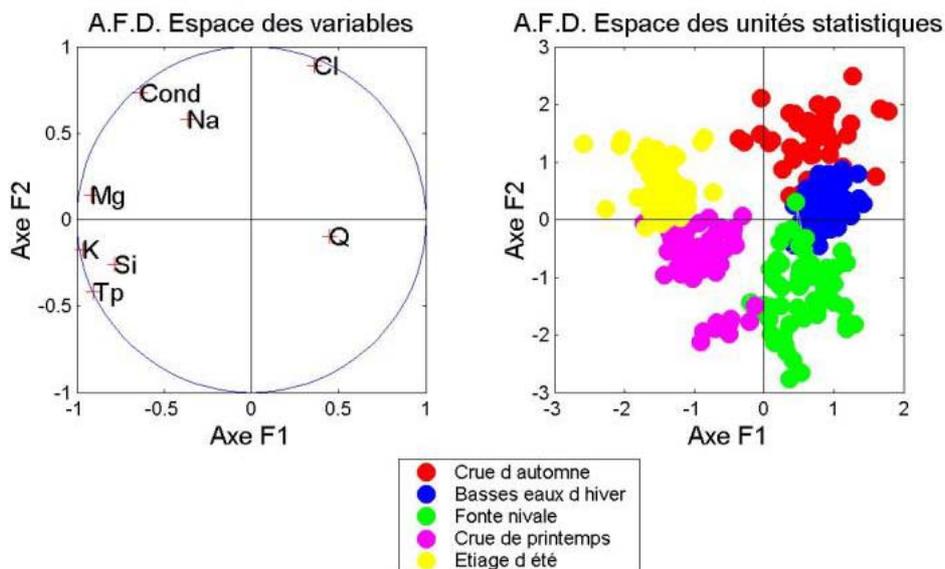


Figure 6 : Analyse Factorielle Discriminante du chimisme de l'eau du système karstique de Bange-L'Eau-Morte

De plus, le stockage des précipitations sous forme de neige pendant l'étiage d'hiver, et la forte évapotranspiration à l'origine de la rétention de forts volumes d'eau dans la zone non saturée pendant l'étiage d'été, jouent le rôle de filtre. Ceci explique la plus faible variabilité du chimisme des eaux pendant ces deux périodes. Par rapport aux individus mal classés, ils apportent également de l'information et permettent de discriminer facilement des épisodes (eaux d'infiltration) assez différents du groupe auquel ils appartiennent.

Les analyses factorielles nous donnent une bonne vision du fonctionnement géochimique global de ce système. Ainsi, les eaux varient de manière cyclique et les cinq groupes correspondant aux cinq périodes du cycle hydrologique se distinguent très bien. Ces analyses rendent bien compte des eaux d'infiltration lente ou des eaux d'infiltration rapide. Cependant, les eaux d'infiltration différées sont mal discriminées. C'est la raison pour laquelle une grande

partie des individus mal classés correspondent à ce type d'eaux et sont reclassés dans d'autres groupes.

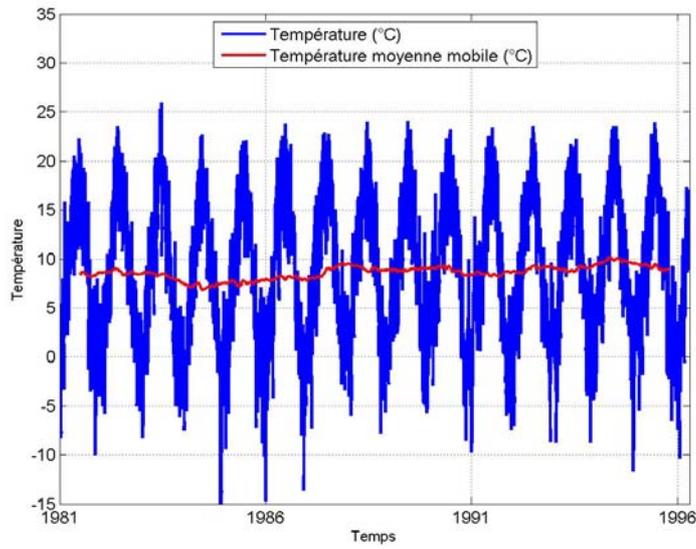
IV.2. Analyse de la chronique de conductivité

L'analyse de la chronique de conductivité au cours du temps était un sujet qui intéressait fortement Michel Lepiller. En effet, l'énergie qu'il a déployée pour maintenir la pérennité des mesures de débit et de conductivité à la station du Nant de la Combe, prenait tout son sens dans la durée. En plus de l'analyse du fonctionnement à court terme du SKBLM et des différentes modalités d'infiltration et d'écoulements, cette chronique permet de comprendre comment la géochimie des eaux, et l'exportation carbonatée, d'un système karstique est influencée par une variable climatique, telle que la température.

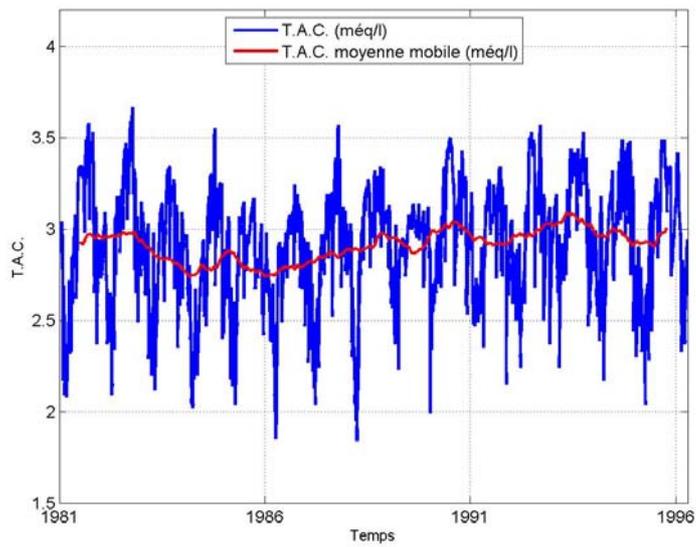
Dans le cadre du SKBLM, la conductivité de l'eau représente très bien la concentration de HCO_3^- (relation linéaire avec un $R^2 = 0.99$). Ainsi, la seule mesure de la conductivité permet de suivre l'exportation carbonatée du système karstique.

La figure 7 montre l'évolution des chroniques de température de l'air et de T.A.C. de 1981 à 1996. Il serait intéressant d'étudier cette chronique jusqu'en 2005, mais l'existence de lacunes rend plus difficile les analyses. La Figure c) montre les chroniques de température de l'air et du T.A.C. lissée par une moyenne mobile et centrée-réduite. On observe tout d'abord sur cette chronique le caractère saisonnier des variations de températures de l'air et de T.A.C., ainsi qu'une tendance sur le long terme à l'augmentation de la température de l'air et du T.A.C.. Cette figure montre une bonne co-fluctuation de ces deux variables, avec un déphasage de 2 à 3 mois. Cette augmentation de température de l'air et du T.A.C., est à mettre en relation avec l'augmentation globale de la température de l'air. L'augmentation de température de l'air est de l'ordre de 3°C en 15 ans, et l'augmentation du T.A.C. est de l'ordre de 0.3 ° d'alcalinité.

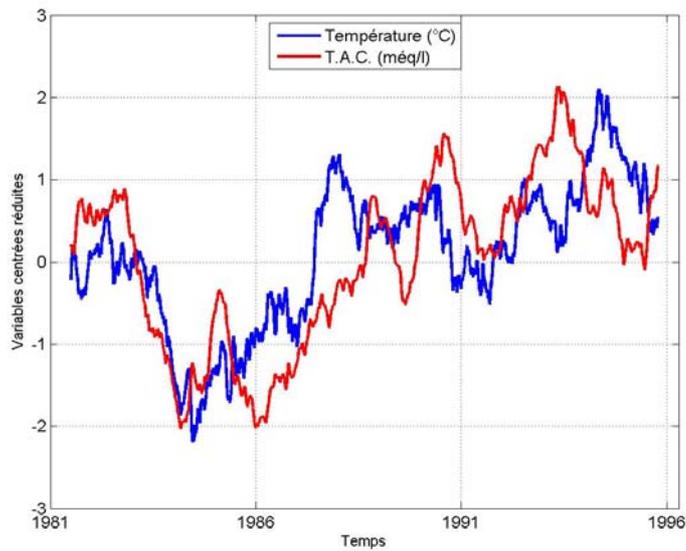
Les analyses corrélatoires et spectrales mettent en évidence le caractère cyclique de la température et du T.A.C., avec une autocorrélation assez forte (Figures 8 a et b). Le corrélogramme croisé entre ces deux variables montre une bonne corrélation ($r_{\max} = 0.6$), avec un déphasage de 2 à 3 mois. Les autres relations du T.A.C. avec la pluie ou les débits sont beaucoup moins bonnes, aussi bien à court terme qu'à long terme.



a)



b)



c)

Figure 7 : Chroniques de température (a) et T.A.C. (b) sur la période 1981-1996. (c) chronique de température et T.A.C. en variables centrées et réduites.

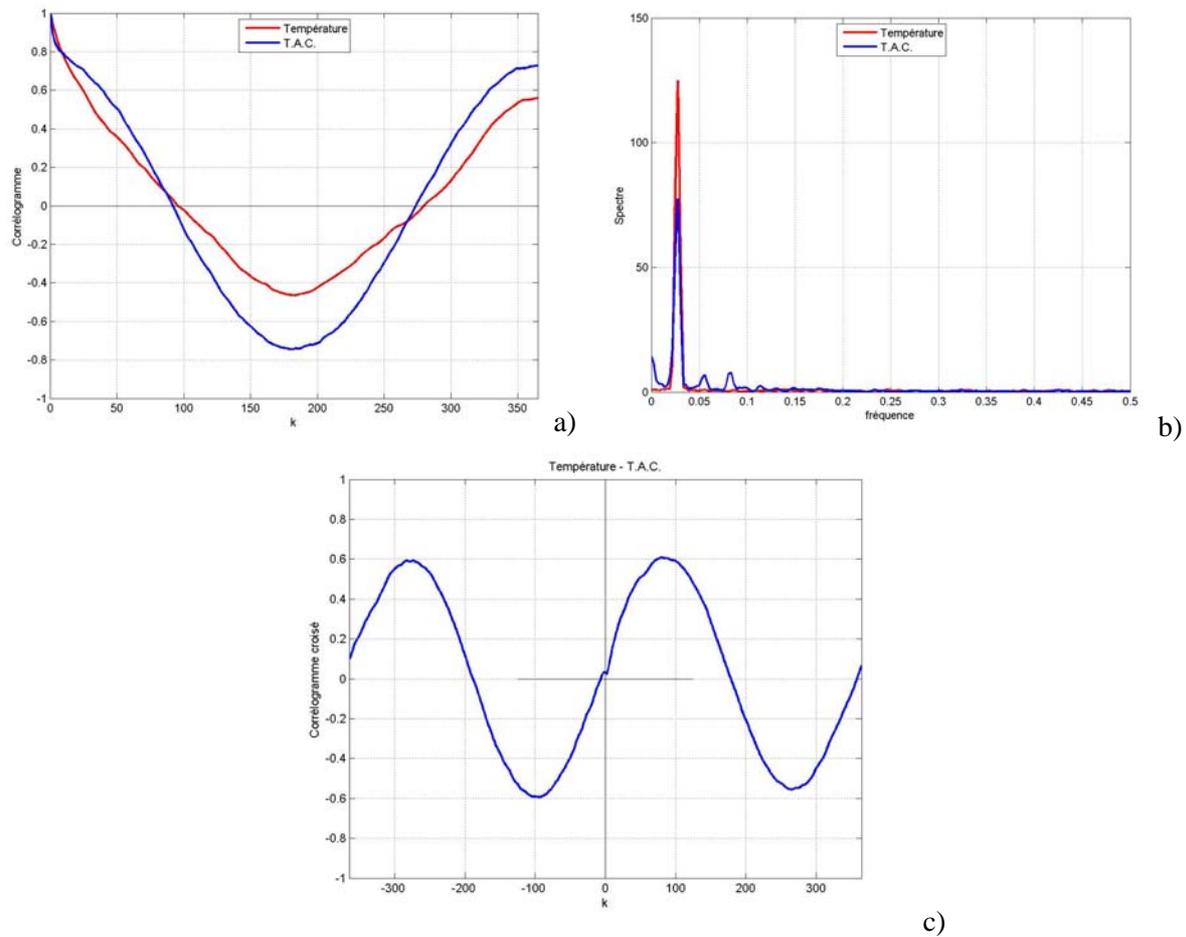


Figure 8 : Corrélogrammes a) et spectre b) de la température de l'air et du T.A.C. (alcalinité en méq/l), c) corrélogramme croisé température – T.A.C.

V. CONCLUSIONS

Le système karstique de Bange-L'Eau-Morte a été suivi pendant plus de 30 ans par Michel Lepiller. La masse et la diversité d'informations recueillies sur ce système permettent d'en analyser finement le fonctionnement hydrodynamique et géochimique. De par sa petite taille, son caractère nerveux et bien karstifié, le fonctionnement du système est bien ausculté par les différents signaux hydrologiques et géochimiques. Ces signaux révèlent assez bien les modalités d'infiltration et d'écoulements des eaux, leurs temps de séjour dans les différentes parties du système karstique.

Enfin, pour revenir à un sujet qui préoccupait fortement Michel Lepiller, la continuité des mesures pendant presque 30 ans a également permis de suivre la réponse du système au réchauffement de la température de l'air. En effet, l'analyse des relations à long terme entre la concentration de HCO_3^- et les variables climatiques indépendantes (pluie, température de l'air) montre que la température de l'air exerce un contrôle non négligeable sur la concentration de HCO_3^- et par conséquent sur l'intensité d'un des processus impliqués – la dissolution du carbonate – dans l'érosion des aires carbonatées (près de 50% de la variance de la concentration de HCO_3^- est expliquée par la variation de la température de l'air entre 1981

et 1995). Néanmoins, les relations mettant en jeu les quantités de chaleur apportées au système par convection et la concentration ou le débit massique de HCO_3^- sont moins étroites.

Le gradient de concentration de HCO_3^- en fonction de l'évolution climatique constatée entre 1981 et 1995 est de 0,08 meq/l / °C. Cette valeur est 8 fois plus faible que celle du gradient de concentration de HCO_3^- en fonction de l'altitude moyenne du bassin versant des systèmes karstiques mis en évidence dans les Bauges ou les Bornes (0,62 meq/l / °C). Cet écart est interprété comme traduisant l'inertie thermique des systèmes karstiques résultant de l'importance des volumes rocheux qui les constituent comparée à la faible valeur du volume d'eau qui les traverse au cours d'un cycle hydrologique.

Il n'en reste pas moins remarquable qu'une augmentation de la température moyenne de l'air de moins de 3 °C en quinze ans entraîne une variation sensible et quasi immédiate (déphasage de 2 à 3 mois) de près de 10% de la charge dissoute des eaux issues des formations carbonatées.

Références bibliographiques

- (1) **Bakalowicz, M.** 1979 - Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse de doctorat d'Etat, Université Paris VI, 269p.
- (2) **Boivent, B.** 1998 - Hydrodynamique et géochimie des eaux des systèmes hydrologiques karstiques du massif subalpin des Bauges (Savoie – Haute-Savoie – France). Rapport de maîtrise de Sciences de la Terre.
- (3) **Eraso,** 1985 - Methodo de prediccion de las direcciones principales de drenaje en el karst. KOBIE, Serie Ciencias Naturales, Bilbao, n° XV, 122 p.
- (4) **Lepiller, M.** 1976 - Résultats et interprétation de cinq opérations de traçage effectuées sur les systèmes karstiques du Semnoz et de la montagne de Bange –Bois de Prépoullain (Massif subalpin des Bauges, Savoie et Haute Savoie, France). 2e Colloq. Hydrol. en Pays Calcaires, Besançon, pp 251-262.
- (5) **Lepiller, M.,** 1979 - Le rôle de l'activité biologique dans l'acquisition de la charge dissoute des eaux d'aquifères carbonatés : Etude sur douze systèmes karstiques des Bauges et des Bornes (massifs subalpins septentrionaux, Alpes Françaises). Actes Coll. Int. « Migrations organo-minérales dans les sols tempérés », Nancy, 1979, 16 p.
- (6) **Lepiller, M.** 1980 - Contribution de l'hydrochimie à la connaissance du comportement hydrogéologique des massifs calcaires. Etude de quelques systèmes karstiques du massif du Semnoz et de la région d'Annecy (Savoie, Haute Savoie, France). Thèse, Univ. Grenoble, 488p.
- (7) **Lepiller, M.** 1982 - La capacité de stockage dans la zone non saturée des aquifères karstiques. Estimation et conséquences pour la localisation de la dissolution dans les systèmes. 3e Colloque d'hydrologie en Pays Calcaires, Besançon.
- (8) **Lepiller, M., Mondain, P.H., Cardin P.,** 1988 - Les recherches en hydrogéologie karstique menées depuis dix ans dans les massifs sub-alpins septentrionaux par le laboratoire d'hydrogéologie de l'université d'Orléans (France). Bulletin du CHYN, pp. 27-48.
- (9) **Lepiller M., Mondain P.-H., Cardin P.,** 1990 - Contribution à la connaissance du karst Urgonien des massifs subalpins des Bauges et des Bornes (Savoie, Haute-Savoie, France). 13ème Réunion des Sciences de la Terre, Grenoble, 2-4 avril 1990, p. 79. Soc. Géol. Fr. édit.
- (10) **Mangin, A.** 1970 - Contribution à l'étude d'aquifères karstiques à partir de l'analyse de courbes de décrues et de tarissement. Annales de Spéléologie, 25, 3, p. 581-609.
- (11) **Mangin, A.** 1971 - Étude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique. Ann. Spéléol., t. 26, fasc. 2, pp 283-329.

- (12) **Mangin, A.** 1975 - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstique. Thèse de Doctorat en Sciences Naturelles. Dijon, (Ann. Spéléol., 1974, 29, 3, p 283-332 ; Ann. Spéléol., 1974, 29, 4, p 495-601 ; Ann. Spéléol., 1975, 30, 1, p 21-24).
- (13) **Marsaud, B.** 1996 - Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Thèse, Univ. Paris XI Orsay.
- (14) **Mathevet, T.,** 2002 -Analyse du fonctionnement du système karstique de Bange-L'Eau-Morte (Bauges, Savoie & Haute-Savoie, France). Rapport de DEA HHGG, École Supérieure des Mines de Paris.
- (15) **Mathevet, T., Lepiller, M., Mangin, A.,** 2004 - Application of time-series analyses to the study of the hydrological functioning of an Alpine karstic system: the case of the Bange-L'Eau-Morte karstic system. Hydrology and Earth System Sciences 8 (6), pp. 1051-1064.
- (16) **Mondain, P.H.** 1991 - Hydrogéologie des systèmes karstiques de l'unité delphino-helvétique inférieure entre les vallées du Fier et du Borne (Massif des Bornes, Haute -Savoie, France). Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 561 p.
- (17) **Mudry, J.,** 1987. Les courbes flux chimique-débit et le fonctionnement des aquifères karstiques. J. Hydrol.,vol. 120 (1-4), pp. 283-294.
- (18) **Plagnes, V.** 1997. Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie des eaux. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 376p.

Les ressources en eau souterraines dans les chaînons béarnais (Pyrénées- atlantiques)

Joëlle Riss ⁽¹⁾, Fabrice Rey ⁽²⁾, Frédéric Huneau ⁽¹⁾, Frédéric Prétou ⁽²⁾

⁽¹⁾ Université Bordeaux 1 – Av. des Facultés – 33405 Talence – j.riss@ghymac.u-bordeaux1.fr

⁽²⁾ CETRA – 12 rue de l'artisanat – 64110 Laroin – scp.cetra@wanadoo.fr

Résumé

La nature et le fonctionnement de quatre aquifères des chaînons béarnais (Pyrénées-Atlantiques) aux caractéristiques bien individualisées sont décrits ainsi que leur vulnérabilité en relation avec le contexte climatique régional.

I. INTRODUCTION

L'accès à l'eau, la gestion et la préservation de cette ressource constituent un immense défi pour aujourd'hui et pour l'avenir. En France, les deux tiers des prélèvements en eau potable ont pour origine les eaux souterraines (1). Dans la continuité de la loi sur l'eau et en référence aux directives cadres FD 2000/60/européennes WCE et NDC 2006/118/EC, huit districts hydrographiques ont été définis, au sein desquels des masses d'eau souterraine ont été délimitées (2). Le district F « Adour, Dordogne, Garonne, Charente et les cours d'eau côtiers charentais et aquitains » est l'un d'eux parmi lequel cent cinq masses d'eau souterraine ont été identifiées. L'une d'elle correspond, en extension superficielle, à la majeure partie du département des Pyrénées-Atlantiques de la rivière du Saison à l'ouest à celle du gave de Pau à l'est (Figure 1). L'étude proposée participe à l'amélioration des connaissances de cette masse d'eau ; en effet quatre sources réparties dans les chaînons béarnais -ensemble sédimentaire de moyenne montagne- ont été récemment l'objet d'un suivi régulier (3) qui a permis d'en caractériser les principaux processus déterminant leur qualité et leur régime.

Au-delà de ces considérations, la nécessité d'une connaissance actualisée de la géologie et du fonctionnement hydrologique des impluviums de ces sources s'est illustrée, il y a peu de temps, à l'occasion de la pollution accidentelle de l'une d'entre elles et cela en raison d'une définition incomplète et non actualisée de son périmètre de protection : un agriculteur avait déversé du purin deux cents mètres en amont d'un captage, mais en dehors du périmètre de protection rapproché de l'époque (3). Les quatre sources étudiées sont, d'ouest en est celles de la Fontaine d'Orbe, des Mourtès, de l'Ourtau, et de Gourgouch (Figure 2).

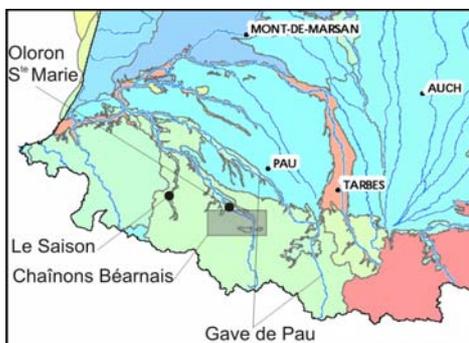


Figure 1 : Les masses d'eau du district F (Adour, Garonne), extrait d'après (2)

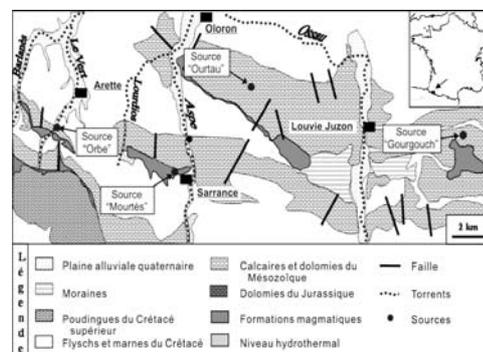


Figure 2 : Localisation des sources étudiées, d'après (3)

II. CONTEXTE DE L'ETUDE

L'importance économique et environnementale des eaux souterraines fait de leur préservation un facteur de développement durable (1). Les massifs pyrénéens, bordant le sud du département des Pyrénées-Atlantiques, constituent une réserve en eau qui, dans le contexte climatique actuel et, à une échelle de temps raisonnable, peut être considérée comme importante et renouvelable. Parmi ces ressources, celles des chaînons béarnais dont certaines sont karstiques, sont déjà l'objet de prélèvements par le biais d'une quinzaine de captages et de sources et constituent un potentiel en eau potable complémentaire ou de substitution remarquable.

Les chaînons béarnais, au nombre de trois, font partie des chaînons calcaires de la zone nord-pyrénéenne limitée au nord par le front nord-pyrénéen et au sud par la faille nord-pyrénéenne. Ces chaînons constituent, en venant du nord, les premiers reliefs plissés essentiellement constitués de matériel jurassique et crétacé inférieur. Les terrains aquifères sont donc essentiellement calcaires et dolomitiques (Figure 2) ; les eaux circulent, dans certains d'entre eux, rapidement et sont, de ce fait, généralement peu filtrées. Les réservoirs peuvent donc présenter une forte vulnérabilité aux pollutions de surface qu'il faut pouvoir caractériser avant d'envisager d'amplifier l'exploitation des ressources (particulièrement pour l'alimentation en eau potable, AEP). Les quatre sources émergent de l'un ou l'autre des trois chaînons (Figure 2) : ce sont, dans l'ordre d'identification des chaînons, les sources de l'Ourtau et Gourgouch (premier chaînon), des Mourtès (deuxième chaînon) et celle de la Fontaine d'Orbe (troisième chaînon). Trois des quatre sources (Ourtau, Mourtès et Orbe) sont utilisées pour l'alimentation en eau potable de communes plus ou moins importantes : respectivement Oloron-Sainte-Marie, sous-préfecture du département (plus de 10 000 habitants), Sarrance (300 habitants) et Arette (1 500 habitants). L'eau de la source Gourgouch approvisionnait, quant à elle, une salmoniculture jusqu'à sa fermeture en 2006.

III. APPROCHE PLURIDISCIPLINAIRE : METHODE DURABLE POUR LES RESSOURCES EN EAU

Les quatre systèmes hydrogéologiques ont été étudiés selon l'approche pluridisciplinaire de l'hydrogéologie moderne. De nombreuses campagnes de terrain sont à l'origine de mesures de la fracturation des massifs carbonatés et de la cartographie de chaque site afin d'en déduire la structure et l'organisation spatiale. Ceci a été complété par une trentaine de panneaux électriques (auscultation non destructive) (3). Enfin, les paramètres physico-chimiques (conductivité, température, pH, débit et ions majeurs) des eaux ont été mesurés de manière hebdomadaire durant deux cycles hydrologiques complets (2004-2005 et 2005-2006). En parallèle, des sondes de mesure multi-paramètres ainsi que des pluviomètres automatiques ont été installés sur les différents sites. La conductivité, la température, le pH, la turbidité et la pluviométrie ont ainsi pu être enregistrés à un pas de temps horaire durant plus d'une année. Les résultats obtenus constituent un corpus de données qualitatives et quantitatives qui ont permis de poser pour la première fois les bases d'une véritable compréhension fonctionnelle des systèmes carbonatés des chaînons béarnais et de mettre en évidence l'utilité de leur valorisation. On se propose, ici, de résumer certains des éléments qui ont conduit à cette compréhension en se fondant sur les travaux de Rey (3). Une présentation du contexte climatique local suivra la description des caractéristiques hydrogéochimiques des quatre aquifères et l'analyse de la vulnérabilité de deux des quatre sources.

III.1. Caractérisation hydrogéochimique du fonctionnement des aquifères

La caractérisation de chacune des quatre sources résulte, en autres études, d'une analyse en composantes principales en données centrées réduites, réalisée sur la série statistique multidimensionnelle dont les variables sont les ions majeurs et les paramètres physico-chimiques, les individus étant eux, les prélèvements (ou date de mesure) effectués au cours de deux cycles hydrologiques. Cette analyse permet de structurer un espace vectoriel dont la dimension est égale au nombre de variables (p) dans lequel les individus forment un nuage de points dont la variance totale est donc égale à p . Rey (3) a utilisé onze variables et quatre cent trois individus. Ici on se limite à dix variables ($p = 10$) après élimination du pH dont les mesures ne sont pas toujours très stables ; par ailleurs la variable pH présentait une forte saturation (78%) sur le premier axe principal. Les variables sont la conductivité (notée μS), la température ($^{\circ}\text{C}$), les cations Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} et les anions Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- .

Chaque source, pour laquelle un descriptif statistique exhaustif a été établi par Rey (3) et dont un résumé succinct est donné Figure 3 a et b, constitue dans l'espace un sous ensemble du nuage de points (M_i) de centre de gravité G_s avec s variant de 1 à 4. Les coordonnées des vecteurs $\overrightarrow{OG_s}$, leur distance à l'origine (*i.e.* centre de gravité global O) ainsi que les angles que font ces vecteurs pris deux à deux peuvent donc être calculés. Avec le Tableau 1 on montre alors que les distances de chacune des sources au centre du système s'organisent en deux groupes (Orbe et Mourtès d'une part et Gourgouch et Ourtau d'autre part) ; de plus les angles des vecteurs $\overrightarrow{OG_s}$ pris deux à deux sont tous très proches de 90° à l'exception des sources de la Fontaine d'Orbe et des Mourtès pour lesquelles l'angle est égal à 76° . Par ailleurs, les distances entre les centres de gravité de chaque source sont globalement du même ordre de grandeur, à l'exception toutefois de celle des sources des Mourtès et Orbe qui est 1,33 fois plus grande que la moyenne des distances entre chacune des trois autres sources. L'analyse globale des contributions de chaque source à la variance totale montre ensuite que la source des Mourtès contribue le moins et celle de l'Ourtau le plus.

Ces contributions, une fois décomposées en variance intragroupe (ou intrasource) et intergroupe (ou intersource) mettent clairement en évidence la faible variabilité des paramètres étudiés pour les sources des Mourtès et de Gourgouch relativement à celle des deux autres sources. Nous sommes donc en présence de quatre sources dont deux présentent une faible variabilité interne mais dont l'une est proche du centre de gravité global et l'autre éloignée, les deux autres présentent une plus forte variabilité interne l'une étant proche du centre de gravité et l'autre éloignée. Il ressort donc de cette première analyse que les quatre sources toutes issues de l'unité géologique que constituent les chaînons béarnais sont bien individualisables.

Source s [1, 2, 3, 4] et (N_s)	$\frac{\sum_{i=1}^{N_s} \ \overrightarrow{G_s M_i}\ ^2}{\sum_{s=1}^4 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_s} \ \overrightarrow{G_s M_i}\ ^2}$	$\ \overrightarrow{OG_s}\ ^2$	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_s} \ \overrightarrow{G_s M_i}\ ^2$	Source n° $s : \{k,l\}$ Angles et distances		
1 Orbe (109)	26%	4,98	4,69	1-2 : 76°	1-3 : 97°	1-4 : 93°
2 Mourtès (96)	17%	4,72	2,51	1-2 : 5,9	2-3 : 96°	2-4 : 93°
3 Gourgouch (99)	26%	8,84	1,73	1-3 : 4,6	2-3 : 4,4	3-4 : 90°
4 Ourtau (98)	30%	7,88	4,53	1-4 : 4,3	2-4 : 4,3	3-4 : 4,5

Tableau 1 : Contribution à la variance totale de chaque source, distance élevée au carré du centre de gravité de chaque source au centre de gravité global, variances intrasources et relations géométriques des centres de gravité pris deux à deux (angle et distance)

La projection des individus sur les trois premiers axes factoriels absorbant 75% de la variance totale permet d'apprécier les caractères spécifiques dominant de chacune des quatre sources (Figure 3). Les sources Gourgouch et Ourtau s'opposent aux deux autres (Orbe et Mourtès) par leur caractère magnésien (composantes négatives sur l'axe F_1 et respectivement 22,2 et 15,3 mg/l contre 3,3 et 6,6 mg/l en moyenne) et le moins sodique pour Ourtau. Les variables conductivité et bicarbonates (variables les plus corrélées $r = 0,96$) opposent aussi ces deux sources avec des valeurs moyennes respectives de 424 et 322 μS et 253,4 et 171,6 mg/l, les coefficients de variation étant les plus faibles pour la source Gourgouch. Elles s'opposent également par les composantes positives et négatives de leurs individus sur l'axe F_2 faiblement négativement corrélé à la variable SO_4^{2-} (teneurs moyennes respectives 20,7 et 14,4 mg/l) et positivement corrélé à la variable calcium (22,2 et 15,3 mg/l en moyenne).

Les sources de la Fontaine d'Orbe et des Mourtès se superposent pour partie dans le plan F_1F_2 mais se distinguent l'une de l'autre par des températures plus élevées pour la première et des teneurs en nitrates plus importantes pour la seconde (composantes respectivement positives ou négative sur l'axe F_3). La source de la Fontaine d'Orbe est située à 376 m d'altitude, celle des Mourtès à 675 m, on notera alors que la hiérarchie établie par l'axe F_3 pour les températures est cohérente avec le gradient de température en fonction de l'altitude établi par Rey (3) ; les deux autres sources (480 m pour Gourgouch et 582 m pour Ourtau) montrent de façon cohérente des composantes intermédiaires sur l'axe F_3 .

Le Tableau 2 des saturations des variables et des variances absorbées montre que si les trois premiers axes factoriels permettent de bien distinguer les quatre sources, certains de leurs caractères ne sont pas encore identifiés. En effet, les variables SO_4^{2-} et K^+ s'expriment de façon très nette sur le plan F_4F_5 qui absorbe 15,4% de la variance totale ; les teneurs en sulfates des eaux des sources d'Orbe, Mourtès, Gourgouch et Ourtau (12,1, 13,2, 14,4 et 20,7 mg/l) sont une caractéristique importante des eaux issues des aquifères des chaînons béarnais dont l'origine est à chercher dans l'imperméable argileux associé systématiquement aux ophites de la région dont l'origine hydrothermale est encore à démontrer. Rey (3) a montré que les teneurs en sulfates sont particulièrement élevées lors des périodes d'étiage (essentiellement durant les mois de juin, juillet et août) dans les eaux des sources d'Ourtau et de la Fontaine d'Orbe. Les coefficients de variation des concentrations en ions sulfates sont plus de deux fois supérieurs pour ces deux sources que pour les sources des Mourtès et de Gourgouch. La dispersion due à la variable Potassium reflète l'influence de rares valeurs élevées tant pour une source que pour l'autre et qui apparaissent encore comme aléatoire.

Avec cinq axes, 86 à 96% de la variance totale de chaque source est absorbée mais seulement 71 à 88% de leur variance intragroupe. En effet, cinq variables ont encore des saturations inférieures à 90%, ce sont les variables T , Cl^- , NO_3^- , Na^+ et Ca^{2+} et il faut atteindre l'axe F_7 pour que les saturations soient toutes au moins égales à 94%, on notera en particulier les sauts respectifs de 13% et 9% des saturations des variables Cl^- , NO_3^- , de l'axe F_6 à l'axe F_7 à associer à la source des Mourtès. Ceci traduit l'effet de la variation de l'une et/ou l'autre de ces variables à l'intérieur de chaque groupe, variation qui est pour partie due à un effet saisonnier mais aussi à des effets locaux et ponctuels encore à éclaircir.

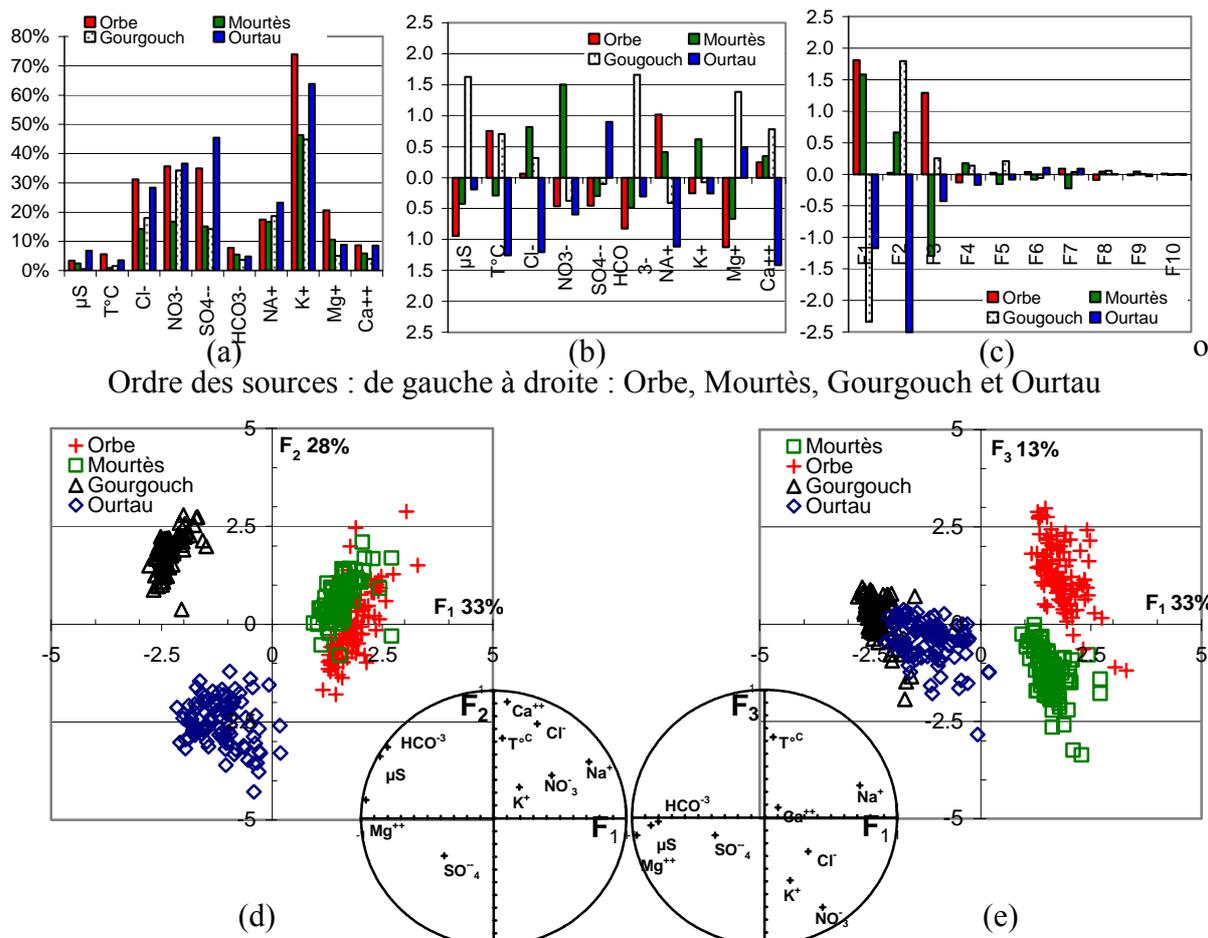


Figure 3 : Coefficients de variation (a), moyennes (b) des variables centrées réduites et moyennes des composantes principales (c) de chaque source. Plans principaux $F_1F_2F_3$ et cercles des corrélations (d) et (e)

	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	F ₉	F ₁₀
Cond (μS)	74%	97%	97%	97%	97%	98%	98%	98%	100%	100%
T°C	0%	40%	79%	84%	85%	95%	99%	99%	100%	100%
Cl ⁻	11%	66%	73%	75%	82%	87%	100%	100%	100%	100%
NO ₃ ⁻	19%	31%	80%	85%	89%	89%	98%	99%	100%	100%
SO ₄ ⁻	14%	23%	24%	59%	99%	99%	99%	99%	99%	100%
HCO ₃ ⁻	64%	95%	95%	96%	98%	99%	99%	99%	99%	100%
Na ⁺	52%	71%	78%	85%	85%	93%	94%	99%	100%	100%
K ⁺	4%	10%	34%	77%	98%	99%	99%	100%	100%	100%
Mg ²⁺	93%	95%	97%	97%	97%	97%	97%	99%	99%	100%
Ca ²⁺	1%	84%	85%	85%	86%	93%	94%	99%	99%	100%
% Variance totale absorbée										
Orbe	35%	42%	66%	77%	86%	92%	97%	100%	100%	100%
Mourtès	36%	45%	74%	83%	91%	95%	97%	100%	100%	100%
Gourgouch	52%	85%	88%	91%	95%	97%	99%	100%	100%	100%
Ourtau	13%	67%	71%	86%	96%	97%	99%	100%	100%	100%
% Variance intrasource absorbée										
Orbe	3%	17%	31%	53%	71%	83%	95%	99%	100%	100%
Mourtès	3%	17%	31%	53%	71%	83%	95%	99%	100%	100%
Gourgouch	4%	14%	31%	50%	71%	85%	93%	99%	100%	101%
Ourtau	6%	14%	21%	61%	88%	93%	97%	99%	100%	100%

Tableau 2 : Saturation des variables sur les axes factoriels (espace des variables), et pourcentages cumulés de variance totale et intrasource absorbés par les axes factoriels (espaces des individus)

En résumé, tenant compte d'une part de la structure du nuage de points dans l'espace à dix dimensions décrit ci-dessus et, d'autre part, des valeurs absolues des paramètres physico-chimiques et de leur distribution que l'on peut trouver dans Rey (3), on établit que :

- les distances entre points moyens sont suffisamment importantes pour qu'il n'y ait pas de recouvrement dans l'espace vectoriel : chaque source a son caractère propre,
- les angles entre vecteurs reliant l'origine du système à chacun des centres de gravité sont proches de 90° montrant ainsi une certaine indépendance des caractéristiques moyennes des sources,
- la variabilité intrasource et les coefficients de variation des sources des Mourtès et de Gourgouch sont nettement inférieurs à celle de Orbe et Ourtau montrant, de ce fait, une plus grande stabilité des valeurs des paramètres physico-chimiques,
- il suffit de deux facteurs pour distinguer les sources à faciès bicarbonaté calcique magnésien (Ourtau et Gourgouch, 1^{er} chaînon) des sources à faciès simplement bicarbonaté (Mourtès 2^{ème} chaînon et Orbe 3^{ème} chaînon),
- le caractère séléniteux à composante saisonnière des sources est traduit par l'axe F₅,
- la variabilité des conductivités et leurs distributions unimodales ou plurimodales (non rappelées ici) conduisent à identifier les aquifères dont le fonctionnement est de type fissuré (Mourtès et Gourgouch) ou karstique (Ourtau et Orbe). Ces deux dernières sources présentent de ce fait une vulnérabilité qui sera étudiée au paragraphe suivant.

En conclusion, deux faciès chimiques majeurs, l'un bicarbonaté calcique à la Fontaine d'Orbe (3ème chaînon) et à Mourtès (2ème chaînon) et l'autre bicarbonaté calcique magnésien à Ourtau et Gourgouch (1er chaînon), sont mis en évidence ; les concentrations en magnésium sont dues à la présence de dolomies du Bathonien-Oxfordien qui constituent en grande partie les bassins d'alimentation, particulièrement dans le cas des premier et second chaînons. Ce résultat a été complété par l'étude de la relation entre les teneurs en ions magnésium et calcium (Mg²⁺ et Ca²⁺) qui montre une quasi indépendance des teneurs pour les sources de La Fontaine d'Orbe et des Mourtès et une corrélation positive et significative pour les deux autres sources. La structuration géologique des chaînons béarnais permet de prévoir que le faciès de l'eau des sources y sera de l'un ou l'autre des deux faciès : bicarbonaté calcique pour les réservoirs urgoniens et liasiques et bicarbonaté calcique magnésien pour les réservoirs jurassiques. Par ailleurs, deux types de fonctionnement hydrodynamique sont à distinguer parmi les quatre systèmes étudiés. Le premier correspond à un comportement karstique (sources de la Fontaine d'Orbe et de l'Ourtau) avec les plus fortes variations annuelles de la minéralisation et de la température. Le second, de type carbonaté fissuré (Mourtès et Gourgouch), montre à l'inverse des valeurs très stables quelle que soit la période hydrologique. Cette conclusion est corroborée par l'étude des variations des teneurs en $\delta^{13}\text{C}$ mesurées au cours de périodes hydrologiques distinctes et par celle des équilibres calcocarboniques (3) En effet, à l'étiage, les eaux des quatre sources présentent un $\delta^{13}\text{C}$ identique avoisinant - 13 ‰ (à $\pm 0,2$), par contre, suite à de forts cumuls de précipitation les teneurs en $\delta^{13}\text{C}$ baissent de 1 ‰ aux sources karstiques et augmentent de 1 ‰ aux sources issues d'aquifères fissurés dans le même temps. De plus la relation linéaire $\text{LogpCO}_2/\text{ISc}$ montre des coefficients de régression distincts selon l'origine de la source : -0,8 pour une origine karstique et 1 pour les sources issues d'un aquifère fissuré.

L'ensemble de ces résultats converge et conduit à la proposition selon laquelle il existe deux types de fonctionnement hydrodynamique dans les chaînons béarnais : l'un de type fissuré et l'autre karstique. Les systèmes de la Fontaine d'Orbe et de l'Ourtau, bien qu'étant tous deux karstiques et particulièrement vulnérables, ne réagissent cependant pas de la même manière à un événement pluvieux : ceci est décrit dans le paragraphe suivant.

III.2. Vulnérabilité des sources de la Fontaine d'Orbe et de l'Ourtau

Lors d'un événement pluvieux, les réactions des deux sources diffèrent (Figure 4) : dans le cas de la Fontaine d'Orbe, la minéralisation augmente (ou diminue selon l'antécédent hydrologique) et est associée à une baisse de la température (non représentée ici) alors que dans le cas de l'Ourtau, on observe une diminution systématique de la conductivité et de la température (3). Ces variations sont accompagnées d'une augmentation quasi systématique de la turbidité. Rey (3) s'est inspiré des travaux de Valdès (4) et Williams (5) pour étudier les relations entre la turbidité et la conductivité et analyser les processus régissant le transport du matériel particulaire au sein des aquifères. Les réponses de la source de l'Ourtau sont caractéristiques d'un aquifère karstique aux drains bien développés avec une infiltration des eaux météoriques facilitée par de nombreuses fractures et formes d'érosion karstiques. En revanche les types de réponse de la Fontaine d'Orbe traduisent des processus complexes avec stockage dans des conduits karstiques de la zone non saturée et annexes au système de drainage principal ; de plus ces réponses semblent dépendre de l'antécédent hydrologique. Dans tous les cas, ces deux sources et celles qui pourraient leur être apparentées sont sensibles aux conditions environnementales et aux conditions climatique et météorologique.

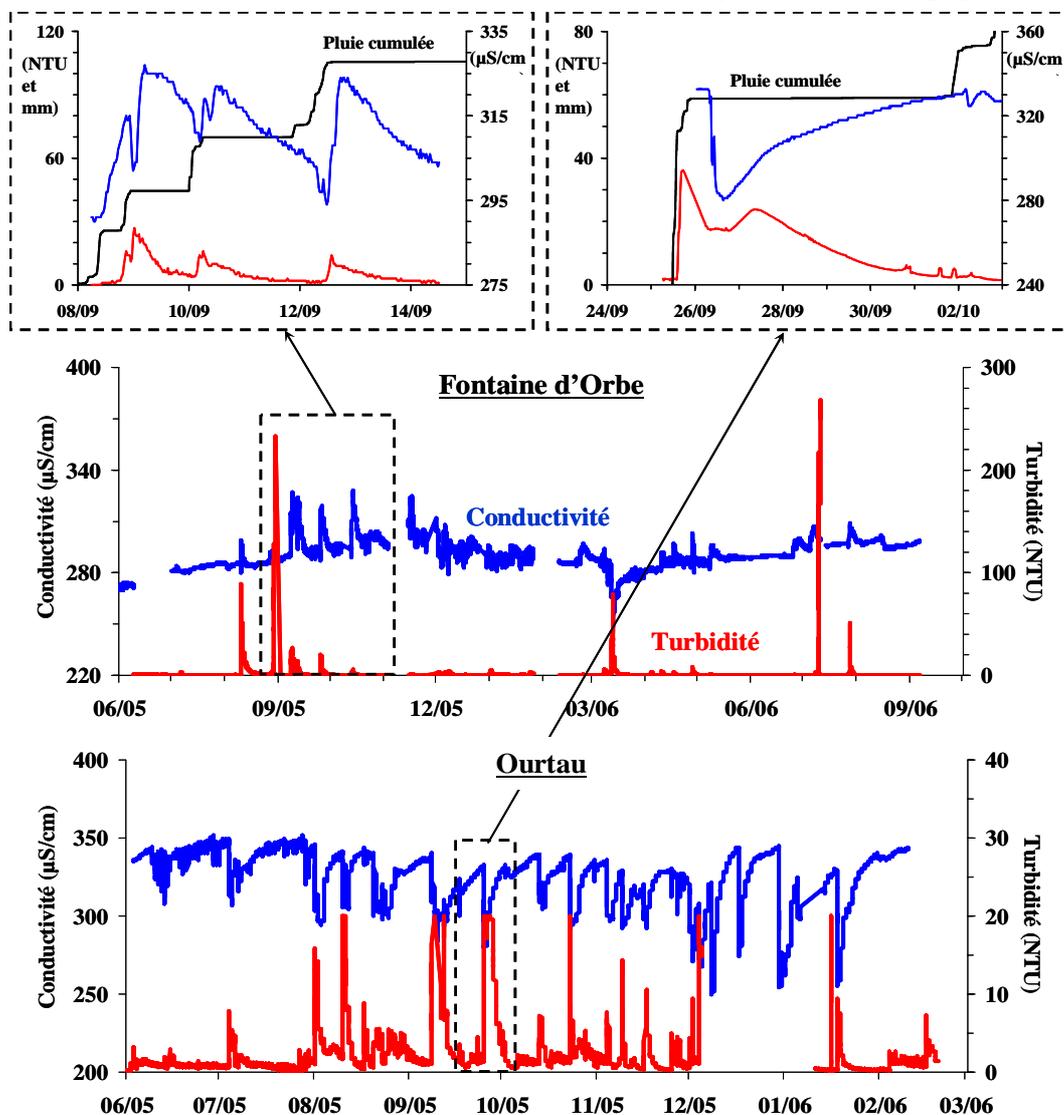


Figure 4 : Evolution de la conductivité et de la turbidité aux sources de la Fontaine d'Orbe et de l'Ourtau (en haut, détail de deux épisodes)

Contexte climatique

Le contexte climatique des chaînons béarnais (pluviométrie, température, évapotranspiration) a été étudié en détail par Rey (3), les grands traits climatologiques de la région seront donc présentés ici en s'appuyant sur la seule station d'Oloron-Sainte-Marie (station n°64422004 de Météo-France, 43°10'12"N, 0°35'24"W, 235 m d'altitude) située au nord des chaînons et au confluent des deux gaves les traversant : les gaves d'Aspe et d'Ossau. La série chronologique dont nous disposons commence au mois de février 1964 et se termine au mois de décembre 2007 ; on présente ci-dessous une analyse des chroniques annuelles et mensuelles.

Les précipitations annuelles fluctuent (Figure 5) sans toutefois montrer de tendance significative ; les plus faibles d'entre elles datent de plus d'une vingtaine d'année (Figure 6). Les précipitations mensuelles (Figure 7) sont, elles aussi, très variables avec des coefficients de variation tous supérieurs à 40%. Cette forte variabilité est principalement due à des valeurs maximales extrêmes qui, à l'exception de celles du mois d'août 2007, sont toutes antérieures à la décennie écoulée : ceci est particulièrement net pour les mois de janvier (350 mm en 1986), mai (318 mm en 1980), octobre (317 mm en 1992) et, dans une moindre mesure, pour les mois de juin et décembre. L'analyse détaillée mois par mois ne montre de tendance significative ni à l'augmentation ni à la diminution que ce soit au cours de la totalité de la période [1964-2007] ou au cours des seules dix dernières années. Les distributions des précipitations cumulées se répartissent à l'intérieur d'un fuseau dessiné par les mois de juillet (mois les plus secs) et d'avril (mois les plus pluvieux) à l'instar de celle du mois de mars reportée sur la Figure 8. Le fuseau va en s'étalant des faibles valeurs aux fortes valeurs marquant ainsi nettement l'étalement des fortes valeurs extrêmes. En conclusion, la distribution des pluies au cours des quarante quatre dernières années à Oloron-Sainte-Marie ne montre aucune tendance particulière à caractère statistique avéré ni à l'échelle annuelle, ni mois par mois, il n'y pleut en particulier pas moins ; il y pleuvrait peut-être un peu plus si l'on se référait de façon simpliste à la pente de la droite de régression ($b_{y,x} = 1,5$ mm/an calculé à partir des années civiles et 1,8 mm/an pour les années hydrologiques).

L'analyse de la température au cours de la même période (Figure 9) montre que celles des années récentes se situent principalement dans le troisième quart de la courbe des fréquences cumulées (années 2000, 2002, 2003, 2004, et 2006) ; l'année 2007 montre, par contre, une température inférieure ($13^{\circ}1$) à la moyenne ($13^{\circ}3$). La tendance à l'augmentation des températures moyennes annuelles est manifeste et cela d'autant plus que l'analyse est limitée à la période [1974-2007]. Pour cette période l'accroissement estimé par le coefficient de régression linéaire serait de $1^{\circ}15$ alors que, estimé sur la totalité de la période, il serait de $1^{\circ}05$ en 43 ans. Rey (3) a montré que cette élévation des températures est due à celle de certains mois de l'année. Ces mois sont, tenant compte de l'année 2007, les mois de mars, avril, mai, juin et octobre pour lesquels les élévations de température toujours estimées par le coefficient de régression seraient de 0,06, 0,05, 0,09, 0,06 et 0,08°/an pour la période 1974-2007. Il faut noter que les mois de mars, mai, juin, et octobre restent marqués par un accroissement moindre mais significatif lorsque la période est élargie à l'intervalle 1964-2007. Il ne sera pas question d'évapotranspiration dans cet article mais il est apparaît que les mois pour lesquels les températures moyennes mensuelles augmentent sont ceux pour lesquels la demande biologique en eau est forte, ce qui contribue donc à une moins grande disponibilité pour la recharge des nappes. Ces observations encore fragmentaires tant en raison de la durée de la série de données que par le type d'analyse en corroborent d'autres établies par ailleurs, par exemple à l'échelle régionale par l'analyse des données de la station de Bordeaux Mérignac (6) ou de façon plus globale (7).

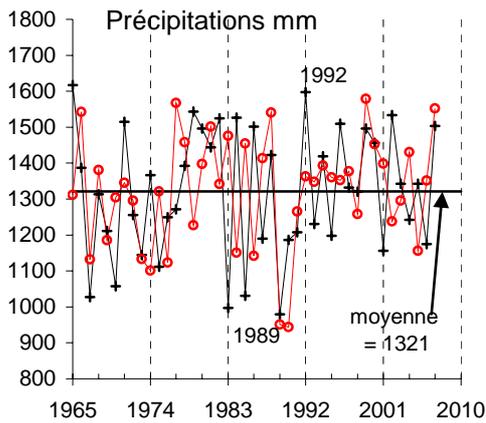


Figure 5 : Hauteurs pluviométriques annuelles (années hydrologiques : cercles rouges et, civiles : croix noires) à Oloron-Sainte-Marie

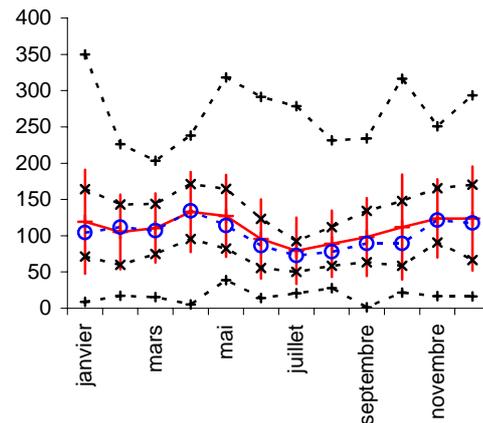


Figure 7 : Valeurs maximales, 3^{èmes} quartiles, moyennes et médianes, 1^{ers} quartiles et minimales des hauteurs pluviométriques mensuelles (barres rouges verticales = moyennes +/- un écart type)

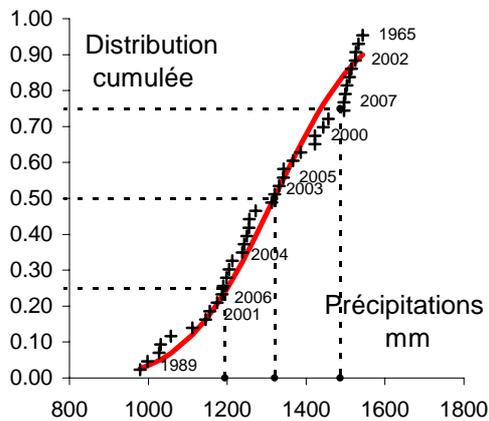


Figure 6 : Distribution des fréquences cumulées des hauteurs pluviométriques annuelles (par année civile) et loi normale

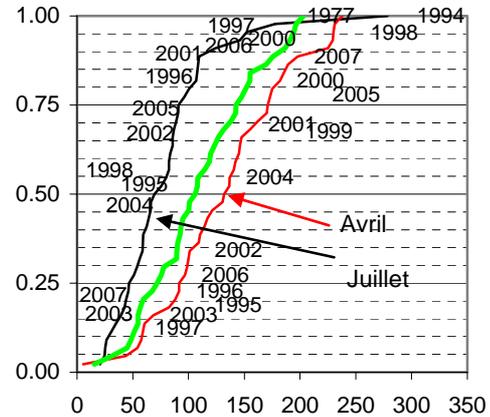


Figure 8 : Fuseau des précipitations mensuelles au cours de 44 dernières années (distributions cumulées). La courbe intermédiaire est celle du mois de mars

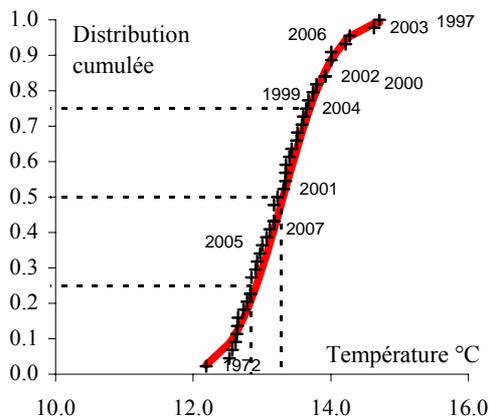


Figure 9 : Distribution cumulée des températures moyennes mensuelles à Oloron-Sainte-Marie et loi normale

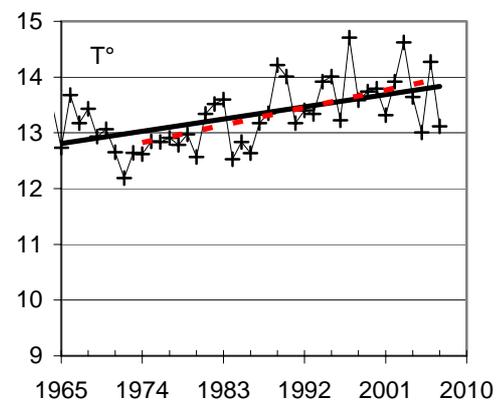


Figure 10 : Températures moyennes annuelles depuis l'année 1964 à Oloron-Sainte-Marie

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Un corpus important de données a été constitué contribuant à la connaissance des aquifères carbonatés des chaînons béarnais tant du point de vue de la définition de leur géométrie et de leur aire d'alimentation que de la compréhension de leur fonctionnement hydrodynamique, essentielle à leur bonne gestion. L'interprétation de ce corpus de données et les modèles conceptuels qui en ont découlé ont permis à Rey (3) de proposer un modèle pour l'étude des ressources en eau souterraine dans la région des chaînons béarnais ce qui devrait permettre de répondre aux exigences émises dans la Directive Cadre Européenne 2000/60/CE.

Une caractérisation complète de la richesse et de la vulnérabilité des sources des chaînons béarnais devrait donc être envisagée à court terme afin d'établir des bilans hydrologiques quantitatifs précis ce qui demande à ce que des débits puissent être précisément mesurés. Les préoccupations d'ordre sociétal exigent par ailleurs que la cartographie de la vulnérabilité de ces sources soit réalisée et mise à disposition du public. Enfin, il semble utile de se donner les moyens d'améliorer la connaissance des temps de séjour dans les systèmes hydrogéologiques en se fondant sur l'analyse des couples isotopiques ^3H - ^3He (pour les systèmes de type fissuré) et ^{18}O - ^2H (pour les systèmes karstiques). Il sera alors possible d'estimer l'évolution de la ressource en fonction de scénarii climatiques élaborés en relation avec l'évolution climatique à plus ou moins long terme dont on a vu que l'évolution des températures était manifeste.

Remerciements

Les auteurs remercient le Conseil Régional d'Aquitaine, le Conseil Général des Pyrénées Atlantiques, et l'Agence de l'eau Adour Garonne et l'ANRT (convention CIFRE) pour le soutien qu'ils ont apporté à ce projet

Références bibliographiques

- (1) **Berteaud P.** (2005) - Les eaux souterraines, un patrimoine essentiel, dans l'eau souterraine, Géosciences, n°3.
- (2) **EauFrance site** http://www.eaufrance/docs/dce2004/R_DCE_2_2_0.htm
- (3) **Rey F.** (2007) - Ressources en eau souterraines dans les chaînons béarnais (Pyrénées-Atlantiques). Géométrie, et fonctionnement hydrogéologique de quatre aquifères carbonatés. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1. <http://tel.archives-ouvertes.fr/>
- (4) **Valdès D., Dupont JP, Massei N., Laignel B., Rodet J.** (2006) - Investigation of karst hydrodynamics and organization using autocorrelation and T- Δ C curves. Journal of Hydrology, 329, 432-443.
- (5) **Williams G.P.** (1989) - Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in river. Journal of Hydrology, 111.
- (6) **Riss J., Malaurent Ph.** (2008) - Evolution des températures et des précipitations à Mérignac depuis les années 1920. L'écho des Faluns, n°22-23, 26-28.
- (7) **IFEN** (2005) - Les indices du réchauffement climatique. Les données de l'environnement, 102,1-4.

Fonctionnement du système karstique du Val d'Orléans : les acquis, les interrogations

François Lelong ⁽¹⁾, Nevila Jozja ⁽²⁾

⁽¹⁾ Professeur honoraire – 179 rue Hème 45160 Olivet - fclelong@wanadoo.fr

⁽²⁾ Environnement, Traçage et Détection – Polytech'Orléans – 8 rue Léonard de Vinci – 45072 Orléans cedex 2 – nevila.jozja@univ-orleans.fr

INTRODUCTION

Ce système étudié depuis longtemps (12 ; 13) est défini par l'ensemble hydrogéologique interactif suivant :

- un tronçon de la Loire et le cours du Loiret ;
- la nappe d'eau souterraine des alluvions de la Loire, dont le lit majeur est fortement élargi à l'amont d'Orléans ;
- l'aquifère des calcaires de Beauce, sous-jacent aux alluvions, en contact direct avec celles-ci dans la partie aval, et séparé des alluvions par les sables et argiles semi-perméables de la formation de Sologne (Burdigalien) dans la partie amont.

Les limites géographiques de ce Val sont claires (figure 1) : le tronçon de plaine alluviale concerné s'étend, sur une longueur de 40 km et une largeur de 4 à 7 km, de la confluence Loire-Loiret, à l'ouest, jusqu'à Sully/Loire, où la plaine alluviale se rétrécit fortement, à l'est. Mais la délimitation du système hydrogéologique est encore sujet de discussion et peut différer selon les auteurs.

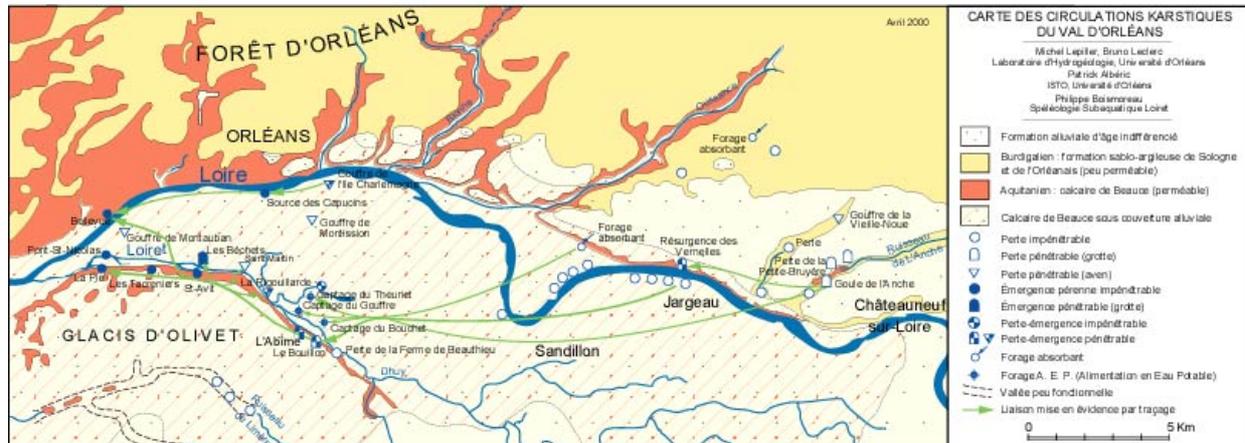


Figure 1. Caractéristiques hydrogéologiques du Val d'Orléans.

Certains limitent le système à tout ou partie de la plaine alluviale ; celle-ci est bordée au nord par le rebord du bas plateau des calcaires de Beauce et au sud par le glacis d'Olivet (vieilles terrasses alluviales) et le coteau de Sologne (formation semi-perméable burdigalienne). Cette délimitation, donnant au système une surface de 140 km², a été utilisée en 1979 par C.Zunino pour bâtir un modèle mathématique de simulation des écoulements souterrains.

J.L. Chéry (4) et E. Livrozet (11) ont étendu le système vers le sud pour y intégrer les apports souterrains du glacis d'Olivet et du coteau de Sologne jusqu'à la crête piézométrique présumée de la nappe phréatique. La limite nord, traité par Zunino (14) comme limite à potentiel imposé par la Loire reste la même. La surface du système atteint alors 400 km².

D'autres auteurs ont pris en compte les flux d'eau qui s'engouffrent rive droite au nord de la Loire (dans le ru de Lanche notamment) et resurgissent au sud-ouest (9 ;12), ce qui augmente encore la surface du système.

La définition plus administrative utilisée par la SAGE « Loiret » prend en compte seulement la rive gauche du Val de Loire mais englobe au sud une large part des communes riveraines. La surface du SAGE, est estimée à 280 Km².

Le principal phénomène à l'origine de ces définitions est l'existence dans le Val de pertes massives de débit de la Loire entre Châteauneuf /Loire et Chécy, sur une vingtaine de kilomètres du cours de ce fleuve : pertes diffuses dans le lit à travers les alluvions récentes ; pertes localisées dans de nombreux gouffres creusés dans le substrat calcaire de ces alluvions, notamment au droit de Jargeau et de Sandillon (*photo*). A ces pertes correspondent des résurgences, elles aussi diffuses ou ponctuelles (gouffres émissifs), tout le long du Loiret, produisant l'essentiel de son débit, et aussi en Loire, à l'aval d'Orléans. Un certain nombre de ces gouffres ont été explorés par les spéléologues, notamment le source du Bouillon, à l'origine du Loiret et la source de l'Abime : le film « Loiret souterrain » réalisé par P. Boimoreau témoigne de la profonde extension des conduits karstiques et du gigantisme de certaines cavités.

Chercher à connaître le fonctionnement de ce système permet de mieux répondre à diverses questions soulevant de forts enjeux : quels débits y transitent, quelle en est la ressource renouvelable, quelles réserves y sont stockées, quelles sont les caractéristiques qualitatives des eaux et leur vulnérabilité aux pollutions, à quels usages peut-il répondre pour les collectivités concernées (la population des communes du SAGE est voisine de 100.000 habitants, mais exclut Orléans dont les principaux captages d'alimentation en eau potable sont pourtant situés sur le territoire du SAGE), quels modes de gestion doit-on envisager pour optimiser l'exploitation durable de cette ressource ? On comprend que les réponses ne sont pas les mêmes selon la définition du système adoptée, en fonction des limites et des conditions hydrauliques aux limites fixées.

Le texte suivant vise à rappeler les principales conclusions des études dont on dispose, en soulignant les convergences des diverses approches et en cherchant à préciser les points encore incertains pouvant faire l'objet de débats et de recherches. Il importe de parvenir à un constat consensuel, de façon à faciliter la gestion collective de la ressource. Pour cela le tableau suivant (tableau 1) résume les bilans hydrologiques publiés, en précisant le cadre spatial et temporel et chaque fois que possible les conditions climatiques ou hydrologiques.

I. ESQUISSES DE BILANS HYDROLOGIQUES

Ces bilans sont établis à partir de l'équation générale suivante :

Entrées annuelles = sorties annuelles + ou - variations de stocks du système.

Les entrées dans le système hydrologique sont : P_e = pluies efficaces, Q_c = apports du coteau de Sologne, P_l = pertes de la Loire.

Les sorties sont : Ex = volumes prélevés pour les différents usages, Q_l = volume écoulé à l'embouchure du Loiret, R_l = résurgences en Loire à l'aval d'Orléans.

Les variations de stocks correspondent aux fluctuations saisonnières du niveau piézométrique de la nappe alluviale. On sait que l'amplitude annuelle de ces fluctuations est réduite (1 à 2 m au maximum) : ce terme représente, sur un cycle hydrologique, 20 à 40 millions de m³ par an (pour une surface de 200 km² et une porosité utile de 10 %). En considérant des cycles hydrologiques calés sur les fins d'étiage, ce terme est négligeable au regard des autres.

Tableau 1 : Bilans hydrologiques annuels du système du Val d'Orléans (en millions de m³)

Auteur	Conditions	Pe	Qc	Pl	=	Ex	Ql	Rl
Chéry 1983(a)	année humide	74	-	281	=	40	315	-
Livrozet 1984(b)	année humide	106	-	317	=	45	378	-
Gonzalès 1991(c)	année moyenne	(60)	-	(515)	=	(40)	(315)	220
Géohyd 2004(d)	année moyenne	18	-	449	=	10	315	142
Lepiller 2006(e)	année moyenne	27	-	453	=	35	170	275
Cette étude(f)	année moyenne	60	5	485	=	50	200	300

(a) système de 400 km², pluies efficaces Pe de 180 mm au lieu de 150 mm/an en moyenne ;

(b) système de 400 km², pluies très exédentaires (Pe = 265 mm/an) ;

(c) système de 400 km², chiffres entre parenthèses tirés des précédents, recalculés en année moyenne, en tenant compte des résurgences en Loire évaluées par cet auteur ;

(d) système de 140 km², étude préalable à l'établissement du SAGE ; pluies efficaces de 130 mm dont 30 mm ruissellent et 100 mm alimentent le système.

(e) système de 460 km², pluies efficaces de 100 mm, dont 40 ruissellent et 60 mm s'infiltrent.

(f) système de 400 km², année de pluviosité moyenne (150 mm/an); le débit souterrain venant du coteau de Sologne est estimé par la loi de Darcy avec les données suivantes : transmissivité = 0,01 m²/s, gradient hydraulique = 0,05 %, largeur du front de nappe 40 km.

Les chiffres de pertes annuelles de la Loire apparaissant en italiques sont déduits de la somme arithmétique des autres termes. Il s'agit de valeurs évaluées « à la louche » étant donné la très forte incertitude sur ces termes. De plus le débit moyen instantané des sorties par le Loiret, qui représente selon ces chiffres environ 10 m³/seconde, peut varier selon les années du simple au double; l'incertitude sur les débits de résurgence en Loire, pour lesquels on ne dispose pas de mesure, est encore plus grande. On voit que la mise en évidence d'importants débits de résurgence à l'aval d'Orléans (sources de Bellevue, à La Chapelle St Mesmin notamment) et provenant en partie (7) du système du Val d'Orléans conduit à beaucoup majorer l'importance des pertes de Loire. Celles-ci varieraient donc en valeurs moyennes entre 8 m³/seconde et 16 m³/seconde. Le volume des entrées latérales dans le système venant de la Loire représenterait ainsi 5 à 10 fois celui des entrées verticales, par les précipitations. L'abondance de la ressource renouvelable est donc exceptionnelle.

Ces fortes valeurs de pertes de Loire sont-elles plausibles ? Le Service Hydrologique Centralisateur du bassin de la Loire a cherché à évaluer ces pertes en comparant les débits écoulés par décades à Châteauneuf/Loire et à Jargeau dans la période 1975-1977. La différence positive entre l'amont et l'aval, indicatrice de ces pertes, serait plus ou moins proportionnelle au débit de Loire :

- pour un débit de 200 m³/s, un peu inférieur au module d'écoulement, les pertes seraient dans le fourchette 5 à 9 m³/s :

- pour un débit trois fois supérieur au module, elles seraient dans la fourchette 37 à 155 m³/s.

D'après Desprez, les pertes cumulées entre Châteauneuf et Combleux pourraient être de 20 à 25 m³/s en basses eaux et atteindre 75 m³/s en crues. Ces valeurs sont estimées par défaut car de petits affluents existent rive droite (Oussance, Bionne) entre ces deux sites, et avec une marge d'erreur très forte car l'incertitude sur chacun des termes s'ajoute.

Soulignons la très forte valeur du rapport (débit de transit annuel) / (volume de stockage) du système. Sachant que la capacité d'emmagasinement dans le réseau karstique des calcaires sous-jacents aux alluvions est très limitée, ce volume correspond essentiellement au dénoyage de la nappe phréatique contenue dans les alluvions, soit 20 à 40 millions de m³ par an, d'après l'évaluation indiquée ci-dessus. Cela signifie, en termes hydrogéologiques, un temps de séjour moyen de l'eau relativement très court dans le système, de l'ordre de 1 à 2 mois, et un temps plus court encore dans les drains.

II. REGIME HYDRODYNAMIQUE

Deux approches ont été tentées : la première par modélisation mathématique, à partir d'un modèle d'écoulement déterministe, en régime d'écoulement permanent correspondant à un débit d'étiage ($45 \text{ m}^3/\text{s}$). La surface du Val ainsi modélisée représente 140 km^2 du Val ; le système est considéré comme un aquifère unique à double couche à l'aval de Châteauneuf/Loire où ont lieu les pertes, et à l'amont, comme deux aquifères séparés par une couche semi-perméable ($K \text{ Darcy} = 10^{-5} \text{ m/s}$) permettant la circulation de débits verticaux. L'espace est découpé en mailles de 635 m de côté. Le meilleur ajustement entre la piézométrie mesurée et calculée est obtenu après 18 phases de calage, en introduisant dans le champ spatial des transmissivités de l'aquifère calcaire des drains extrêmement transmissifs, simulant les chenaux karstiques (figure 2). Les valeurs de transmissivité, hors chenaux, varient de $0,01$ à $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ dans la partie aval où l'aquifère des calcaires est en contact direct avec les alluvions, elles sont 10 à 100 fois plus faibles dans la partie amont où cet aquifère est captif. Le débit du Loiret pour le meilleur calage est $0,31 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui pourrait indiquer le très rapide tarissement des volumes stockés dans les alluvions.

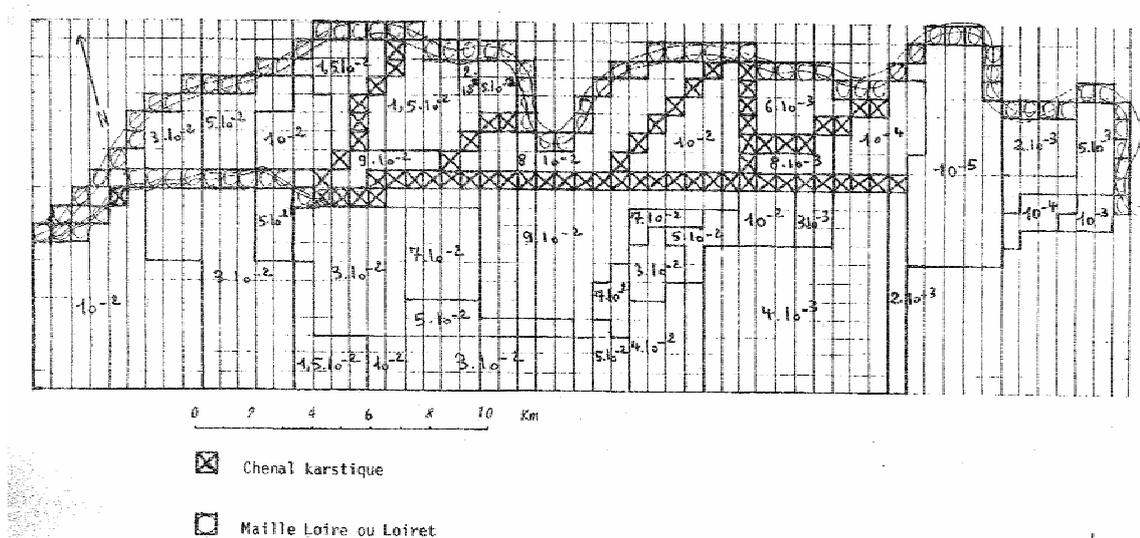


Figure 2. Distribution spatiale des transmissivités de l'aquifère calcaire du Val d'Orléans

L'autre approche poursuivie depuis longtemps (2 ; 9 ; 12) consiste en des traçages, avec des colorants injectés en divers points de pertes, dont l'éventuelle restitution est suivie aux points de résurgence supposés. Cela permet de préciser les limites du système, de caractériser les vitesses d'écoulement le long des drains majeurs, et éventuellement les phénomènes de dispersion dans le flot écoulé.

Les traçages réalisés entre les pertes de Jargeau et les exutoires du système du Val d'Orléans ont permis d'observer des vitesses moyennes de transit assez fortes. Ces vitesses sont peu dépendantes du débit du fleuve. Un accroissement de la vitesse apparente entre l'amont de la zone d'exhaure a été ainsi observé (vitesse apparente, jusqu'à la source du Bouillon: 100 à 140 m/h) et l'aval (vitesse apparente, jusqu'à la source de la Pie : 200 m/h environ). Il existe une liaison souterraine directe sous la Loire entre des gouffres absorbants rive droite (pertes de Lanche et du ru de Chenailles, près de Châteauneuf/Loire) et les sources du Loiret. La contribution de ces pertes à l'alimentation du système a été confirmée à trois reprises. Les

traçages réalisés ont montré des vitesses apparentes différentes selon les conditions hydrologiques (68m/h en basses eaux et 142 m/h à hautes eaux) (9).

Divers traçages réalisés à partir de gouffres absorbants (pertes de Jargeau et plan d'eau de l'île Charlemagne) ont donné des restitutions à la source de Bellevue à La Chapelle-Saint-Mesmin (vitesse apparente 79 m/h). Ceci indique l'existence, le long de la Loire, de drains karstiques importants distincts de ceux du Loiret.

Les taux de restitution des traceurs sont généralement très faibles, de l'ordre de 1 % ou moins encore, indice que les masses de colorants injectées sont fortement diluées (apports venant de la nappe alluviale ou, plus probablement, de drains latéraux convergents vers l'émergence) ou encore que la masse d'eau colorée subit des phénomènes de diffifluence (9).

Des traçages ont été également opérés à l'aide de traceurs microbiologiques (3), en injectant des germes bactériens dans les pertes de Jargeau. Ces traceurs migrent de la même manière que les traceurs colorés jusqu'à la source du Bouillon et se retrouvent, quoi qu'en concentration moindre et avec un délai plus long, dans les captages d'eau potable de la Ville d'Orléans, situés à l'écart (à 500 m) du drain karstique.

Le schéma physique décrivant le système peut être représenté par une couche perméable en petit (les alluvions), superposée directement ou non à l'aquifère discontinu des calcaires de Beauce, comportant un réseau de drains plus ou moins anastomosés. La figure 3 représente, dans la partie du Val où l'écran semi-perméable entre les deux couches est absent, la trace des drains principaux, principalement entre Jargeau, la source du Bouillon et les diverses sources échelonnées le long du Loiret d'une part, et entre Sandillon et ces sources d'autre part. On remarque aussi l'existence d'un drain majeur le long de la Loire débouchant vers les émergences de La Chapelle St Mesmin et, sans doute, d'un drain entre les pertes du ru de Limère et l'aval du système.

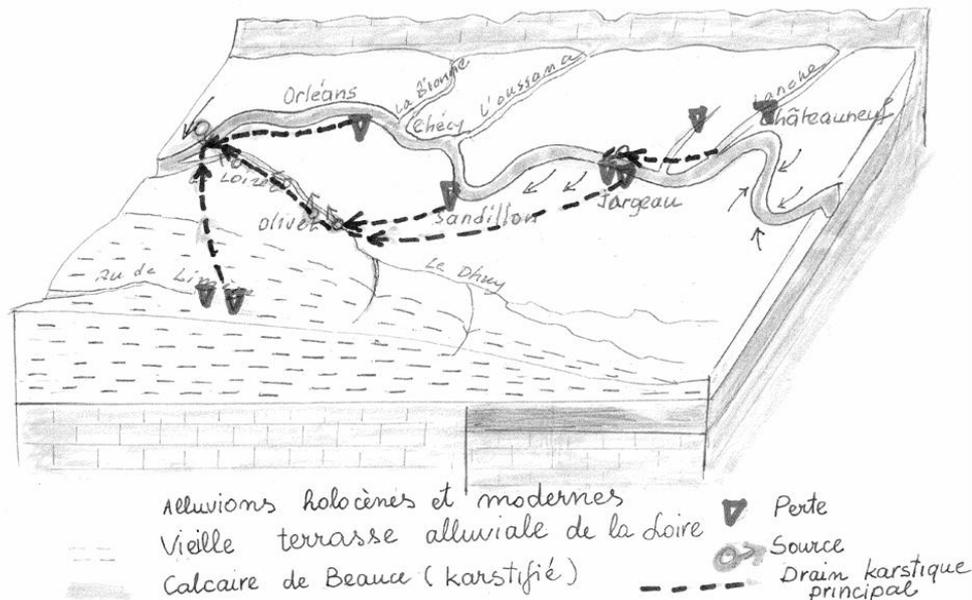


Figure 3. Schéma des circulations karstiques dans le Val d'Orléans

Cette figure esquisse le sens des échanges entre les écoulements de surface et les écoulements souterrains: on voit que la nappe souterraine alimente la Loire (hors crue de celle-ci) à

l'amont du système, que la Loire alimente ensuite l'aquifère entre Jargeau et la boucle de Bou (secteur de Chécy), à l'aval de laquelle les relations entre la Loire et la piézométrie du système aquifère sont complexes, certains regards pouvant tour à tour fonctionner en perte ou en émergences, comme du reste le long du cours du Loiret (1; 9).

La relation entre la cote piézométrique du système aquifère et celle de la ligne d'eau de la Loire varie dans le temps et dans l'espace : au droit d'Orléans, ces cotes fluctuent de façon synchrone, avec la Loire en charge vis-à-vis de la cote de la source du Bouillon, en période de hautes eaux et inversement en période de l'étiage (figure 4). Dans la zone des pertes vers l'amont, la ligne d'eau de la Loire est 4 à 6 m plus haute et le fleuve reste toute l'année en charge sur le système aquifère. Le niveau piézométrique de l'aquifère calcaire et celui de la nappe alluviale sont proches: selon Desprez, l'aquifère calcaire semble généralement un peu en charge vis à vis de la nappe alluviale ; selon Lepiller (9), des mesures à l'aval d'Orléans montrent une cote piézométrique de la nappe alluviale égale ou un peu supérieure à celle de l'aquifère calcaire. On sait que dans les aquifères discontinus, les mesures piézométriques sont délicates à interpréter, car il existe de brusques écarts de niveau dans l'espace et dans le temps, avec de possibles inversions de sens de courant.

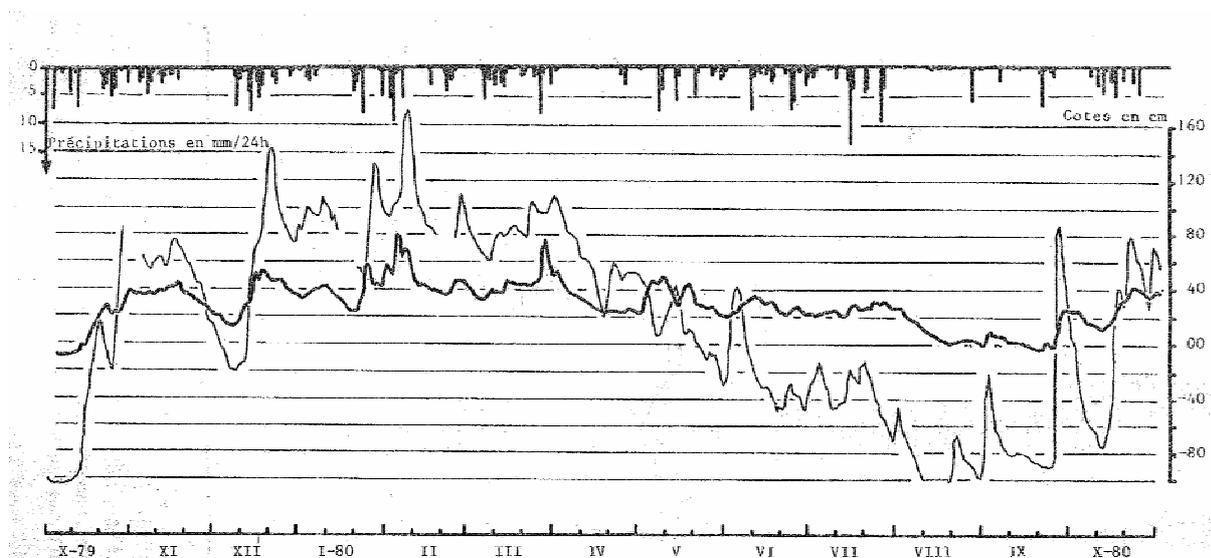


Figure 4 : Cotes de la Loire à Orléans (----) et la source du Bouillon (----) lors du cycle hydrologique 1979-80.

III. MANIFESTATIONS PHYSICO-CHIMIQUES ET MICROBIOLOGIQUES

Les phénomènes physico-chimiques principaux existant lors du transit des eaux de la Loire jusqu'à la source du Bouillon dans le système karstique sont d'après Chéry (4) :

- forte diminution de l'amplitude thermique maximale (16° pour la source du Bouillon contre 24° pour la Loire) ;
- majoration sensible de l'alcalinité et de la teneur en calcium ;
- faible augmentation de l'azote sous forme de nitrate (gain de 1 à 2 mg/l N) ;
- et surtout chute de l'oxygène dissous (3,4 mg/l en moyenne contre 11 mg/l en Loire).

Les mêmes tendances se retrouvent dans l'eau des diverses sources du Loiret, avec une augmentation plus nette des teneurs (nitrate, alcalinité, calcium) pour les sources plus lointaines.

La courbe de distribution de fréquence des valeurs des principaux paramètres (Ca, HCO₃) n'est pas beaucoup modifiée pendant le transit ; cela peut s'expliquer par la surface et le temps de contact assez réduits entre l'eau issue de la Loire et l'aquifère calcaire. Les faibles teneurs en nitrate semblent dues au fait que les circulations dans le karst sont généralement en charge par rapport à la nappe d'eau alluviale, qui est bien plus polluée que la Loire.

L'évaluation du flux d'ions Ca et HCO₃ entrants (eaux de la Loire) et sortants (source du Bouillon) a permis de chiffrer la masse de carbonate dissoute annuellement dans le système. D'après Chéry (4), pour un volume d'eau de 336 millions de m³ en transit, le tonnage dissous dans le système karstique serait de 35.450 tonnes, chiffre par défaut, car, aux flux pris en compte par cet auteur, il faut ajouter les flux de pertes résurgant en Loire. Le taux de dissolution spécifique, exprimé en m³ par an et par unité de volume d'aquifère est extrêmement élevé par rapport à ceux des systèmes karstiques connus, même ceux soumis à des précipitations beaucoup plus intenses. L'origine du CO₂ nécessaire pour cette dissolution ne semble pas provenir du sol, mais résulter de phénomènes internes au système karstique (5).

Les travaux de Livrozet (11) ont permis d'éclairer les phénomènes biogéochimiques intervenant pendant le transit des eaux souterraines. Le suivi hebdomadaire de la source du Bouillon et bi-mensuel de la Loire, pendant un cycle hydrologique complet, des paramètres contrôlés par les réactions microbiologiques (pH, teneur en oxygène, formes de l'azote) confirme les tendances décrites par Chéry et met en évidence :

- une baisse de pH de 0,1 à 0,3 unité en saison froide et de 1,5 unité en saison chaude, entre les pertes de Loire et la résurgence ;
- la disparition presque totale des matières en suspensions, abondantes pendant les crues et pendant les périodes d'eutrophisation de la Loire.

Les germes introduits dans le système se retrouvent dans les captages de la Ville d'Orléans, avec des teneurs certes inférieures à celles trouvées en Loire, mais encore bien au-delà des normes sanitaires, et avec parfois des traces de matières organiques non dégradées, pénalisantes pour le traitement de l'eau. Le comptage des bactéries du cycle de l'azote indique la présence de tous les germes de minéralisation et de dénitrification de l'azote, mais les conditions de température ne favorisent pas leur métabolisme.

La biodégradation des matières organiques et notamment du plancton de Loire introduits dans le karst explique la production de CO₂ nécessaire à la dissolution de l'aquifère calcaire. Le bilan de production de ce composé a pu être établi (5). En outre les réactions biogéochimiques ont pu être simulées *in vitro*, en laissant évoluer, à l'obscurité, de l'eau de Loire dans un fermenteur soumis à une température contrôlée (11) : la figure 5 montre que l'évolution au cours du temps des paramètres physico-chimique correspond bien aux résultats obtenus *in vitro* (figure 5).

En conclusion, les eaux souterraines de ce système karstique sont peu minéralisées, proches de la composition de l'eau de la Loire. Mais la forte demande en oxygène, nécessaire à la biodégradation des matières organiques provoque, notamment lors des épisodes d'eutrophisation de la Loire (6) la quasi-anoxie des eaux résurgentes et en conséquence le bas niveau de leur capacité épuratrice.

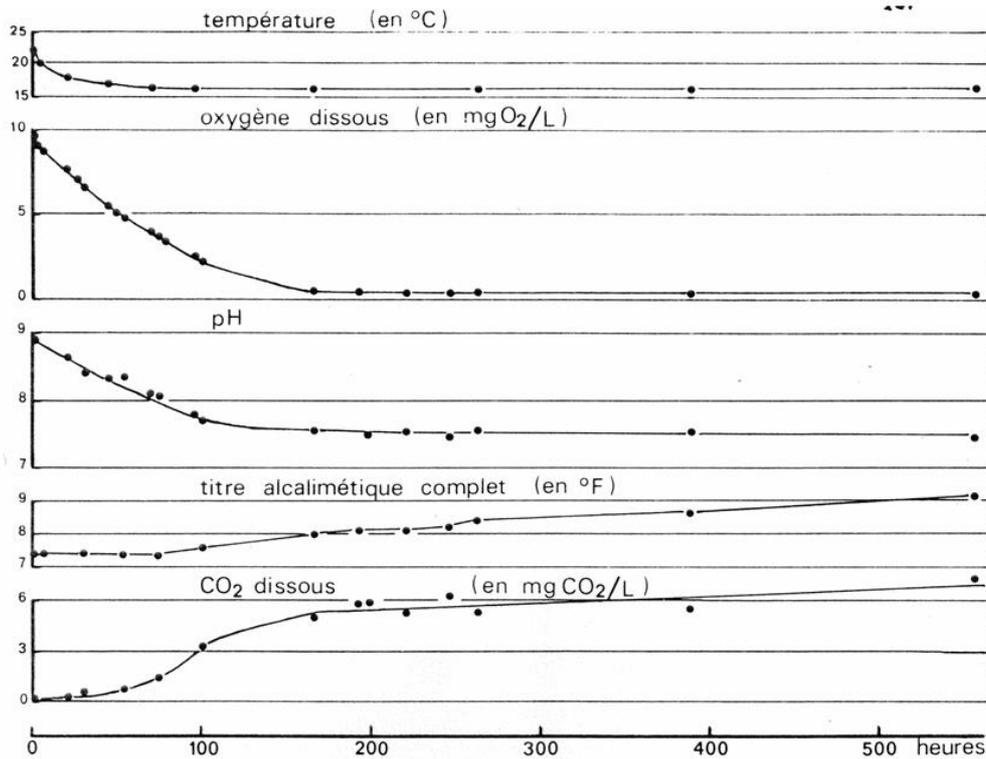


Figure 5. Evolution physico-chimique et chimique des eaux pendant la simulation en période estivale (août 1982).

IV. CONSEQUENCES PRATIQUES - PERSPECTIVES

Aspects quantitatifs

Le potentiel de production de cette ressource karstique, avec une alimentation latérale 5 à 10 fois supérieure aux apports météoriques directs, est remarquable. Cependant ce bilan, apparemment très excédentaire vis-à-vis des besoins actuels ne doit pas faire oublier le tarissement rapide des résurgences lors d'étiages de la Loire. Une augmentation excessive des prélèvements en étiage dans le Val risque d'aggraver la vitesse de tarissement des résurgences et de diminuer le débit du Loiret, avec des conséquences sur l'envasement et la dilution des polluants. Une gestion rigoureuse de cette ressource visant à encadrer les attributions de prélèvement en fonction de la sévérité des étiages sera sans doute nécessaire.

Aspects qualitatifs

Du point de vue qualitatif, le système karstique est très fortement vulnérable, dans sa partie libre où l'aquifère communique directement avec la nappe alluviale. Le poids de la Loire dans son alimentation exige un contrôle continu de la qualité des eaux du fleuve et le recours à une solution immédiate de secours en cas d'accident polluant grave sur le fleuve. En outre, les activités et installations de surface existantes sur le Val (grandes cultures et cultures maraichères, pépinières, serres, industries agro-alimentaires) créent une pression polluante importante. Le pouvoir de filtration et d'épuration de cet aquifère est très faible, voire inexistant : les pollutions chimiques et microbiologiques peuvent s'y propager avec des vitesses très rapides. En outre les émissaires qui drainent la plaine alluviale et débouchent via le Dhuy dans le Loiret près de la source, apportent à ce cours d'eau fragile des masses

importantes de matières en suspension, de fertilisants et de produits phytosanitaire qui provoquent son envasement et entraîne son déclassement écologique.

Les interrogations

Malgré des travaux avancés sur le système karstique du Val d'Orléans, la délimitation précise du système reste mal connue : à l'est vers l'amont du Val et au sud la situation de la crête piézométrique de l'aquifère des calcaires de Beauce.

Un traçage réalisé par Lepiller et Jozja, en novembre 2003 à partir d'un forage agricole à Ouvrouer-les-Champs a confirmé que le drainage karstique s'étendait vers l'est, au moins jusqu'au pied du talus piézométrique résultant du soutien de la nappe des alluvions par le Burdigalien argilo-sableux. Il serait particulièrement indiqué de rechercher l'existence d'une éventuelle karstification sous le Burdigalien, entre ce talus piézométrique et la Loire par la réalisation de traçages à partir de forages au calcaire de Beauce.

Aussi l'hydrométrie des affluents de rive droite de la Loire est mal connue. L'hydrogéologie des systèmes de l'Oussance et de la Bionne, qui comportent plusieurs pertes sur leur bassin versant, ou celui de leurs affluents est à préciser à l'aide de traçages.

Sous le glacis d'Olivet, la question de la contribution des pertes de deux systèmes hydrologiques superficiels issus de la formation de Sologne (les ruisseaux de Limère et de Baule) à l'alimentation du système karstique du Val d'Orléans n'a pu être tranchée malgré la réalisation, en 1981 et 1985, de trois traçages (4, 7). Les traçages des ruisseaux de Limère et de Baule seraient donc à envisager en période de crue avec une surveillance des émergences du Clouseau, de la Pie, de l'Abîme à Mézières-lès-Cléry, des Eaux-Bleues à Cléry-Saint-André et du forage artésien de la Petite Qualité à Dry.

Références bibliographiques

- (1) **Albéric P.**, 2001- L'inversac (perte-émergence) de la résurgence du Bouillon (source du Loiret, France). Sci. Tech. Envir., Mém. H.S. n° 13, p1-4.
- (2) **Albinet M. et Brossier G.**, 1973- Expérience de coloration dans le Val d'Orléans. BRGM SGN 095 AME.
- (3) **Chatelain S. et Livrozet E.** 1982- Impacts de apports de Loire sur la qualité des eaux du système karstique des calcaires de Brauce du Val d'Orléans. II Aspects bactériologiques. Ann. Sci. Univ. Besançon, Mem. N° 1 p. 65-75.
- (4) **Chéry J.L.**, 1983- Etude hydrochimique d'un aquifère karstique alimenté par perte de cours d'eau (la Loire)- Thèse Doct.3° cycle, Univ. Orléans.
- (5) **Chéry J.L., Lelong F. et Lepiller M.** 1982- Impacts des apports de la Loire la qualité des eaux du système karstique des calcaires de Beauce sous le Val d'Orléans. Ann. Sci. Univ. Besançon, Mém. N° 1 p.47 à 63.
- (6) **Crouzet P.**, 1981- L'azote, facteur de pollution et d'eutrophisation. C.R. XXVI° Congr. Nat., Assoc. fr. de Limnologie, juin 1981.
- (7) **Gonzalès R.**1991 – Etude de l'organisation et évaluation des échanges entre le Loire moyenne et l'aquifère des calcaires de Beauce.Thèse Doc. Sci. Terre, Univ. Orléans
Déprez N. (1976- Etude hydrogéologique. Val d'Orléans. BRGM, DGRST 67, A21.
- (8) **Lelong F et Lepiller M.**, 1981- Le système karstique du Val d'Orléans. Esquisse de fonctionnement hydrodynamique. Comm. 26° Coll. Nat. De Limnologie ; Orléans, juin 1981.
- (9) **Lepiller M.** 1996- Guide de l'excursion AIH, 1996, Orléans.
- (10) **Lepiller M.**2006- Aquifères et eaux souterraines de France, Tome 1, III, 6. Val d'Orléans.Edition BRGM, p. 200 à 214.
- (11) **Livrozet E.** 1984- Influence des apports de la Loire sur la qualité bactériologique et chimique de l'aquifère karstique du Val d'Orléans. Thèse Doc.3° cycle, Univ. Orléans.

- (12) **Marboutin F.** 1901 et 1902- Etudes hydrologiques, Mission Val d'Orléans. Commission scientifique de l'Observatoire municipal de Monsouris.
- (13) **Sainjon H.** 1888- La Loire, le Loiret et les courants souterrains du Val d'Orléans.
- (14) **Zunino C.** 1979- Contribution à l'étude hydrogéologique du Val d'Orléans. Etablissement d'un modèle mathématique de simulation de nappe. Thèse Doc. Spéc. Univ. Orléans.

Les trois pertes-émergences (ou inversacs) du domaine de la Source (Loiret)

Patrick Albéric

Université d'Orléans, ISTO-CNRS, ISTE 1A rue de la Férollerie - 45071 Orléans cedex 2,
France – patrick.alberic@univ-orleans.fr

I. INTRODUCTION

Le val d'Orléans combine des caractéristiques fluviales évidentes à un fonctionnement karstique. Les cours d'eau de surface contribuent de manière importante à la recharge de l'aquifère. D'abord, en amont d'Orléans, au contact du lit de la Loire dont les pertes de débit enregistrées à partir de Sully sur Loire (<http://www2.centre.ecologie.gouv.fr/SIEL>) témoignent de l'importance du phénomène. En second, au niveau des petits cours d'eau drainant le val, la forêt d'Orléans ou la Sologne, à leur passage des terrains imperméables aux calcaires. Les principaux points d'émergence d'eau souterraine du système sont eux-mêmes directement influencés par le régime des eaux de surface, soit qu'ils se situent dans le lit même du fleuve (en aval d'Orléans) ou d'autres cours d'eau comme le Dhuy ou le Loiret, soit qu'ils se trouvent temporairement submergés par les écoulements de surface. Ces caractéristiques peuvent entraîner une variabilité importante du système à différentes échelles; à court terme ainsi que de manière saisonnière en fonction de la pluviométrie locale et du régime de la Loire, mais aussi à plus long terme par exemple en fonction de l'évolution de l'enfoncement du lit de la Loire. Dans les systèmes fluvio-karstiques, jugés instables, de petites variations du partage entre écoulement de surface et écoulement souterrain, diffus ou canalisés, sont tenues pour responsables de modifications géomorphologiques importantes et durables (1). Cet article, écrit à l'occasion du colloque tenu à la mémoire de Michel Lepiller, retrace différents travaux récents sur le fonctionnement des sources karstiques situées dans l'enceinte de l'ancien domaine de la Source, et connues comme la (les) source(s) de la rivière Loiret.

Situés dans un territoire profondément modelé par l'homme, les points d'émergence des sources du Loiret et le cours du Loiret lui même ont été à plusieurs reprises aménagés, particulièrement en ce qui concerne la relation entre écoulement de surface et émergence d'eau souterraine. Les documents les plus instructifs à ce sujet sont sans doute l'article rédigé en 1736 par l'abbé de Fontenu et les plans de Beaurain réalisés en 1739 et publiés ensemble dans les Mémoires de l'Académie Royale des Inscriptions et Belles Lettres (2). Le point important concerne l'écartement progressif du cours du Dhuy des points d'émergence karstique donnant naissance au Loiret (Figure 1). Outre l'attrait architectural apporté par ces aménagements, l'isolement des points d'émergence a créé des conditions privilégiées pour le prélèvement et accessoirement l'analyse des eaux résurgentes!

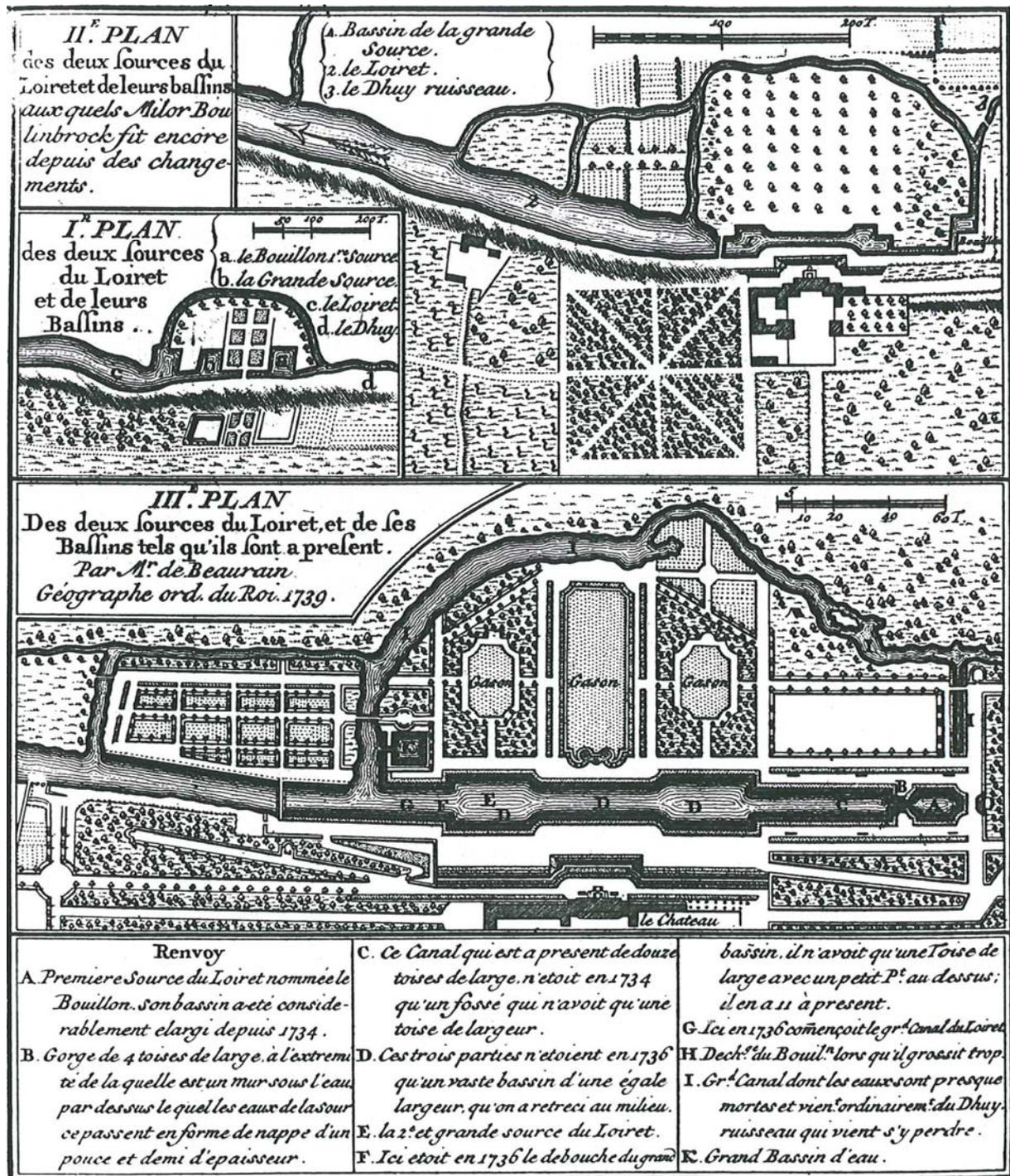


Figure 1: Plans de Beaurain, In Abbé de Fontenu 1736. *Réflexions historiques sur le Loiret. Mémoires de l'Académie Royale des Inscriptions et Belles Lettres, Tome XII, 153-163.*

II. LES TROIS SOURCES DU LOIRET DU DOMAINE DE LA SOURCE

La référence à l'ancien domaine de la Source - devenu aujourd'hui le Parc Floral de la Source et le campus de l'université d'Orléans ainsi que par extension la ville nouvelle d'Orléans la Source - porte l'accent sur l'importance des aménagements successifs apportés au site pour expliquer la disposition actuelle du réseau hydrographique et des sources ainsi que des captages pour l'adduction d'eau potable de l'agglomération orléanaise. Jusqu'à ces dernières

années, seule la source amont du Loiret dite le "Bouillon" était demeurée active. Suite aux efforts de l'association Spéléologie Subaquatique Loiret et de son président Philippe Boismoreau la désobstruction du point d'émergence des conduits karstiques aboutissant à la source de l'Abîme a permis de réactiver la source historique (appelée Grande Source au XVIII^{ème} siècle) située dans le cours du Loiret au pied du château.

La troisième source, dite du Gouffre, mentionnée par les auteurs dès la fin du XVIII^{ème} siècle (3) jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle (4; 5) mais apparemment absente des plans et cartes datant de la première moitié du XVIII^{ème} siècle (Beurain, Cassini) se situait sur le bord du fossé du Dhuy en face de l'actuel captage AEP du puits du Gouffre, mis en service par la ville d'Orléans en 1876 (6). Cette troisième source dite du Gouffre, colmatée vers 1879 (5), devait correspondre à un effondrement des berges du fossé du Dhuy à l'aplomb d'un conduit karstique exploité ensuite par la prise d'eau du puits du Gouffre. Les descriptions faites du fonctionnement alternativement émissif ou absorbant de cette cavité (4; 6; 5) correspondent étroitement aux observations qui seront faites à partir de 1997 à la source du Bouillon puis à l'Abîme (7; 8).

Bien que l'exploration spéléologique indique que ces trois points d'émergence (Bouillon, Abîme, Gouffre) correspondent à des regards accédant à des conduits karstiques différents, les prélèvements d'eau effectués aux trois points montrent une composition chimique unique au moins en ce qui concerne les éléments majeurs et le carbone organique dissous. La variation de leur teneur en chlorure lors d'une crue de la Loire est illustrée Figure 2. La répercussion identique (en concentration et dans le temps) de la diminution des teneurs en Cl⁻ aux trois sources indique l'origine commune des eaux. Au contraire, les sources situées plus en aval sur le cours du Loiret (Rigouillarde, St Avit, La Pie) présentent des teneurs légèrement différentes qui témoignent d'un mélange plus important entre les eaux de Loire et un ou plusieurs autres pôles.

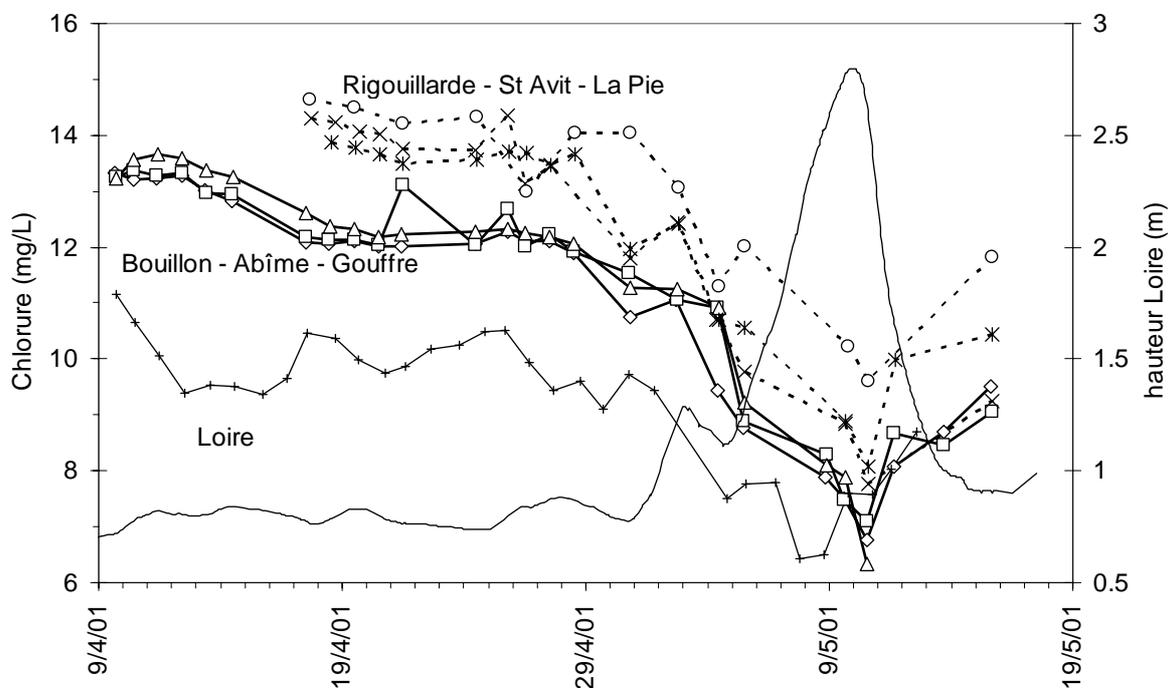


Figure 2: Variation des teneurs en chlorure de la Loire et des sources du val d'Orléans lors d'une crue de la Loire. Bouillon, Abîme et Gouffre présentent des concentrations identiques et plus proches de celles de la Loire que le second groupe (Rigouillarde, St Avit, la Pie).

III. RELATIONS LOIRE - SOURCES DU LOIRET

Dès 1736 (2), l'hypothèse d'une relation étroite entre la Loire et les sources du Loiret avait été formulée et même ensuite fortement étayée (4; 9). Ce n'est qu'à partir du début du XX^{ème} siècle que les traçages artificiels, relatés dans plusieurs travaux particuliers ou de synthèse sur les sources du Loiret et l'hydrogéologie du val d'Orléans (10; 11; 12; 13; 14; 15), ont permis d'établir puis de préciser les liens entre les cours d'eau de surface (Loire principalement, mais également ruisseau de l'Anche) et les résurgences, sources du Loiret. Ces expérimentations ont permis de déterminer qu'environ 3 jours pouvaient suffire aux eaux perdues vers Jargeau pour atteindre le Bouillon.

Après le décès accidentel de Michel Lepiller, le transfert dans le Val d'Orléans de l'école de traçage qu'il avait mis en place pour les élèves de Polytech Orléans dans le massif des Bauges (Savoie), a donné lieu à des opérations annuelles de traçage entre Jargeau et les résurgences qui perpétuent la transmission de l'état de l'art, et continuent à faire progresser la connaissance du système (16).

Les relations hydrochimiques entre les eaux de Loire et les résurgences ont été particulièrement étudiées par Chéry (13). La comparaison entre les teneurs en éléments majeurs de la Loire et des sources du Bouillon et de la Pie en fonction des cycles hydrologiques permet d'apprécier les similitudes (Na, K, Cl) et les différences (O₂ dissous, pH, Ca) entre les différentes eaux. Sur ces bases, un temps de transit moyen des masses d'eau entre la Loire et les résurgences de plusieurs semaines avait été envisagé pour tenir compte des différences probables de vitesse des eaux circulant grâce à la perméabilité moyenne de l'aquifère ou par les conduits majeurs nécessairement privilégiés par les traçages artificiels.

Au début des années 90, de nouvelles campagnes de prélèvement avec un pas de temps plus court et ciblant un suivi des crues de Loire ont permis de montrer que c'était plutôt la totalité de la masse d'eau qui circulait rapidement en 3 jours, témoignant de l'importance de la karstification du système (17). La Figure 3 présente la variation en chlorure des eaux de Loire et du Bouillon lors d'une crue suivie en 1993. La diminution des teneurs en Cl⁻ avec la crue constitue un traçage naturel de l'ensemble de la masse d'eau du fleuve. On a pu constater qu'à partir d'une situation quasi stationnaire avant la crue (teneurs égales en Loire et au Bouillon), le transfert de la diminution de la teneur en Cl⁻ se faisait avec un décalage de 3 jours à la résurgence, concordant donc avec les traçages artificiels. Ce résultat nouveau a permis de considérer le système hydrogéologique du val d'Orléans comme un réacteur biogéochimique fonctionnant sur 3 jours, dont on pouvait connaître facilement (en période de faible impact de l'impluvium local) les concentrations des composés entrant (Loire) et sortant (résurgence du Bouillon). Il a ainsi été possible de montrer que les processus de dégradation de la matière organique apportée par les eaux de Loire pouvaient expliquer quantitativement la dissolution du calcaire dans l'aquifère (17; 18; 19). Cependant, en période de forte contribution des précipitations locales par infiltration diffuse ou par perte des ruisseaux drainant les eaux de ruissellement du val, la contribution d'au moins un troisième pôle chimique ne permet plus d'équilibrer facilement les bilans de matière.

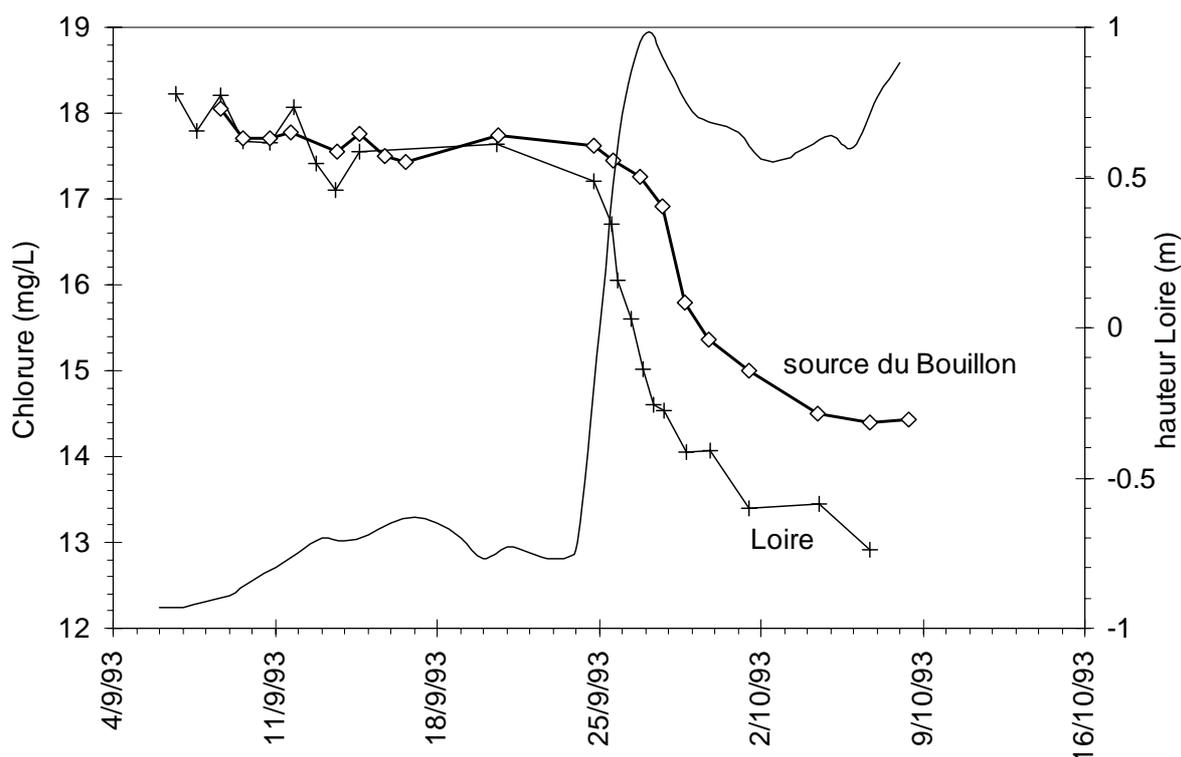


Figure 3: Variation des teneurs en chlorure des eaux de Loire et de la résurgence du Bouillon lors d'une crue d'après (17).

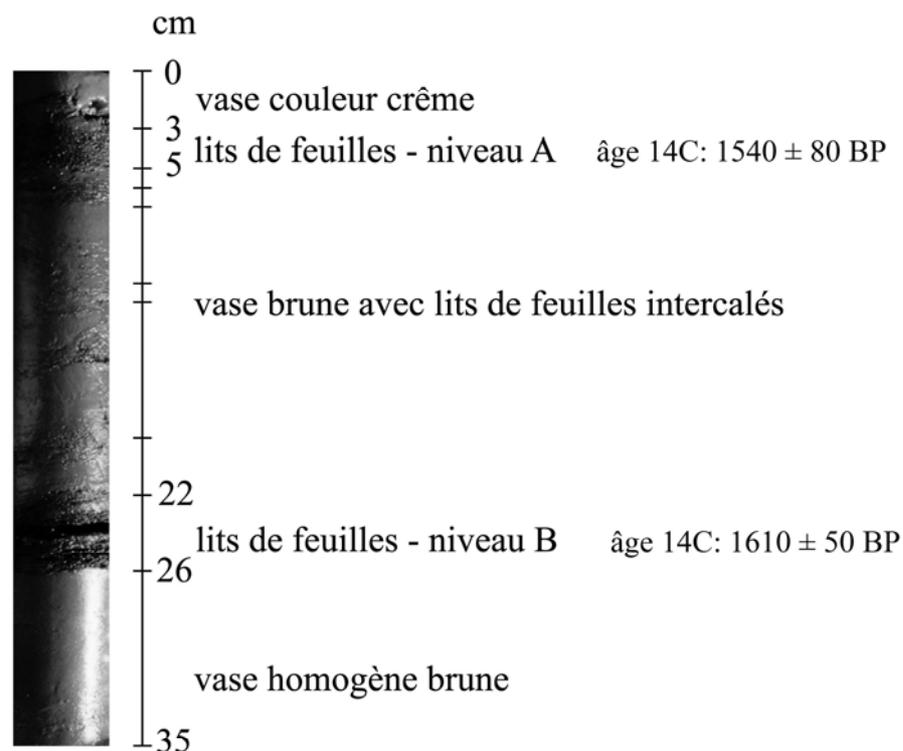
Dans son travail de thèse, réorienté après le décès de Michel Lepiller, Ali Joodi utilise les informations apportées par les traçages artificiels (fluorescéine) et naturels (chlorure) pour contraindre un modèle numérique du système hydrogéologique du val d'Orléans (16;20).

IV. RELATIONS DHUY - SOURCES DU LOIRET ET SOURCES AVAL (ST AVIT, LA PIE)

L'intrusion des eaux boueuses du Dhuy dans la vasque du Bouillon début juillet 1997 a marqué le démarrage d'un travail sur le fonctionnement en perte des sources du Loiret. L'inventaire des épisodes d'écoulement inverse a permis d'établir une relation algébrique entre les niveaux journaliers des hauteurs d'eau de la Loire et du Dhuy permettant de retracer les différents événements connus entre 1997 et 2000 (7; 8). L'indice d'absorption calculé par cette méthode permettrait même de prévoir l'éventualité imminente d'un nouvel épisode et d'anticiper au besoin les mesures à prendre pour préserver la qualité des eaux pompées par les captages AEP les plus proches des sources. Le même indice a également permis de rechercher l'existence dans le passé de périodes propices au fonctionnement inverse des sources et est actuellement étendu jusqu'au milieu des années 1960 dans une problématique d'étude de l'impact des variations climatiques sur l'hydrologie du val d'Orléans et la qualité des eaux (21).

Le fonctionnement alternativement émissif ou absorbant des cavités du Bouillon, de l'Abîme et (anciennement) du Gouffre en font d'un point de vue terminologique des pertes-émergences ou bien encore des inversacs selon Gèze (22).

Si la disposition actuelle du Dhuy et du Loiret peut rendre surprenant le fonctionnement absorbant des cavités, le cours ancien naturel du Dhuy à l'aplomb des points d'émergence du Bouillon et de l'Abîme (Figure 1) autorise dans le passé leur fonctionnement beaucoup plus fréquent en perte, comme c'était le cas de la source du Gouffre avant son colmatage. Marboutin dans son rapport de 1902 conseille fortement de renforcer son isolement et même de détourner le fossé du Dhuy afin de protéger les eaux pompées au puits du Gouffre des pollutions absorbées avec les eaux du ruisseau (6). En ce qui concerne le fonctionnement ancien de la cavité du Bouillon, les dépôts de près d'un mètre d'épaisseur de sédiments argileux intercalés de lits de feuilles et disposés en banquettes à l'entrée du conduit principal, témoignent de périodes d'absorption intense des eaux de surface. Deux lits de feuilles extraits d'une carotte prélevée en plongée (Figure 4) ont respectivement été datés à 1540 et 1610 BP (âges ^{14}C conventionnels).



Remplissages kartiques de la cavité du Bouillon - Source du Loiret carotte B01-A - Novembre 2001

Figure 4: Description de la carotte de 35 cm prélevée en plongée le 25/11/2001 dans les banquettes de sédiment argileux situées au passage du conduit principal aux étroitures menant au porche d'entrée. L'analyse radiométrique des lits de feuilles (datations Beta Analytic Inc.) donne les âges conventionnels suivants: 1540 BP pour le niveau supérieur (A) et 1610 BP pour le niveau inférieur (B).

Terminons ce rapide panorama des travaux de l'Université d'Orléans sur les sources du Loiret au Parc Floral en relatant le traçage effectué en compagnie de Michel Lepiller à partir de la cavité du Bouillon pendant l'épisode d'écoulement inverse du 13 décembre 1997. Ce traçage (Figure 5) avait donné lieu au compte-rendu reproduit ci-dessous ainsi qu'un article dans la République du Centre du 13 février 1998 (Figure 6). La mise en évidence d'une circulation aval depuis la cavité du Bouillon s'était révélée également être un aiguillon pour l'exploration spéléo de nouveaux conduits et finalement pour entreprendre la désobstruction de l'Abîme.

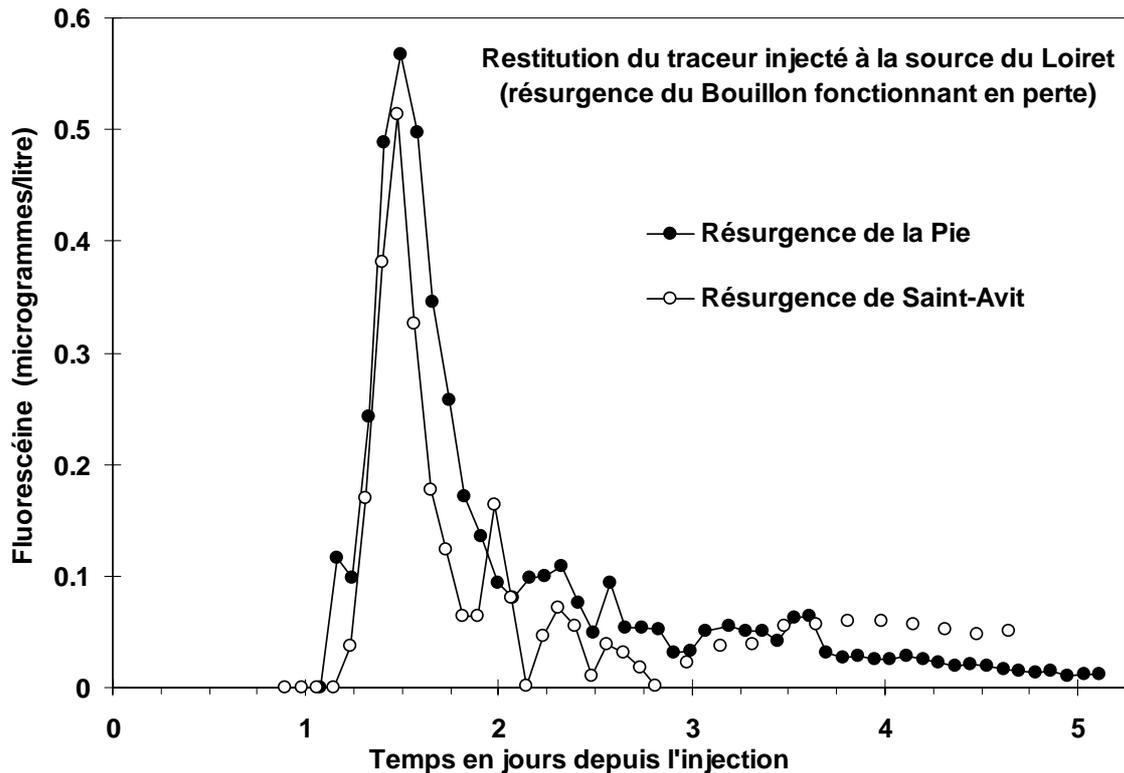


Figure 5: Traçage du 13 décembre 1997 de la source du Bouillon. Restitution du traceur aux sources de St Avit et de la Pie

Résultats du traçage de la source du Loiret du 13 décembre 1997

Michel Lepiller, Université d'Orléans, Laboratoire d'Hydrogéologie
Patrick Albéric, Université d'Orléans, CNRS UMR 6531

La concomitance de bas niveaux d'eau en Loire et de l'élévation rapide du niveau du Dhuy après un épisode pluvieux local permet l'inversion du sens d'écoulement des eaux à la source du Loiret (source du Bouillon, Parc Floral).

La vasque du Bouillon qui habituellement est un lieu important de résurgence des eaux de Loire infiltrées en amont d'Orléans, se transforme temporairement en une perte des eaux limoneuses du Dhuy. Un tel mode de fonctionnement porte le nom d'inversac.

Un épisode de ce type s'est déroulé du 12 au 13 décembre 1997 et a permis l'injection de 500 grammes de fluorescéine. Un autre épisode (apparemment de plus grande intensité) avait déjà été observé et relaté par la presse, la première semaine de juillet de la même année.

Bien qu'une masse importante du traceur injecté ait reflué de la source quelques heures seulement après l'injection, suite au

rétablissement du sens d'écoulement normal des eaux, une quantité suffisante a été entraînée par la circulation souterraine pour donner lieu à des restitutions de traceur aux quatre points de résurgence surveillés.

L'installation de préleveurs automatiques aux résurgences de Saint Avit et de la Pie a permis l'établissement de courbes complètes de restitution. On note l'arrivée du traceur un jour et six heures environ après le moment de l'injection, cela aussi bien à la fontaine de Saint Avit qu'aux sources de la Pie pourtant distantes de près de quatre kilomètres. Les concentrations maximales de traceur sont observées six heures après, soit un jour et demi après l'injection.

Les deux résurgences des Moulins de la Mothe et des Béchets ont également restitué une partie du traceur, mais l'espacement des prélèvements manuels n'a pas permis dans ce cas de suivre complètement la restitution.

Le premier résultat de ce traçage est de confirmer l'existence de liens de circulation souterraine directe entre la Source du Loiret au Bouillon d'une part et la Fontaine de Saint Avit et les sources de la Pie d'autre part, situées respectivement 5 et 8 km à l'ouest de la source du Bouillon. La simultanéité des restitutions à St

Avit et à la Pie laisse penser que ces liens puissent être séparés, au moins sur une partie du trajet conduisant à St Avit. La vitesse de circulation des eaux serait dans ce cas supérieure dans la partie du drain conduisant aux sources de la Pie. Il faut noter aussi le peu de différences de concentration du traceur dans les eaux des deux résurgences, ce qui peut indiquer que les deux voies de circulation souterraines envisagées,

n'offrent pas des conditions de mélange, avec d'autres types d'eaux, qui soient différentes l'une de l'autre.

Ces observations doivent par ailleurs faire comprendre la vulnérabilité de la qualité des eaux de résurgence et de captage du Val d'Orléans pendant les épisodes de fonctionnement de la source du Loiret en perte des eaux du Dhuy.

ENVIRONNEMENT

« Inversac » à la source du Bouillon

Ce phénomène rare intéresse les scientifiques. Michel Lepiller et Patrick Albéric ont suivi le cheminement des circulations souterraines karstiques du val d'Orléans.

MICHEL Lepiller et Patrick Albéric sont deux scientifiques, maîtres de conférences à l'université d'Orléans. L'un travaille au laboratoire d'hydrogéologie, l'autre au laboratoire de géochimie organique et poursuit depuis plusieurs années des recherches sur les circulations souterraines karstiques qui sont établies dans les calcaires qui forment le soubassement du Val d'Orléans. Les circulations sont étudiées sous l'angle de la géochimie des eaux en liaison avec les transformations subies par la matière organique.

« L'inversac » est un phénomène rare : c'est le rapport de simultanéité de bas niveaux d'eau en Loire et l'élévation rapide du niveau du Dhuy - cours d'eau adjacent se jetant dans le Loiret -, après de fortes précipitations, ce qui permet l'inversion du sens d'écoulement des eaux à la source du Bouillon, source du Loiret. Elles se transforment en perte des eaux limoneuses du Dhuy. Cet effet de vases communicants est dû au niveau d'eau de la source, trop élevé par rapport à celui de la Loire.

« L'inversac » a eu lieu pour la dernière fois samedi 13 décembre 1997, et les deux scientifiques en ont profité pour suivre les eaux à l'aide de l'injection de 500 grammes de fluorescéine, traceur non polluant détectable à très faible dose. L'intérêt était donc de recueillir des indications sur la vitesse de circulation de l'eau, mais surtout sur sa direction dans la partie aval du système hydrologique.

Quatre points de résurgence étaient surveillés : la fontaine de Saint-Avit, les sources de la Pie, du Moulin de la Mothe et du Moulin des Béchets. Le traceur est arrivé à Saint-Avit et à la Pie 30 heures après l'injection par prélèvements automatiques. Ce qui confirme l'existence de liens de circulation souterraine directe entre la source du Loiret au Bouillon d'une part, et la Fontaine de Saint-Avit et les sources de la Pie d'autre part. La vitesse de circulation des eaux serait donc supérieure dans la partie du drain conduisant aux sources de la Pie.

Quant aux résurgences des Moulins de la Mothe et des Béchets les prélèvements étaient



Michel Lepiller déversant le traceur à la source du Bouillon au Parc floral le 13 décembre 1997.

manuels, ce qui explique que la restitution n'ait pas pu être complètement suivie.

En conclusion, ces observations font comprendre aux scientifiques la vulnérabilité de la qua-

lité des eaux de résurgence et de captage du Val d'Orléans, pendant les épisodes de fonctionnement de la source du Loiret en perte des eaux du Dhuy.

V. F.

Figure 6
République du centre, 13 février 1998

V. CONCLUSION

Le Val d'Orléans est un site privilégié d'étude des relations entre écoulement de surface et aquifère karstique. Comme réacteur biogéochimique assez bien contraint il offre la possibilité de tester *in situ* de nombreux processus parmi lesquels la réactivité ou la stabilité des micropolluants organiques, les fractionnements isotopiques, la spéciation des éléments traces ou les interactions avec la matière organique totale. Certains de ces volets sont en cours de développement, en particulier grâce à des collaborations fructueuses entre les équipes du BRGM et de l'Université d'Orléans. D'autres aspects liés à la réactivité des microparticules et aux informations qu'elles transmettent sur la dynamique et l'origine des eaux dans les systèmes karstiques devraient certainement être développés comme ils l'ont été dans d'autres systèmes (23).

Références bibliographiques

- (1) **Phillips J. D., Walls M. D.**, 2004 – Flow partitioning and unstable divergence in fluviokarst evolution in central Kentucky. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11: 371-381.
- (2) **Fontenu abbé de**, 1736 – Réflexions historiques sur le Loiret. *Mémoires de l'Académie Royale des Inscriptions et Belles Lettres*, Tome XII: 153-163.
- (3) **Beauvais de Préau D.M.**, 1784 – Essai sur la topographie d'Olivet. *Couret de Villeneuve*, Orléans, 93 pp.
- (4) **Dufrénoy P. A.**, 1847 – Cavités et courants souterrains dans la vallée de la Loire, à Orléans. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 4 n°2: 772-774.
- (5) **Blanchard R.**, 1903 – Le Val d'Orléans. *Annales de Géographie*, 12: 307-323.
- (6) **Marboutin F.**, 1902 – Rapport sur les eaux de la ville d'Orléans. Michau & Cie, Orléans, 13 pp.
- (7) **Albéric P.**, 2001 – L'inversac (perte-émergence) de la résurgence du Bouillon (source du Loiret, France). *Sciences et Techniques de l'Environnement*, H. S. n°13: 1-4.
- (8) **Albéric P.**, 2004 – River backflooding into a karst resurgence (Loiret, France). *Journal of Hydrology*, 286, 194-202.
- (9) **Sainjon H.**, 1880 – La Loire, le Loiret et les courants souterrains du val d'Orléans. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 91 n°4: 242-245.
- (10) **Caudron M., Albinet M., Cottez S., Margat J.**, 1965 – Les sources du Loiret - Guide hydrogéologique. *Bulletin du BRGM*, 3: 183-202.
- (11) **Desprez N.**, 1967 – Inventaire et étude hydrogéologique du Val d'Orléans (Loiret). *BRGM rapport*, DSGR67A21, 26 pp.
- (12) **Desprez N.**, 1976 – Val d'Orléans à l'est d'Orléans (Loiret). Etude hydrogéologique. *BRGM rapport*, 76SGN109BDP, 18 pp.
- (13) **Chéry J.-L.**, 1983 – Etude hydrochimique d'un aquifère karstique alimenté par perte de cours d'eau (la Loire): Le système des calcaires de Beauce sous le val d'Orléans. *Thèse Université d'Orléans*.
- (14) **Le Borgne F., Treuil M., Joron J.-L., Lepiller M.**, 2005 – Méthode de sondage géochimique des aquifères à l'aide des lanthanides naturels et de leurs complexes EDTA : Cas des aquifères alluvial et karstique du Val d'Orléans. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 176: 513-529
- (15) **Lepiller M.**, 2006 – Val d'Orléans. In: *Aquifère et eaux souterraines en France*, J.-C. Roux éditeur, BRGM I, pp. 200-214
- (16) **Joodi A. S., Albéric P., Sizaret S., Binet S., Bruand A.** 2008 - Tests for modelling the unsteady behaviour of a karstic aquifer. 33rd International Geosciences Congress, August 6-14th, Oslo.
- (17) **Albéric P., Lepiller M.**, 1998 – Oxydation de la matière organique dans un système hydrologique karstique alimenté par des pertes fluviales (Loiret, France). *Water Research*, 32, 2051-2064.
- (18) **Albéric P.**, 1998 – Transformation of riverine organic matter from sinking stream recharge to spring discharge in a karst aquifer. *Mineralogical Magazine*, 62A: 36-37.
- (19) **Le Borgne F., Treuil M., Joron J.-L., Lepiller M.**, 2006 – Bilan des impacts hydrogéochimiques naturels et anthropiques à l'intérieur du réseau karstique du Val d'Orléans établi à l'aide des éléments majeurs: Confirmation et tentative de quantification du modèle de «confinement dynamique». *Bulletin de la Société Géologique de France*, **177: 37-50**.
- (20) **Joodi A. S., Sizaret S., Binet S., Bruand A., Albéric P.** 2008 - Développement d'un modèle pour la simulation de l'écoulement d'eau et du transport du traceur dans l'aquifère karstique du val d'Orléans. 22ème Réunion des Sciences de la Terre, 21-24 avril, Nancy.

- (21) **Joigneaux E., Albéric P., Pauwels H., Gutierrez A., Baran N., Binet S.,** 2008 – The impacts of climate change on point groundwater discharge in a fluviokarst landscape. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-12076, Vienne.
- (22) **Gèze B.,** 1987 – Les mésaventures des sources de l'Estavelle et de l'Inversac en Languedoc méditerranéen. *International Journal of Speleology*, 16 :101-109.
- (23) **Massei N., Lacroix M., Wang H.Q., Mahler B.J., Dupont J.P.,** 2002 – Transport of suspended solids from a karstic to an alluvial aquifer: the role of the karst/alluvium interface. *Journal of Hydrology*, 260: 88-11.

Protection des captages du Val d'Orléans

Nelly Bonnefoy⁽¹⁾, Jean Louis Charleux⁽²⁾, Dominique Chigot⁽³⁾, Philippe Maget⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Ville d'Orléans – 4, quai du Chatelet – 45000 Orléans – nbonnefoy@ville-orleans.fr

⁽²⁾ Chambre d'Agriculture du Loiret – 13 Avenue des Droits de l'Homme – 45921 Orléans cedex – jean-louis.charleux@loiretchambagri.fr

⁽³⁾ Eaux & Industrie – ZAC des Aulnaies - 1121 rue de la Bergeresse – 45160 Olivet – dominique.chigot@eau-et-industrie.com

⁽⁴⁾ Philippe Maget – 432, rue de Champdoux – 45560 Saint-Denis-en-Val – maget.philippe@wanadoo.fr

I. LES CAPTAGES DU VAL

I.1. Introduction

80 % de la ville d'Orléans et 3 communes du sud de la Loire (Saint-Pryvé-Saint-Mesmin, une partie de Saint-Jean-le-Blanc, Saint-Denis-en-Val et Saint Cyr en Val) sont alimentées en eau potable par un ensemble de 3 ouvrages souterrains situés dans le val d'Orléans, à proximité du Parc floral :

Le puits du Gouffre réalisé en 1877

Le puits Theuriet réalisé en 1894

Le puits du Bouchet réalisé en 1963

A ces puits s'ajoutent 3 forages profonds dits « de secours » sur le coteau sud de Sologne, au lieu-dit la Saussaye, dont on expliquera le rôle plus loin.

I.2. Des captages en milieu karstique

Ces ouvrages peu profonds, d'une vingtaine de mètres au maximum, captent les eaux du complexe aquifère alluvions – calcaire de Pithiviers. Le calcaire, profond de 4 à 7 m de profondeur seulement, est très fortement karstifié, avec un réseau de galeries complexes, explorables par des plongeurs spéléologues (voir film de Philippe Boismoreau et Michel Lepiller). Une galerie a été remontée depuis une source du parc floral jusqu'à proximité d'un puits de la Ville d'Orléans.

Les débits spécifiques de ces ouvrages varient de 200 à 3 400 m³/h/m, valeurs significatives d'un système karstique.

Nom du Puits	N°BSS	Profondeur en m	Année de réalisation	Débit autorisé en m ³ /h	Débit spécifique en m ³ /h/m
Gouffre	03982X0007	26	1877	1 050	215
Theuriet	03982X0006	17	1894	900	3 400
Bouchet	03982X0008	25	1963	1 150	1 950

Tableau 1 : Principales caractéristiques des ouvrages AEP du Val

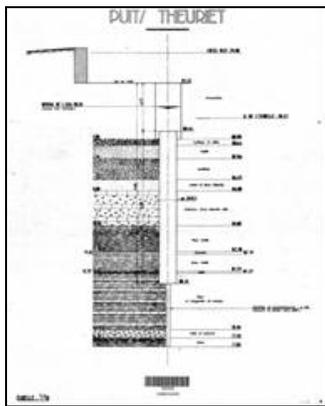


Figure 1 : Coupe géologique et technique du puits Theuriet

I.3. Alimentation

L'alimentation se fait pour 80 % environ par les pertes de la Loire échelonnées sur 41 km vers l'Est, la majorité ayant été reconnue par traçages à Jargeau distant de moins de 15 km. La circulation de l'eau dans ce karst est très rapide ; des traçages entre les pertes de Jargeau et le puits du gouffre indiquent un temps de 48 heures seulement. L'alimentation se fait en partie par l'infiltration des eaux de pluie sur le Val, ainsi que par le ruissellement issu du coteau de Sologne.

L'alimentation est encore plus complexe : les travaux de Michel Lepiller ont mis en évidence par traçage une alimentation d'un captage du Val depuis des gouffres situés dans la forêt d'Orléans, donc de l'autre côté de la Loire (gouffre de la vallée de l'Anche à Châteauneuf-sur-Loire et fosses de la Noue à Saint-Denis-de-l'Hôtel, qui ont fait l'objet de l'excursion du colloque de 2005). A cette alimentation « naturelle » se greffent les divers rejets des activités humaines (agriculture, urbanisation) à partir de fossés, puits, bassins d'infiltration, et même forages atteignant le calcaire, ce dont il faudra se protéger.

I.4. Qualité des eaux

Les eaux captées par les ouvrages du Val sont régulièrement suivies, mais aussi celles de la Loire à hauteur des pertes à Jargeau où se trouve une station de contrôle et d'alerte.

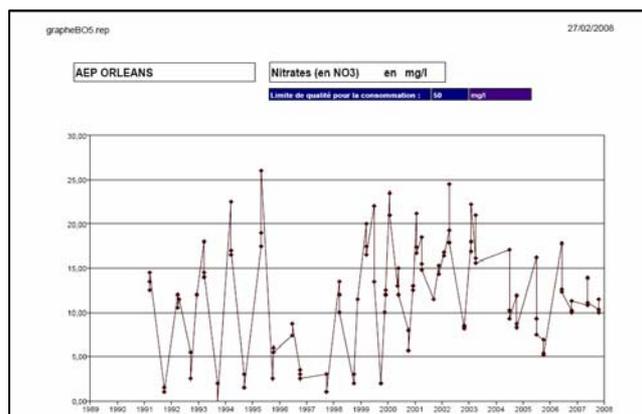


Figure 2 : variations des teneurs en nitrate sur le champ captant du Val d'Orléans (source DDASS 45)

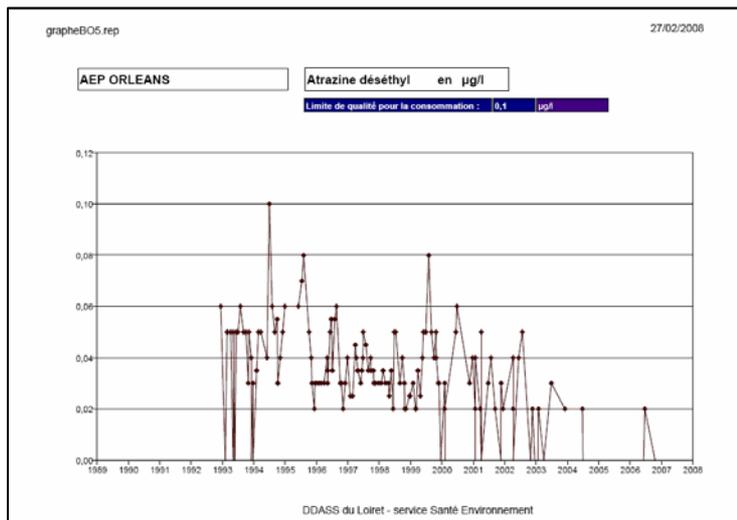


Figure 3 : variations des teneurs en déséthyl-atrazine sur le champ captant du Val d'Orléans (source DDASS 45)

L'eau des ouvrages de captage présente une teneur moyenne en nitrate de l'ordre de 15 mg/l, seulement (la limite de potabilité étant de 50 mg/l). Pour les pesticides, la teneur décroît depuis 1995 pour la déséthyl-atrazine et l'atrazine qui est interdite, mais aussi pour les autres phytosanitaires suivis (diuron et simazine).

Ces graphiques font ressortir 2 caractéristiques :

- 1) Les teneurs aux captages suivent en variations celles de la Loire à Jargeau, mais elles sont plus élevées : → La pollution ne vient pas uniquement de la Loire.
- 2) Les teneurs montrent une très grande variabilité. Par exemple, en 1 mois, les teneurs en nitrate passent de 0 à 20 mg/l : → Ces poussées sont bien marquées en fin d'automne et d'hiver correspondant au lessivage. Par contre pour les autres mois, on peut supposer que la pollution n'est pas diffuse. Ses sources sont ponctuelles dans le temps et à des distances relativement proches.

La protection de l'alimentation en eau d'Orléans s'est donc faite suivant 3 directions :

- Une station de contrôle et d'alerte à Jargeau, en service depuis le début des années 1990, à hauteur des principales pertes, pour prévenir d'une éventuelle pollution par la Loire, gérer le traitement de l'eau ou se connecter sur les forages « de secours » situés sur le coteau de Sologne,
- La protection autour des captages du Val par l'instauration de périmètres de protection, ce qui est présenté ci-après.
- Un système performant de traitement des eaux avec charbon actif et membranes.

II. LE LONG PARCOURS JUSQU'A L'ARRETE PREFECTORAL

Les études préalables à la mise en place des périmètres de protection se sont déroulées entre 1988 et 1994, permettant à Jean-Claude Schmidt -Hydrogéologue agréé- de définir les périmètres de protection dans son avis d'avril 1994, réactualisé en 2003. Le dossier de demande d'autorisation a été établi par le BRGM en 1994. Il a été officiellement déposé en

janvier 2004 pour aboutir à un arrêté préfectoral en date du 19 avril 2006. Cette démarche a donc duré près de 18 ans, dont 15 ans d'études et de mise au point, 2 ans de procédure.

III. LES PERIMETRES DE PROTECTION

Les périmètres de protection des captages du val sont constitués :

- d'un périmètre immédiat pour chaque captage,
- d'un périmètre rapproché d'une superficie de 1100 ha,
- d'un périmètre éloigné de près de 70 km².

Figure 2 : le périmètre de protection rapprochée des captages du Val



Les prescriptions dans le périmètre de protection rapprochée inscrites à l'arrêté sont :

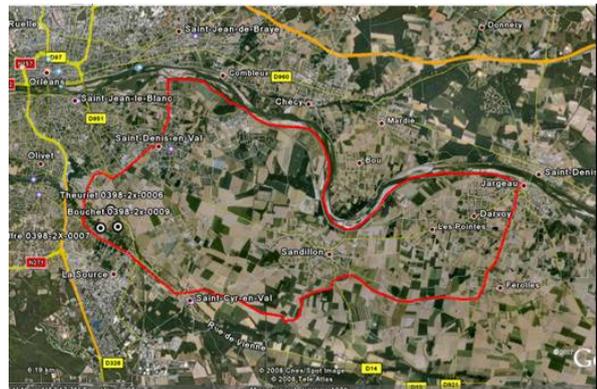
III.1. Interdiction

- Le transport de produits dangereux ou polluants sur l'avenue Gaston Galloux dans l'attente de réalisation d'un dispositif de recueil des eaux pluviales ;
- La création de toute excavation restant ouverte et non étanche ;
- La pose de nouvelles canalisations d'hydrocarbures liquides ;
- Les dépôts d'ordures et d'autres déchets à l'exception des déchets verts ;
- L'épandage de boues de station d'épuration, de matières de vidanges ou de lisiers ;
- Les nouveaux stockages de produits polluants.

Figure 3 : le périmètre de protection éloignée des captages du Val

III .2. Réglementation

- Soumission à autorisation de tous forages, avec obligation de cimentation du tube de soutènement face aux alluvions ;
- Utilisation de produits biodégradables le long des voies SNCF ;
- Mise en place de fossés étanches le long de la voie Gaston Galloux, avec des bassins étanches et dotés de dispositifs de déshuilage ;
- Mise en rétention des stockages existants ;
- Contrôle des forages existants et exploités pour s'assurer de l'étanchéité de leur tête de puits et mise à niveau si besoin ;
- Comblement des forages non exploités ;
- Inventaire tenu à jour des effondrements existants, visibles ou comblés le long des voies de circulation.



III.3. Plan d'action

- Mise en place avec la profession agricole d'une convention pour un code de bonnes pratiques agricoles, avec la mise en place de bandes enherbées, et la gestion des fonds de cuves des pulvérisateurs ;
- Mise en place d'un protocole pour l'utilisation des captages existants afin de piéger une pollution dans la nappe ;
- Mise en place d'un suivi de la qualité de l'eau sur 5 à 10 forages situés à l'amont du périmètre de protection rapprochée ;
- Mise en place d'un service de contrôle et de suivi des actions menées, avec bilan annuel.

IV. LES ACTIONS REALISEES OU EN COURS VISANT LA REDUCTION DES POLLUTIONS ACCIDENTELLES

IV.1. Travaux réalisés

- A la demande de l'hydrogéologue agréé, le périmètre de protection du puits Theuriet a été agrandi et clôturé.
- La déviation des transports de matières dangereuses sur l'avenue Gaston Galloux est opérationnelle.
- Deux cuves à hydrocarbures enterrées au niveau du Parc floral ont été neutralisées.

IV.2. Travaux en cours

La ville d'Orléans a lancé les actions suivantes demandées par l'hydrogéologue agréé :

Recensement des puits et forages

Le recensement sur le terrain a été effectué par ANTEA et GEOHYD. De cet inventaire, il ressort que 15 ouvrages devront être comblés. Un protocole de comblement a été défini pour chaque captage.

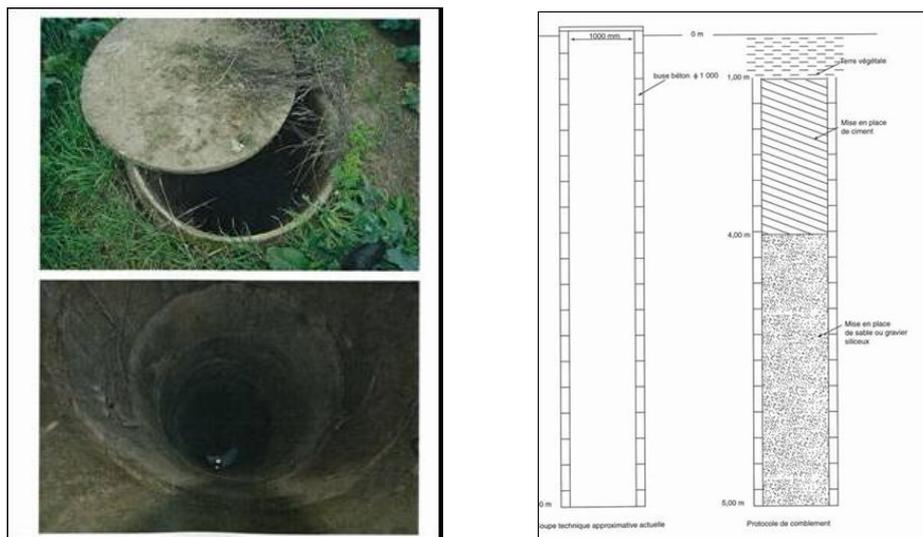


Figure 4 : Exemple de protocole de comblement (Extrait du rapport Geohyd R/GHD H06.24)

Le coût de comblement est estimé à près de 53 000 € HT. Les travaux seront terminés en 2009.

La tête de puits de 56 ouvrages exploités devra être mise en conformité. Le coût des travaux est estimé à près de 73 000 €. Les travaux devraient être terminés fin 2008.

Mise en conformité des stockages solides et liquides

Deux sites de stockages d'hydrocarbures enterrés ont été passés en stockage aérien avec rétention.

Dans un délai de 3ans, il est prévu de mettre en conformité 15 cuves de stockages d'engrais liquides et 26 aires de stockage d'engrais solides pour un montant estimé à 28 000 € H T.

Recensement des dépressions et gouffres

Le recensement des dépressions et des gouffres a été réalisé en 2005 à partir d'archives et actualisé en 2007 sur des manifestations visibles en surface, ou anciennement connues. Les effondrements anciens et rebouchés ont été répertoriés. Une quarantaine de manifestations a été cartographiée sur la zone du périmètre de protection rapprochée.

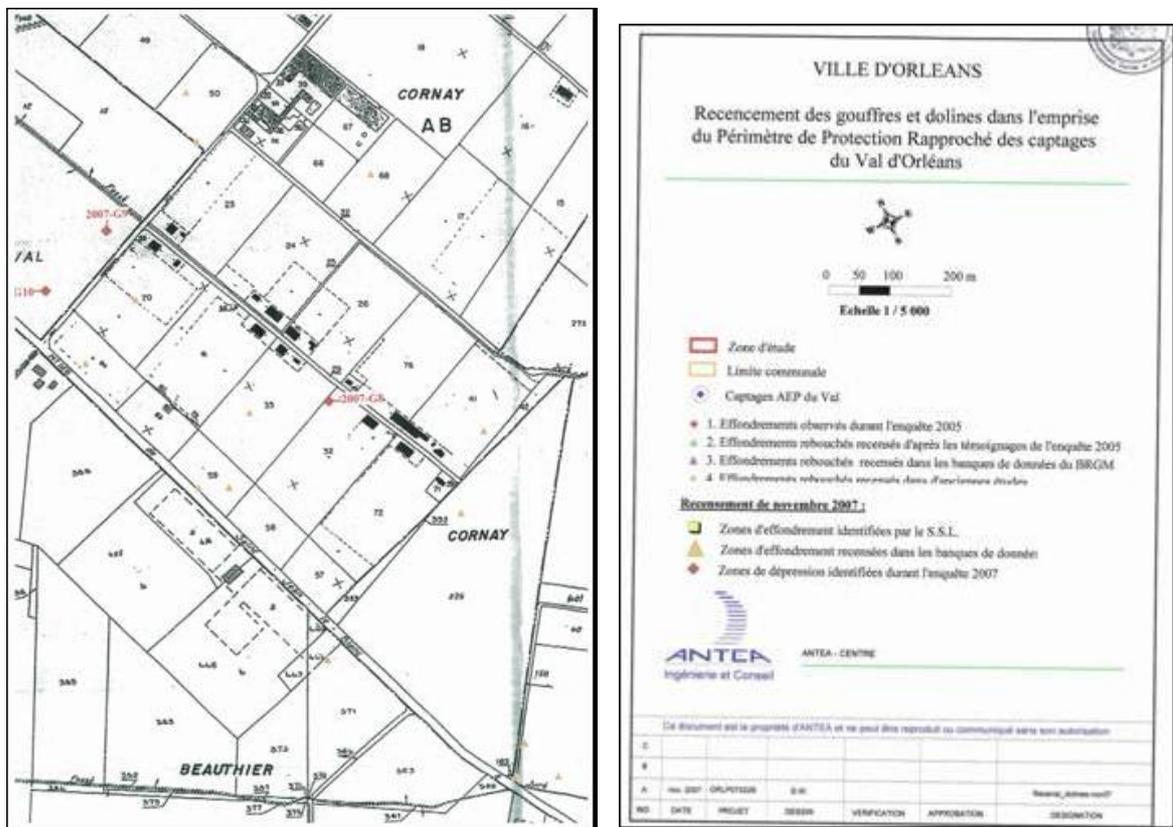


Figure 5 : Recensement des dolines (Extrait du rapport ANTEA 48541/1 de novembre 2007)

Mise en place de procédure d'alerte

L'arrêté préfectoral de DUP préconise la mise en place d'un plan d'action dans l'emprise des périmètres de protection. Ce plan d'action vise notamment à :

- Mettre en place un protocole pour l'utilisation des captages existants afin de piéger une pollution dans la nappe ;

- Mettre en place un suivi de 5 à 10 forages situés à l'amont du périmètre de protection rapprochée.

La Ville d'Orléans a souhaité associer à cette démarche un Collège d'expert en hydrogéologie. La première réunion de ce groupe de travail a eu lieu le 25 octobre 2007.

1) Pour la mise en place du protocole, et compte tenu des vitesses de circulation élevées, il a été décidé d'élaborer plutôt une procédure d'alerte ayant pour objectif :

- de mettre en place une procédure d'information d'une pollution accidentelle dans les plus brefs délais ;
- d'arrêter, dès sa connaissance, le fonctionnement des captages du Val en basculant l'approvisionnement à partir des forages de secours de La Saussaye, ce qui a été mis en œuvre vers 1985 ;
- de mettre en œuvre la résorption de la pollution soit par interception dans la nappe, soit par décapage des terres, avec contrôle de l'eau sur des forages en aval.
- Pour la mise en place d'un suivi, il a été décidé de choisir des points de contrôle de la teneur en pesticides à l'amont du périmètre de protection rapprochée, ce qui est plus délicat à mettre en œuvre.

Avant de mettre en place ce suivi, il convient de préciser :

- Quels forages choisir ? Il faudra s'assurer de la liaison hydraulique entre ces ouvrages et ceux du Val, ainsi que de leur équipement.
- Quels paramètres à analyser et à quelle fréquence ? Plutôt qu'une analyse tous les cinq ans, le groupe de travail a préconisé la recherche de moins d'éléments, mais plus fréquemment sur les produits phytosanitaires.
- Quand effectuer ces analyses ?

Les prochaines réunions de ce groupe de travail permettront de finaliser les procédures.

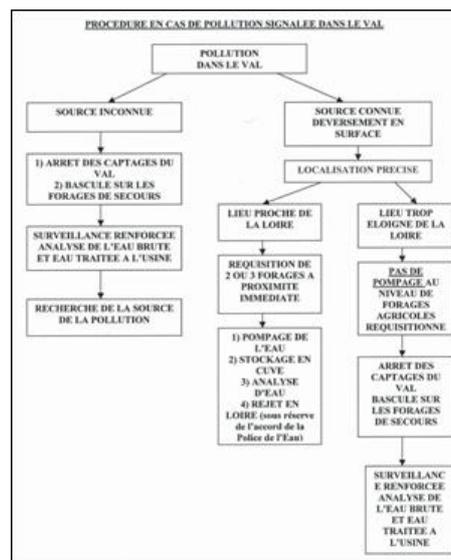


Figure 6 : Exemple de procédure d'alerte

V. LES ACTIONS REALISEES OU EN COURS VISANT LA REDUCTION DES POLLUTIONS CHRONIQUES

V.1. Une convention tripartite

Dans le cadre de la mise en place des périmètres de protection des ressources en eau de la Ville d'Orléans, l'arrêté préfectoral préconise d'établir une convention avec la profession agricole pour définir un plan d'action pour la mise en œuvre de bonnes pratiques agricoles. Cette démarche constitue l'un des moyens pour réduire les risques de pollutions des eaux d'alimentation par les produits phytosanitaires.

A cet effet, une convention tripartite (Chambre d'agriculture du Loiret, Lyonnaise des Eaux et Ville d'Orléans) a été signée le 29 juin 2006. Cette convention confirme la volonté des signataires de poursuivre les actions engagées depuis 2000.

Cette convention précise les obligations de chacun des signataires et en particulier leurs engagements financiers.

V.2. Les actions réalisées

Etat des lieux de la zone d'étude

En 2000, il a été réalisé un état des lieux dans le périmètre de protection rapprochée. 48 exploitations réparties en 4 types d'activités représentent une surface de l'ordre de 900 ha.

Chaque exploitation a fait l'objet d'un diagnostic de ses pratiques culturales et plus spécifiquement des pratiques en terme d'utilisation de produits phytosanitaires et des risques de pollution de la ressource. C'est sur les cultures de pleins champs (45% de la surface cultivée) que les marges de progrès sont les plus importantes pour limiter le risque de pollution. Un diagnostic phytosanitaire a été mené auprès des utilisateurs agricoles et non agricoles, hors particuliers.

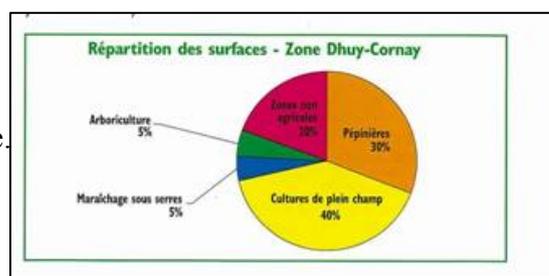


Figure 7 : Répartition des surfaces (Données Chambre d'Agriculture)

Pour chaque activité, les risques identifiés portent sur l'état des têtes de forages, la gestion des déchets de produits phytosanitaires, les stockages d'hydrocarbures et d'engrais, les remplissages des pulvérisateurs et les rejets sur des zones imperméabilisées et des serres.

Matières actives	Classe TGAP	Non agricole (en kg/200 ha)	Agricole (en kg/900 ha)	Concentrations Dhuy Moyenne été 2002	Concentrations Bras de Bou Moyenne été 2002
Atrazine	3	0	29,9	0,47	0,09
Simazine	3	0	23	0,04	0,03
Alachlore	3	0	39,1	0,40	0,01
Diuron	6	12,1	28,4	0,34	1,14
Isoproturon	6	0	105,2	0	0
Oxadixyl	1	0,28	22,2	0,11	1,57
Glyphosate	1	59,8	102,8	0,36	0,79
Oxadiazon	4	90,4	9,89	0,53	0,60

Les couleurs correspondent au SEQ Eau développé par les Agences de l'Eau.
 Pour l'oxadixyl et l'oxadiazon, les seuils de classe ne sont pas définis.
 La TGAP est une taxe basée sur la toxicité de la substance active (le niveau le plus toxique correspond à 6).

Figure 8 : Recensement par utilisateur des produits phytosanitaires (Données Chambre d'Agriculture)

L'évolution des pratiques agricoles

Durant sept années de travail, les pratiques agricoles ont évolué avec la réduction, puis l'arrêt en 2003, de l'usage de l'atrazine. La substitution a été totale sur les cultures de maïs. Les usages du diuron ont été également réglementés.

La collecte des déchets phytosanitaires

La collecte des emballages vides (boîtes, cartons, papiers, bidons et fûts) est gratuite et organisée deux fois par an depuis 2002. La participation des agriculteurs progresse d'année en année. En 2007, 70% de la production d'emballages vides a été collecté sur le département.

Pour la collecte des produits non utilisables, quatre collectes ont été organisées par la coopérative installée au centre de la zone.

Les équipements réalisés depuis 2000

Suite aux diagnostics des exploitations, et à la mise en évidence des risques de pollutions accidentelles, les principaux investissements ont été réalisés dans le domaine des stockages de produits phytosanitaires. Quelques aires lavages/remplissage des pulvérisateurs ont été réalisées ou le seront à court terme.

La récupération des eaux issues des aires imperméabilisées se développe en pépinière et les maraichers réfléchissent aux possibilités de recyclage des solutions nutritives.

En ce qui concerne les déchets verts, les exploitants privilégient l'épandage sur leur parcelle après stockage sur leur site de production ou le dépôt dans des bennes.

La mise en place de bandes enherbées

L'hydrogéologue agréé avait préconisé dans son avis la mise en place de bandes enherbées le long des cours d'eau situés dans le périmètre de protection rapprochée. La réforme de la PAC a aidé à mettre en place des bandes enherbées le long du Dhuy et du Bras de Bou. Actuellement près de 4 000 m de bandes enherbées sont en place sur les exploitations en grandes cultures.

La communication et la formation

La communication a été réalisée par l'édition de plaquettes à destination des agriculteurs sous forme de fiches pratiques. Ces plaquettes ont été déclinées sous forme de panneaux et présentées au public lors de journées de l'environnement et dans le cadre de l'enquête de DUP.

Deux formations aux bonnes pratiques de désherbage ont été organisées avec le GREPPES (Groupement pour l'Etude des Pollutions par les produits Phytosanitaires dans les Eaux et les Sols) à destination des agents communaux de voirie et des Espaces-verts des collectivités présentes sur les périmètres de protection rapprochée et éloignée.

Le suivi des eaux superficielles

Des campagnes annuelles d'analyse en pesticides des eaux superficielles sont réalisées sur le Bras de Bou et le Dhuy depuis 2002. Les résultats sont communiqués sous forme d'un bulletin à l'ensemble des acteurs de la zone. Elles confirment la forte contamination des eaux superficielles par les molécules phytosanitaires en particulier par les molécules utilisées pour le désherbage (alachlore, diuron, glyphosate et oxadiazon).

II.2. Les actions à venir

La convention reconduite confie deux types de missions à la Chambre d'agriculture :

- Une mission d'animation et de communication ;
- Une mission d'assistance technique pour la réalisation des travaux chez les exploitants agricoles :
 - o Réalisation de diagnostics individuels des équipements ;
 - o Définition des aménagements à prévoir ;
 - o Apport d'un appui technique et assurance du suivi et de la réception des travaux dans l'emprise de l'exploitation ;
 - o Fourniture de conseils pour la mise en œuvre du code de bonnes pratiques en agriculture.

IV. LES EFFETS A ATTENDRE

La mise en place effective des périmètres de protection et la réalisation des préconisations demandés dans l'arrête préfectoral ne seront peut être pas directement visibles sur la qualité des eaux.

- Les travaux engagés permettent de minimiser fortement le risque de pollutions accidentelles et de prévoir surtout la marche à suivre en cas de pollution dans la nappe.

- La mise en place de bonnes pratiques agricoles permettra de stabiliser la qualité des eaux et d'éviter un accroissement de la pollution chronique

Les effets à attendre ne seront peut être pas visibles tout de suite sur les évolutions des teneurs en phytosanitaires et en nitrate dans l'eau.

Il faut aussi profiter des opportunités qui se présentent comme l'arrachage des vergers à proximité des captages pour acquérir les parcelles voisines afin de gérer au mieux leur exploitation.

Les efforts engagés et à engager sont importants et mais l'implication de chacun des acteurs est un gage de réussite.

Références bibliographiques

(1) **BRGM, version actualisée du rapport N1732**. 2003 – Dossier de demande de déclaration d'utilité publique pour huit ouvrages de captages d'eau potable de la ville d'Orléans

(2) Arrêté préfectoral autorisant l'exploitation des captages de la ville d'Orléans – 19 avril 2006

(3) Convention pour la mise en œuvre de bonnes pratiques agricoles dans les périmètres de protection du Val 29 juin 2006

(4) **GEOHYD**, Détermination du protocole de comblement de puits et forages non utilisés – R/GHD H 06.24 – décembre 2006

- (5) **ANTEA**, inventaire des effondrements dans les périmètres rapprochée des captages du Val à Orléans (Loiret) – campagne 2007 – A48541/A
- (6) La protection des captages du val et l’agriculture du Val d’Orléans – fiche d’information éditée par la Chambre d’Agriculture du Loiret, la Lyonnaise des Eaux et la Ville d’Orléans
- (7) **Chambre d’agriculture du Loiret**, protection des captages du val – secteur Dhuy-Cornay : suivi de la qualité des eaux 2004 – Bilan annuel – GREPPES
- (8) **Chambre d’agriculture du Loiret**, protection des captages du val – secteur Dhuy-Cornay : Atlas des exploitations – août 2002

Pollutions diffuses et karst : exemple du système des Trois Fontaines (Loiret)

Nicole Baran⁽¹⁾, Michel Lepiller^{(2)†}, Christophe Mouvet⁽¹⁾

⁽¹⁾ BRGM – 3, avenue C. Guillemin BP36009 – 45060 Orléans cedex 2 – n.baran@brgm.fr,
c.mouvet@brgm.fr

⁽²⁾ Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans, 8 rue Léonard de Vinci - 45072 Orléans
cedex 2

I. INTRODUCTION

La détérioration de la qualité des eaux souterraines en relation avec les pratiques agricoles a été mise en évidence aux Etats Unis et en Europe (1, 2). Dans certains secteurs, les concentrations en produits phytosanitaires dans les eaux souterraines dépassent la valeur guide de $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$. Or, dans de nombreux pays (France, Royaume-Uni, Danemark, Suisse) l'alimentation en eau potable est assurée en grande partie par les eaux souterraines. En conséquence, la connaissance de la contamination, du transfert et du devenir des produits phytosanitaires représentent des enjeux majeurs pour la gestion des ressources en eau.

Au niveau national et international, peu d'études ont été publiées portant sur le suivi de la contamination des eaux souterraines par les produits phytosanitaires à l'échelle de systèmes hydrogéologiques pendant des périodes pluri-annuelles et avec une fréquence de mesures élevée (3-6). De plus peu d'études de cet type ont été réalisées en intégrant des volets hydrogéologique et hydrodynamique conséquents (3, 7).

L'atrazine (ATR) et l'isoproturon (IPU) sont des herbicides fréquemment détectés dans les eaux souterraines en France mais aussi au niveau international. (2, 8, 9). Le plus grand risque potentiel de lessivage de l'ATR comparativement à l'IPU a été démontré à l'aide d'études de sorption, de volatilisation et de minéralisation dans différents sols (10, 11). En ce qui concerne la craie, sous certaines conditions l'IPU peut être dégradé dans la zone non saturée et la zone saturée alors que l'ATR n'est jamais dégradée (12). Une autre étude a aussi montré que l'IPU était dégradé de façon plus importante que l'ATR dans la zone non saturée crayeuse (13). Ces deux études en complément aux observations faites sur les sols pourraient donc indiquer que l'ATR présente un risque de contamination des eaux souterraines en contexte de craie plus important que l'IPU.

En France, la craie représente un aquifère majeur largement utilisé pour l'AEP (Alimentation en Eau Potable) dans le bassin parisien. La craie représente aussi un enjeu fort au niveau international et notamment au Royaume Uni.

Les objectifs de l'étude présentées sont donc de i) caractériser la contamination des eaux souterraines d'un aquifère crayeux pendant une période de plusieurs années afin d'évaluer la variabilité temporelle de la contamination vis-à-vis de l'ATR et l'IPU et de leurs principaux produits de dégradation ii) d'estimer les flux de pesticides à l'échelle d'un système hydrogéologique et iii) d'identifier les mécanismes et les facteurs influençant le transfert des pesticides. Pour cela, l'exploitation de 17 années de suivi d'un bassin hydrogéologique karstique crayeux de 50 km^2 situé en contexte agricole a été réalisée en intégrant des approches hydrodynamiques, géochimiques et le suivi de la qualité des eaux.

II. MATERIELS ET METHODES

II.1. Le système hydrogéologique des Trois Fontaines: contexte hydrogéologique

Le système hydrogéologique des Trois Fontaines, situé dans la partie Est du département du Loiret, est développé dans la craie du bassin parisien (figure 1). D'un point de vue hydrogéologique, le système des Trois Fontaines largement étudié notamment via de vastes campagnes piézométriques, a une taille d'environ 50 km² et des limites relativement stables dans le temps (14). Deux groupes de sources constituent les exutoires principaux (sources des Trois Fontaines représentant 55% du débit total et les sources du Moulin de Loignes, 30 à 40% du débit total). Des sources mineures dans le lit de la Cléry constituent des exutoires de moindre importance. L'épaisseur de la zone non saturée est en moyenne de 25 m mais peut atteindre une quarantaine de mètres localement. Le substrat est constitué de craie moins perméable. L'aquifère est libre.

Le réseau hydrographique de surface a un fonctionnement intermittent. Des pertes de ruissellement ont été observées et différents traçages ont révélé des vitesses de circulation de plusieurs mètres par heure, signe de la karstification du système. Toutefois l'absence de conduits pénétrables semble indiquer que le degré de karstification est limité.

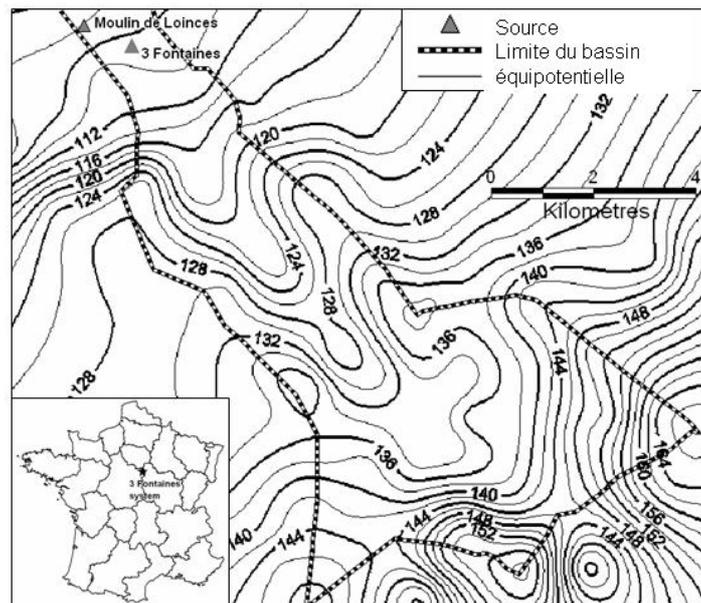


Figure 1 : Localisation du système hydrogéologique karstique des Trois Fontaines et piézométrie

II.2. Données climatiques

Une station météorologique gérée par MétéoFrance se trouve sur le bassin à environ 11 km au sud des sources. Bien qu'installée depuis 1971, des séries de mesures complètes ne sont disponibles que depuis 1983. Les précipitations annuelles par année hydrologique (septembre à Août) varient d'un facteur 2 (517.2 et 1002.1 mm pour l'année 1991-92 et 2000-01, respectivement) pour la période 1982-2005, avec une moyenne annuelle de 734.6 mm. L'année 2004-05 montre un déficit pluviométrique important qui intervient après 3 années

proches de la moyenne. L'estimation des périodes de retour (correspondant à la probabilité de dépassement p) pour les années sèches et $1/(1-p)$ pour les années humides montre le caractère exceptionnel des années 1991-92 (très déficitaire) et 2000-01 (très excédentaire). L'évapotranspiration potentielle considérée est estimée au site le plus proche (70 km à l'ouest du bassin). Les valeurs maximales ont été mesurées en 1990 et 2003 (1 011.4 et 952.8 mm, respectivement), alors que la moyenne est de 817 mm. Les valeurs minimales (inférieures à 700 mm) ont été enregistrées par ordre croissant en 1981, 1979, 1978, 1987, 1980, 1988.

II.3. Débits et niveaux piézométriques

Le débit des sources des Trois Fontaines ont été enregistrés de manière continue entre janvier 1989 et décembre 1999, novembre 2000 à décembre 2003, juillet 2004 à mai 2006 (figure 2). La mesure de la hauteur d'eau est convertie en débit à l'aide d'une courbe de calibration régulièrement validée et consolidée par des jaugeages au micro-moulinet. Les mesures de débit sont fiables jusqu'à la valeur de 198 L s^{-1} . Au-delà de cette valeur, la mesure est biaisée par la Cléry située 100 m en aval qui, lorsqu'elle est en crue, bloque les écoulements.

Alors qu'au début du suivi les sources n'étaient utilisées que quelques heures par jour pour l'alimentation en eau potable, l'installation en mars 2005 d'une nouvelle usine nécessitant la mise en eau continue des lits bactériens, a contribué à une augmentation des débits pompés et surtout à générer des prélèvements continus. Les débits considérés sont corrigés des volumes pompés.

Trois campagnes piézométriques à forte densité de mesures (2 à 3 mesures par kilomètres carrés) ont été menées en février 1988, septembre 1990 et mars-avril 2003. Les mesures manuelles effectuées hebdomadairement depuis janvier 1990 au forage de la Bissaugerie localisé dans la partie amont du bassin permettent de juger des fluctuations de la piézométrie et en relation avec les variations climatiques tout au long du suivi.

II.4. Contexte agro-pédologique

Environ 1000 observations de terrain et 270 sondages à la tarière à main ont permis à l'INRA d'établir la carte des sols du secteur (15) et de définir 3 unités pédologiques majeures : 1) les sols lessivés appelés luvisols de texture limono-argileuse et souvent hydromorphiques (51% de la surface du bassin et plutôt dans la partie aval), 2) les sols dégradés (34% du bassin et plutôt dans la partie amont) qui correspondent à des luvisols dégradés et 3) les sols alluviaux et colluviaux présents dans les thalwegs (15%), sols pouvant être caillouteux.

Le bassin se trouve dans un contexte d'agriculture intensive de polyculture. Environ 80% de la surface correspondent à des sols cultivés, 12% à de la forêt, 8 % pour les zones habitées, les routes et des secteurs d'exploitation de pétrole.

Les pratiques culturales (assolement et traitements phytosanitaires) sont connues de manière disparate. Pour la période 1992-93 à 1996-97, des enquêtes ont été réalisées auprès d'agriculteurs couvrant environ 50% de la surface exploitée. Les céréales et notamment le blé apparaissent comme les cultures majoritaires avec plus de 50% de la surface agricole utile. Le maïs, le colza, le tournesol et la jachère occupent environ 10% chacun. Conséquence directe de l'utilisation du sol, l'IPU apparaît comme la molécule phytosanitaire la plus largement utilisée (24% de la masse des pesticides utilisés), vient ensuite la trifluraline, un autre herbicide utilisé sur céréales, colza et tournesol, (6%), et enfin d'autres molécules dont l'ATR qui été utilisée à l'époque comme herbicide du maïs (5%). Une enquête auprès des autres utilisateurs potentiels de phytosanitaires (SNCF, voiries, services municipaux) a montré que l'IPU et l'ATR avaient des usages uniquement agricoles pendant la période d'étude.

La lourdeur de la démarche d'enquêtes et le grand nombre d'agriculteurs (plus de 60) n'a pas permis de poursuivre cette approche après 1997. Les pratiques sont donc estimées en fonction de l'évolution de la législation et des pratiques régionales. Au niveau national, la dose maximale autorisée pour l'IPU est passé de 1 800 to 1 200 g ha⁻¹ au 1^{er} janvier 2004 alors que pour l'ATR, la dose autorisée en 1959 de 2 500 g ha⁻¹ a été réduite à 1 500 en 1990, puis 1 000 g ha⁻¹ en 1997, avant d'être interdite le 1^{er} septembre 2003. Pour l'azote, aucune information spécifique n'est disponible sur le bassin mais au niveau régional, les quantités vendues sont stables avec environ 111 t d'azote par an (+/- 14.5 t) pour 33 années culturales (1972/73 à 2004/05 – données Unifa, 2007).

II.5. Suivi et analyses

Deux herbicides, l'IPU et l'ATR, et leurs principaux métabolites, le monodesmethylisoproturon (MDIPU), le didesmethylisoproturon (DDIPU), la desethylatrazine (DEA) et la desisopropylatrazine (DIA), ont été recherchés pendant 13 années (du 2 février 1993 au 16 mai 2006) soit un total de 476 échantillons collectés tous les 10 jours en moyenne (+/- 17 jours), la plus longue interruption ayant eu lieu entre le 1^{er} juin 2004 et le 19 avril 2005. Dans la mesure où la période de suivi est particulièrement longue, les techniques d'extraction et d'analyses ont évolué au cours du temps mais correspondent toujours à une limite quantification maximale de 0.05 µg L⁻¹ pour chacune des molécules suivies.

Les ions chlorure et nitrate ont été mesurés 1330 fois depuis le 25 janvier 1989 à raison d'un prélèvement tous les 4.75 jours en moyenne (+/- 9.1 j). La précision des mesures est de moins de 10 %.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. Fonctionnement hydrodynamique

Les différentes campagnes piézométriques ont permis de montrer la stabilité des limites du système dans le temps et d'identifier une zone à plus faible gradient hydraulique correspondant à un axe de drainage orienté SE-NO et témoignant de l'existence d'une zone plus karstifiée (figure 1). Au niveau du captage de la Bissaugerie (8600 m en amont des sources de Trois Fontaines), les fluctuations piézométriques sont de 17.02 m avec un minimum de 123.95 m enregistré le 17 septembre 1993 et un maximum de 140.97 le 14 mars 2002 en réponse aux variations climatiques, la période 1988-1993 correspondant à 5 cycles hydrologiques déficitaires consécutifs alors que 1999, 2000 et 2001 ont été des années humides.

En plus de ces cycles inter-annuels des cycles intra-annuels plus ou moins visibles selon les années, se distinguent avec des périodes de basses eaux en septembre-novembre et des périodes de hautes eaux en mars-mai.

Ces variations du niveau piézométrique sont corrélées avec les fluctuations du débit des sources pour lequel des cycles intra et inter-annuels sont aussi visibles (figure 2). D'une manière globale, le débit diminue fortement jusque environ 30 L s⁻¹ en automne 1993 en réponse au déficit pluviométrique des années 1988-1993. Ensuite le débit augmente pour devenir supérieur à 100 L s⁻¹ jusque 2001-2003. En plus de cette tendance générale, des variations de débit à l'échelle du cycle hydrologique sont observées (hautes eaux – basses eaux). Enfin un troisième type de variation à plus court pas de temps est observé. Il

correspond à des variations associées à des périodes très pluvieuses (juin 1993 par exemple), qui peuvent intervenir à n'importe quel moment du cycle hydrologique et pas uniquement lorsque le sol est saturé. Il correspond à de l'infiltration immédiate qui est caractérisée par une eau s'infiltrant rapidement au sein d'une porosité large (fissures et/ou conduits). L'infiltration immédiate qui correspond à une réponse rapide du système à une impulsion pluviométrique peut s'accompagner d'une forte augmentation des teneurs en chlorure et nitrate, ions qui ont été stockés et concentrés au niveau du sol à cause de l'évapotranspiration (14). L'examen des données de débit révèle donc l'existence de circulations lentes et rapides au sein de l'aquifère.

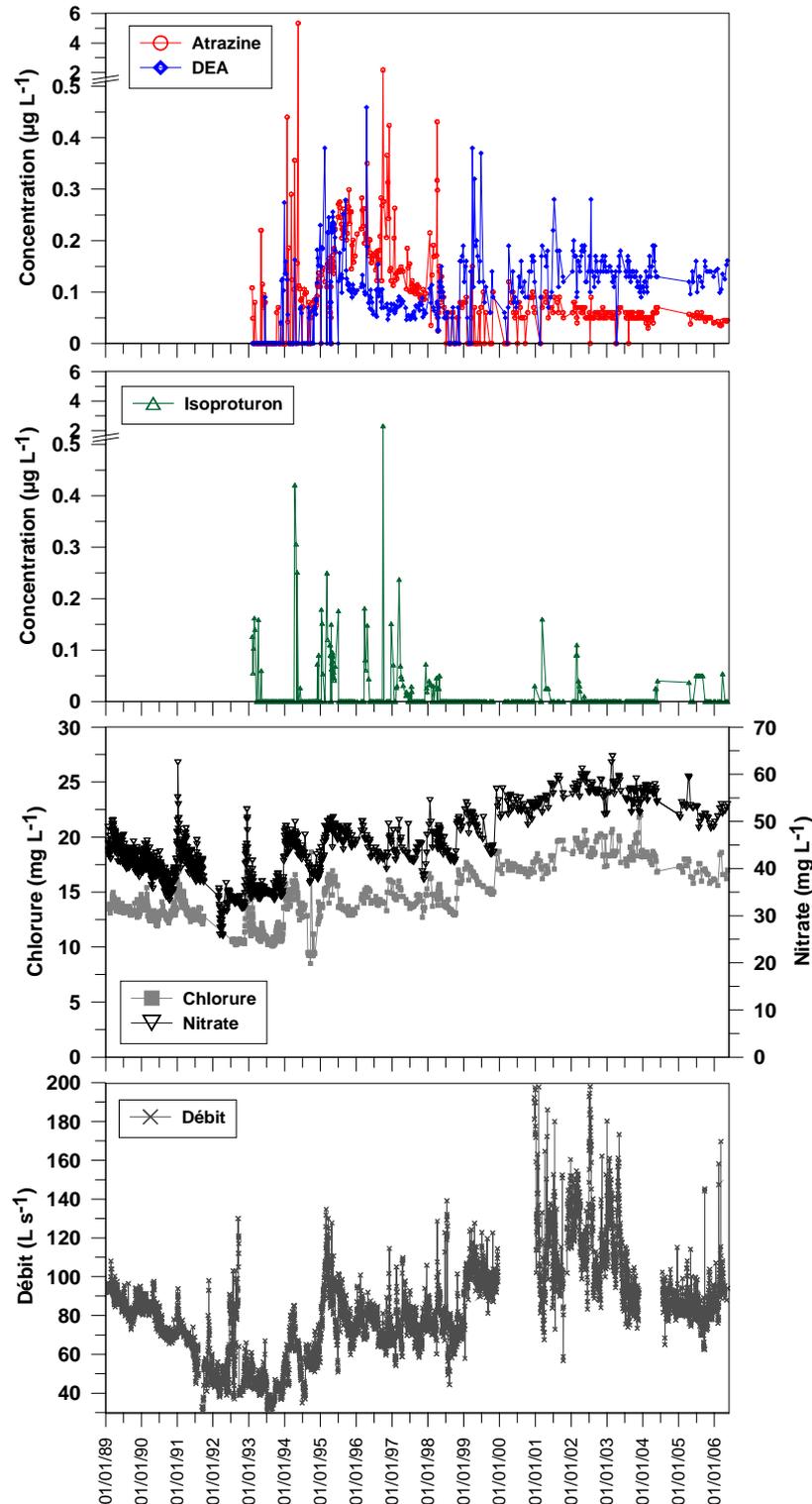


Figure 2 : Teneurs en atrazine, deethylatrazine, isoproturon, chlorure et nitrate et débit mesurés à la source des Trois Fontaines de janvier 1989 à mai 2006

III.2. Chronique des teneurs en nitrate

Les teneurs en nitrate ont fluctué d'un facteur 2.5 pendant le suivi allant 25.7 mg L⁻¹ le 12 avril 1992 à 63.8 mg L⁻¹ le 7 février 2003 (figure 2). D'une manière globale, les concentrations diminuent entre 1988 et l'été 1992 pour croître à nouveau et atteindre leur maximum en 2001 et 2002. Cette tendance est similaire à celle des débits. D'ailleurs débit et teneurs en nitrate sont significativement corrélés ($r = 0.676$; $n = 1184$). Cela signifie donc que les augmentations de débit s'accompagnent d'une détérioration de la qualité de l'eau vis-à-vis du paramètre nitrate. A la source, pendant les longues périodes sèches, la teneur en nitrate décroît vraisemblablement parce que le débit est alors essentiellement constitué par de l'eau plus ancienne provenant des secteurs à infiltration plus lente et vraisemblablement moins contaminée comme le suggèrent (5). Dans le cas présent, les variations de teneur en nitrate semblent plus vraisemblablement liées à un changement de contexte hydrodynamique qu'à une évolution des pratiques culturales, pratiques qui au niveau régional sont stables en terme de vente de fertilisants sur plusieurs décennies.

III.3. Chronique des teneurs en Isoproturon

L'isoproturon a été quantifié dans 23% des échantillons collectés à l'exutoire du système (108 fois sur 476 échantillons – figure 2) avec une concentration maximale de 2.32 µg L⁻¹, le 2 octobre 1996. Une chronique de ce type avec la présence d'IPU sous forme de pics a aussi été observée dans un autre aquifère crayeux (18). Dans notre cas, les concentrations en IPU et les débits ne sont pas corrélés indiquant que, contrairement à ce qui est observé pour les nitrates, le débit n'est pas le seul facteur influençant les variations de concentrations en IPU. Toutes les détections d'IPU sont en relation avec les deux périodes de traitement potentielles (en début d'hiver ou début de printemps), deux périodes qui correspondent à des situations hydrologiques différentes (début et fin de la recharge). Ces pics suggèrent en fait l'existence d'épisodes d'infiltration rapide capables de mobiliser le soluté qui vient d'être appliqué.

Jusqu'à l'été 1995, les concentrations en IPU sont corrélées aux concentrations en chlorure et nitrate ($r = 0.272$ et 0.199 , respectivement). Comme il s'agit d'indicateur d'infiltration, la faible corrélation suggère qu'un autre facteur que l'infiltration immédiate gouverne les teneurs en IPU. Ce facteur est probablement la disponibilité au lessivage de l'IPU. En effet, cette molécule n'est mobilisable que pendant quelques semaines après son application suite à la mise en place de processus de dégradation ou à la formation de résidus liés (16, 17). Ces auteurs ont d'ailleurs montré que le délai entre l'application et le premier épisode pluvieux significatif avait une incidence sur la qualité d'IPU lessivée.

Supposant que sur la durée du suivi les usages relatifs à l'IPU ont peu changé, la localisation des parcelles traitées sur le bassin pourraient aussi avoir une incidence et expliquer la variabilité des concentrations observées d'une année à l'autre. En effet, Johnson et al. (18) ont montré que dans des secteurs où la zone non saturée crayeuse est peu épaisse (5 m), des infiltrations rapides de solutés peuvent être observées même si il n'y a qu'une faible variation du potentiel de pression dans la craie (en relation avec la teneur en eau). Haria et al. (19) ont aussi montré que des flux rapides et matriciels existent sous les vallées sèches alors que seuls des écoulements matriciels sont observés dans les interfluves. Enfin le contexte

hydrodynamique global avec des alternances d'années sèches et humides doit être pris en compte car il joue sur le fonctionnement des fissures (20).

Les 2 principaux métabolites de l'IPU, le MDIPU et le DDIPU, ont été analysés entre décembre 1994 et mai 1995 et entre avril 1998 et mai 2006. Le DDIPU n'a jamais été détecté alors que le MDIPU n'a été détecté que 2 fois (23 mars 1995 et 29 mars 1995) à des teneurs proches de $0.05 \mu\text{g L}^{-1}$. Dans certains cas, le MDIPU peut apparaître dans la zone non saturée ou saturée de la craie (12). La presque totale absence des 2 métabolites est en accord avec les observations faites dans le cadre d'autres études (3).

III.4. Chronique en Atrazine et produits de dégradation

L'ATR et la DEA (figure 1) ont été détectées beaucoup plus fréquemment que l'IPU (394 et 393 fois, respectivement, sur 476 échantillons – figure 2), avec des concentrations maximales de $5.3 \mu\text{g L}^{-1}$ pour l'ATR le 20 mai 1994 et $1.86 \mu\text{g L}^{-1}$ pour la DEA le 2 Octobre 1996 alors que l'atrazine a été beaucoup moins appliquée que l'IPU (4.5 à 6 fois moins entre 1992-93 et 1996-97, c'est-à-dire avant même que la dose homologuée soit réduite en 1997 et l'interdiction de 2003). La DIA n'a été détectée que sporadiquement toujours à des teneurs très proches de la limite de quantification. Ces observations sont en accord avec celles de Rowden et al. (5) qui étudiant un karst sur 18 ans ont montré que les concentrations en ATR, DEA and DIA dépassaient la teneur de $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ dans 86, 72 and 0 % de leurs échantillons, respectivement.

Entre 1993 et la fin 1998, les variations globales en ATR semblent liées aux variations globales de débit avec notamment une augmentation des teneurs après les périodes de recharge qui ont conduit à une augmentation du débit de base. Ensuite les teneurs ont tendance à décroître malgré la forte recharge et les forts débits de 2001-2003. Les teneurs en DEA sont corrélées aux débits pendant tout le suivi ($r = 0.282$ $n = 385$), alors que l'atrazine ne l'est pas.

Comme pour l'IPU, certains pics d'ATR (19 mai 1994, 30 avril 1996, 22 mai 1997) semblent en relation avec les périodes d'application (avril, mai) et pourraient être expliqués par des épisodes d'infiltration immédiate. D'autres pics (2 octobre 1996, 27 janvier 1994, 4 décembre 1996) ne sont pas en lien avec d'éventuelles applications et semblent indiquer que après une période de stockage, l'atrazine peut être remobilisée par un épisode d'infiltration immédiate survenant plusieurs mois après l'application.

Le bruit de fond en ATR, caractérisé par un signal de long durée et de faible amplitude augmente entre décembre 1994 et le printemps-été 1995 lorsque la recharge augmente. Pendant cette période, l'infiltration lente est probablement dominante. Ensuite le bruit de fond diminue fortement jusqu'à l'été 1998 puis progressivement et lentement. La concentration en ATR décroît alors que la recharge augmente jusqu'en 2002-03 suggérant que l'eau atteignant l'aquifère par un transfert plutôt lent n'est pas aussi contaminée que l'eau de recharge de 1994-95.

La DEA est détectée plus systématiquement depuis la fin 1994 avec une augmentation du bruit de fond. Des pics en relation avec des épisodes d'infiltration rapide sont également visibles. La persistance de l'ATR et de la DEA presque 3 ans après l'interdiction d'usage sont en accord avec d'autres études (3, 7).

III.5. Flux en solutés quittant le système

Les flux journaliers sont calculés de la manière suivante : $F_d (\mu\text{g.d}^{-1}) = C_d \times Q_d$

où C_d est la concentration mesurée à la source le jour d ou linéairement interpolé entre deux mesures ($\mu\text{g L}^{-1}$). Lorsque que la valeur est inférieure à la limite de quantification, la concentration considérée est égale à la valeur de la limite de quantification divisée par 2. Q_d est le débit moyen journalier mesuré (L d^{-1}).

Les flux ont été cumulés par année hydrologique lorsque toutes les données (débit, qualité) étaient disponibles. Les quantités de nitrate quittant le système au niveau des sources des Trois Fontaines varient d'un facteur presque 3 : 54 t (1992-93) à 141 t (1998-99). Cette variabilité est peu probablement liée aux variations des quantités appliquées, les ventes dans la région étant relativement constantes sur les 30 dernières années.

Pour les phytosanitaires, le flux cumulé d'ATR+DEA varie de 469 g (1993-94) à 915 g (1996-97), ce qui correspond à 0.26 et 0.57% des quantités apportées ces deux années. Ces valeurs sont probablement surestimées car les enquêtes n'ont porté que sur une partie du bassin (environ 50-60% du bassin). La détection d'ATR plusieurs années après les dernières applications met en exergue le fait qu'il est difficile de comparer les sorties du système à une date d'application. Par conséquent il pourrait être plus judicieux de raisonner en considérant les pratiques moyennes et non pas en pratiques connues une année spécifique. Ainsi, considérant une surface en maïs de 250 ha et une dose moyenne de $1\,500\text{ g ha}^{-1}$, les flux minimum et maximum en ATR +DEA correspondent à 0.11 et 0.24% de la quantité d'ATR théoriquement appliquée. Considérant que les sources des Trois Fontaines représentent 50 % du débit total, cela suggère que moins de 0.5% des quantités appliquées quittent le système bien que la valeur guide de $0.1\ \mu\text{g L}^{-1}$ retenue pour l'AEP puisse être dépassée.

Pour l'IPU, quelque soit l'année considérée, le flux aux sources correspond à moins de 0.03% des quantités appliquées soit moins de 0.06 % à l'échelle du système, une valeur bien plus faible que la valeur mesurée (0.2%) dans un cas défavorable d'un aquifère crayeux (19) mais similaire aux 0.02 % estimés dans un autre contexte hydrogéologique (4).

IV. CONCLUSION

Le système des Trois Fontaines a fait l'objet d'un suivi à haute fréquence de mesures pendant 17 cycles hydrologiques le rendant à ce titre exceptionnel aussi bien au niveau national qu'international. Les chroniques en produits phytosanitaires et métabolites associés sont différentes d'une molécule à une autre et pour une molécule donnée au cours du temps. Bien que l'IPU soit la molécule la plus appliquée, l'IPU est moins souvent détecté que l'ATR et son métabolite DEA, l'ATR n'étant pourtant plus appliquée depuis 2003. Cette variabilité de la fréquence de détection souligne l'importance des propriétés physico-chimique des molécules sur la contamination des eaux souterraines. En terme de bilan, moins de 0.6% de des quantités d'IPU ou d'ATR appliqués quittent le système annuellement provoquant toutefois des dépassements de la valeur guide de $0.1\ \mu\text{g L}^{-1}$.

La qualité de l'eau à l'exutoire du système dépend du mélange d'eaux de différentes origines (infiltration immédiate, infiltration lente) dont les proportions varient au cours du temps en fonction des conditions climatiques. L'utilisation de données géochimiques couplées à des suivis hydrologiques permet de mettre en évidence la contribution de ces différents réservoirs. Les concentrations en produits phytosanitaires et métabolites associés apparaissent donc clairement gouvernés par la combinaison des propriétés spécifiques aux molécules et au contexte hydrodynamique. Seul un suivi pluri-annuel permet de mettre en évidence d'évaluer correctement l'impact des différents facteurs. L'interprétation des données et la prédiction de l'évolution de la qualité passe donc nécessairement par une bonne connaissance du comportement des molécules elles-mêmes mais aussi du fonctionnement hydrodynamique du système. Ces aspects sont indispensables pour prévoir l'évolution de la qualité de l'eau,

comprendre les tendances, points qui sont abordés au travers de la Directive Européenne Cadre sur l'Eau.

Remerciements

Les travaux présentés constituent la synthèse de différents projets financés par le Conseil Régional du Centre (bourses de thèses de E. Lasne and N. Baran), des Agences de l'Eau Loire-Bretagne et Seine-Normandie, les Ministères de l'Environnement et de la Recherche via les fonds de recherche du BRGM. Les auteurs remercient le syndicat des eaux de la Cléry et la SAUR, société exploitante de la station AEP, ainsi que les agriculteurs présents sur le bassin pour leur collaboration tout au long de ces années.

Ce document simplifié est largement inspiré de l'article accepté dans Journal of Hydrology auquel il sera possible de se référer pour plus de précisions.

Références bibliographiques

- (1) **Barbash, J.E., Thelin, G.P, Kolpin, D.W., Gilliom, R.J.**, 2001 - Major herbicides in ground water: Results from the national water-quality assessment. *J. Environ. Qual.* 30, 831–845.
- (2) **IFEN**, 2004 - Les pesticides dans les eaux – Sixième bilan annuel – données 2002. Collection Etudes et travaux, n°42, Ifen, Orléans, 32 p. ISBN : 2-911089-70-7. (Detailed results on CD-Rom).
- (3) **Baran, N., Mouvet C., Négre P.** 2007 - Hydrodynamic and geochemical constraints on pesticide concentrations in the groundwater of an agricultural catchment (Brévilles, France). *Environ. Poll.*, 148:729-738
- (4) **Morvan, X., Mouvet, C., Baran, N., Gutierrez, A.**, 2006 - Pesticides in the groundwater of a spring draining a sandy aquifer: temporal variability of concentrations and fluxes. *J. Contam. Hydrol.* 87, 176-190.
- (5) **Rowden R.D., Liu H., Libra R.D.**, 2001 - Results from the Big Spring basin water quality monitoring and demonstration projects, Iowa, USA. *Hydrogeol. J.* 9, 487-497.
- (6) **Lapworth, D.J., Gooddy, D.C., Stuart, M.E., Chilton, P.J., Cachandt, G., Knapp, M., Bishop, S.** 2006 - Pesticides in groundwater: some observations on temporal and spatial trends. *Water Environ. J.* 20: 55-64.
- (7) **Lapworth, D.J., Gooddy, D.C.**, 2006 - Source and persistence of pesticides in a semi-confined chalk aquifer of southeast England. *Environ. Pollut.* 144, 1031-1044.
- (8) **Carabias-Martínez, R., Rodríguez-Gonzalo E., Fernández-Laespada E., Calvo-Seronero L., Sanchez-San Roman F.J.**, 2003 - Evolution over time of the agricultural pollution of waters in an area of Salamanca and Zamora (Spain), *Water Res.* 37, 928–938
- (9) **Gooddy, D.C., Bloomfield, J.P., Chilton, P.J., Johnson, A.C., Williams, R.J.**, 2001 - Assessing herbicide concentrations in the saturated and unsaturated zone of a chalk aquifer in Southern England. *Groundwater* 39, 262-271.
- (10) **Boivin, A., Cherrier, R., Schiavon, M.**, 2005 - A comparison of five pesticides adsorption and desorption processes in thirteen contrasting field soils. *Chemosphere* 61, 668-676.
- (11) **Mordaunt, C.J., Gevao, B., Jones, K.C., Semple, K.T.**, 2005 - Formation of non-extractable pesticide residues: observations on compound differences, measurement and regulatory issues. *Environ. Pollut.* 133, 25-34.
- (12) **Johnson, A.C., White, C., Bhardwaj, C.L.**, 2000 - Potential for isoproturon, atrazine and mecoprop to be degraded within a chalk aquifer system. *J. Contamin. Hydrol.* 44, 1-18.
- (13) **Issa S., Wood M.**, 1999 - Degradation of atrazine and isoproturon in the unsaturated zone: a study from Southern England. *Pesticide Science* 55: 539-545.

- (14) **Lasne, E.**, 1992 - Etude du système hydrologique karstique des sources des Trois Fontaines (Saint-Loup de Gonois, Loiret). Contribution à la connaissance de la structure, du fonctionnement et de l'évolution de l'aquifère crayeux du Gâtinais (Sud est du Bassin de Paris). Thèse.
- (15) **Baran, N.**, 1999 - Transit de l'isoproturon et de l'atrazine dans un système hydrologique karstique de la craie (Gâtinais-France) : de la station pédologique expérimentale à l'échelle du système. Documents BRGM 284, Editions BRGM, 329p. these
- (16) **Perrin-Ganier, C., Breuzin, C., Portal, J.M., Shiavon, M.**, 1996 - Availability and persistence of IPU under field and laboratory conditions. *Ecotox. Environ. Safe.*, 35, 226-230.
- (17) **Walker, A., Rodriguez-Cruz, M.S., Mitchell, M.J.** 2005 - Influence of ageing of residues on the availability of herbicides for leaching. *Environ. Pollut.* 133, 43-51.
- (18) **Johnson, A.C., Besien, T.J., Bharwaj, C.L., Dixon, A., Gooddy, D.C., Haria, A.H., White, C.**, 2001 - Penetration of herbicides to groundwater in an unconfined chalk aquifer following normal soil applications. *J. Contam. Hydrol.* 53,101-117.
- (19) **Haria, A.H., Hodnett, M.G., Johnson, A.C.**, 2003 - Mechanisms of groundwater recharge and pesticide penetration to a chalk aquifer in southern England. *J. Hydrol.* 275, 122-137.
- (20) **Brouyère, S., Dassargues, A., Hallet, V.**, 2004 - Migration of contaminants through the unsaturated zone overlying the Hesbaye chalky aquifer in Belgium: a field investigation. *J. Contam. Hydrol.* 72, 135-164.

Traçages et limites des bassins versants : exemple du système des Trois Fontaines (Loiret)

Bruno LECLERC

Géo-Hyd – Parc du Moulin, 101, rue Jacques Charles – 45160 Olivet
bruno.leclerc@geo-hyd.com

I. INTRODUCTION

La source des Trois Fontaines est utilisée pour l'adduction en eau potable du Syndicat des eaux de la Cléry depuis de nombreuses années. Elle constitue la seule ressource en eau du Syndicat.

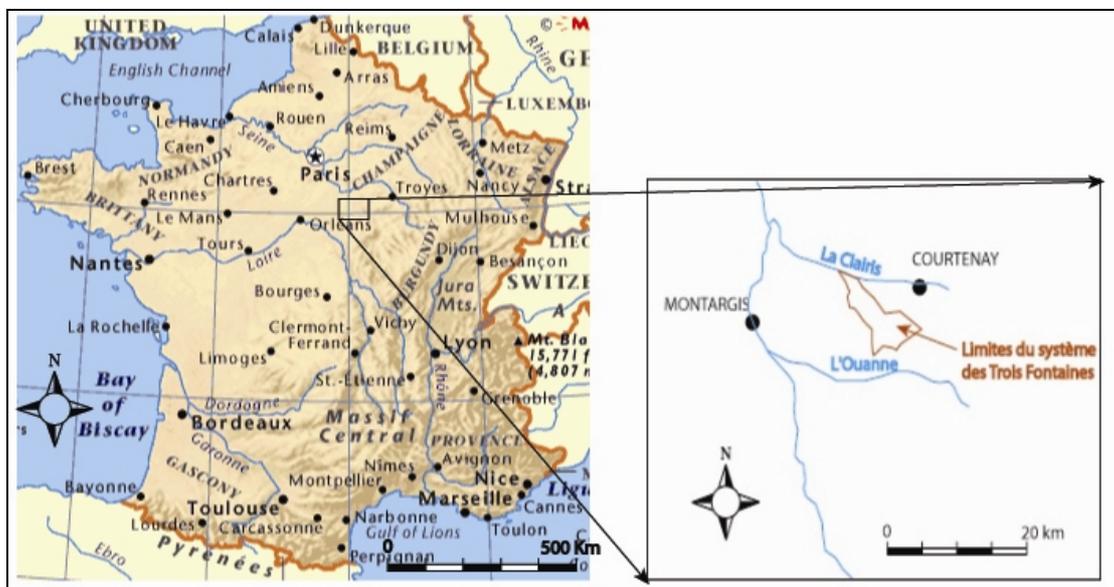


Figure 1 : Localisation du système hydrogéologique karstique des Trois Fontaines

En raison de la relative proximité du site avec l'Université d'Orléans, de son intérêt scientifique et de l'importance de mieux connaître cette ressource très vulnérable, de nombreuses études ont été menées par Michel LEPILLER et le Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Orléans dès la fin des années 80 avec en particulier deux travaux de thèses :

- Celle d'Éric LASNE (1989-1992) avait pour sujet principal la structure et l'évolution de l'aquifère crayeux (1).
- La thèse de Nicole BARAN (1993-1996) avait pour sujet l'étude du transit de l'isoproturon et de l'atrazine dans le système hydrogéologique des Trois Fontaines (2).

Plusieurs traçages ont été réalisés durant ces deux thèses.

Dans le cadre de la révision du périmètre de protection des captages (seules deux des quatre émergences principales étaient captées jusqu'en 2006) douze nouveaux traçages ont été réalisés en 2005 et 2006.

II PRESENTATION DU CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DU SYSTEME DES TROIS FONTAINES

Le substratum régional est constitué par la craie séno-turonienne dont l'épaisseur atteint 280 m (140 m pour le Turonien, 80 m pour le Coniacien et 60 m pour le Santonien). C'est le niveau terminal du Santonien qui affleure dans la vallée de la Cléry et qui constitue l'aquifère du système karstique des Trois Fontaines. D'une manière générale dans le Gâtinais, la craie n'est visible que dans les vallées. Sur les plateaux, elle est recouverte par un épais complexe argilo-sableux à silex (parfois plus de 20 m), résultat de l'altération sous climat chaud et de l'érosion des assises crayeuses à partir du Campanien.

D'un point de vue tectonique, la région est marquée par deux traits majeurs :

- un pendage général des assises secondaires vers le Nord-Ouest,
- une tectonique cassante de direction Nord-Sud se rattachant aux grands systèmes de failles subméridiennes du fossé de la Loire et de la bordure septentrionale du Morvan.

Du point de vue hydrogéologique, l'aquifère crayeux renferme une nappe libre qui s'écoule globalement vers le nord sur la zone d'alimentation des sources des Trois Fontaines. La nappe est alimentée principalement par de l'infiltration diffuse mais quelques zones de perte plus ou moins bien identifiées participent à la recharge de la nappe. Ces zones d'infiltration rapides sont localisées dans des vallées à écoulement temporaire, sur les parties intermédiaires du bassin versant, là où la couverture tertiaire a été presque totalement érodée.

III traçages réalisés en 2005-2006

III.1 Traceurs utilisés

Cinq traceurs fluorescents différents ont été utilisés. Il s'agit de :

- l'uranine ou sel sodique de la fluorescéine,
- l'éosine,
- le naphthionate,
- l'acide aminé G,
- la sulforhodamine G.

Les quantités de traceur injecté ont varié entre 100 g et 2 kg (1kg le plus souvent).

III.2 Lieux et dispositifs de surveillance

Les traceurs ont été recherchés sur des échantillons d'eau prélevés au niveau des 4 sources F1, F2, F3 et F4 des Trois Fontaines. Sur ces 4 points, les prélèvements ont été faits avec des préleveurs automatiques. Le pas de temps d'échantillonnage a varié entre 2 et 4 heures (en fin de suivi), soit au total 288 échantillons prélevés par source.

Quelques échantillons manuels ont également été prélevés aux sources de Chantecoq, Courtemaux, Champ Pelledieu (commune de La Selle-sur-le-Bied) et Le Moulin de Loince (commune de La Selle-sur-le-Bied).

III.3 Mode de recherche du traceur dans les échantillons prélevés

La recherche et le dosage des traceurs ont été effectués par Géo-Hyd à l'aide d'un spectrofluorimètre SAFAS FLX Xenius XC, aux longueurs d'ondes d'excitation et d'émission respectives de 328 et 420 nm pour le naphthionate, 352 et 446 nm pour l' amino G acide, 486 et 516 nm pour l'uranine, 516 et 536 nm pour l'éosine et 530 et 552 nm pour la sulforhodamine. Les échantillons ont été laissés au repos pendant plusieurs jours avant la mesure, afin de permettre la décantation des éventuelles matières en suspension. Celles-ci se sont avérées relativement peu abondantes.

III.4 Résultats

Sur les douze traçages réalisés, huit ont donné lieu à restitution. Les quatre traceurs injectés au Nord de la Cléry sont ressortis aux sources de Champ Pelledieu (cf. annexe 1 et 2).

Le traceur déversé dans la vallée Saint-Jacques au point de rejet de la station d'épuration de Chuelles a été détecté sur quelques échantillons manuels prélevés sur la source de Courtemaux.

Les injections réalisées à partir de la perte des Sapins, de la perte des Gonguets et du forage de la Bissaugerie ont été retrouvées aux quatre sources des Trois Fontaines.

III.4.1. INJECTION D'URANINE A BOIS BARREAUX

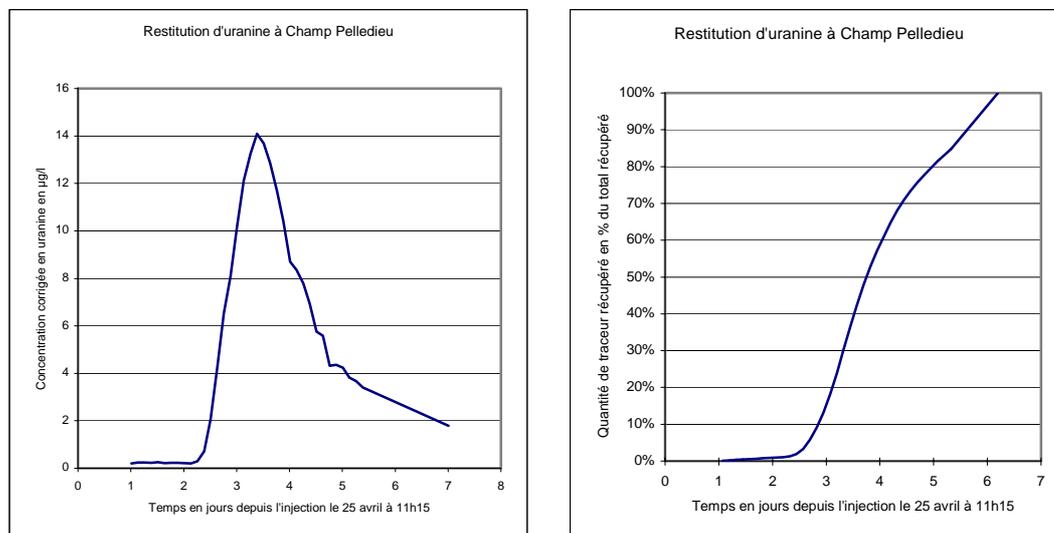


Figure 2 : Courbe de restitution à Champ Pelledieu Courbe cumulative à Champ Pelledieu

Restitution	Sources de Champ Pelledieu
Date d'injection :	25/04/05 à 11h45
Distance apparente :	2 975 m
Début de restitution :	27 avril à 18h00 (soit 2,26 jours)
Fin de restitution :	Postérieure au 2 mai à 12h00 (soit 7 jours)
Maximum de concentration :	14,09 µg/l le 28 avril à 21h00
Temps modal :	3,4 jours

Temps moyen de séjour :	Environ 3,8 jours*
Vitesse apparente maximale de circulation	56 m/h
Vitesse apparente moyenne de circulation	33 m/h*
Quantité de traceur récupéré	70 g (sur la base d'un débit moyen de la source de 30 l/s)
Pourcentage de traceur récupéré	70 %

* La restitution n'était pas totalement terminée lors de l'arrêt de la surveillance

III.4.2. INJECTION D'AMINO G ACIDE AU FORAGE DE LA BISSAUGERIE

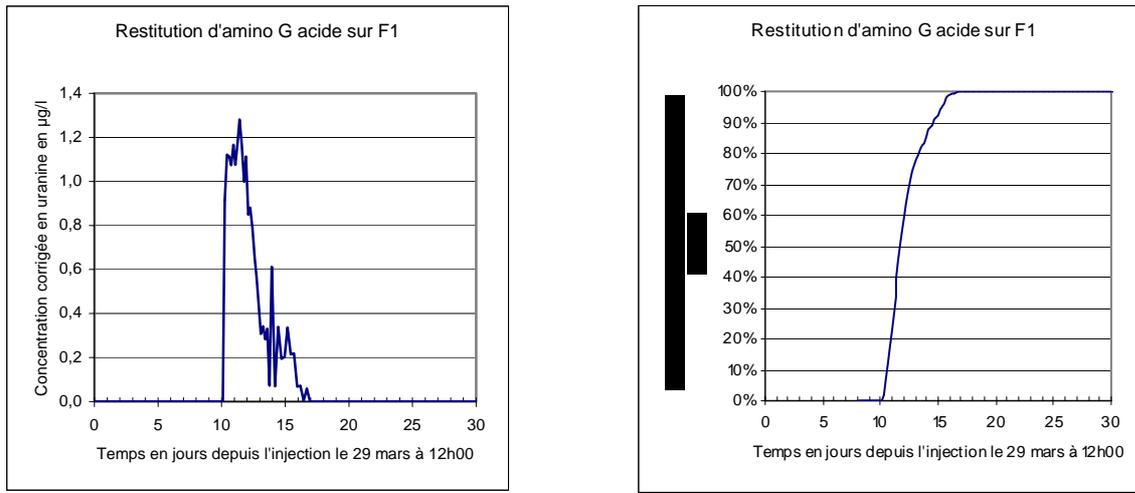


Figure 3 : Courbe de restitution à la source F1 Courbe cumulative à la source F1

Restitution	Source Trois Fontaine F1, F2, F3 et F4
Date d'injection :	29/03/05 à 12h00
Distance apparente :	8 595 m
Début de restitution :	8 avril à 18h05 (soit 10,25 jours)
Fin de restitution :	15 avril à 4h30 (soit 16,7 jours)
Maximum de concentration :	1,28 µg/l le 9 avril à 22h05
Temps modal :	11,42 jours
Temps moyen de séjour :	11,7 jours
Vitesse apparente maximale de circulation	35 m/h
Vitesse apparente moyenne de circulation	31 m/h
Quantité de traceur récupéré	9,61 g (sur la base d'un débit moyen de la source de 10 l/s)
Pourcentage de traceur récupéré	1 %

III.4.3. INJECTION DE SULFORHODAMINE A PARTIR DE LA PERTE DES SAPINS (CHUELLES)

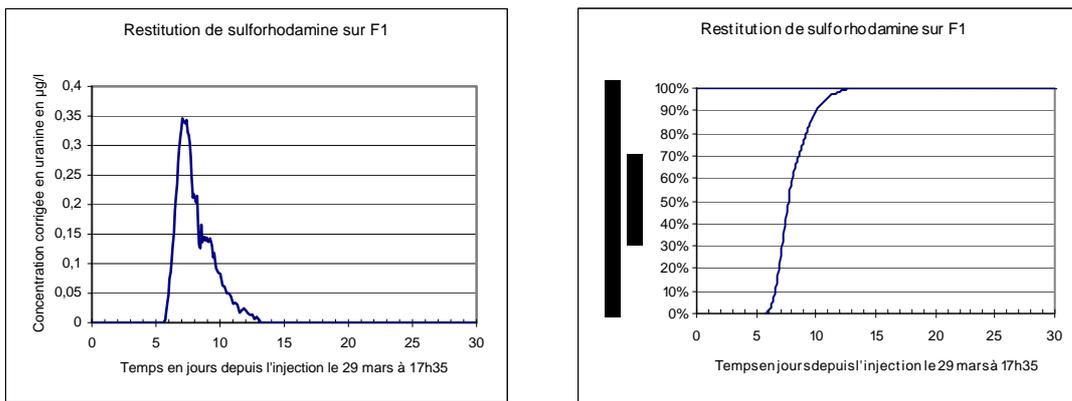


Figure 4 : Courbe de restitution à la Courbe cumulative à la source F1 source F1

Restitution	Source Trois Fontaine F1, F2, F3 et F4
Date d'injection :	29 mars à 17h35
Distance apparente :	9 140 m
Début de restitution :	4 avril à 11h00 (soit 5,73 jours)
Fin de restitution :	11 avril à 18h05 (soit 13 jours)
Maximum de concentration :	0,346 µg/l le 5 avril à 19h00
Temps modale :	7,06 jours
Temps moyen de séjour :	7,7 jours
Vitesse apparente maximale de circulation	66 m/h
Vitesse apparente moyenne de circulation	49 m/h
Quantité de traceur récupéré	2,76 g (sur la base d'un débit moyen à l'exutoire de 40 l/s)
Pourcentage de traceur récupéré	0,3 %

III.4.4. INJECTION D'AMINO G ACIDE AUX GONGUETS (CHUELLES)

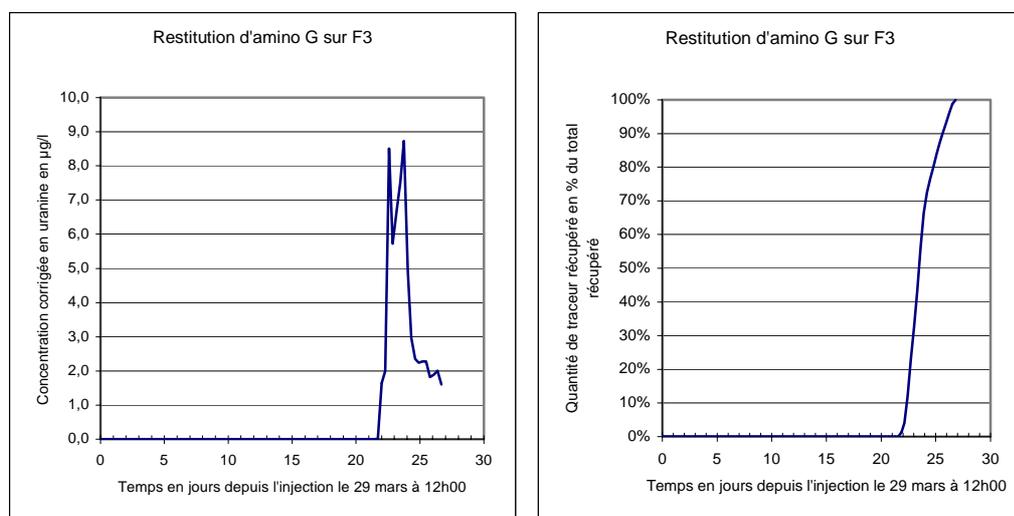


Figure 5 : Courbe de restitution à la source F3

Courbe cumulative à la source F3

Restitution	Sources F3 des Trois Fontaines
Date d'injection :	24/01/05 à 13h00
Distance apparente :	7 865 m
Début de restitution :	15 février à 06h00 (soit 21,7 jours)
Fin de restitution :	>20 février à 05h00 (soit >27 jours)
Maximum de concentration :	8,73 µg/l le 17 février à 7h00
Temps modal :	23,7 jours
Temps moyen de séjour :	Environ 24jours*
Vitesse apparente maximale de circulation	15 m/h
Vitesse apparente moyenne de circulation	14 m/h*
Quantité de traceur récupérée	137g (sur la base d'un débit moyen de la source de 80 l/s)
Pourcentage de traceur récupéré	13,5 %

* La restitution n'était pas totalement terminée lors de l'arrêt de la surveillance

L'exploitation des courbes de restitution a permis le calcul des vitesses de circulation détaillées dans le tableau de synthèse en annexe 1.

IV CONCLUSION

Les 4 sources ont le même bassin d'alimentation. Les limites de système obtenues par les traçages sont cohérentes avec les limites obtenues par piézométrie. D'une manière stricte ces sources sont davantage des exurgences que des résurgences. Bien que déjà relativement avancée, la maturation du karst n'a pas encore véritablement atteint le stade d'un système binaire (perte ponctuelle – source).

Cette nouvelle campagne de traçage laisse en suspens deux questions :

- Pour quelle raison, le traçage réalisé à partir de la perte des Gonguet a donné lieu à une restitution aux Trois Fontaines, alors que cette expérience avait déjà été menée plusieurs fois sans succès par le passé. Probablement à cause des conditions hydrologiques (niveau piézométrique et débit favorables).

- Lors du traçage réalisé à l'aval de la STEP de Chuelles, les apports d'eau dus au fonctionnement aléatoire de la STEP et non continu n'ont pas permis d'identifier le point d'infiltration du traceur récupéré à la source de Courtemaux.

Références bibliographiques :

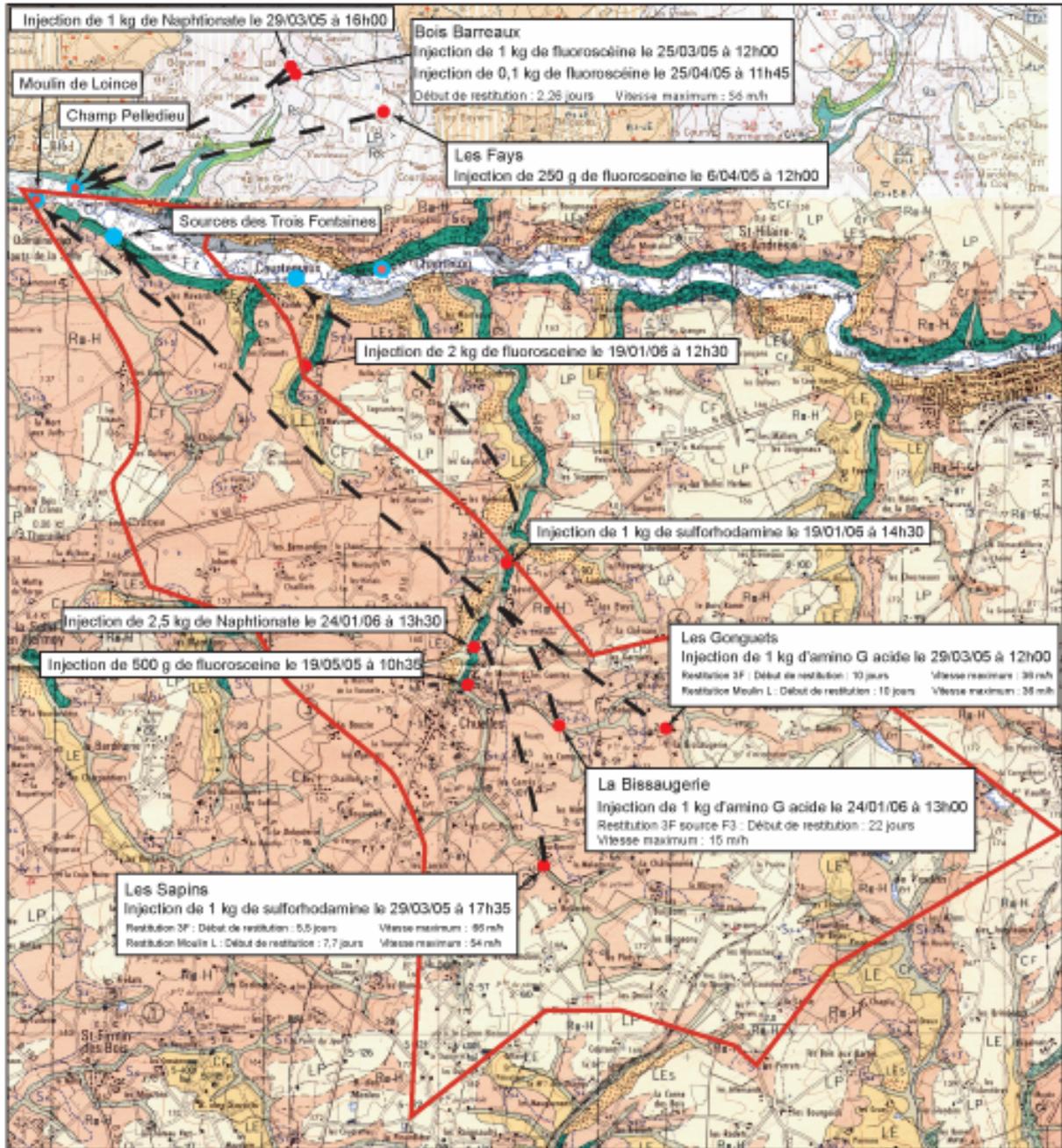
(1) **Lasne E.**, 1992 - Etude du système hydrologique karstique des sources des Trois Fontaines (Saint-Loup de Gonois, Loiret). Contribution à la connaissance de la structure, du fonctionnement et de l'évolution de l'aquifère crayeux du Gâtinais (Sud-Est du Bassin de Paris). Thèse.

(2) **Baran N.** 1999- Transit de l'isoproturon et de l'atrazine dans un système hydrologique karstique de la craie (Gâtinais-France) : de la station pédologique expérimentale à l'échelle du système. Documents BRGM 284, Editions BRGM, 329p. Thèse.

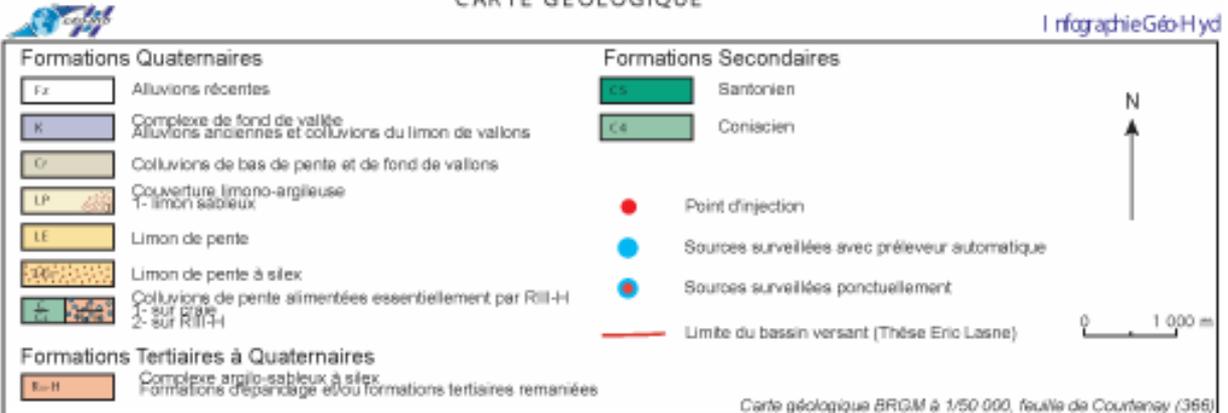
Lieu d'injection	Nature du point d'injection	Date d'injection	Traceur utilisé	Lieu de restitution	Début de restitution	Fin de restitution	Temps moyen de séjour	Vitesse apparente moyenne de circulation
Les Gonguets (Merinville)	Perte diffuse	25/03/05 à 11h15	Eosine	Non connu	Pas de restitution aux Trois Fontaines, restitution probable à la source de Courtemaux.			
Bois Barreaux (Merinville)	Mardelle avec sortie de drain	25/03/05 à 12h00	Uranine	Source de Champ Pelledieu	Restitution massive et rapide à la source de Champ Pelledieu. Quelques échantillons manuels prélevés ne permettant pas de tracer la courbe de restitution ni de calculer les vitesses d'écoulement.			
Bois Barreaux (Merinville)	Mardelle avec sortie de drain	29/03/05 à 16h00	Naphtionate	Source de Champ Pelledieu	Restitution constatée à la source de Champ Pelledieu. Uniquement quelques échantillons manuels prélevés ne permettant pas de tracer la courbe de restitution.			
La Bissaugerie (Chuelles)	Forage	29/03/05 à 12h00	Amino G acide	Sources des Trois Fontaines (F1, F2, F3, F4) /Moulin de Loince	F1 : 08/04/05 à 18h05 (soit 10,25 jours)	F1 : 15/04/05 à 4h30 (soit 16,7 jours)	F1 : 11,7 jours	F1 : 31 m/h
					F2 : 08/04/05 à 10h05 (soit 9,92 jours)	F2 : 12/04/05 à 6h05 (soit 13,75 jours)	F2 : 11,4 jours	F2 : 31 m/h
					F3 : 08/04/05 à 6h30 (soit 9,77 jours)	F3 : 12/04/05 à 10h30 (soit 13,94 jours)	F3 : 11,2 jours	F3 : 32 m/h
					F4 : 08/04/05 à 8h30 (soit 9,85 jours)	F4 : 11/04/05 à 22h05 (soit 13,42 jours)	F4 : 11,2 jours	F4 : 32 m/h
Les Sapins (Chuelles)	Perte diffuse	29/03/05 à 17h35	Sulforhodamine	Sources des Trois Fontaines (F1 F2, F3, F4) /Moulin de Loince	F1 : 04/04/05 à 11h00 (soit 5,73 jours)	F1 : 11/04/05 à 18h05 (soit 13 jours)	F1 : 7,7 jours	F1 : 49 m/h
					F2 : 04/04/05 à 2h00 (soit 5,35 jours)	F2 : 19/04/05 à 00h20 (soit 20,3 jours)	F2 : 6,4 jours	F2 : 60 m/h
					F3 : 04/04/05 à 11h00 (soit 5,73 jours)	F3 : 19/04/05 à 21h20 (soit 21,16 jours)	F3 : 7,9 jours	F3 : 48 m/h
					F4 : 04/04/05 à 2h00 (soit 5,35 jours)	F4 : 20/04/05 à 4h20 (soit 21,45 jours)	F4 : 8,0 jours	F4 : 48 m/h *
					Moulin de Loince : 06/04/05 à 11h00 (soit 7,73 jours)	Moulin de Loince : 15/04/05 à 17h00 (soit 17 jours)	Moulin de Loince : 8,5 jours	Moulin de Loince : 34 m/h
Les Fays (Courtemaux)	Forage	6/04/05 à 12h00	Uranine	Source de Champ Pelledieu	Restitution constatée à la source de Champ Pelledieu. Uniquement quelques échantillons manuels prélevés le 08/04/2005 ne permettant pas de tracer la courbe de restitution.			
Sortie de STEP (Chuelles)	Perte diffuse	19/04/05 à 10h35	Uranine	Source de Courtemaux	Restitution constatée à la source de Courtemaux sur quelques échantillons manuels ne permettant pas de tracer la courbe de restitution. Vitesses de circulations souterraines probablement proches de 20 m/h.			
Bois Barreaux (Merinville)	Mardelle avec sortie de drain	25/04/05 à 11h45	Uranine	Source de Champ Pelledieu	27/04/05 à 18h00 (soit 2,26 jours)	> 2 mai à 12h00 (soit 7 jours) *	Environ 3,8 jours *	33 m/h *
Belle Cour (Courtemaux)	Fosse creusée à la pelle mécanique	19/01/06 à 12h30	Uranine	Non connu	Pas de restitution aux Trois Fontaines ni à Courtemaux.			
Perte aval du ru St Jacques (Chuelles)	Perte diffuse	19/01/06 à 14h30	Sulforhodamine	Non connu	Pas de restitution aux Trois Fontaines ni à Courtemaux.			
Les Gonguets (Chuelles)	Perte diffuse	24/01/06 à 13h00	Amino G acide	Sources F3 des Trois Fontaines	F3 : 15/02/05 à 6h00 (soit 21,7 jours)	F3 : >20/02/06 à 05h00 (soit >27 jours)	F3 : Environ 24jours*	14 m/h*
Perte amont du ru St Jacques (Chuelles)	Perte diffuse	24/01/06 à 13h30	Naphtionate	Non connu	Pas de restitution aux Trois Fontaines ni à Courtemaux.			

* La restitution n'était pas totalement terminée lors de l'arrêt de la surveillance

ANNEXE 1 : Tableau de synthèse



CARTE GEOLOGIQUE



ANNEXE 2 : Localisation des points d'injection et de surveillance

Étude hydrogéologique de la partie ouest du Causse de Sauveterre et de ses avants-Causse. Apport des traçages

Laurent Danneville ⁽¹⁾, Bernard Blavoux ⁽²⁾, Stéphane Brusset ⁽³⁾, Laurent Bruxelles ⁽⁴⁾, et Alain Mangin ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Parc Naturel Régional des Grands Causses, 71 Bd de l'Ayrolle, BP 126 -12101 Millau cedex - laurent.danneville@parc-grands-causses.fr

⁽²⁾ Université d'Avignon, Laboratoire d'hydrogéologie, Faculté des Sciences, 33 rue Louis Pasteur - 84000 Avignon - bernard.blavoux@univ-avignon.fr

⁽³⁾ Laboratoire des Mécanismes et Transferts en Géologie, UMR 5563 UR 154 CNRS Université Paul Sabatier IRD, 14, avenue Edouard Belin - 31400 Toulouse - stephane.brusset@lmtg.obs-mip.fr

⁽⁴⁾ INRAP et UMR 8555 "Centre d'Anthropologie" - ZA des Champs Pinsons - 13 rue du négoce - 31650 Saint-Orens-de-Gameville - laurent.bruxelles@inrap.fr,

⁽⁵⁾ Station d'Ecologie Expérimentale du CNRS- 09200 Moulis - mangin@lsm.cnrs.fr

I. INTRODUCTION

Cette étude qui se veut pluridisciplinaire a permis d'obtenir une vision hydrogéologique générale du Causse de Sauveterre. Elle s'intègre dans une politique de protection des milieux karstiques initiée par le Parc naturel régional des Grands Causses depuis 1995 (cf. figure 1). Après une rapide description du contexte général, quelques résultats seront évoqués ainsi que l'apport des traçages. Les principales conclusions que Michel LEPILLER avait exposées sont reprises intégralement.

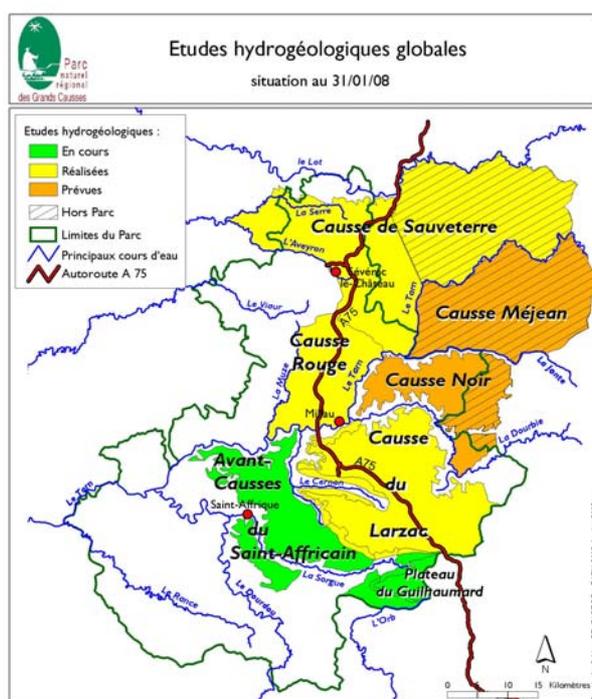


Figure 1 : études hydrogéologiques réalisées, en cours ou prévues sur le territoire du Parc naturel régional des Grands Causses.

II. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Outre la connaissance physique du Causse de Sauveterre, plusieurs objectifs ont été identifiés initialement, parmi lesquels :

- La détermination des bassins d'alimentation des principales sources karstiques ;
- La connaissance du fonctionnement et de la structure des aquifères karstiques ;
- L'évaluation de la ressource en eau souterraine
- l'incidence des activités humaines et les mesures de protection à mettre en œuvre lors de la procédure de périmètres de protection.

Plusieurs disciplines comme l'hydrodynamique, l'hydrochimie, les traçages, la géologie et la tectonique, et la géomorphologie ont été mises en œuvre pour réaliser cette étude.

III. DONNEES GENERALES

Le territoire d'étude possède une superficie d'environ 420 km². Il est composé de 23 communes (14 dans le département de l'Aveyron et 9 dans le département de la Lozère).

Plusieurs sous entités composent ce territoire : le Causse de Sauveterre et ses prolongements avec le Causse du Masségros au Sud-Est et le Causse de Sévérac au Nord, tous deux appartenant aux formations du Jurassique moyen ; les avants-Causse liasiques (cf. figure 2). Deux accidents majeurs de direction Nord Ouest Sud-Est recoupent ces entités : la faille des Vignes et la faille des Palanges.

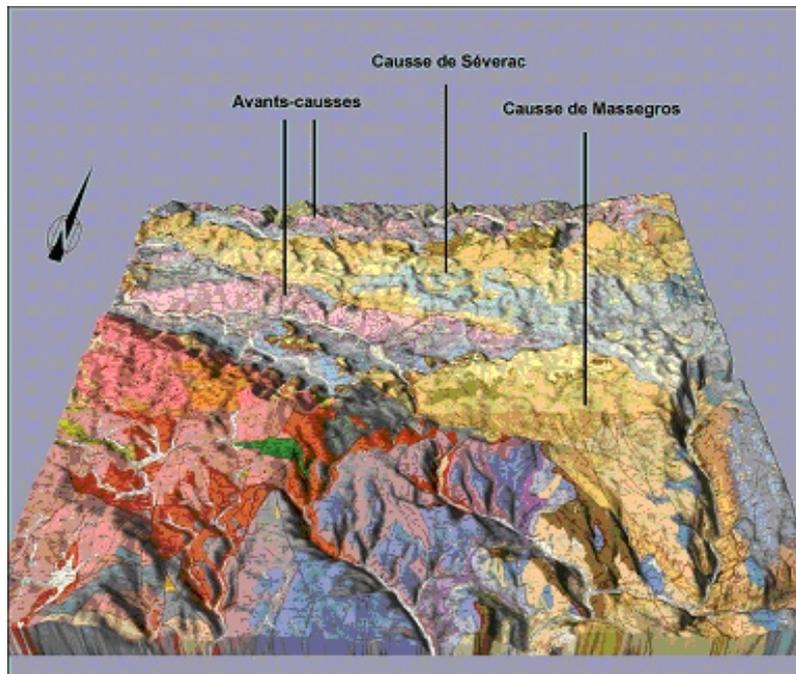


Figure 2 : Contexte géologique et géomorphologique globale de la zone étudiée

Pour simplifier, on peut indiquer que deux grands aquifères sont présents : l'aquifère inférieur composé des formations de l'Hettangien, du Sinémurien et du Domérien ; l'aquifère supérieur qui démarre depuis les formations de l'Aalénien pour se terminer aux formations du Portlandien (cf. coupe géologique jointe).

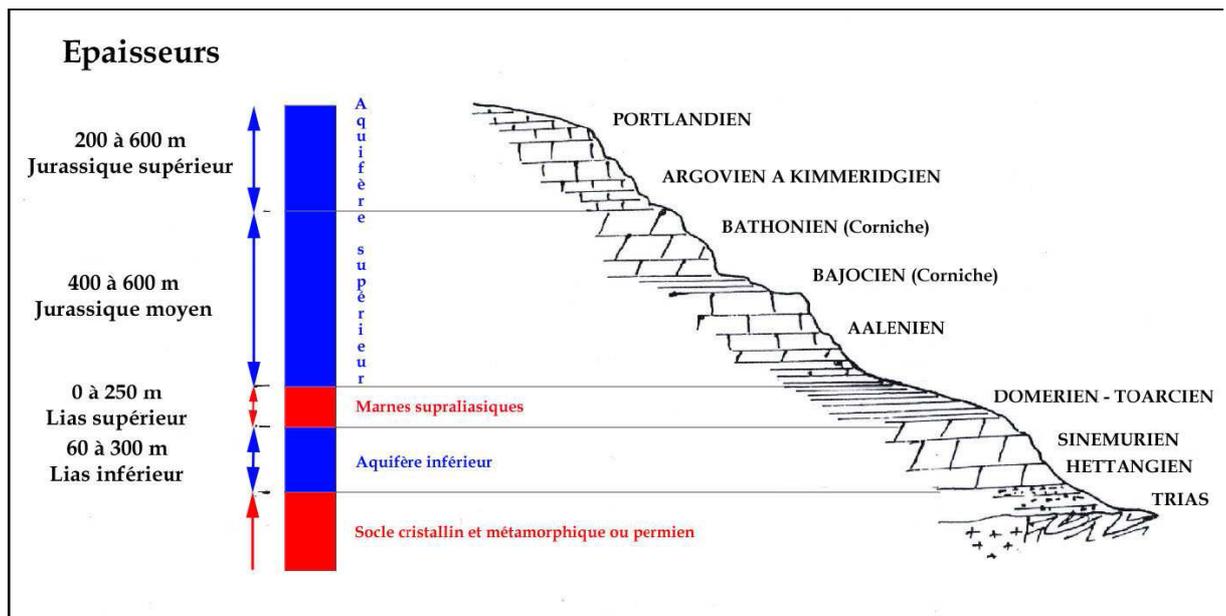


Figure 3 : coupe géologique simplifiée et aquifères principaux

L'existence de couvertures d'altérites et autres formations vestigiales peu perméables, ainsi que le contact avec les formations du socle permo-triasique confèrent un caractère binaire à plusieurs des systèmes étudiés.

C'est un territoire doté d'une multitude de sources (150 recensées au total). Les sources les plus importantes sont situées sur les Grands Causses (cf. photographie 1) et les avants-Causses présentent des sources plus nombreuses avec des débits plus faibles. La hiérarchisation des écoulements est donc plus évidente dans l'aquifère supérieur.

Sur ces 150 sources recensées, 19 ont fait l'objet d'un équipement quantitatif (station hydrométrique) et 120 ont fait l'objet d'un suivi hydrochimique. Un suivi mensuel complet a été effectué pour une dizaine de ces sources (cf. figure 4).



Photographie 1 : source de Fontmaure qui sort dans les gorges du Tarn (trop plein de la source de Beldoire).

IV. QUELQUES RESULTATS

Il n'est pas possible ici de présenter l'ensemble des bilans scientifiques, mais quelques particularités seront évoquées.

IV.1. Détermination des bassins d'alimentation

L'ensemble des méthodes utilisées a permis de définir une première carte des bassins hydrogéologiques de ce territoire. On peut rappeler qu'aucune carte de synthèse détaillée n'existait avant cette étude.

Un résultat majeur concerne le bassin des sources de Beldoire-Fontmaure qui, avec ses 130 km², constitue le premier bassin de ce territoire. Il s'étend jusqu'à l'extrémité Nord-Ouest du Causse. Les traçages, et notamment celui de la perte de Saint-Urbain sur la commune de Campagnac, ont permis de mieux délimiter ce bassin. La distance entre cette perte et la source de Beldoire est d'environ 15,8 km (cf. figure 5).

Il semble avéré que l'approfondissement des gorges du Tarn soit le facteur principal d'attractivité des eaux. Ceci est confirmé également par l'étendue du bassin de la source de Rouveyrol au détriment du bassin des sources de l'Aveyron.

Autre résultat : il est confirmé que l'autoroute A75 passe sur les bassins de sources captées : Cayrac qui alimente la commune de Sévérac-le-Château, Beldoire qui alimente le camping du même nom, Rocaysou qui alimente la commune de Banassac en Lozère.

IV.2. Evaluation de la ressource en eau

Cette évaluation calculée à partir des volumes dynamiques (17) permet d'estimer les réserves à plusieurs dizaines de millions de mètres cube. On peut distinguer :

- Des volumes supérieurs à 1,5 Mm³ pour Beldoire et Cayrac, impliquant la présence de réserves souterraines considérables;
- Des volumes compris entre 0,5 Mm³ et 1,5 Mm³ pour Bastide, Lestang, Mayrinhac, Ségala et Verlenque ;
- Des volumes plus faibles, inférieurs à 0,5 Mm³, pour les autres sources.

IV.3. Incidences des activités humaines (chimie)

D'une façon générale, la qualité des eaux est satisfaisante et aucun dépassement majeur n'est à noter, excepté une turbidité importante associée à des valeurs bactériologiques élevées sur certaines sources. En revanche les suivis mensuels et saisonniers permettent de distinguer des influences anthropiques ponctuelles ou chroniques localisées sur certains bassins.

Les principales sources de pollutions détectées proviennent du salage des routes (Source captée de Rocaysou, Source du Parisien), de la gestion de stations d'épuration (Rouveyrol, Courtinaux) et de l'activité agricole (Source de l'Aveyron).

Certaines sources possèdent des qualités hydrochimiques excellentes. C'est le cas de la source de Mas de Lafon par exemple sur la commune de Mostuéjols dont le bassin est peu anthropisé et où il existe des terrains de couverture permettant une bonne filtration des eaux d'infiltration.

IV.4. Vulnérabilité

IV.4.1. Etablissement

A partir du croisement de la géologie, des formations superficielles, de la géomorphologie karstique, des pertes et de l'occupation du sol, une carte de vulnérabilité (cf. figure 6) a été établie dont l'objectif principal est de fournir des éléments de réflexion pour :

- la définition des périmètres de protection réalisée par l'hydrogéologue agréé ;
- l'installation de futurs aménagements ou infrastructures (zones d'activités, stations d'épuration, routes, entreprises artisanales ou industrielles, etc....).

C'est le facteur I de la méthode RISKE qui est apparu primordial : facteur décrivant la plus ou moins grande facilité que possède un polluant à rejoindre le réservoir aquifère.

De façon plus précise, ce sont les paramètres suivants, pondérés, qui ont été sélectionnés pour établir une première version de la carte de vulnérabilité :

- la couverture (supérieure à 1 m) : absence ou présence ;
- la présence de vallon fluvio-karstiques : indice d'écoulement ancien superficiel et indice d'écoulement souterrain préférentiel;
- la présence de dépressions : dolines, lapiès : indice d'une infiltration plus ou moins rapide suivant la présence de formations superficielles plus ou moins épaisses;
- les pertes avérées : zone d'infiltration rapide;
- l'occupation du sol : 2 catégories de données sont utilisées ; forêt et pelouse, cultures et prairies. Ce paramètre a également été retenu car il conditionne la vulnérabilité de l'aquifère karstique aux pollutions.

IV.5. Propositions de zones de protection pour les sources captées

Plusieurs classes de vulnérabilité ont été déterminées. Elles vont de la valeur 0 à la valeur 11. La valeur 11 correspond à une vulnérabilité forte par rapport, essentiellement, au critère infiltration. Ce sont les pertes qui sont mises en évidence à ce niveau (l'infiltration est rapide ; elle peut s'effectuer en quelques heures voire en quelques jours). Ce niveau pourrait être proposé comme Zone de protection immédiate satellite.

En ce qui concerne les autres zones de protection, il apparaît de toute évidence, qu'une zone de protection immédiate doit être effective au niveau du captage, ainsi qu'une zone de protection rapprochée autour de celui-ci et enfin une zone de protection éloignée.

En effet, pour l'ensemble des sources concernées, la présence d'un écoulement permanent en période estivale indique des temps de séjour assez longs au sein de l'aquifère, de l'ordre de l'année. Des précipitations dans une zone éloignée du bassin d'alimentation vont donc mettre un certain temps avant d'arriver à l'exutoire. Cette régulation est bien sûr aussi influencée par les systèmes annexes au drainage qui permettent une alimentation continue du drain karstique principal.

C'est ainsi que les niveaux 0, 1 et 2 pourraient être proposés en zones de protection éloignée et les niveaux 3 à 10 pourraient être proposés en zone de protection rapprochée.

V. APPORTS DES TRAÇAGES

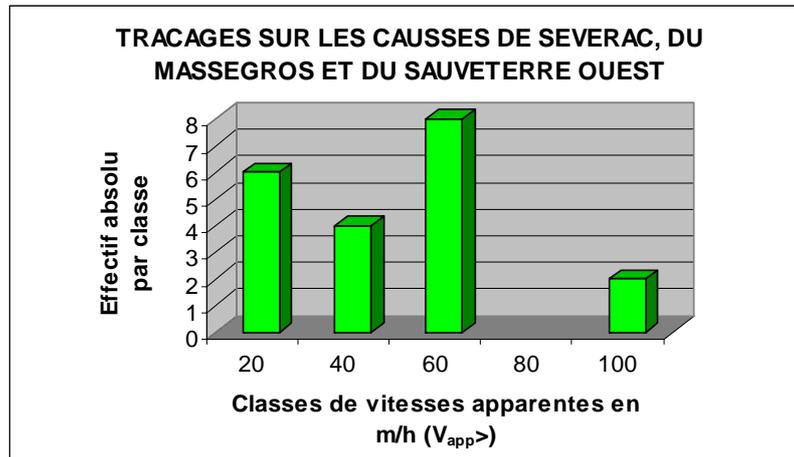
Les traçages s'avèrent indispensables dans l'établissement des études hydrogéologiques à plusieurs titres :

- pour la détermination des bassins d'alimentation où ils permettent de mieux fixer leurs limites ;
- dans la compréhension du fonctionnement des systèmes karstiques ;
- dans l'estimation des réserves d'eaux souterraines ;

- et enfin dans l'estimation des impacts des activités anthropiques ou des pollutions accidentelles (utilisation des pollutogrammes).

V. 1. Vitesses apparentes

Les vitesses apparentes déduites des distributions des temps de séjour (DTS) ne dépassent pas 100 m/h. Les vitesses les plus élevées ont été mesurées sur des systèmes traçage dont l'entrée est une perte fonctionnelle (pertes des Sâgnes ou du Souci, de Novis – source de Rouveyrol, perte du ruisseau de Serre au trou de Souci - source de Glassac).



Distribution des valeurs de vitesses apparentes déduites des distributions des temps de séjour des traçages réalisés dans la région étudiée

V.2. Volume d'eau tracé

Il n'existe pas de relation entre le volume d'eau tracé lors d'un traçage et le volume estimé des réserves du système karstique. Le transit d'un traceur injecté en un point ne s'effectue que selon un ensemble de trajectoires (système traçage) qui ne représentent qu'un sous-ensemble des trajectoires constituant le système hydrologique karstique. En revanche, l'écart entre ces deux volumes, généralement très important, peut constituer un indicateur de la représentativité du résultat obtenu sur un système traçage par rapport à l'ensemble du système karstique.

V.3. Système Beldoire-Fontmaure

Les traçages ont permis la mise en évidence de l'incorporation au bassin du Tarn, par drainage souterrain, du système de Beldoire-Fontmaure, et suite à l'enfoncement du Tarn, d'une majeure partie de la surface du Causse de Sauveterre primitivement drainée superficiellement vers le Lot.

La faible variabilité (de 44 à 55 m/h) de la vitesse apparente mesurée vers la source de Beldoire à partir de points d'injection diversement situés et dans des conditions hydrologiques variées (très basses à moyennes eaux) suggère l'existence d'un réseau de drainage moyennement développé et alimenté en permanence par de puissantes réserves.

V.4. Ajustement des limites hydrogéologiques

La limite entre le système de la source de la Verlenque (bassin hydrographique de l'Aveyron) et celui de la source Rouveyrol (bassin hydrographique du Tarn) a pu être placée entre la perte des Pradels et celle des Sâgnes. Ce résultat remet en cause les colorations antérieures

effectuées il y a plus d'une dizaine d'années. Ceci confirme le rôle de l'abaissement du niveau de base régional contrôlé par le Tarn dans l'extension vers l'ouest des systèmes drainés vers ce cours d'eau.

V.5. Existence d'un karst noyé au nord de la faille des vignes

Le traçage de l'aven de Cassagnes, situé à 200 m environ de la faille des Vignes, a donné lieu, à la source de Mayrinhac, à une restitution dont les caractéristiques révèlent probablement l'existence d'un karst noyé assez développé dans les formations carbonatées qui présentent une épaisseur maximale en contact avec la faille.

L'existence d'un pic très aigu (valeur maximale de la D.T.S. apparue un peu plus de 25 h après l'injection indiquant une vitesse modale de 69 m/h) suivi d'une traîne très étalée suggère que le traceur a très probablement transité sans difficulté vers un karst noyé assez développé expliquant l'importance du volume d'eau tracé (830 000 m³).

V.6. Réflexions sur les traçages effectués

Une trentaine de traçages ont été réalisés, mais une dizaine n'ont pas fait l'objet d'une restitution avérée. Les causes de cette non restitution sont multiples :

- certains traçages auraient demandé une masse de traceur sans doute plus importante mais le facteur limitant était la présence de sources captées ;
- la quantité d'eau apportée n'a pas été suffisante pour remettre en fonctionnement la cavité ;
- Y a-t-il une absorption du traceur dans le sable dolomitique argileux ? (des études sont en cours)

En tout état de cause, lorsque l'injection s'est effectuée sur une partie fonctionnelle du système karstique (zone noyée, petite circulation d'eau dans le fond d'un aven, pertes de ruisseau, sources de plateau qui se perdent dans les formations sous-jacentes) il y a eu systématiquement une restitution.

VI. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude hydrogéologique générale pluridisciplinaire établie sur un grand territoire a permis de mieux apprécier le fonctionnement et la structure des principaux aquifères karstiques. Il s'agit là d'une première vision hydrogéologique d'ensemble de la partie Ouest du Causse de Sauveterre.

Il est bien évident que les investigations doivent se poursuivre, notamment sur la base de :

- traçages, afin de mieux cerner les limites des bassins hydrogéologiques parfois définis avec une grande incertitude ;
- sondages, afin de mieux comprendre la vulnérabilité de l'aquifère et mieux appréhender le fonctionnement de la zone épikarstique.

Les réserves souterraines de la zone karstique étudiée sont estimées à plusieurs dizaines de millions de m³.

L'utilisation de diverses approches a montré tout son intérêt dans l'étude de ces aquifères très complexes.

La mise en place des systèmes karstiques, notamment deux grands systèmes (Beldoire-Fontmaure et Rouveyrol) est marquée par l'influence prépondérante du fort gradient hydraulique résultant de l'incision creusée par le Tarn dans les formations carbonatées. Ces systèmes étendent leurs aires de drainage vers l'ouest en se partageant plus de la moitié de la surface étudiée.

D'une façon générale, le fait d'étudier une zone hydrogéologiquement cohérente, dont les exutoires sont tous connus, permet de mieux appréhender les limites des différents systèmes karstiques.

Références bibliographiques

- (1) **Bailly -Comte V.** 2003- étude hydrogéologique de l'Ouest du Causse du Massegros et participation à l'étude hydrogéologique de la partie ouest du Causse de Sauveterre et de ses avants-Causse, rapport de stage de Polytech'Orleans – Ecole Supérieure de l'Energie et des Matériaux.
- (2) **Bruxelles L et Mallet A.** 2004 - étude géomorphologique de la partie ouest du Causse de Sauveterre et de ses avants-Causse;
- (3) **Brusset S. avril 2004** - étude géologique et tectonique du Causse de Sauveterre et de ses avants-Causse, Université Paul Sabatier;
- (4) **Blavoux B., Mudry J., Puig JM.** 1991/1992 - Bilan, fonctionnement et protection du système karstique de la Fontaine de Vaucluse (sud-est de la France) (Water budget, functioning and protection of the Fontaine de Vaucluse karst system (southeastern France), *Geodynamica Acta* (Paris),5,3,pp 153-172.
- (5) **Blavoux B, Simler R., Daniel M., Blondel T.** 2005 - étude hydrochimique de la partie ouest du Causse de Sauveterre et de ses avants-Causse, Laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon et des Pays de Vaucluse ;
- (6) **Blondel T.** 2004 - contribution à l'étude hydrogéologique de la partie ouest du Causse de Sauveterre, caractérisation de l'altération de la qualité de la ressource en eau des systèmes karstiques du Causse de Sauveterre, rapport de stage de l'école polytechnique d'Orléans ;
- (7) **Bruxelles L.** 2001 - Dépôts et altérites du Larzac central : Causse de l'Hospitalet et de Campestre (Aveyron, Gard, Hérault), Evolution morphogénique, conséquences géologiques et implications pour l'aménagement, PhD thesis, University of Provence, document du BRGM n°304, Editions BRGM,Orléans 2004 ;
- (8) **Danneville L.** 2008 - L'eau des karsts des Grands Causse : enjeu pour le développement durable d'un espace protégé, *Géosciences* n° 7/8, p 236 à 243.
- (9) **De Montety V.** 2003 - participation à l'étude hydrogéologique de la partie ouest du Causse de Sauveterre et de ses avants-Causse : détermination de systèmes hydrogéologiques karstiques à l'aide de campagnes de multitraçages, étude de l'influence de la nature du milieu sur le transit de divers traceurs fluorescents par multitraçages simultanés, rapport de stage de Polytech'Orleans – Ecole Supérieure de l'Energie et des Matériaux;
- (10) **L D., Abadou R., Mangin A.** 2002 - analyse multirésolution croisée de pluies et débits de sources karstiques, *C.R.Geoscience* 334, pp 176-195.
- (11) **Lepiller M., Blavoux B, Brusset S., Bruxelles L., Danneville L., Mangin A., Marchet P.,** 2006 - Approche pluridisciplinaire d'une région karstique pour l'exploitation et la protection de la ressource en eau. Application au Causse de Sauveterre (Sud de la France), in *Aquifer Systems management. Darcy's Legacy in a World of Impending Water Shortage.* Edited by L. Chery & G. De Marsily. Taylor& Francis Group. IAH Selected Papers in Hydrogeology. N°10.
- (13) **Lepiller M., Mondain PH.** 1986 - Les traçages artificiels en hydrogéologie karstique, *Hydrogeologie*, BRGM,1.,1986.
- (14) **Mangin A.** 1970 - Contribution à l'étude d'aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrue et de tarissement (Contribution to karstic aquifers study from the « decrue » and recession curve analysis) *Annales de Spéléologie*,t 25,3,pp 581-609.
- (15) **Mangin A.** 1971 - Etude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique (Sorted discharge studies of karstic springs during a hydrological cycle) *Annales de Spéléologie*, t 26,2, pp 283-329.
- (16) **Mangin A.** 1975 - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques (Contribution to hydrodynamic study of karstic aquifers) Thèse de Docteur en Sciences, Université de Dijon ;*Annales de Spéléologie*, 1974,29,3, pp283-332 ;1974,29,4, pp495-601 ; 1975,30,1, pp21-124.

- (17) **Mangin A.** 1984 - Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales, *Journal of Hydrology*, 67, pp25-43.
- (18) **Marsaud B.** 1996 - Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux (Structure and behavior of the saturated zone of karst aquifers from experimental results) PhD Thesis, University Paris XI Orsay, Document du BRGM n° 268, 1997, Editions BRGM.
- (19) **Mudry J.** 1987 - Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrodynamique des aquifères carbonatés (Contribution of the physical and chemical natural tracers to the hydrodynamic knowledge of the carbonated aquifers). Thèse de Docteur en Sciences, Université de Franche Comté, Besançon, France.
- (20) **Plagnes V.** 1997 - Structure et fonctionnement des aquifères karstiques, caractérisation par la géochimie des eaux (Structure and behavior of karstic aquifers, characterisation by hydrogeochemistry) PhD. Thesis, University of Montpellier; document du BRGM n°293, 2000, Editions BRGM.
- (21) **Poulain D.** 2003 - Contribution à l'étude hydrogéologique de la partie ouest du Causse de Sauveterre et étude des modalités et de circulation des eaux dans la zone non saturée par comparaison des informations fournies par les traceurs chimiques naturels et anthropiques (ions majeurs) et les traceurs fluorescents sur les systèmes karstiques de la partie ouest du Causse de Sauveterre, rapport de stage de l'Ecole Supérieure de l'Energie et des Matériaux, Polytech'Orléans.

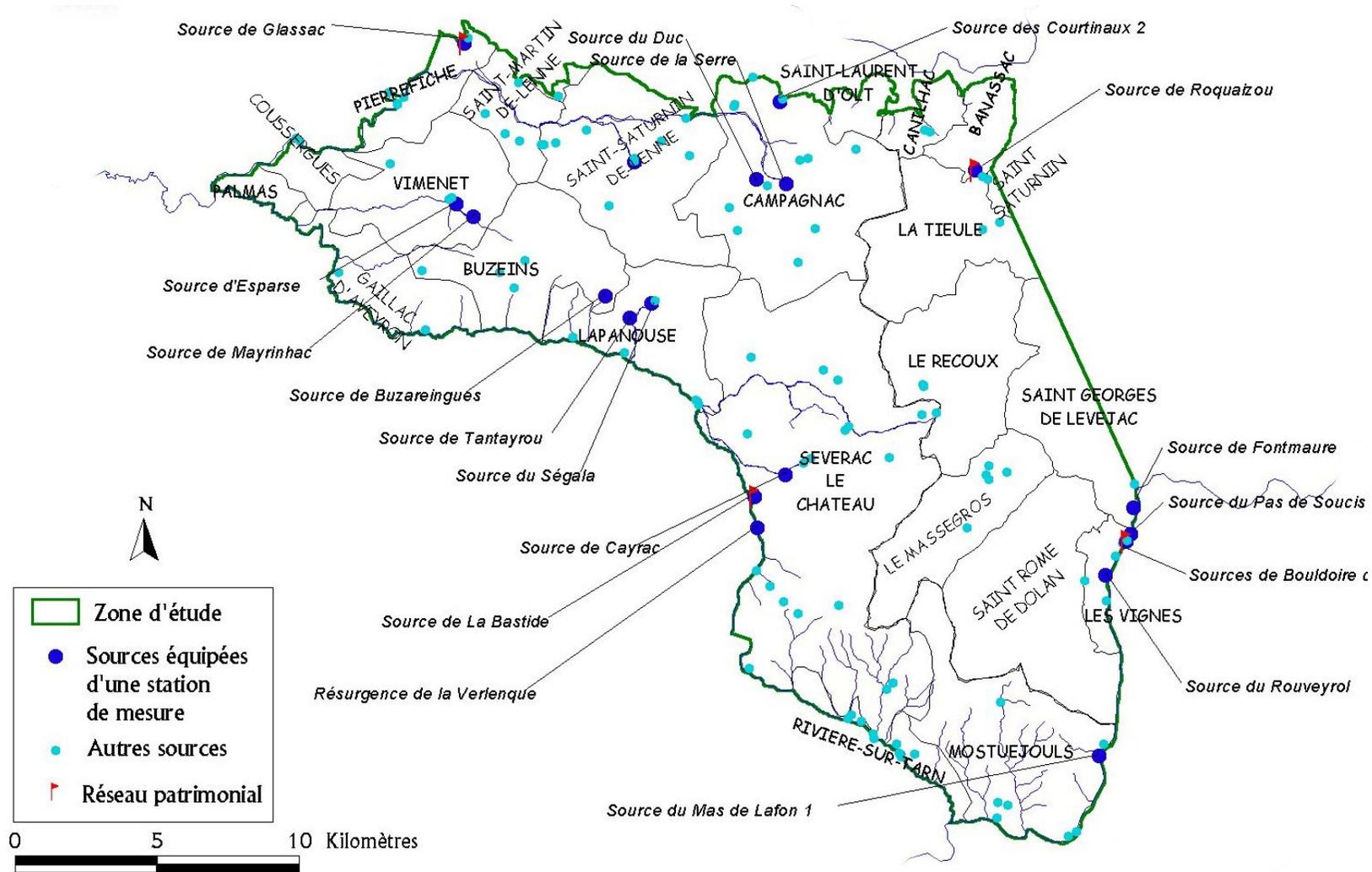


Figure 4 : Principaux exutoires de la zone d'étude et localisation des stations hydrométriques

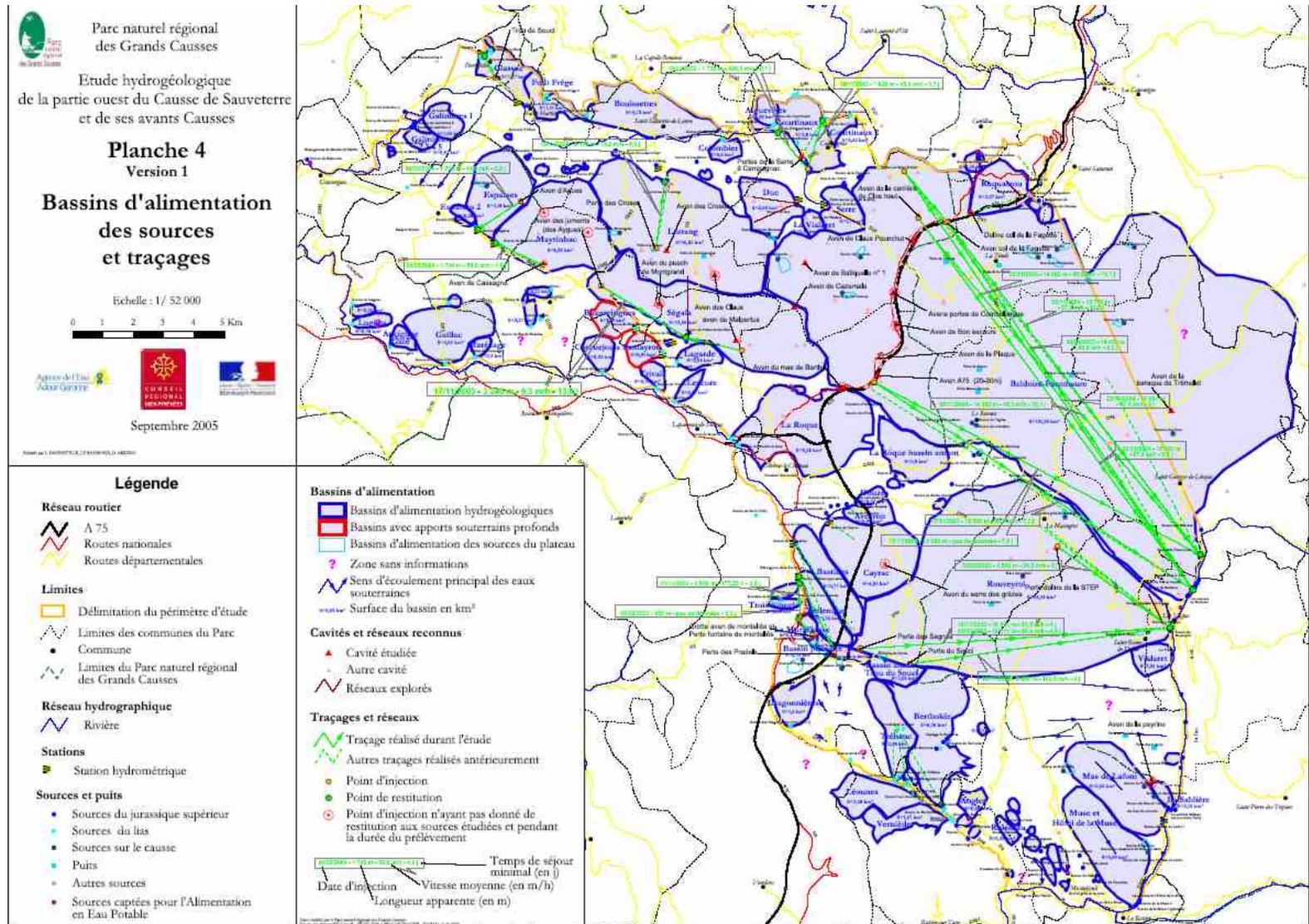


Figure 5 : bassins d'alimentation des sources et traçages

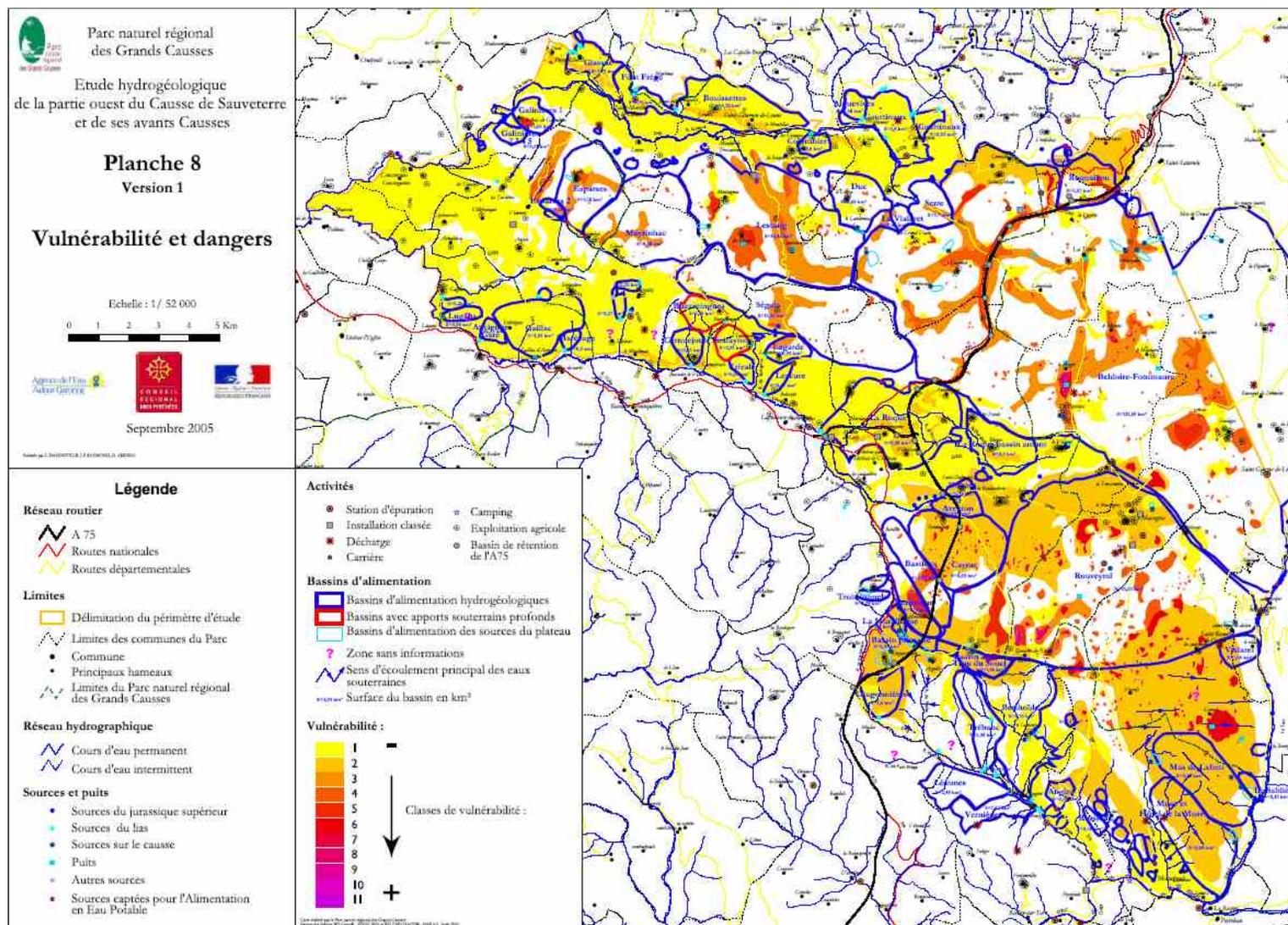


Figure 6 : Carte de vulnérabilité de la partie Ouest du Causse de Sauveterre et de ses avants Causses

Impact des aménagements des bétoires sur la turbidité des eaux : exemple du captage des Varras (Eure)

**Matthieu Fournier, Aurélien Rossi, Amer Mouhri, Smail Slimani,
Anne Motelay, Nicolas Massei, Jean-Paul Dupont**

Université de Rouen, UMR CNRS 6143, Bâtiment IRESE A, Place Emile Blondel -76821
Mont Saint Aignan cedex - matthieu.fournier@univ-rouen.fr

Résumé

Michel Lepiller connaissait bien le karst de la craie de Normandie et y a consacré ses premières publications. Spéléologue, il a participé à la désobstruction et au développement des connaissances de nombreux réseaux karstiques. Hydrogéologue, il a notamment acquis de nombreuses données permettant la caractérisation du fonctionnement et de la vulnérabilité des aquifères.

La vulnérabilité des aquifères karstiques est principalement due aux connections hydrauliques existantes entre la surface et le souterrain. L'infiltration concentrée des eaux de surface se fait via les bétoires et les crypto-bétoires disséminées sur le bassin versant. Pour préserver les ressources en eau potable, des techniques d'aménagement ont été développées, mais elles sont coûteuses. Le syndicat d'eau exploitant le captage des Varras, basé au Nord-Ouest du département de l'Eure en Haute-Normandie à 20 km de Rouen, a réalisé un certain nombre de ces aménagements durant la fin des années 1990 et le début des années 2000 et souhaitait évaluer l'impact de ces aménagements sur la turbidité au captage.

Les chroniques de pluie et turbidité ont été enregistrées depuis 1995. A l'instar des travaux de Michel Lepiller, celles-ci ont été étudiées au moyen des méthodes d'analyse du signal (analyse corrélatoire et spectrale, analyse en ondelette). Les modifications de la composition spectrale observées dans le signal peuvent être attribuées à de nombreux paramètres comme l'intensité des pluies et les conditions d'occupation du sol. Afin d'étudier l'impact des seuls aménagements sur le risque turbide au captage des Varras, le rapport turbidité/pluie a été calculé. Ce rapport correspond à un indice de sensibilité du risque turbide du captage des Varras en réponse à la pluie.

Des analyses en ondelettes ont été effectuées sur cet indice afin de reconstruire les réponses aux événements synoptiques et aux fluctuations de nappe. Afin de modéliser l'impact des aménagements, une interpolation paramétrique sur l'indice de réponse du système a été effectuée. Cette méthode a permis la reconstruction de l'indice de réponse sans l'impact supposé des aménagements. Celui-ci a ensuite été comparé à l'indice calculé initialement afin d'observer l'influence des aménagements sur la sensibilité à la pluie du captage des Varras.

I. INTRODUCTION

La Haute-Normandie est connue pour la vulnérabilité de ses ressources en eau. Les captages les plus productifs de la région exploitent les systèmes karstiques de nature binaire avec parfois plus d'une vingtaine de mètres de formations superficielles, principalement des argiles à silex (1). La nature de ces formations ainsi que celle des sols engendrent un aléa érosion fort à très fort (2). De part ces caractéristiques, le risque d'occurrence d'épisodes turbides est très important en Haute-Normandie de sorte que de nombreux captages sont touchés. La mise en

place des BAC et des DUP ont permis la multiplication des études de vulnérabilité et notamment la recherche et l'aménagement des bétoires dont le BRGM réalise actuellement la synthèse et la cartographie.

Le syndicat d'eau gérant le captage des Varras a très tôt développé une politique volontaire de protection de la ressource et a lancé entre 1997 et 2001 de nombreux travaux d'aménagement des bétoires (2, 3) identifiées par les différentes études environnementales (4-10). Dans le cadre de l'évaluation de sa politique de protection de la ressource, le syndicat d'eau a souhaité étudier l'efficacité de ces aménagements sur la turbidité des eaux au captage des Varras.

Les chroniques de pluie et de turbidité au pas de temps journalier ou horaire sont disponibles depuis 1995. Des analyses du signal (analyses corrélatoire et spectrale simples et croisées, périodogramme de Lomb, analyse en ondelettes) ont été utilisées sur ces signaux à l'échelle annuelle et pluriannuelle pour comparer les résultats avant (1995-1999) et après (2001-2005) la période des aménagements. Cependant, les différences observées entre ces deux périodes ne peuvent pas être imputées aux seuls aménagements. En première approche nous pouvons considérer que la turbidité aux captages dépend de l'introduction d'eau de ruissellement dans le système karstique via les bétoires et que cette introduction est fonction de la pluie et des caractéristiques géomorphologiques du bassin versant. Pour isoler l'effet des aménagements par rapport à celui de la pluie, nous proposons dans cet article de calculer le ratio entre la turbidité et la pluviométrie. Cet indice évaluerait la sensibilité de la réponse du système karstique aux pluies et sa comparaison entre les périodes 1995-1999 et 2001-2005 mettrait en évidence l'impact des aménagements sur cette sensibilité. Pour ce faire, cet indice a été étudié par analyse en ondelettes afin de reconstruire le signal à partir des basses et des hautes fréquences puis comparer les résultats entre les deux périodes. Une proposition de méthodologie pour la modélisation de l'impact des aménagements sur la sensibilité du système par interpolation paramétrique est présentée ensuite sur la période 2001-2005.

II. SITE

Le captage des Varras est situé dans le département de l'Eure sur la rive gauche de la Seine à 20 km en aval de Rouen. Il a été foré en 1960 dans l'aquifère de la craie au niveau du talweg de la vallée sèche du Fournel. Lors de sa réalisation le forage était sec et ce n'est qu'après le creusement d'une galerie horizontale de 39 m de long à 41 m de profondeur que celui-ci a été mis en eau par le recoupement d'un drain karstique du réseau spéléologique de Caumont (11). Les essais de pompage montrent de faibles rabattements de l'ordre de la quinzaine de centimètres après 90 minutes de pompage à $500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (4). Aujourd'hui, ce captage alimente 35 000 habitants et produit annuellement de $1,5$ à $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Le bassin versant des Varras couvre une superficie de 30 km^2 . Il est de forme très allongée d'Ouest en Est et fortement entaillé en son axe depuis le point culminant à 146 mNGF jusqu'à l'exutoire dans la Seine à 4 mNGF. La station de pompage des Varras se trouve à l'extrême aval du bassin et draine 28 km^2 de celui-ci. Les études réalisées pour la définition du BAC divergent et donnent une superficie allant de 30 à 50 km^2 . De part la nature karstique de la ressource en eau, les études cherchant à démontrer les connexions hydrauliques ont débuté sur le BAC des Varras en 1985 et plus d'une trentaine de pertes ont été dénombrées à ce jour. Dans ce contexte, le captage des Varras était fréquemment touché par des épisodes de turbidité et une usine de traitement par ultrafiltration sur membranes a été construite afin de continuer l'exploitation de la ressource.

III. MATERIELS ET METHODES

III.1. Jeu de données

La turbidité est mesurée au captage depuis 1995, d'abord au pas de temps journalier jusqu'en 1999 puis au pas de temps horaire à partir de 2001 jusqu'en 2005 (Figure 1). La pluviométrie est suivie au même pas de temps dans une station située sur le bassin versant. Les travaux d'aménagement ont été réalisés entre 1997 et 2001 de sorte que ces deux chroniques permettent globalement de considérer les restitutions sans et avec ces aménagements afin d'évaluer l'efficacité de ceux-ci sur l'occurrence des épisodes turbides au captage. Cependant, l'occurrence de ces épisodes est fortement contrainte par l'occurrence et l'intensité des épisodes pluvieux. Afin de d'affranchir de cet impact, le rapport entre la turbidité et la pluviométrie a été calculé afin d'obtenir un indice de réponse du système. Cet indice a été lissé par moyenne mobile d'ordre 7 correspondant au temps modal maximum observé dans les différents traçages (Figure 1).

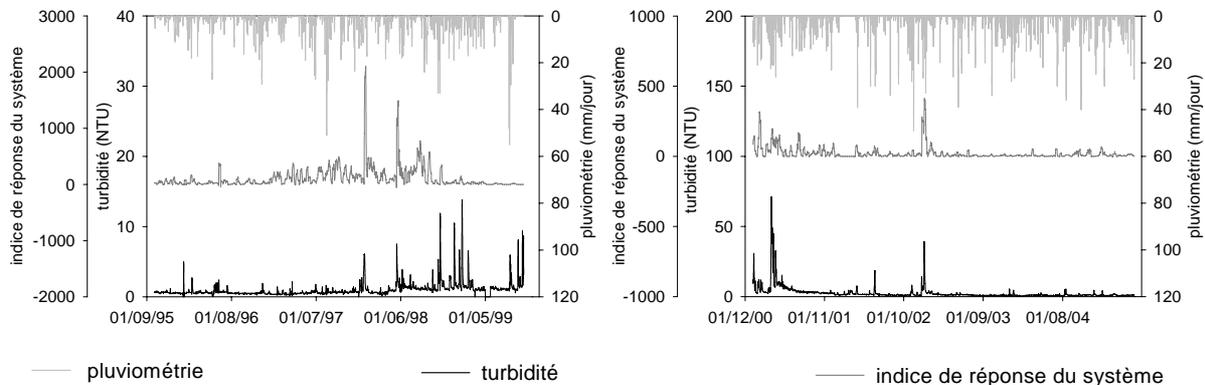


Figure 1 : pluie, turbidité et indice de réponse du système de 1995 à 1999 et de 2001 à 2005

Cet indice ne prend en compte que les phénomènes de transfert direct d'eau de ruissellement introduite dans le système via les bétouilles car en absence de pluie l'indice est nul. Il permet d'établir un signal entre l'intensité de l'épisode pluvieux et l'intensité de la réponse turbide. Cependant, il donnera moins d'importance aux forts épisodes pluvieux puisque pour une même turbidité, il sera plus faible lorsqu'une forte pluie surviendra. Le signal ainsi construit permet d'évaluer la sensibilité du système aux pluies.

III.2. Analyses en ondelettes

Les méthodes d'analyse du signal ont été introduites en hydrologie karstique par Mangin (12-15). Parmi ces méthodes, l'analyse spectrale par transformée de Fourier a été la première employée dans le cadre de l'analyse systémique des aquifères karstiques. Cependant, elle ne s'avère pas être un outil adapté à l'étude des signaux non-stationnaires dont le contenu fréquentiel varie au cours du temps.

De tels signaux nécessitent la mise en place d'une analyse temps-échelle qui permet la localisation des périodicités dans le temps et indique si la période varie d'une façon continue ou si elle disparaît puis réapparaît par la suite.

Pour répondre à cette problématique, l'analyse spectrale par transformée en ondelettes a été introduite en hydrologie karstique (16-20). Contrairement à la transformée de Fourier, celle-ci décompose le signal en une somme de fonctions de taille finie localisées dans le temps pour chaque fréquence repérée dans le signal. Elle permet d'analyser efficacement les signaux en

identifiant les fréquences et en les localisant dans le temps tout en prenant en compte la nature particulière du fonctionnement karstique comme le comportement multi-échelle et l'instationnarité.

III.3. Modélisation par interpolation paramétrique

La méthode d'interpolation paramétrique (21) permet de générer un modèle paramétrique stochastique du signal en utilisant plusieurs sinusoides amorties ou non amorties, de manière à ce que les propriétés statistiques du modèle soient les plus proches de celles des données. La modélisation s'effectue en plusieurs étapes : i) suppression de tendance ou centrage des données susceptibles de masquer une partie des fluctuations de plus hautes fréquences, ii) estimation du nombre de composantes et de leurs fréquences, iii) ajustement par moindres carrés linéaires du modèle paramétrique.

Dans une première étape, la chronique de l'indice de réponse du système est modélisée à partir de sinusoides amorties rendant compte de la perte de puissance progressive et continue observée et supposée imputable aux aménagements :

$$y = A \sin(2\pi Fx + P) e^{-kx}$$

A désignant l'amplitude, F la fréquence, P la phase et k le coefficient d'amortissement des sinusoides ; x le temps

Dans une seconde étape, afin de simuler l'indice de réponse du système dépourvu de l'impact des aménagements, il est nécessaire de créer de nouveaux modèles qui ne tiennent pas compte de l'amortissement du signal. Pour cela, des sinusoides non-atténuées sont générées à partir des sinusoides amorties précédemment utilisées. Ces nouvelles sinusoides, conservent les mêmes propriétés paramétriques et statistiques que les sinusoides de base, et donc les propriétés de l'indice de réponse du système :

$$y = A' \sin(2\pi Fx + P)$$

La comparaison entre les différentes sinusoides générées (amorties et non-amorties) est illustrée par la figure 2.

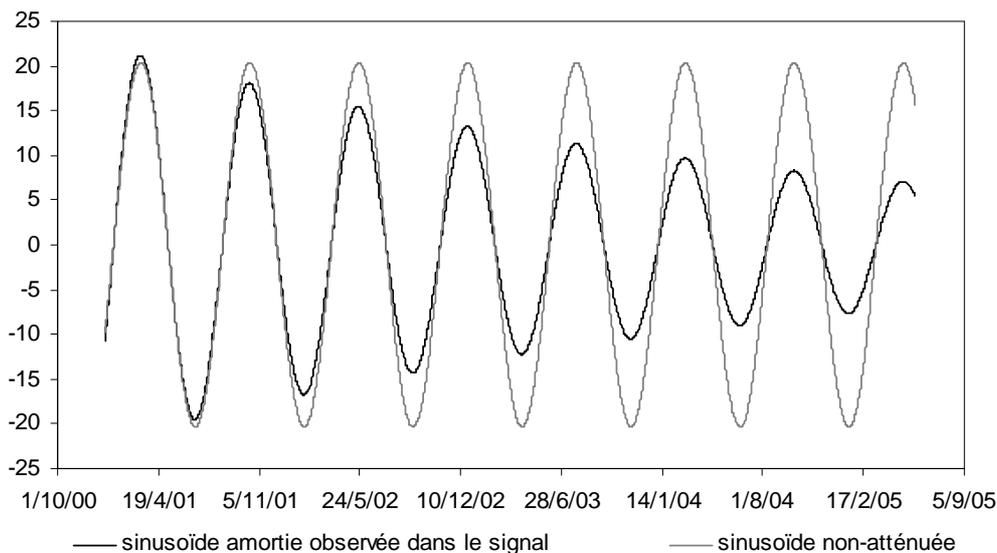


Figure 2 : comparaison entre sinusoïde amortie et non-atténuée.

IV. RESULTAT ET DISCUSSION

IV.1. Décomposition de l'indice de réponse du système par analyse en ondelettes

L'indice de réponse du système représente la sensibilité à la pluie du captage des Varras. Celui-ci présente des valeurs beaucoup plus fortes entre 1995 et 1999 que lors de la période 2001-2005. Cependant, les valeurs de turbidité sont plus faibles lors de la 1^{ère} période que lors de la 2^{ème} ; ce qui s'explique par une pluviométrie plus faible entre 1995 et 1999 (figure 1). L'indice de réponse traduit donc un changement dans la sensibilité à la pluie du captage des Varras entre les deux périodes : la 1^{ère} montre une sensibilité plus forte avec une tendance linéaire à la hausse alors que la 2^{ème} montre une sensibilité plus faible avec une tendance linéaire à la baisse (figure 3 a,d).

Des analyses spectrales par transformée en ondelettes ont été réalisées sur ces deux périodes afin d'explorer les variations du contenu fréquentiel des deux signaux. Les hautes fréquences (inférieures à 30 jours) et basses fréquences (supérieures à 40 jours) ont été séparées afin de reconstruire le signal de l'indice de réponse (figure 3).

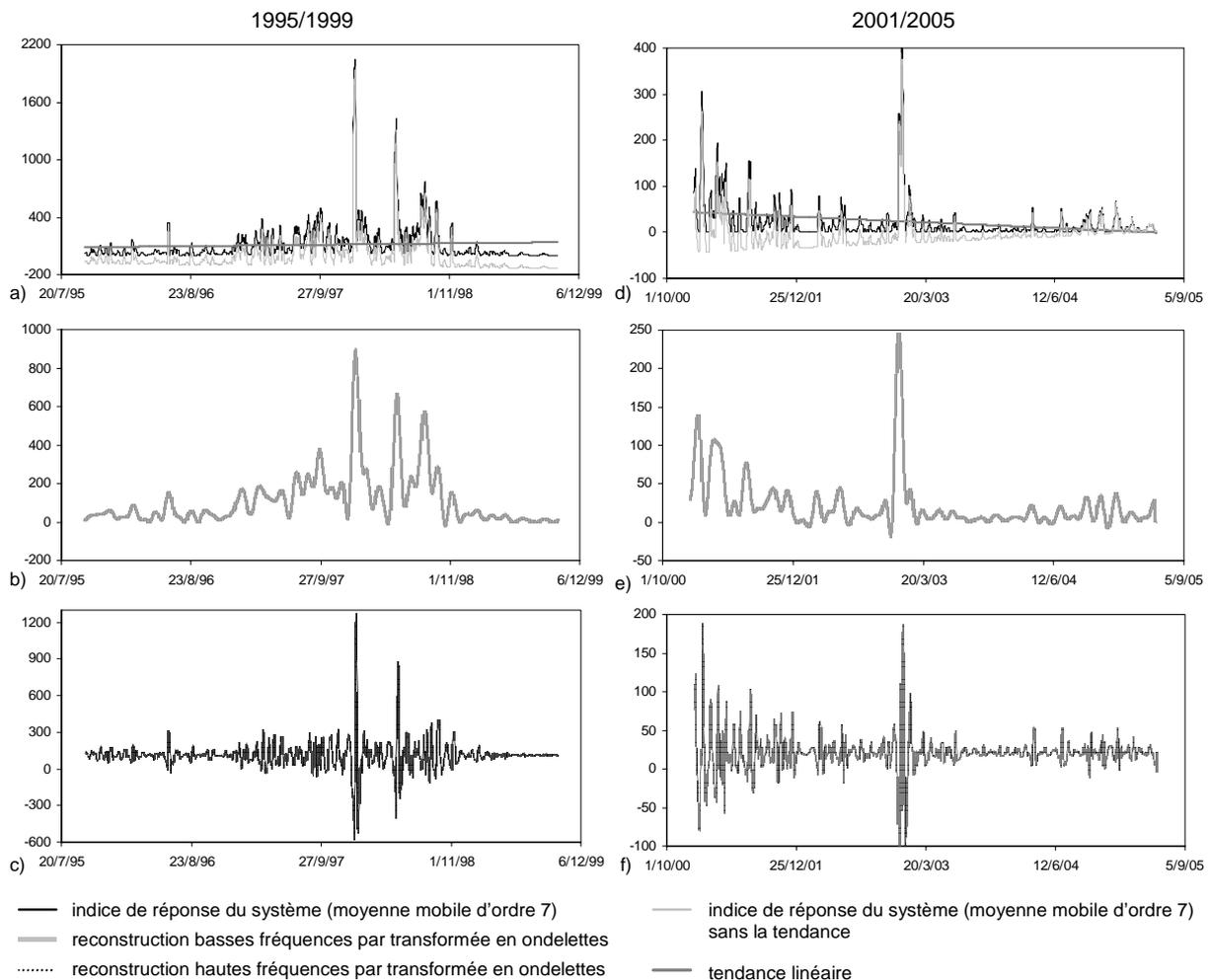


Figure 3 : reconstruction par transformée en ondelettes des basses et hautes fréquences de l'indice de réponse du captage à la pluie sans tendance pour les périodes 95-99 et 01-05

Les pourcentages de variance expliqués par les hautes et les basses fréquences durant la période 1995-1999 sont respectivement de 30% et 65% alors qu'ils sont de 14 et 81% durant la période 2001-2005 (tableau 1).

	1995-1999	2001-2005
hautes fréquences (F<30j)	30%	14%
basses fréquences (F>40j)	65%	81%

Tableau 1 : Pourcentage de variance exprimé par les hautes et basses fréquences de l'indice de réponse du captage des Varras durant les périodes 1995-1999 et 2001-2005

Ces résultats montrent qu'en plus d'une diminution de la sensibilité à la pluie du captage des Varras, la part des hautes fréquences dans cette sensibilité, supposée due aux infiltrations ponctuelles via les bétoires, a diminué de moitié entre les deux périodes étudiées.

IV.2. Modélisation de l'impact des aménagements sur l'indice de réponse du système

Les aménagements de bétoires réalisés pour la protection de la ressource en eau du captage des Varras sont supposés avoir eu un effet sur son indice de réponse. La diminution de la sensibilité à la pluie observée sur la période 2001-2005 est supposée résulter de ces aménagements engendrant un amortissement des fonctions sinusoïdales utilisées pour modéliser le signal. Si nous annulons l'amortissement de ces fonctions, nous supposons recréer le signal qu'il y aurait eu en absence des aménagements.

La tendance linéaire décroissante observée dans le signal de l'indice de réponse sur la période 2001-2005 fait partie de cette amortissement. Par conséquent, elle doit être supprimée afin de modéliser le signal dépourvu de l'impact des aménagements.

Le modèle d'interpolation paramétrique a été effectué sur le signal 2001-2005 sans tendance. Le modèle reproduit assez bien le signal observé ($R^2=0,637$) malgré une sous-estimation des hautes fréquences certainement due au pas d'échantillonnage journalier (figure 4a). Le modèle à partir des mêmes sinusoïdes mais non-amorties montre des amplitudes de variations nettement plus importantes (figure 4b).

Ces modèles sont à ce stade dépourvus de la tendance initialement extraite pour la modélisation de l'indice de réponse du système. Il est donc nécessaire de la rajouter afin de comparer le signal modélisé au signal brut et évaluer l'effet des aménagements sur la sensibilité à la pluie du captage des Varras (Figure 5). La surface grise correspond à la différence entre le signal modélisé non-amorti et le signal brut observé. Elle représente une augmentation de 69% de l'indice de réponse du captage. La valeur moyenne de l'indice de réponse du captage en 1995-1999 est égale à 112 et celle de 2001-2005 vaut 23. La valeur moyenne de la différence entre le signal brut observé en 2001-2005 et le signal modélisé avec la tendance est de 66. Le calcul de la tendance du signal modélisé donne des résultats similaires à ceux calculés pour la période 1995-1999 (tableau 2).

	1995-1999	2001-2005
coefficient de la régression	0,0362	-1181
ordonnée à l'origine	0,0288	-1015

Tableau 2 : comparaison des tendances linéaires de l'indice de réponse du système en 1995-1999 et de celui modélisé avec la tendance pour 2001-2005

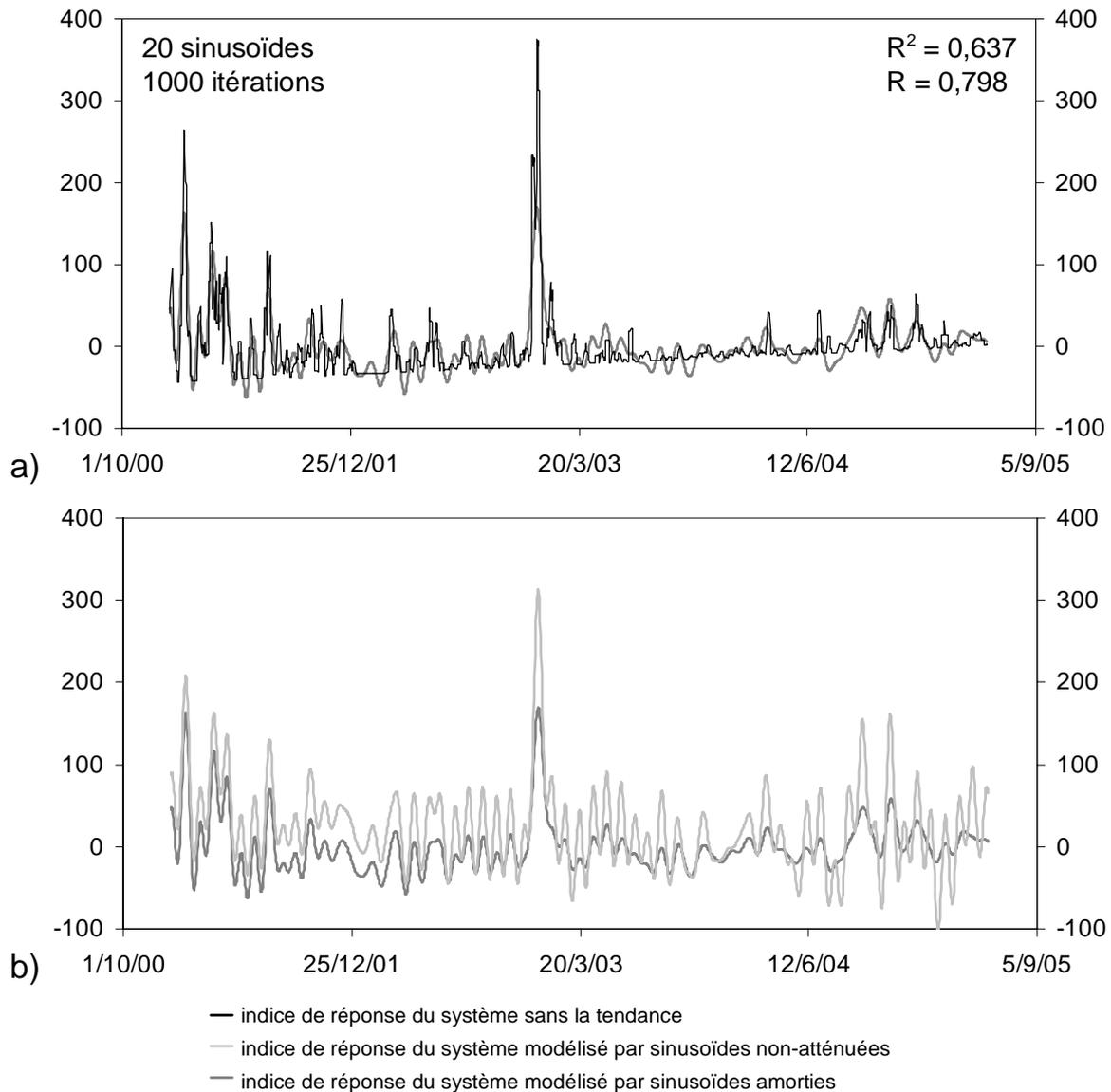


Figure 4 : Comparaison des chroniques sans tendance de la réponse du système observée et modélisée par sinusoides amorties et non-amorties

Ces résultats permettent de vérifier la validité du modèle d'interpolation paramétrique. Ainsi, le signal non-amorti ajouté de la tendance linéaire constitue une bonne approximation de la sensibilité à la pluie du captage des Varras s'il n'y avait pas eu les aménagements.

L'impact de ces aménagements est plus important à partir de 2003 lorsque tous les ceux-ci ont été terminés (figure 5). On pourrait y voir aussi l'effet de l'ajout de la tendance mais cet aspect est également perceptible sur le signal non-amorti sans la tendance (figure 4).

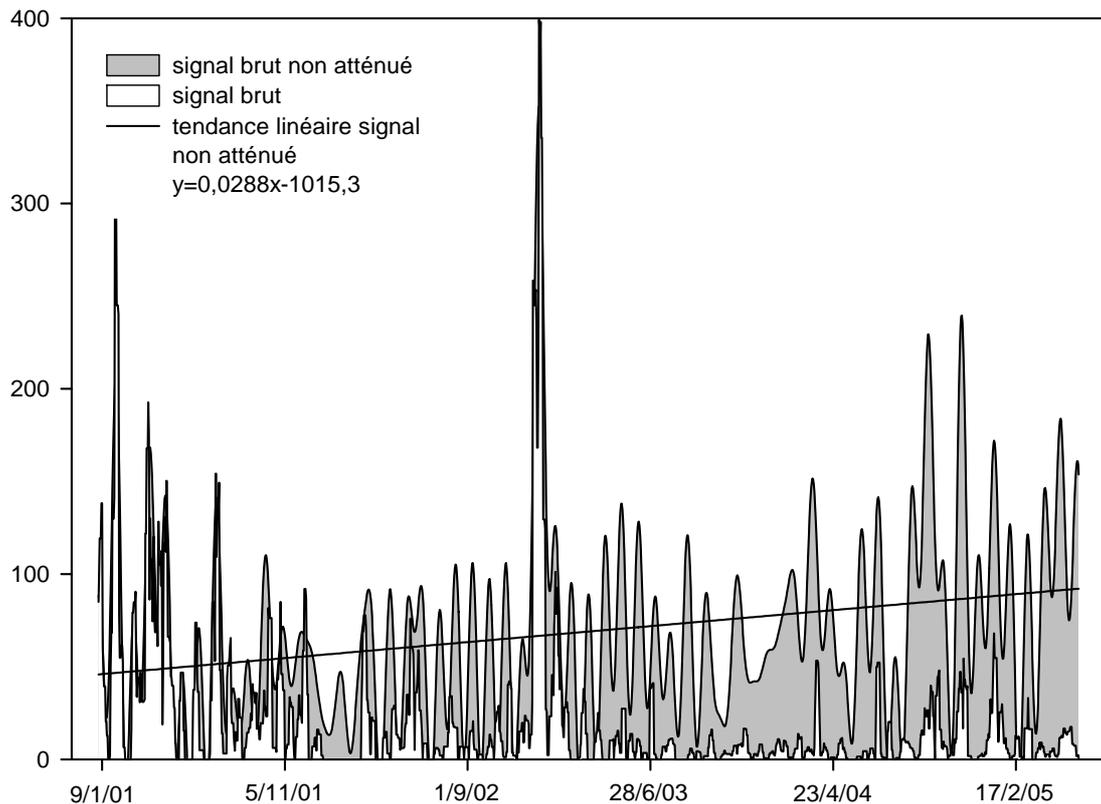


Figure 5 : Comparaison entre l'indice de réponse du système observée et modélisée

V. CONCLUSION

L'occurrence des phénomènes turbides à un captage est fortement dépendant de la répartition temporelle des pluies. Le calcul du ratio entre turbidité et pluviométrie, comme indice de la sensibilité de la réponse du captage à la pluie, permettrait de s'affranchir de l'impact des variations interannuelles de la pluviométrie et ainsi d'évaluer les seuls impacts des aménagements de bétoires. La décomposition du signal et sa reconstruction à partir des hautes et basses fréquences par transformée en ondelettes ont permis de constater une diminution de moitié de la sensibilité due aux infiltrations concentrées au niveau des bétoires. La modélisation du signal par interpolation paramétrique a permis de définir le signal qu'il y aurait eu sans les aménagements puis de le comparer au signal observé. Les résultats ont montré une nette diminution de près de 70% de la sensibilité du captage et une inversion de la tendance à l'augmentation de cette réponse.

La méthodologie proposée dans cet article offre des perspectives intéressantes pour l'évaluation des impacts des aménagements sur la sensibilité de la réponse à la pluie des captages d'alimentation en eau potable. De plus, cette méthode peut également être utilisée pour évaluer d'autres impacts liés notamment aux changements d'occupation du sol, et d'aménagement du territoire.

Références bibliographiques

(1) **Laignel B.**, 1997 – Les altérites à silex de l'ouest du Bassin de Paris. Caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulat. *Thèse Université Rouen, Edition BRGM.*

- (2) **Lesage J.**, 2004 – Protection du captage des Varras : étude de l'aménagement des bétoires et suivi de la qualité des eaux brutes. *Rapport MST 2^{ème} année, Université de Rouen.*
- (3) **Desetres**, 2005 – Caractérisation de l'origine de la turbidité au captage des Varras (Eure). *Rapport MST 2^{ème} année, Université de Rouen.*
- (4) **De La Queriére P.**, 1993 – Révision des périmètres de protection du captage des Varras. *BRGM.*
- (5) **De La Queriére P.**, 1997 – Reconnaissance du sous-sol du bassin d'écrêtement du Val Postel (bétoire 14). *ANTEA.*
- (6) **Gombert P. et Ternon M.**, 2000 – Expertise contradictoire environnementale, juridique et financière sur les rejets vers l'environnement du captage des Varras. *Gaudriot.*
- (7) **Gombert P.**, 2001 – Expérience de traçage de la bétoire n°3 avec suivi au captage des varras, *Gaudriot.*
- (8) **Géocarta**, 2003 – Rapport sur la prospection géophysique de la bétoire n°14.
- (9) **Sogeo expert**, 2003 – Reconnaissance géologique : bétoire n°14.
- (10) **Gombert P.**, 2004 – Réalisation d'une opération de traçage sur la bétoire n°10 : rapport final. *Gaudriot.*
- (11) **Rodet J.**, 1991 – Les karsts de la craie : étude comparative. *Thèse d'Etat, Université Paris IV.*
- (12) **Mangin A.**, 1975 – Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. *Thèse d'Etat, Université de Dijon.*
- (13) **Mangin A.**, 1981a – Apports des analyses corrélatoire et spectrale croisées dans la connaissance des systèmes hydrologiques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 293: 1011-1014.
- (14) **Mangin A.**, 1981b – Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 293: 401-404.
- (15) **Mangin A.**, 1984 – Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology*, 67: 25-43.
- (16) **Labat D., Ababou R. et Mangin A.**, 1999a – Analyse en ondelettes en hydrologie karstique. 1ère partie: analyse univariée de pluies et débits de sources karstiques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 329: 873-879.
- (17) **Labat D., Ababou R. et Mangin A.**, 1999b – Analyse en ondelettes en hydrologie karstique. 2ème partie: analyse en ondelettes croisée pluie-débit. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 329: 881-887.
- (18) **Labat D., Ababou R. et Mangin A.**, 2000 – Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part II: continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses. *Journal of Hydrology*, 238(3-4): 149-178.
- (19) **Mathevet T.**, 2002 – Analyse du fonctionnement du système karstique de Bange-L'eau-Morte (Bauges, Savoie et Haute-Savoie, France). *Rapport de DEA, Université de Paris VI.*
- (20) **Mathevet T., Lepiller M., Mangin A.**, (2004) – Application of time-series analyses to the hydrological functioning of an Alpine karstic system: the case of the Bange-L'Eau-Morte karstic system. *Hydrology and Earth systems sciences*, 8 (6), 1051-1064
- (21) **Rossi A.**, 2007 – Variabilité du transfert hydrosédimentaire dans le bassin versant du Mississippi dans le contexte du changement global : forçage climatique et modélisation de l'impact anthropique. *Rapport M2R, Université de Rouen.*

Synthèse des travaux sur les Îles Loyauté (Nouvelle Calédonie). Problèmes de la gestion de la ressource en eau

François Orange^{(1) (5)}, Michel Allenbach⁽²⁾, Michel Lepiller^{†(3)}, Didier Lille⁽⁴⁾, Alexandre Hoesz⁽³⁾, Dorota Jaromin⁽³⁾, Aziz Atiyeh⁽³⁾, Vincent Cadoret⁽³⁾, Savinien Navarre⁽³⁾

⁽¹⁾ Institut des Sciences de la Terre d'Orléans - Bâtiment Géosciences, Université d'Orléans, BP 6759 - 45067 Orléans cedex 2 - orange@cnrs-orleans.fr

⁽²⁾ LGPMC-EA 3325, Université de la Nouvelle Calédonie - BP R4 - 98851 Nouméa cedex, Nouvelle Calédonie - allenbach@univ-nc.nc

⁽³⁾ Polytech'Orléans, Université d'Orléans - 8 rue Léonard de Vinci - 45072 Orléans cedex 2

⁽⁴⁾ US Espace, Institut de Recherche pour le Développement, Nouméa - BP A5 - 98848 Nouméa cedex, Nouvelle Calédonie - didier.lille@noumea.ird.fr

⁽⁵⁾ Centre de Biophysique Moléculaire CNRS - 45071 Orléans cedex 2

I. INTRODUCTION

Avant sa disparition en 2006, Michel Lepiller était fortement impliqué dans l'étude hydrogéologique des Îles Loyauté (Nouvelle-Calédonie), au sein d'un programme de recherche pluridisciplinaire concernant la compréhension et la gestion de la ressource en eau sur ces îles, impliquant de nombreux partenaires en Nouvelle-Calédonie ainsi qu'en France.

Cet article a pour but de présenter l'originalité des formations karstiques des Îles Loyauté, et de montrer comment Michel Lepiller, accompagnés de nombreux étudiants, a pu y transposer ses connaissances des systèmes karstiques, pour y mettre en œuvre une série d'études qui a permis de faire avancer notre conception des aquifères de ces îles.

II. PRÉSENTATION DES ÎLES LOYAUTÉ

II.1 Histoire géologique

L'archipel de la Nouvelle-Calédonie (Fig. 1) s'est formé à la suite de plissements de la croûte océanique à l'est de la plaque australienne. L'un de ces plissements a donné la Grande Terre, tandis qu'un autre, parallèle au premier, a formé la ride des Loyauté. C'est sur cette ride que se sont formées les Îles Loyauté (du nord-ouest au sud-est : Ouvéa, Lifou, Tiga, Maré), des îles hautes carbonatées qui, malgré leurs tailles et aspects différents, ont la même origine et la même structure géologique.

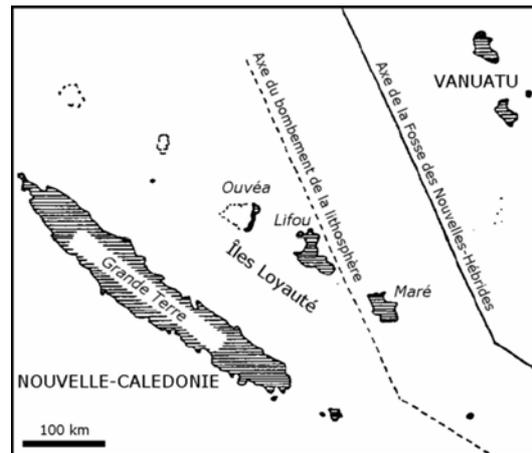


Figure 1 : Carte de la Nouvelle-Calédonie montrant la position des Îles Loyauté par rapport à la Fosse des Nouvelles-Hébrides et au bombement de la lithosphère (1), adapté de (2).

Sur un soubassement basaltique (Miocène), seul reste d'anciens volcans, s'est ainsi développé, entre 11 Ma (Miocène supérieur) et 3 Ma (Pliocène), une formation calcaire sous l'action des rhodolithes (algues rouges) qui constitue aujourd'hui 95% du calcaire des Loyauté. Ce calcaire à rhodolithes se présente sous forme de formations alguaires sphériques (quelques centimètres de diamètres) cimentées entre elles, donnant un aspect boursoufflé aux affleurements. Par la suite, une formation récifale, d'origine principalement corallienne, s'est développée au Pliocène sur cette formation à rhodolithes tout autour des îles, et a formé le bourrelet périphérique (large de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres) qui ceinture les Loyauté et surplombe d'une cinquantaine de mètres le plateau central des îles (Fig. 5a). L'érosion de ce bourrelet a donné lieu à une sédimentation de matériau biodétritique au centre de l'île, qui a recouvert le calcaire à rhodolithes (Fig. 2) (2, 3, 4).

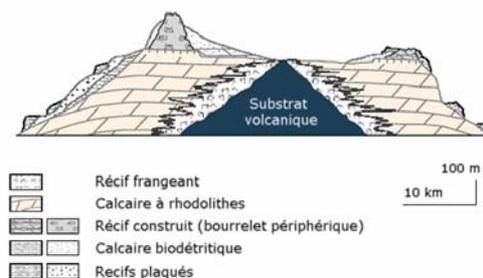


Figure 2 : Coupe lithologique synthétique de l'île de Maré (4), adapté de (2).

La présence de formations coralliennes jusqu'à une centaine de mètres d'altitude, ainsi que la différence d'aspect des îles s'expliquent par la proximité d'une zone de subduction (fosse des Nouvelles-Hébrides) où la plaque australienne plonge sous la plaque Pacifique. Cette subduction entraîne un bombement de la plaque océanique qui est le socle des Îles Loyauté (Fig. 3). Au fur et à mesure de l'avancée de la plaque australienne, les Îles Loyauté, Maré la première, ont atteint depuis le Pléistocène ce bombement et ont progressivement émergé (Fig. 3) (1). Maré semble avoir déjà basculé de l'autre côté du bombement et entamé son plongeon vers la fosse de subduction, tandis que Lifou est encore en phase d'ascension. Ouvéa ferme la marche et se trouve dans la position qu'occupait Lifou et Maré il y a quelques centaines de milliers d'années. Elle a ainsi à peine entamé sa phase d'ascension, ce qui explique qu'elle ne présente qu'une faible surface émergée, et un plateau central encore submergé. C'est au cours de cette émergence

que des récifs coralliens ont recouvert le calcaire à rhodolithes au niveau du littoral, donnant naissance à un certain nombre de terrasses et de falaises tout autour des îles (Fig. 2).

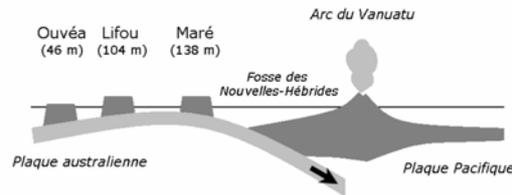


Figure 3 : Profil de la zone de subduction à proximité des Îles Loyauté.

II.2. Organisation du réseau karstique et structure de la nappe d'eau douce

II.2.1. Développement du karst

Depuis le début de l'émersion des îles, un important réseau karstique s'est formé dans le plateau calcaire, sous l'effet de l'infiltration des eaux météoritiques et de l'eau de mer par les nombreuses fractures qui parcourent les massifs calcaires. Cette fracturation a été accentuée par les déformations provoquées par le parcours des îles sur le bombement de la lithosphère. Les formations karstiques se sont développées dans le calcaire à rhodolithes, qui est beaucoup plus sensible à l'érosion que le calcaire corallien. Le sous-sol de toutes les Îles Loyauté comporte ainsi de nombreux vides (cavités, trous d'effondrements, fractures élargies) qui peuvent atteindre des tailles impressionnantes (jusqu'à une centaine de mètres de diamètre à Maré et Lifou, Fig. 5b). Ces formations karstiques atteignent parfois la surface (exokarst) dans les zones où la couche de calcaire corallien est peu épaisse et s'est effondrée. De ce fait, les formations exokarstiques sont essentiellement présentes en périphérie des îles, au pied du bourrelet périphérique.

II.2.2. Une lentille d'eau douce

L'une des caractéristiques principales des quatre principales Îles Loyauté (Lifou, Maré, Ouvéa et Tiga) est leur absence de réseau hydrographique superficiel : on n'y trouve en effet aucun cours d'eau. Du fait de la grande porosité du socle calcaire, de l'importance de la fracturation et du réseau karstique, la totalité des importantes précipitations (1600 mm/an en moyenne) s'infiltré en effet directement dans le sol.

Ces îles sont véritablement des cailloux posés au milieu de l'océan Pacifique. De ce fait, l'existence d'une nappe d'eau douce apparaît comme un petit miracle géologique. Les Îles Loyauté disposent pourtant toutes d'une nappe d'eau douce ou saumâtre qui « flotte » sur l'eau salée, grâce à sa plus faible densité, et la faible miscibilité des deux liquides. Vue de profil cette nappe prend la forme d'une lentille dite de Ghyben-Herzberg, d'après les auteurs qui ont décrit ce modèle (Fig. 4).

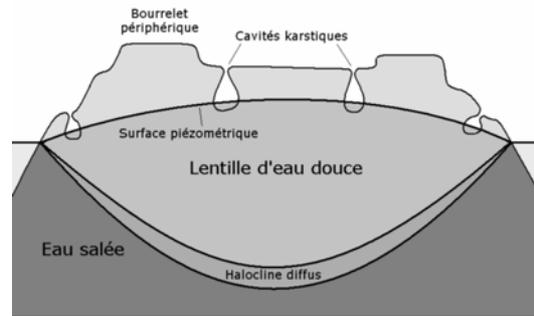


Figure 4 : Représentation schématique de la lentille d'eau douce des Îles Loyauté, adapté de (2).

Ce modèle est assez simpliste, mais permet de bien décrire la morphologie générale des nappes d'eau douces des Îles Loyautés. La taille et la salinité de cette lentille d'eau dépendent de la taille de l'île. Ainsi on trouve une nappe d'eau douce importante à Lifou et Maré, tandis que seule une petite nappe d'eau contaminée par l'eau de mer est présente à Ouvéa et Tiga. Les niveaux piézométriques suivent la même tendance : la nappe d'eau douce à Lifou et Maré atteint respectivement 3,5 et 2,5 mètres au dessus du niveau de la mer, tandis qu'elle atteint à peine quelques dizaines de centimètres à Ouvéa (5, 6). La limite inférieure de cette nappe se situe à approximativement 40 fois le niveau piézométrique.

L'équilibre qui maintient la lentille d'eau douce est fragile, et dépend d'une alimentation régulière de la nappe, et de variations limitées de son niveau et du niveau marin, afin de limiter la contamination par l'eau salée (5).

II.3. Conséquences pour la gestion de la ressource en eau. Programmes de recherches (ADAGE, SAGE)

L'accès à l'eau douce et la gestion de cette ressource est un problème de longue date aux Îles Loyauté. Hormis les citernes, la nappe d'eau douce représente ainsi la seule source d'eau potable pour les populations de Lifou et Maré. A Ouvéa, l'absence d'une vraie nappe d'eau douce a conduit à la construction récente d'une usine de dessalement.

II.3.1 Vulnérabilité de la nappe d'eau douce

Comme nous l'avons déjà mentionné, la présence d'une nappe d'eau douce sur ces îles repose sur un équilibre précaire. L'eau potable est exposée à une pollution par l'eau salée et à la pollution humaine.

Si, en théorie, la limite entre la nappe d'eau et l'eau salée (ou halocline) sur laquelle elle repose est nette, les études ont montré que cet halocline est plutôt diffus (Fig. 4), moins profond que la valeur théorique, et qu'il se déplace en fonction des variations du niveau piézométrique, comme celles entraînées par les pompages. Une légère variation du niveau piézométrique suffit à faire remonter fortement l'halocline. Ainsi un pompage intensif entraînerait une baisse significative du niveau piézométrique, et inversement, une remontée de l'halocline, ce qui peut aboutir dans le cas extrême au pompage d'eau salée.

La nature très perméable des terrains calcaires rongés par la karstification fait que les substances polluantes peuvent être entraînées par les eaux météoriques jusque dans la nappe, et sont donc une menace permanente vis à vis de la potabilité des eaux de pompage.

Confronté à la croissance démographique et au développement agricole, artisanal et touristique, le développement économique durable des Îles Loyauté est donc lié à la capacité des populations (20000 habitants au total) à préserver la qualité des eaux souterraines, et donc

à savoir exploiter raisonnablement cette ressource, tout en limitant et en maîtrisant les activités pouvant entraîner une pollution. Dans cette optique, différents programmes de recherches pluridisciplinaires ont été mis en œuvre.

II.3.2. Programmes d'étude de la ressource en eau

Dans un premier temps, le programme ADAGE (Aide à la Décision en Aménagement et Gestion de l'Environnement) a d'abord été mis en œuvre à Lifou, et a mobilisé plusieurs partenaires des Îles Loyauté et de Nouvelle-Calédonie (IRD, Province des Îles Loyauté, Mairie de Lifou, autorités coutumières, ALCATEL-Space-Industrie et UNC) avec l'objectif de rassembler les connaissances relatives à la ressource en eau de cette île. Il en est ressorti que le volume de la nappe d'eau douce de Lifou était nettement suffisant pour subvenir aux habitants et aux activités de l'île, à condition de pomper l'eau de manière répartie et modérée (7). Ces conclusions sont également valables pour Maré. En ce qui concerne Ouvéa et Tiga, si la nappe d'eau est insuffisante ou inutilisable en l'état, elle demeure tout de même vulnérable à une pollution humaine.

Ce programme a aussi mis en avant notre manque de connaissances concernant les risques de pollution aux Îles Loyauté, les zones les plus sensibles, et la conciliation du développement social et économique (agriculture, tourisme, élevage, urbanisation) de ces îles avec une gestion équilibrée des ressources en eau.

C'est avec l'objectif de répondre à ces problématiques que le programme SAGE – Îles Loyauté (Système d'Aide à la Gestion de l'Environnement - Gestion Durable de la Ressource en Eau) a été entrepris, partenariat pluridisciplinaire (géosciences, géomatique, géographie, droit, communication) entre l'IRD, les Universités de Nouvelle-Calédonie et d'Orléans, et la Province des Îles Loyauté. Les objectifs étaient d'améliorer la connaissance des mécanismes de circulation de l'eau dans les nappes des Îles Loyautés pour permettre la compréhension en matière de risque des conséquences d'une pollution des nappes d'eau douce, d'établir des cartes de vulnérabilité et d'aider à la localisation des activités à risque.

Cela passait par la réalisation d'un programme de recherche fondamentale sur la compréhension du karst des Îles Loyauté. La partie géologique de ce programme a ainsi été abordée sous deux facettes complémentaires, avec une approche d'hydrogéologie karstique d'une part, et une approche structurale (étude de la fracturation), d'autre part. Les recherches en hydrogéologie karstique avaient pour objectif précis de mieux caractériser l'aquifère et de préciser le rôle de la karstification dans son fonctionnement, l'objectif final étant l'élaboration d'un modèle le plus fidèle possible à la réalité, constituant un outil de gestion de l'aménagement et du développement.

Ce fut ainsi l'opportunité pour Michel Lepiller de mettre en application son expérience des réseaux karstiques, et d'impliquer plusieurs élèves ingénieurs qui l'ont accompagné lors des travaux en laboratoire ou sur place.

III. ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DES ÎLES LOYAUTÉ

Les études hydrogéologiques ont surtout concerné Lifou, et dans une moindre mesure Maré, qui sont les deux seules îles à posséder une nappe d'eau importante.

Cette série de travaux a été conçue par Michel Lepiller en collaboration avec les partenaires locaux. Pour leur mise en œuvre, il fut aidé par de nombreux élèves ingénieurs de Polytech'Orléans (Alexandre Hoesz, François Orange, Aziz Atiyeh, Vincent Cadoret, Dorota Jaromin et Savinien Navarre), lors des trois années qu'ont duré le programme SAGE (jusqu'en 2004) et les années suivantes.

Le déroulement de l'étude hydrogéologique des Îles Loyauté a suivi une démarche progressive, commençant par le recensement, la prospection et l'exploration spéléologique des formations karstiques à Lifou et Maré, suivis par l'identification d'axes de drainages préférentiels par des traçages fluorimétriques, et un recueil de chroniques de piézométrie le long de ces drains karstiques. Ces données et résultats furent la base d'une étude sur l'influence des précipitations et de la marée sur la nappe d'eau douce par analyses corrélatoires et spectrales (ACS), et d'une modélisation informatique de l'aquifère. Ces moyens d'analyses précis ont surtout été utilisés dans la zone de la Baie de Châteaubriand à Lifou, qui est la zone la plus peuplée de l'île, et qui présente également une grande concentration de formations karstiques (Fig. 6). L'objectif était d'obtenir une connaissance très poussée de cette zone test, pour pouvoir ensuite appliquer et généraliser les conclusions au reste de l'île et à Maré.

III.1. Repérage des cavités karstiques et des zones d'exhaure

Avant que soit entreprise l'étude hydrogéologique des Îles Loyauté, on considérait que l'exhaure était diffus et réparti sur tout le littoral, suivant le modèle de la lentille de Ghyben-Herzberg. Les zones importantes d'exhaure n'avaient jusque là pas été repérées, ou n'étaient connues que des habitants de l'île.

Une partie importante du temps passé aux Îles Loyauté par Michel Lepiller et ses étudiants a été consacrée au recensement des zones d'exhaure littorales, pour repérer de possibles zones préférentielles de drainage, par prospection du littoral à marée basse. D'importantes émergences ont ainsi été identifiées en différents points du littoral de Lifou et de Maré (Figs. 5c et d). L'eau qui y jaillit est toujours saumâtre (mélangée à l'eau de mer) et peut être détectée visuellement (aspect huileux des eaux saumâtres), ou par conductimétrie. De manière systématique, leur position a été relevée et des prélèvements d'eau ont été faits pour analyse.

En parallèle, un recensement des formations karstiques de Lifou et de leur localisation a été effectué par Alexandre Hoesz, à partir de la bibliographie existante, des informations données par les habitants de l'île, et complété par des observations aériennes ou satellite (8, 9). Cet inventaire a ensuite été suivi de l'exploration spéléologique de ces grottes, afin de voir dans quelles conditions elles permettaient l'accès à la nappe d'eau douce, de juger de leur taille, de leur morphologie et de leur orientation. Ce recensement a également été effectué à Maré.

Ce repérage des zones d'exhaures et la spéléologie dans les cavités karstiques constituaient le travail de base à l'étude hydrogéologique des Îles Loyauté. Il a été mené de manière régulière et soutenue au cours de toutes les missions de terrains par l'ensemble des élèves ingénieurs sous la responsabilité de Michel Lepiller, que ce soit à Lifou ou Maré.

Si le repérage des zones d'exhaure est loin d'être complet, il a toutefois permis de montrer que l'exhaure s'effectuait de manière localisée et non diffuse, et le plus souvent dans des parties concaves du trait de côte (comme au niveau de la baie de Châteaubriand à Lifou). Cette observation s'avère également cohérente avec les zones de drainage de l'aquifère mises en évidence par la piézométrie, qui montre une partition de l'aquifère en systèmes hydrogéologiques individualisés.

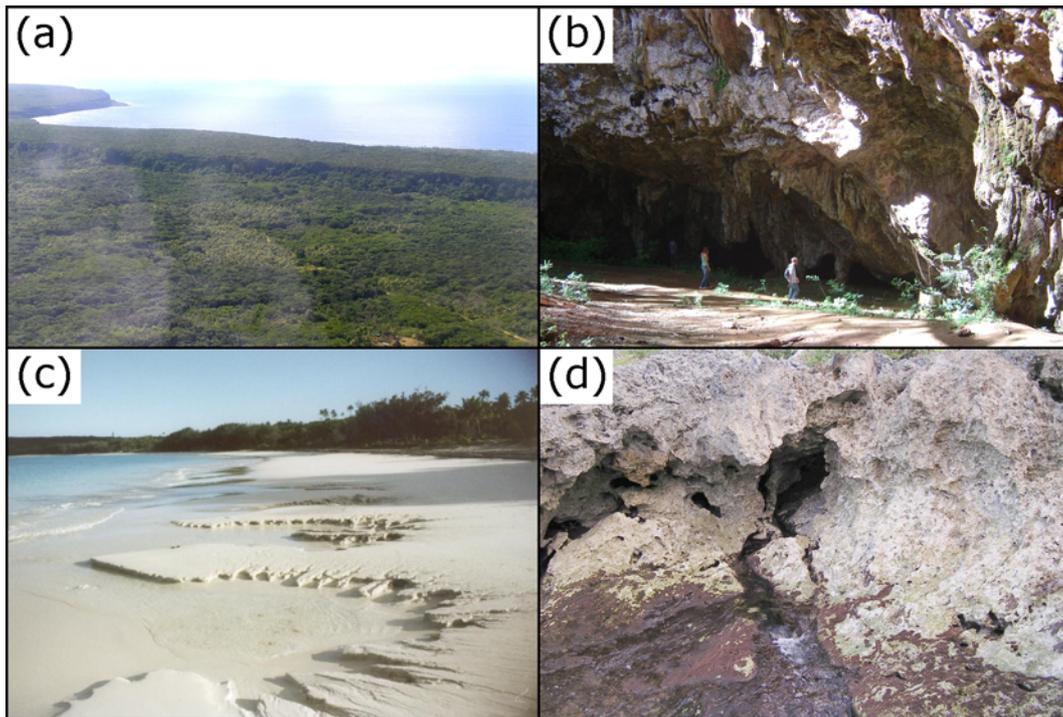


Figure 5 : Différents aspects géologiques et hydrogéologiques des Îles Loyauté. (a) Vue aérienne du bourrelet périphérique de Lifou (b) Exemple de formation karstique de grande taille à Maré. (c) Émergences visibles à marée basse sur la plage de Luecilla (Lifou) (d) Émergence visible à marée basse au niveau d'une fracture dans le calcaire corallien (Lifou).

III.2. Traçages

Le repérage d'alignements de formations exokarstiques à proximité de zones d'exhaures, ainsi que la variabilité probable de la perméabilité du massif calcaire de l'île ont conduit à la réalisation de traçages fluorimétriques dans divers sites à Lifou, afin de mettre en évidence l'existence de drains karstiques souterrains et d'évaluer les paramètres du transit à partir de la distribution des temps de séjour (temps moyen de séjour, vitesse apparente).

Ces traçages ont été réalisés en injectant de la fluorescéine ou de la rhodamine au fond de certaines formations karstiques où la nappe d'eau est accessible. En aval, des mesures par spectrofluorimétrie en laboratoire ou fluorimétrie *in situ* ont été effectuées sur l'eau prélevée aux points de sortie supposés.

C'est ainsi que des liaisons karstiques de grandes dimensions ont pu être mises en évidence, notamment entre les grottes de Thoubotr et Manet (Lifou) et la zone d'exhaure située plus en aval (Figs. 6 et 5d). Injecté au niveau du bourrelet périphérique, le traceur a atteint la mer, située à 2 km de là, en quelques jours. Ce traçage a ainsi permis de démontrer que la succession des manifestations exokarstiques était bien le témoignage en surface d'un drain karstique souterrain (9).

D'autre part, un traçage lancé dans une grotte proche de la mer à Luengoni (Lifou) a également montré un lien avec les émergences voisines, et a permis, par la même, de constater l'influence de la marée sur le fonctionnement de l'exhaure. A marée montante, la pression de l'eau de mer bloque l'exhaure, qui n'est alors fonctionnelle qu'à marée descendante (10).

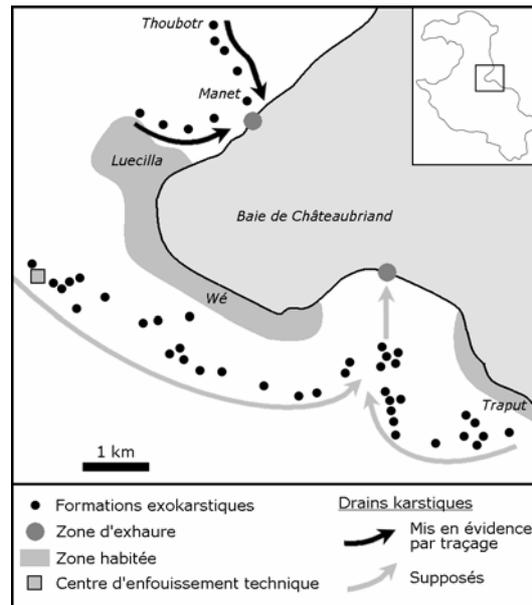


Figure 6 : Carte de la Baie de Châteaubriand (Lifou), avec la localisation des formations exokarstiques et le trajet des drains karstiques, mis en évidence par traçage fluorimétriques ou supposés.

III.4. Analyses Corrélatoires et Spectrales (ACS)

Dans la continuité de la réalisation de traçage, une étude approfondie de ce drain karstique (allant du haut du bourrelet périphérique (grotte de Thoubotr) jusqu'à la mer) a été menée pour appréhender la dynamique de la nappe au voisinage de la côte, et sa réaction aux variations de marée et aux événements pluvieux. Des appareils de mesures ont ainsi été installés au fond des grottes de Thoubotr et de Manet et ont enregistré, en continu et sur plusieurs mois, les niveaux piézométriques.

En parallèle, les données relatives à la pluviométrie et aux hauteurs de marées ont également été compilées. Le traitement de toutes ces chroniques par analyse corrélatoire et spectrale (ACS), effectué par Dorota Jaromin (11), a permis de préciser le fonctionnement de ce drain karstique. Tout d'abord, l'étude par ACS de la relation entre les précipitations et le niveau piézométrique a confirmé la rapidité de l'infiltration des eaux de pluie dans le sous-sol, en montrant une répercussion quasi-immédiate des précipitations sur la piézométrie. Ensuite, il a été montré que les variations du niveau de la nappe au sein d'un drain karstique sont très vite transmises, et qu'il n'y a qu'une dizaine de minutes de déphasage entre les niveaux piézométriques des grottes de Thoubotr et Manet, pourtant éloignées de 1400 mètres. En revanche, les variations de hauteur de marée tardent à se faire sentir sur la piézométrie de la nappe, même si l'onde de marée peut se faire ressentir jusqu'à plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres. Malgré la faible distance entre la grotte de Manet et la mer, un déphasage important a été constaté. Les variations dues à la marée ne se font sentir qu'une heure plus tard sur la piézométrie de la grotte. Ceci suggère que les massifs calcaires du littoral ont une perméabilité bien plus faible que le reste du drain karstique, et forment ainsi un bouchon qui retarde les effets de la marée sur la piézométrie.

III.4. Modélisation de l'aquifère

Une modélisation informatique a été réalisée par François Orange (10) et utilisée pour étudier le fonctionnement de la nappe d'eau douce à l'échelle de l'île de Lifou, puis à l'échelle de la

Baie de Châteaubriand, afin de simuler le comportement hydrodynamique de l'aquifère, le transit de l'eau et d'éventuelles substances polluantes, en intégrant les dernières connaissances acquises. Ces modèles ont été établis avec le logiciel ASMWIN (Aquifer Simulation Model) (12).

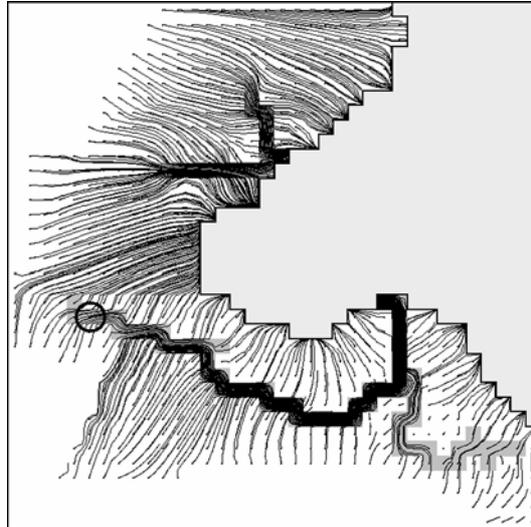


Figure 7 : Calcul par ASMWIN des trajectoires d'écoulement à la surface de la nappe d'eau douce sur une période d'un mois au niveau de la Baie de Châteaubriand (Lifou, cf. Fig. 6). Les mailles grisées correspondent aux formations karstiques qui ont été prises en compte dans la modélisation. La localisation du centre d'enfouissement technique est précisée (rond noir).

Il a ainsi été possible de simuler les trajectoires des écoulements d'eau autour de la Baie de Châteaubriand (Lifou), en prenant en compte la présence de drains karstiques avérés par traçages, ou supposés, qui suivent les alignements de formations exokarstiques, pour aboutir aux zones d'exhaure reconnues. La modélisation a ainsi permis de représenter de manière significative et spectaculaire l'influence de tels réseaux karstiques sur la piézométrie locale. Les écoulements d'eau apparaissent être capturés par les drains karstiques, et atteignent préférentiellement la mer au niveau des zones d'exhaure localisées (Fig. 7). Cette modélisation a enfin eu une application concrète en montrant que l'ensemble du drain karstique supposé au sud de la baie pourrait être exposé à une pollution provenant d'un centre d'enfouissement technique installé à proximité de formations exokarstiques (Fig. 6 et 7).

IV. CONCLUSION : APPORTS À LA COMPRÉHENSION DE CES AQUIFÈRES

Sur le plan scientifique, les recherches en hydrogéologie entreprises dans le cadre du programme SAGE ont permis de faire évoluer de manière significative notre représentation des aquifères des Îles Loyauté, pour aboutir à une modélisation dynamique de la circulation de l'eau. Auparavant vus comme des milieux avec une porosité interstitielle primaire, où la porosité et la perméabilité varient de manière homogène et continue, ces aquifères sont désormais considérés comme des milieux à porosité interstitielle primaire à laquelle se juxtapose une porosité secondaire résultat de la karstification, où la porosité et la perméabilité présentent des variations spatiales très fortes et brutales. La simulation du transit de l'eau et d'un éventuel polluant s'en trouve considérablement améliorée, et les modèles qui en découlent représentent un outil d'aide à la décision en matière d'aménagement du territoire et de gestion de la ressource en eau.

Sur le plan humain, Michel Lepiller a permis à plusieurs élèves ingénieurs d'acquérir une expérience qui s'intègre parfaitement dans leur formation, en les impliquant dans l'étude d'aquifères avec un réel problème de la gestion de la ressource en eau. Les travaux en hydrogéologie planifiés par Michel Lepiller et les résultats qu'ils ont amenés ont également permis la création de liens professionnels et humains forts entre les personnels des Universités d'Orléans et de Nouvelle-Calédonie, comme en témoigne la poursuite des recherches en hydrogéologie aux Îles Loyauté qui se prolongent encore actuellement, impliquant chaque année de nouveaux élèves ingénieurs.

Références bibliographiques

- (1) **Dubois J., Launay J., Récy J.**, 1974 – Uplift movements in New Caledonia, Loyalty islands area and their plate tectonics interpretation. *Tectonophysics*, 24 : 133-150.
- (2) **Maurizot P., Lafoy Y.**, 2003 – Carte géologique de la Nouvelle-Calédonie (1 / 50 000), feuille Maré, Îles Loyauté. Nouméa : Service des Mines et de l'Energie, Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Notice explicative par P. Maurizot *et al.* (2003).
- (3) **Maurizot P., Lafoy Y.**, 2004 – Carte géologique de la Nouvelle-Calédonie (1 / 50 000), feuille Lifou, Îles Loyauté. Nouméa : Service des Mines et de l'Energie, Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Notice explicative par P. Maurizot *et al.* (2004).
- (4) **Carrière D.**, 1987 – Sédimentation, diagenèse et cadre géodynamique de l'atoll soulevé de Maré, Nouvelle-Calédonie, thèse de Docteur ès sciences, Université de Paris-Sud, centre d'Orsay.
- (5) **Koch P.**, 1958 - Hydrogéologie des îles Loyautés. *Bulletin géologique de la Nouvelle-Calédonie, France*, 1 : 135-188.
- (6) **A2EP**, 1993 – Modélisation de la ressource en eau (Rapport I - Chapitre 2) : Elaboration d'un schéma d'exploitation et de protection de la ressource en eau sur Maré et Lifou, Rapport NOUMEA NCH 93/03 02, mars 1993. A2EP, Province des Îles, 65pp.
- (7) **Allenbach M., Taladoire G., Lille D.**, 2000 – The ADAGE concept. Freshwater resources in Loyalty islands (New-Caledonia). In Abst. 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brésil, Août 2000.
- (8) **Dupin L.**, 2002 – Cartographie géologique et géomorphologique pour le suivi des nappes d'eau douce à Lifou et Maré, rapport de stage, mém. DESS Géomatique, Université d'Orléans, 51 pp.
- (9) **Hoez A.**, 2003 – Etude hydrogéologique des Îles Loyauté, rapport de stage, mém. technicien, ESEM, Université d'Orléans, 68pp.
- (10) **Orange F.**, 2003 – Etude hydrogéologique des Îles Loyauté. Rapport de stage, mém. technicien, ESEM, Université d'Orléans, 58 pp.
- (11) **Jaromin D.**, 2007 – Gestion de la ressource en eau sur l'île de Lifou, rapport de stage, mém. ingénieur, Polytech' Orléans, 76 pp.
- (12) **Chiang W.H., Kinzelbach W., Rausch R.**, 1998 - Aquifer Simulation Model for WINDOWS - Groundwater flow and transport modeling, an integrated program. Berlin, Stuttgart (Borntraeger), 137 pp. <http://www.pmwin.net/asmwin6.htm>

Session 2
**Traçages artificiels: méthodologie,
technique, outils, interprétation**

Proposition d'une grille d'évaluation des résultats des traçages en milieu karstique (au moyen de traceurs fluorescents)

Paul-Henri Mondain⁽¹⁾, Philippe Muet⁽²⁾

⁽¹⁾ CALLIGEE – BP 82118 – 1 rue de la Noë – 44321 Nantes cedex 3 –
ph.modain@calligee.fr

⁽²⁾ GINGER Environnement et Infrastructures – BP 885 – 117 route de Nexon – 87016
Limoges Cedex – p.muet@gingergroupe.com

Résumé

Le traçage artificiel des eaux souterraines est une méthode rapide et pratique de reconnaissance des écoulements souterrains. Les traçages sont de plus en plus utilisés à la fois pour délimiter les aires d'alimentation de points d'eaux, captés ou non, et pour simuler des pollutions. Pour ce qui est de la simple reconnaissance des écoulements souterrains la compilation de données anciennes et, malheureusement, la valorisation de données récentes montrent que les résultats de traçages peuvent conduire à des interprétations hâtives voire à des incohérences hydrogéologiques.

C'est pour cette raison que dans les années 1990, Michel Lepiller avait commencé à réfléchir à une grille d'évaluation des résultats de traçages.

L'objet de cette note est de présenter la grille de Michel Lepiller et de reprendre la réflexion là où il l'avait laissée pour aboutir à deux grilles d'évaluation de la fiabilité des traçages : une pour les traçages à résultat positif, l'autre pour les traçages à résultat négatif. Une note allant de 0 à 10 par ordre de fiabilité croissante est alors attribuée à chaque traçage en fonction des techniques mises en œuvre pour étayer le résultat du traçage.

L'intérêt de cette cotation est de pouvoir évaluer, pour chaque expérience, la fiabilité statistique du résultat par rapport à la méthode de détection des traceurs employée. Ces grilles peuvent être utilisées a posteriori pour reprendre des interprétations hydrogéologiques et inciter ainsi l'hydrogéologue à éliminer les expériences peu fiables pour les rééditer à nouveau en ayant recours à des méthodes de détection plus fiables. Elles peuvent également servir à choisir la fiabilité d'une expérience avant de la réaliser, en connaissant les risques d'erreur que l'on prend sur les résultats positifs et négatifs.

Le principal enseignement de cet exercice est qu'il est impératif de demander les moyens de détection utilisés sur les fiches destinées à dresser un inventaire des traçages. De plus, il faut toujours donner le protocole de suivi des restitutions de traçage lorsque que l'on fait une publication.

L'important n'est pas automatiquement que le résultat soit fiable mais que l'on sache s'il ne l'est pas à 100%.

I. INTRODUCTION

I.1. Utilisation des traçages

Le traçage est une technique employée de longue date en hydrogéologie. Les premières « colorations » des eaux souterraines remontent en effet à la fin du 19^{ème} siècle. Les premiers essais relatés ont été réalisés par le Professeur Knop en 1869 pour mettre en évidence des pertes du Danube entre Immendingen et Tuttlingen en Allemagne (1). La coloration française la plus célèbre reste celle réalisée en 1931 par N. CASTERET au « Trou du Toro » qui a démontré que la Garonne prenait sa source en Espagne dans le massif de la Maladetta (2).

Cette technique a été initiée par les spéléologues. Son objectif principal était de mettre en évidence les relations hydrauliques existant entre un point de perte d'un écoulement de surface, ou bien l'extrémité aval d'une rivière souterraine reconnue en spéléologie, et une ou plusieurs sources localisées à la périphérie du massif karstique étudié. Sa finalité était avant-tout, de guider les spéléologues dans leur prospection de nouvelles cavités qui permettent de poursuivre la reconnaissance d'un réseau spéléologique.

Dès le début du XX^{ième} siècle, certains géologues officiels ont recours à cette technique pour mettre en évidence des problèmes d'hygiène publique. Fournier a notamment fait de nombreuses colorations pour démontrer de quelle façon étaient alimentées les fontaines publiques des villages du Doubs et attirer l'attention des Maires sur les rejets d'eau usées qui risquaient de contaminer ces fontaines (3).

A cette époque, le traceur employé était le plus souvent des colorants (fluorescéine principalement) et la détection du traceur se faisait uniquement de façon visuelle par observation de la coloration des sources surveillées. Cela supposait que les observateurs soient présents au bon moment, lorsque le traceur était restitué à la source, et que le traceur ressorte à une concentration suffisante pour que sa coloration spécifique soit perceptible sans équivoque.

De nos jours, parallèlement à cette activité de coloration spéléologique, les traçages sont devenus un outil de premier ordre pour permettre à l'hydrogéologue de définir des périmètres de protection autour des captages d'alimentation en eau potable.

Dans le domaine des aquifères karstiques, on peut reconnaître aux traçages deux principales utilisations :

- **les traçages de reconnaissance** (ou exploratoires) dont la finalité est de reconnaître des circulations souterraines dans le but généralement de déterminer les limites du bassin d'alimentation d'une source captée. Cette approche reste comparable à celle des spéléologues.
- **les traçages de simulation** dont la finalité est de simuler une pollution entre un point potentiel de contamination de l'aquifère et la source captée. et/ou de calculer une restitution d'un éventuel polluant.

Dans les deux cas la fiabilité des résultats doit être primordiale :

- si l'expérience de traçage est positive et conclut à une restitution, il convient de s'assurer que les moyens de détection du traceur utilisés permettent d'affirmer sans ambiguïté que le signal observé au point de restitution est bien dû à la présence du traceur (4) ;
- si l'expérience de traçage est négative et conclut à une absence de restitution, il convient alors de se demander si la période de surveillance de la restitution et la fréquence des échantillonnages étaient bien adaptées, ou bien si la technique de détection était appropriée pour détecter de faibles concentrations de traceur à l'exutoire. Ces questions se posent encore avec plus d'acuité si le traceur injecté n'a été retrouvé sur aucun des exutoires surveillés.

I.2. Rappel des notions de base des traçages

Un **traçage artificiel** consiste à introduire dans le sous-sol un traceur, puis à rechercher cette même substance en un ou plusieurs points d'émergence des eaux souterraines. Le **traceur** est défini comme étant une substance facilement détectable et peu dégradable dans le milieu souterrain, qui est transportée par l'eau et susceptible de représenter son transit.

Notion de système karstique : le système karstique est défini comme étant « un ensemble au niveau duquel les écoulements souterrains s'organisent pour constituer une unité de drainage » (5, 6, 7 et 8). A l'image d'un bassin versant de surface, le système karstique correspond à l'impluvium au niveau duquel les écoulements souterrains s'organisent en une unité de drainage aboutissant à un nombre réduit d'exutoires.

Notion de système traçage : le système traçage n'est représentatif uniquement que de la zone effectivement parcourue par le traceur entre le point d'injection et le point de restitution. C'est donc un sous-ensemble du système karstique (9). Les résultats d'un traçage ne seront donc représentatifs que de la partie du système karstique dont les écoulements ont été concernés par le transit du traceur injecté. En aucune manière, ils peuvent être extrapolés à l'ensemble des écoulements parcourant le système karstique.

Interprétation des traçages : les données d'un traçage ne permettent pas uniquement d'obtenir une information sur l'existence ou non d'une relation entre deux points, mais permettent également en cas de restitution avérée d'acquérir des informations sur la structure du système traçage et les modalités de transit du traceur, susceptible de simuler un polluant, en son sein. L'interprétation des traçages repose sur l'étude des modalités de transfert de la masse de traceur injectée, laquelle est appréhendée au moyen de l'analyse de la courbe des flux massiques observée à l'exutoire, appelée aussi courbe de distribution des temps de séjour lorsque celle-ci est normée par rapport à la masse de traceur restituée (10, 11, 12).

Le système traçage est alors assimilé à un système scalaire dont la fonction d'entrée est la courbe de flux massique du traceur injecté et la fonction de sortie la courbe de flux massique du traceur restitué à l'exutoire. Le plus souvent la durée de l'injection du traceur peut être considérée comme négligeable et, de ce fait, la courbe des flux de traceur à l'exutoire représente une image de la réponse impulsionnelle du système traçage étudié. Ainsi toute restitution de traceur, doit donner lieu à une courbe de restitution parfaitement structurée (fig 1).

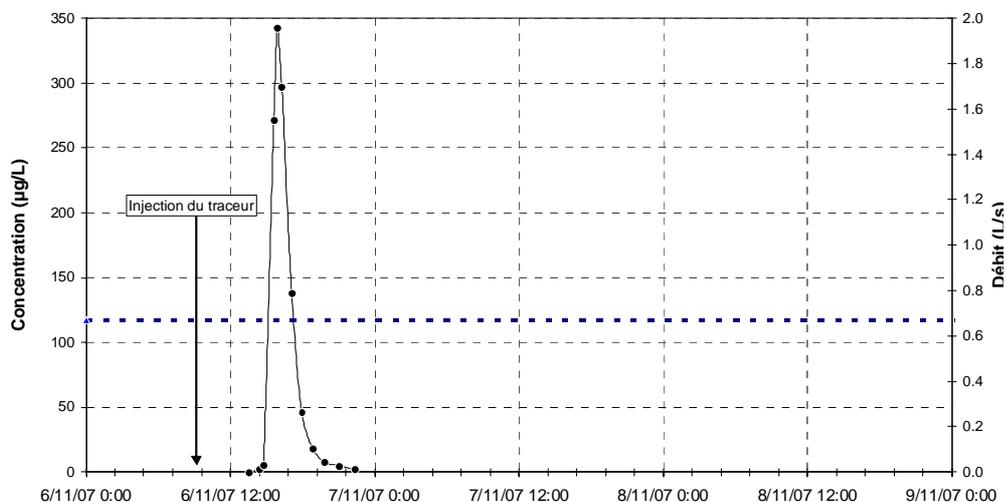


Figure 1 : Exemple de restitution structurée

A l'opposé toute courbe de restitution présentant une restitution aléatoire ou limitée à un ou deux points isolés devra être considérée comme suspecte, et d'autant plus que les teneurs en traceur mesurées à l'exutoire sont faibles.

Lorsque les débits à l'exutoire sont connus, il est important d'effectuer un calcul de bilan de restitution. Il permet d'apprécier pleinement la valeur du résultat obtenu. Lorsque celui-ci est élevé, il est fort probable que la totalité injectée ne concerne que l'exutoire sur lequel la restitution a été constatée. Si celui-ci est faible, d'autres sorties à d'autres exutoires peuvent être suspectées, ou, à défaut, les raisons de cette faible restitution doivent être recherchées. En revanche, si le bilan est excédentaire et qu'il n'y a pas de doute sur la fiabilité des débits de l'exutoire, de fortes suspicions pèsent sur la validité du signal interprété comme étant une restitution de traceur.

Quels que soient les résultats analytiques d'un traçage, ceux-ci n'échappent pas en dernier ressort à la signification hydrogéologique qui en découle. Le résultat obtenu est-il cohérent avec la compréhension des écoulements souterrains que l'on peut se faire sur le secteur étudié ?

I.3. Spécificité des traceurs fluorescents

Un certain nombre de substances fluorescentes aisément disponibles dans le commerce répondent aux différents critères d'un bon traceur en milieu souterrain (13), à savoir : bonne stabilité chimique, faible tendance à l'adsorption, forte solubilité dans l'eau, seuil de détection bas, détection assez aisée, toxicité nulle pour l'homme et les milieux aquatiques et coût d'achat modéré. Ainsi de faibles quantités de traceurs (quelques kg) suffisent généralement pour obtenir des signaux de restitution après plusieurs kilomètres de transit souterrain. Tous ces éléments font que les traceurs fluorescents ont été et sont encore les traceurs les plus communément utilisés en hydrogéologie karstique.

Les techniques de détection des traceurs fluorescents ont évolué au cours du temps :

Détection visuelle : celle-ci est sans équivoque lorsque la coloration au point de restitution est intense, mais elle peut prêter à confusion lorsque la coloration est faible. En effet une coloration naturelle de l'eau peut alors être interprétée comme une restitution. Ceci est particulièrement vrai dans le cas d'une coloration verte qui peut être attribuée à de la fluorescéine.

Fluocapteurs : les traceurs fluorescents sont supposés s'adsorber sur du charbon actif en grain (CAG) immergé dans l'exutoire surveillé. Le traceur fluorescent est ensuite désorbé dans une solution alcoolique de potasse à 10% (14). La restitution est alors appréciée à partir de la coloration visuelle de l'éluat, ou bien après son passage dans un fluorimètre, ou bien un spectrofluorimètre. Il convient de rester très prudent sur les résultats ainsi obtenus. En effet, l'absence de signal ne veut pas dire pour autant absence de restitution : si tous les sites d'adsorption du CGA sont saturés au moment où le traceur est restitué, le traceur ne sera pas piégé sur le fluocapteur. A contrario, une coloration verte non vérifiée par spectrofluorimétrie ne veut pas dire nécessairement restitution de traceur, il peut entre autre s'agir de chlorophylle.

Fluorimètres de terrain : l'utilisation de ces appareils est de plus en plus répandue. D'un usage facile, ces appareils permettent d'obtenir un signal de fluorescence dans une gamme de longueur d'onde donnée. Toutefois il convient de s'assurer que le signal mesuré correspond bien à celui du traceur injecté et qu'il ne provient pas d'un signal parasite venant interférer sur la mesure (diffusion de matières en suspension, matières organiques dissoutes...). De plus ces appareils ont une gamme de mesure peu étendue d'où un risque de saturation en cas de concentration élevée en traceur, et leur seuil de détection reste assez élevé ce qui peut poser problème en cas de faibles concentrations en traceur. Aussi pour un bon diagnostic du résultat, est-il indispensable des pouvoir doser en parallèle quelques échantillons au laboratoire.

Prélèvements réguliers et Analyse spectrofluorimétriques : le recours à des préleveurs automatiques a considérablement allégé la charge de surveillance de la restitution d'un traçage. Les échantillons collectés sont ensuite dosés à l'aide d'un spectrofluorimètre en laboratoire. Si l'on se contente d'une simple analyse, on risque de rencontrer aussi l'écueil d'interférence de signal. Mais il est alors possible de réaliser sur quelques échantillons pour lesquels des doutes analytiques subsistent des spectres d'émission et d'excitation pour s'assurer que l'on retrouve bien des pics aux longueurs d'ondes caractéristiques du traceur recherché (3, 15). Les dosages spectrofluorimétriques associés à la réalisation de spectres constituent la méthode la plus fiable de détection d'un traceur fluorescent.

Ces dosages analytiques associés à des spectres deviennent de plus en plus nécessaires pour étayer un diagnostic de résultat de traçage dans la mesure où les utilisateurs utilisent fréquemment de faibles quantités de traceur afin de rester sous le seuil de détection visuelle en cas de restitution sur un exutoire capté pour l'alimentation en eau potable, ceci dans un souci de ne pas perturber la distribution d'eau.

On retiendra que le résultat positif d'un traçage dépendra à la fois :

- de la quantité de traceur injectée dont découlera l'intensité du signal détecté en sortie du système traçage ;
- de la fenêtre d'observation retenue pour suivre la restitution et de la fréquence d'échantillonnage pour les mesures (ou les observations visuelles) ;
- de la méthode utilisée pour détecter la restitution du traceur.

Parallèlement le résultat négatif d'un traçage pourra avoir diverses origines :

- une quantité de traceur injectée trop faible conduisant à des teneurs en traceur sous le seuil de détection analytique ;
- une période d'observation trop courte par rapport à la durée réelle de transit du traceur au sein du système traçage ;
- une méthode de détection peu fiable
- une absence de surveillance du lieu sur lequel la restitution s'est réellement produite

II. POURQUOI UNE GRILLE D'EVALUATION

Le grand nombre de colorations et de traçages réalisés a débouché sur la réalisation d'inventaires, de bases de données ou d'atlas pour une région donnée (Franche Comté ; Rhône-Alpes, Alpes-Maritimes, cartes hydrogéologiques dans diverses régions de France).

Dans l'avenir, ces bases de données pourraient se développer sur internet et être une source importante de données de base pour de nombreuses études comme la définition des aires d'alimentation des captages (Loi sur l'eau de 2006), ou exploitée en vue d'aménagements futurs ou pour la rédaction de documents d'incidence.

La plupart du temps, ces inventaires accordent la même valeur à toutes les expériences de traçages. Hors, les méthodologies employées pour obtenir les résultats sont très différentes et parfois peu fiables.

L'examen des documents existants montre des incohérences hydrogéologiques ou soulèvent des interrogations pour lesquelles il serait bien de pouvoir évaluer la fiabilité de l'expérience de traçage réalisée (fig. 2).

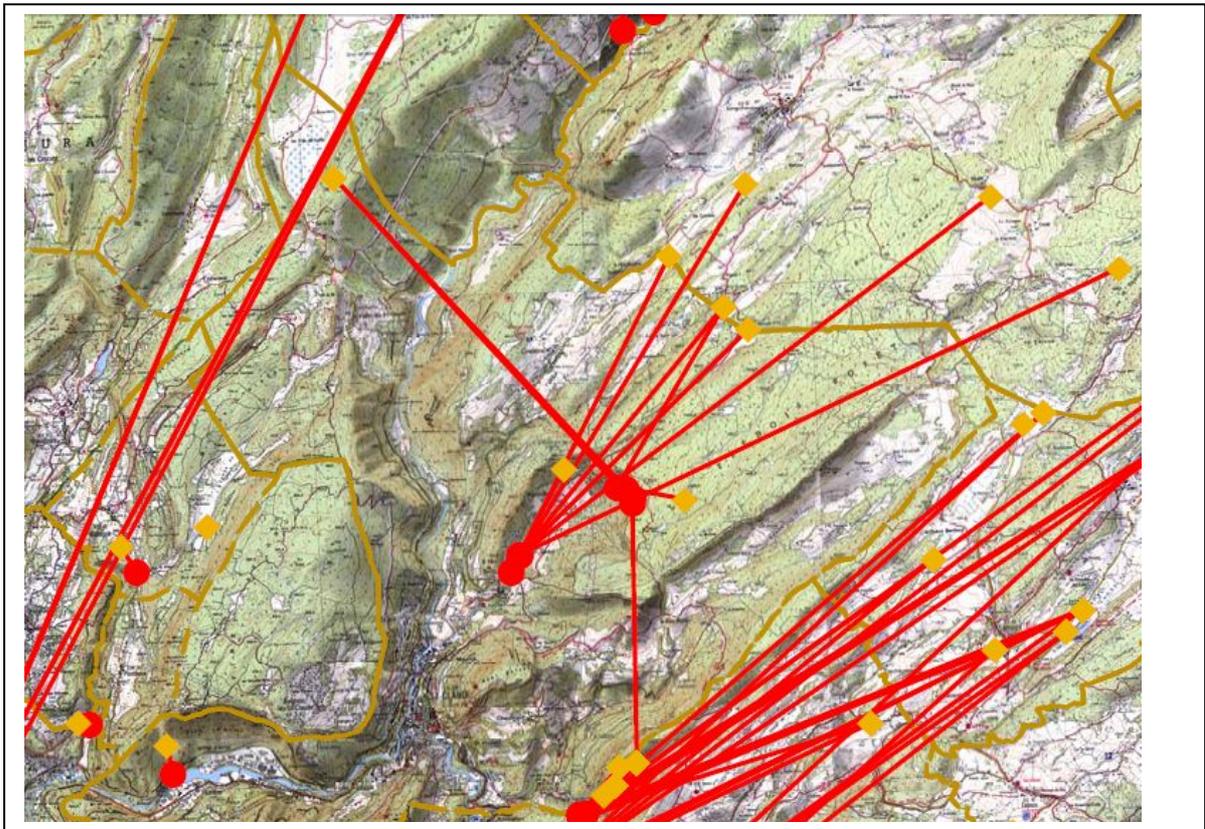


Figure 2 : Extrait de l'inventaire des traçages du département du Jura – Région de Saint Claude (16). On remarque que les structures de drainage sont généralement nord-est sud-est conformément aux structures géologiques locales. Quelques traçages traversent la totalité de ces structures et même la vallée de la Bienne.

Interrogations portant sur :

- la restitution systématique à tous les exutoires suivis,
- les croisements d'écoulements souterrains dans la même formation (fig n°2),
- les vitesses apparentes très élevées malgré des conditions hydrologiques de basses eaux,
- les expériences récentes contredisant des résultats anciens,

Parfois des traçages dont les résultats sont peu fiables amènent à des conclusions hâtives voire, dans certain cas à des théories compliquées sur l'hydrogéologie d'un secteur ou sur le fonctionnement particulier d'un type d'aquifère karstique. Par exemple en Normandie, il est commun qu'une crue sur une émergence qui draine la craie soit associée à une forte turbidité. Le pic de turbidité génère alors un signal parasite qui interfère sur le signal de fluorescence du traceur. En l'absence de contrôle analytique en laboratoire, il peut alors être interprété comme une restitution (fig. 3).

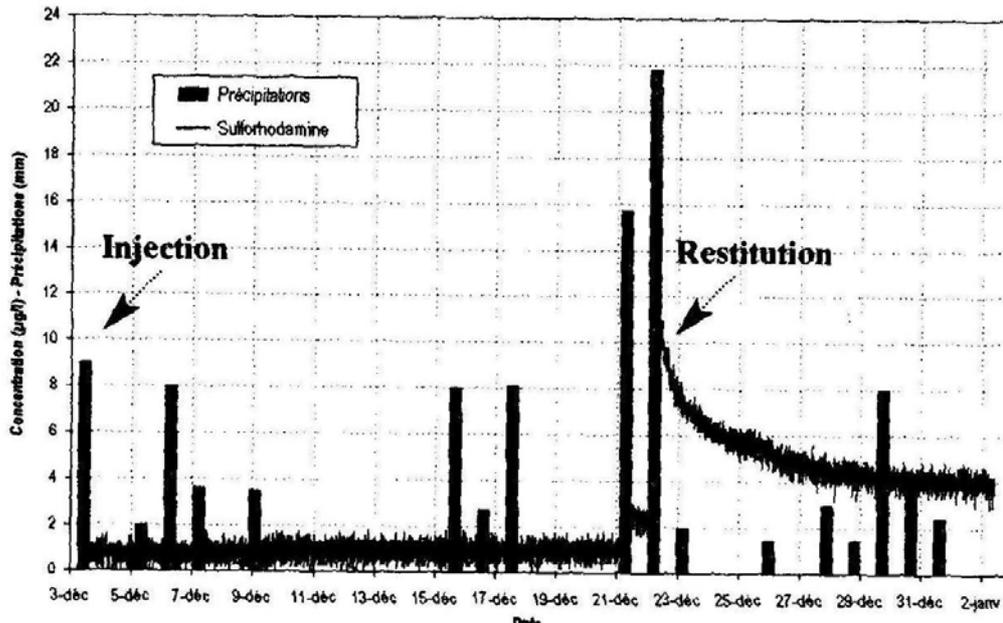


Figure 3 : Exemple de restitution douteuse donnée par un fluorimètre enregistreur de terrain sans contrôle par analyse spectrofluorimétrique. (17)

Malheureusement, ces exemples sont nombreux dans la littérature et sans une grille d'évaluation des résultats des traçages, ces résultats douteux peuvent nuire à la compréhension hydrogéologique des circulations souterraines.

III. GRILLE D'ÉVALUATION PROPOSÉE PAR MICHEL LEPILLER

Dans les années 80, à l'initiative de la Fédération Française de Spéléologie, un inventaire des traçages avait été entrepris dans la région Rhône-Alpes. A cette occasion Michel Lepiller avait été contacté pour les travaux qu'il conduisait dans les Bauges et dans les Bornes. Il avait alors remarqué que les fiches d'inventaire à remplir ne comportaient aucune indication sur les divers critères qui pouvaient permettre *a posteriori* d'évaluer la pertinence des expériences de traçages consignées. Tous les résultats de traçages contenus dans cet inventaire étaient à prendre « pour argent comptant » alors que certains d'entre eux n'étaient pas sans poser quelques problèmes d'interprétation hydrogéologique.

Dans le souci de pallier à cette lacune, Michel Lepiller avait commencé à réfléchir à cette question et nous avait proposé, il y a une dizaine d'années un « projet d'échelle de cotation du degré de fiabilité des résultats d'un traçage de circulation souterraine ».

Degré	Critère
0	Examen visuel seul de l'éluat d'un fluocapteur
1	Examen de l'éluat d'un fluocapteur au fluorimètre avec référence à l'éluat d'un fluocapteur témoin
2	Examen de l'éluat d'un fluocapteur au spectrofluorimètre avec réalisation de spectres d'excitation et d'émission.
3	Présomption d'une restitution fondée sur l'examen visuel de l'exutoire ayant permis de remarquer une variation de couleur de l'eau compatible avec la restitution du traceur utilisé
4	Examen d'un nombre suffisant d'éluats de fluocapteurs au fluorimètre permettant de fonder une présomption de restitution du traceur sur le tracé d'une courbe de concentration
5	Examen d'un nombre suffisant d'éluats de fluocapteurs au spectrofluorimètre permettant de fonder une présomption de restitution du traceur sur le tracé d'une courbe de concentration, avec réalisation de spectres d'excitation et d'émission
6	Examen d'un échantillon d'eau isolé ou unique (échantillon composé) au spectrofluorimètre comprenant le tracé des spectres d'excitation et d'émission ou un balayage synchrone
7	Examen d'échantillons d'eau en nombre suffisant pour construire une courbe de concentration du traceur et comprenant le tracé des spectres d'excitation d'émission ou un balayage synchrone

Tableau 1 : *Projet d'échelle de cotation du degré de fiabilité des résultats d'un traçage de circulation souterraine (Michel Lepiller – Inédit)*

Un des points important de ce projet d'échelle de cotation est le faible degré de fiabilité accordé par Michel Lepiller aux résultats obtenus à l'aide de fluocapteurs.

Toutefois, ce projet d'échelle de cotation allant de 0 à 7 devait être amélioré. Nous avons convenu que cette échelle devait aller jusqu'à 10 et que d'autres cas devaient être introduits comme par exemple l'emploi de fluorimètres enregistreurs de terrain qui sont aujourd'hui de plus en plus utilisés pour obtenir des résultats en temps réel.

IV. PROPOSITION D'UNE NOUVELLE GRILLE D'EVALUATION

IV. Principe généraux d'élaboration de la grille

La cotation attribuée à un traçage doit être considérée comme un indice de fiabilité au sens statistique du terme. Une note faible donnée à un traçage ne veut pas dire que le résultat est faux, mais plutôt dire que statistiquement pour un échantillon de traçages réalisé dans des conditions similaires seul un certain pourcentage des expériences fournit une information correcte telle qu'elle aurait pu être vérifiée avec la méthode de détection la plus fiable.

L'objet n'est pas de rejeter en bloc les expériences de traçages réalisées avec peu de moyens mais plutôt de leur donner un indice de fiabilité statistique compte-tenu des moyens de détection employés.

La cotation proposée varie de 0 à 10 :

- Zéro veut dire que l'information fournie par 100% des expériences réalisées dans ces conditions n'apportent aucune information fiable sur le transit souterrain,
- Dix veut dire que la totalité (100%) des traçages réalisés avec cette méthode de détection apporte une information fiable sur les écoulements souterrains.

Dans cette cotation, et compte-tenu des méthodes actuelles de détection, nous avons retenu pour méthode fiable à 100%, les traçages réalisés avec un nombre suffisant d'analyses spectrofluorimétriques en laboratoire, avec vérification de la nature du produit fluorescent par réalisation de spectres d'excitation et d'émission, permettant de décrire de façon satisfaisante une courbe de restitution structurée et, lorsque que c'est possible, confirmée par un bilan de restitution du traceur cohérent.

Ainsi une note de 3 signifie que sur 10 traçages réalisés dans des conditions similaires 7 peuvent apporter une information erronée et 3 seulement auraient pu être confirmées par des analyses de spectrofluorimétrie complètes en laboratoire.

Cette cotation reste une appréciation subjective basée sur notre expérience et découle de nombreuses discussions que nous avons eues avec d'autres hydrogéologues travaillant sur le karst dont Michel Lepiller. Elle ne repose pas sur une étude purement statistique d'expériences réalisées, faute de pouvoir vérifier *a posteriori*, pour toutes les expériences, leur fiabilité réelle.

Nous avons choisi de nous en tenir aux traçages fournissant un résultat binaire : le traceur a atteint cette source (résultat positif) ou le traçage n'a pas atteint cette source (résultat négatif). En effet, ce type de traçage est le plus courant et surtout la fiabilité de ce résultat conditionne la justesse des cartes et atlas hydrogéologiques publiés.

L'utilisation des fluocapteurs dont le principe rend plus que douteux les résultats négatifs, nous a conduit à proposer deux grilles d'évaluation : une grille pour les traçages dont le résultat est positif et une grille pour les traçages dont le résultat est négatif.

Pour les traçages négatifs et pour simplifier, nous avons pris les hypothèses suivantes :

- la quantité injectée est suffisante pour obtenir un résultat positif si la méthode fiable à 100% avait été utilisée,
- le temps de suivi de la restitution est suffisant pour obtenir un résultat positif si la méthode fiable à 100% avait été utilisée,

Ces grilles ont été élaborées en utilisant, pour chaque technique de détection, un organigramme. Ces organigrammes sont proposés à la fin de cette note. Ils peuvent être utilisés pour automatiser la cotation des expériences de traçage et introduire, par exemple, un code de couleur sur les cartes et atlas hydrogéologiques ou, associer les traçages par note de fiabilité sur des couches SIG.

Dans un souci de cohérence avec la grille de cotation proposée par Michel Lepiller, nous avons regroupé les cas présentant la même note, comprise entre 0 et 10.

Enfin, comme Michel Lepiller, nous nous sommes restreints aux traçages réalisés avec des traceurs fluorescents.

Grille d'évaluation des traçages positifs

Degré	Critères
10	- Fluorimètre de terrain et/ou échantillons avec analyses spectro fluorimétriques en Laboratoire montrant une restitution structurée du traceur prouvée par la réalisation de spectres d'excitation et d'émission.
9	- Observation visuelle par plusieurs observateurs et à plusieurs reprises d'une coloration intense au point de restitution - Echantillons avec analyses spectro fluorimétriques en Laboratoire montrant une restitution structurée du traceur non prouvée par la réalisation de spectres d'excitation et d'émission. - Fluorimètre de terrain montrant une restitution structurée du traceur avec une seule analyse spectro fluorimétriques en Laboratoire avec réalisation d'un spectre d'excitation et d'émission.
8	- Observation visuelle d'une coloration intense au point de restitution par un observateur et à plusieurs reprises ou par plusieurs observateurs une seule fois. - Restitution structurée obtenue par un fluorimètre de terrain complété par plusieurs analyses en Laboratoire non prouvées par des spectres ou par un nombre suffisant d'éluats de fluocapteurs colorés avec analyse en laboratoire et spectres
7	- Observation visuelle une seule fois d'une coloration intense au point de restitution par un seul observateur. - Restitution structurée obtenue par un nombre suffisant d'éluats de fluocapteurs non colorés avec analyse en laboratoire et prouvée par spectres
6	- Observation visuelle à plusieurs reprises par plusieurs observateurs d'une coloration faible mais présentant une variation structurée.
5	- Observation visuelle à plusieurs reprises par un seul observateur d'une coloration faible mais présentant une variation structurée - Restitution structurée obtenue par un fluorimètre de terrain sans analyses en Laboratoire ou par un nombre suffisant d'éluats de fluocapteurs colorés avec analyse en laboratoire et non prouvée par spectres
4	- Observation visuelle à plusieurs reprises par plusieurs observateurs d'une coloration faible ne présentant pas de variations structurées - Restitution structurée obtenue par un nombre suffisant d'éluats de fluocapteurs non colorés avec analyse en laboratoire et non prouvée par spectres
3	- Observation visuelle à plusieurs reprises par un seul observateur d'une coloration faible ne présentant pas de variations structurées. - Restitution non structurée obtenue sur un ou plusieurs éluats de fluocapteurs avec analyses en laboratoire et prouvée par spectres - Variation structurée de la coloration de plusieurs éluats de fluocapteurs sans analyses en laboratoire - Restitution non structurée obtenue à l'aide d'un fluorimètre de terrain et/ou d'analyses d'échantillons en laboratoire et prouvée par spectres
2	- Observation visuelle à une seule reprise par plusieurs observateurs d'une coloration faible - Restitution non structurée observée à l'aide d'analyses d'échantillons en laboratoire non prouvée par spectres sur éluats de fluocapteurs - Restitution non structurée obtenue à l'aide d'un fluorimètre de terrain et/ou d'analyses d'échantillons en laboratoire et non prouvée par spectres
1	- Observation visuelle à une seule reprise par un seul observateur d'une coloration faible - Restitution non structurée observée visuellement sur des éluats de fluocapteurs colorés. - Restitution non structurée obtenue sur des éluats de fluocapteurs non colorés par analyse en laboratoire non prouvée par spectres - Restitution non structurée obtenue à l'aide d'un fluorimètre de terrain sans contrôle par analyse en laboratoire
0	- Aucune information concernant les modalités de réalisation du traçage

Tableau 2 : Grille d'évaluation de la fiabilité des résultats de traçages – résultats positifs

Grille d'évaluation des traçages négatifs

Degré	Critères
10	- un nombre suffisant d'échantillons avec analyses spectro fluorimétriques en laboratoire montrant une absence de restitution du traceur prouvée ou non par la réalisation de spectres d'excitation et d'émission
9	- Fluorimètre de terrain et échantillons avec analyses spectro fluorimétriques en laboratoire montrant une absence de restitution du traceur prouvée ou non par la réalisation de spectres d'excitation et d'émission.
8	- un nombre suffisant d'échantillons avec analyses spectro fluorimétriques en laboratoire présentant quelques valeurs positives non structurées du traceur prouvée ou non par la réalisation de spectres d'excitation et d'émission
7	- Fluorimètre de terrain et échantillons avec analyses spectro fluorimétriques en laboratoire présentant quelques valeurs positives non structurées du traceur prouvée ou non par la réalisation de spectres d'excitation et d'émission.
6	- Fluorimètre de terrain avec une analyses spectro fluorimétriques en laboratoire prouvée ou non par la réalisation de spectres d'excitation et d'émission.
5	- Résultat négatifs en laboratoire prouvée par spectres sur un nombre suffisant d'éluats de fluocapteurs colorés ou non, - Résultat négatifs obtenu avec un fluorimètre de terrain sans contrôle par analyse en laboratoire
4	- Eluats de fluocapteurs présentant après analyse en laboratoire sans spectres quelques valeurs positives non structurées du traceur ou pas de valeurs positives.
3	- plusieurs éluats de fluocapteurs présentant après analyse en laboratoire quelques valeurs positives non structurées du traceur prouvée par la réalisation de spectres.
2	- plusieurs éluats de fluocapteurs non colorés présentant après analyse en laboratoire quelques valeurs positives non structurées du traceur sans réalisation de spectres - un seul éluat de fluocapteur coloré ou non, négatif après analyse en laboratoire avec spectres.
1	- plusieurs éluats de fluocapteurs non colorés sans analyse de contrôle en laboratoire - un seul éluat de fluocapteur coloré ou non, négatif après analyse en laboratoire sans spectres.
0	- Absence de coloration visuelle constatée à une ou plusieurs reprises par un ou plusieurs observateurs - un seul éluat de fluocapteur non coloré sans analyse de contrôle en laboratoire, - un seul échantillon avec une analyse spectro fluorimétrique en laboratoire prouvée ou non par la réalisation de spectres d'excitation et d'émission - Aucune information concernant les modalités de réalisation du traçage

Tableau 3 : Grille d'évaluation de la fiabilité des résultats de traçages – résultats négatifs

V. COMMENTAIRES

Comme dans la grille de Michel Lepiller, les résultats obtenus à l'aide de fluocapteurs obtiennent des notes faibles sauf dans le cas où il y a un grand nombre d'éluats de fluocapteurs analysés par spectrofluorimétrie. On peut d'ailleurs remarquer que dans ce cas, si l'on doit relever de nombreux fluocapteurs, il vaut mieux réaliser des prélèvements et les analyser par spectrofluorimétrie, la fiabilité sera bien meilleure.

On peut également remarquer que pour les traçages réputés négatifs, la note obtenue par les fluocapteurs ne peut pas dépasser 5. En effet, on ne peut jamais savoir si le charbon actif n'a pas été saturé par d'autres molécules que celles du traceur.

Dans cette grille nous attirons également l'attention sur la modeste fiabilité des résultats de traçages positifs ou négatifs obtenus par les seules données issues d'un fluorimètre enregistreur de terrain. En effet, il existe dans la nature des molécules qui émettent des intensités lumineuses parfois importantes à la longueur d'onde d'excitation du traceur. C'est en particulier le cas en période de crue (fig n°3) et pour certains traceurs fluorescents. Dans ces conditions, si le signal n'est pas très fort, il y a obligation de réaliser des analyses en laboratoire avec vérification de la nature du traceur à l'aide spectres d'excitation et d'émission pour obtenir une note maximale.

L'observation visuelle reste une méthode fiable pour les résultats positifs à condition de réaliser plusieurs observations et de pouvoir décrire une variation de couleur (9). Toutefois, cette méthode n'est pas fiable pour les résultats négatifs puisque le traceur peut passer à des concentrations inférieures au seuil de détection visuel. Comme pour les fluocapteurs, si l'on doit observer régulièrement des exutoires le mieux est de faire des prélèvements et de les analyser en laboratoire avec vérification de la présence du traceur par réalisation de spectres.

Dans ces grilles, nous n'avons pas tenu compte de tous les cas où il peut y avoir cumul des méthodes de détection. Toutefois, il nous semble que la seule méthode fiable dans tous les cas pour les traçages positifs et négatifs est de réaliser des analyses avec réalisation de spectres sur un nombre suffisant d'échantillons

Nous avons choisi volontairement de ne pas retenir comme critère de fiabilité, le bilan de restitution du traceur car d'une part tous les exutoires ne se prêtent pas à des mesures de débit, et d'autre part, lorsque c'est possible, leur débit n'est que très rarement mesuré à l'occasion du traçage. Nous recommandons toutefois vivement de mesurer le débit des sources surveillées lors d'un traçage.

VI. CONCLUSIONS

Ces grilles sont des propositions qui peuvent bien évidemment être adaptées et améliorées. Elles devront automatiquement l'être avec l'évolution probable des méthodes et techniques de détection.

Le principal enseignement de l'exercice est qu'il est absolument nécessaire de donner les conditions exactes de suivi de restitution d'un traçage pour que l'on puisse lui appliquer une cotation de fiabilité. En fait, peu importe la méthode utilisée, à partir du moment où l'on peut retrouver les conditions de réalisation qui permettent d'en connaître la fiabilité. Cette remarque n'est valable que pour les traçages à venir. Pour ces mêmes traçages on peut également utiliser ces grilles à l'envers et choisir la fiabilité du traçage que l'on veut réaliser.

De la même façon ces grilles peuvent être utilisées par un maître d'ouvrage pour comparer la fiabilité d'opérations de traçages proposées par différents bureaux d'études.

En revanche pour les traçages anciens, l'exercice sera souvent plus délicat car les formulaires disponibles dans les inventaires ont beaucoup de champs pour décrire les résultats du traçage (point d'injection, de restitution, temps...) et le plus souvent très peu, voire aucun, champ permettant de décrire les conditions de suivi des restitutions qui ont abouti à attribuer un résultat positif ou négatif.

Références bibliographiques

- (1) **Kass W.**, 1998 – Tracing Technique in Géohydrology. *Taylor & Francis*. 585 p.
- (2) **Casteret N.**, 1961 - Ma vie souterraine. Mémoires d'un spéléologue. *Ed. Flammarion* : 151-156.
- (3) **Fournier M.**, 1919 – Gouffres, grottes, cours d'eau souterrains, résurgences etc..., du département du Doubs. Essai statistique. *Imp. Jacques et Demontrond, Besançon*. 303 p.
- (4) **Lepiller M.**, 2001 - Traçages appliqués à la dynamique des aquifères : possibilités et limites. *Géologues*, 129 : 79-84.
- (5) **Mangin A.**, 1974 – La notion de système karstique. *Spélunca Mém.*, 8 : 65-68.
- (6) **Mangin A.**, 1975 – Contribution à l'hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doctorat, *in Ann. Spéol.*, 29,3 : 283-332 ; 29,4 : 495-601 ; 30,1 : 21-124.
- (7) **Mangin A.**, 1976 – Les systèmes karstiques et leur méthodologie d'investigation. Actes 2nd Coll. Hydrol. Pays Calcaire, *in Ann. Sc. Univ. Besançon*, 25 : 263-273.
- (8) **Bakalowicz M., Mangin A.**, 1980 – L'aquifère Karstique. Sa définition, ses caractéristiques et son identification. *Mém. h. sér. Soc. géol. France*, 11 : 71-79.
- (9) **Lepiller M., Mondain P-H.**, 1986 – Les traçages artificiels en hydrogéologie karstique. Mise en œuvre et interprétation. *Hydrogéologie*, 1 : 33-52.
- (10) **Guizerix J., Margarita R.**, 1976 – Méthodologie d'étude par traceur des transferts de masse. *La Houille Blanche*, 3/4 : 205-221.
- (11) **Molinari J.**, 1976 – Perspectives offertes par l'utilisation rationnelle des traceurs naturels et artificiels en hydrologie karstique. Commentaires de nombreux exemples récents de multitraçages. Actes 2nd Coll. Hydrol. Pays Calcaire, *in Ann. Sc. Univ. Besançon*, 25 : 275-306.
- (12) **Mangin A., Molinari J., Paloc H.**, 1976 – Les traceurs en hydrogéologie karstique. Leur apport à la connaissance des réservoirs aquifères calcaires. *La Houille Blanche*, 3/4 : 261-267.
- (13) Société Suisse d'Hydrogéologie, Groupe de travail Traçage, 2002 – Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie. Guide pratique. Rapport de l'OFEG, Série Géologie, 3 : 78 p.
- (14) **Lallemand A. et Paloc H.**, 1964 – Possibilités offertes par la méthode de détection au charbon actif pour les expériences de coloration à la fluorescéine – *Spélunca mém.* 4 : 27-40
- (15) **Jozja N.**, 2008 – Importance de la composante analytique dans la fiabilité de l'interprétation d'un traçage. Hydrogéologie et Karst aux travers des travaux de Michel Lepiller, *Journées techniques de CFH-AIH, Orléans, 16-17 mai 2008*.
- (16) **Inventaire des traçages du département du Jura – Région de Saint Claude – in Site internet de la DIREN Franche-Comté**
(http://www1.franche.comte.ecologie.gouv.fr/infos_geo/fiches_cartes/EauxSou/TRA39478.PDF)
- (17) **Gombert P.**, 2007 – Proposition of tracing test protocol in karstic chalk - *European Journal of Water Quality* – Tome 38 – Fasc. 1-2007 – page 61- 78

Annexes :

Mode de suivi : visuel						
Coloration	Observateur	Nb observations	int. Color.	variations	Positif	Négatif
Non	→	→	→	→	 	0
Oui	un	une	forte	→	7	
			faible	→	1	
		plusieurs	forte	→	8	
			faible	oui	5	
			non	3	 	
	plusieurs	une	forte	→	8	
			faible	→	2	
		plusieurs	forte	→	9	
			faible	oui	6	
				non	4	

Mode de suivi : Fluocapteur						
Eluat coloré	Nombre	Fluorimétrie	spectres	Restitution	Positif	Négatif
Non	un	non	→	→	 	0
		oui	non	→	2	1
			oui	→	3	2
	plusieurs	non	→	→	 	1
		oui	non	aucune	 	3
				pas structurée	1	2
				structurée	4	
		oui	oui	aucune	 	5
				pas structurée	2	4
				structurée	7	
structurée	 			 		
Oui	un	non	→	→	1	
		oui	non	→	2	1
			oui	→	3	2
	plusieurs	non	→	pas structurée	1	5
			→	structurée	3	
		oui	non	aucune	 	3
				pas structurée	2	3
				structurée	5	
			oui	aucune	 	5
				pas structurée	3	4
structurée	8	5				

Mode de suivi : Echantillons puis analyses au labo (spectrofluorimétrie)						
Intensité à la longueur d'onde	Nombre	spectres	Restitution	-	Positif	Négatif
non	un	→	→	→	 	0
	plusieurs	→	→	→	 	10
oui	un	non	→	→	2	0
		oui	→	→	3	0
	plusieurs	non	pas structurée	→	2	9
			structurée	→	9	
		oui	aucune	→	 	10
			pas structurée	→	3	10
structurée	→	10	 			

Mode de suivi : Fluorimètre enregistreur de terrain						
Intensité à la longueur d'onde	Nombre dosages spectrofluorimétriques	spectres	Restitution	-	Positif	Négatif
non	→	→	→	→	 	5
oui	aucun	→	pas structurée	→	1	
			structurée	→	5	
	un	non	pas structurée	→	2	
			structurée	→	6	
	oui	oui	pas structurée	→	3	6
			structurée	→	9	6
	plusieurs	non	pas structurée	→	2	9
			structurée	→	8	
oui		aucune	→	 	10	
		pas structurée	→	4	10	
structurée	→	10	 			

Importance de la composante analytique dans la fiabilité de l'interprétation d'un traçage

Nevila Jozja

Environnement, Traçage et Détection – Polytech'Orléans – 8 rue Léonard de Vinci – 45072
Orléans cedex 2 – nevila.jozja@univ-orleans.fr

I. INTRODUCTION

L'utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie est une technique forte ancienne. L'analyse de nombreuses expériences effectuées tout au long de ces années ainsi que le développement de l'approche interprétative (avec ou sans modèle) permettent de mettre plus en avant l'intérêt, l'efficacité et les perspectives de l'outil traçage (6). Notamment en milieu karstique, les *traçages artificiels* restent essentiels pour délimiter les systèmes hydrogéologiques et évaluer les caractéristiques du transit à partir de la Distribution des Temps de Séjour (D.T.S.). Même si c'est dans les milieux karstiques et fracturés que se rencontre la plus grande variété d'applications des traçages, ils ne sont, pour autant, pas limités à ce type de milieu.

La demande croissante pour de telles expertises, et l'attention de plus en plus accentuée portée aux aspects quantitatifs exigent une maîtrise de tous les éléments qui peuvent limiter l'interprétation. Le but de cette communication est de montrer que l'optimisation des résultats d'un traçage passe nécessairement par la prise en considération de la composante analytique, souvent négligée par les praticiens. Celle-ci ne traitera que du cas des traceurs fluorescents.

II. IDENTIFICATION DU SIGNAL DE RESTITUTION : DIFFICULTES RENCONTREES

Suite au comportement et à la réactivité des traceurs fluorescents dans le milieu naturel, ainsi qu'aux interactions avec les roches de l'aquifère, l'évaluation précise d'une restitution rencontre quelques difficultés expérimentales.

II.1. Différentes composantes du signal brut de fluorescence

Lors de la recherche d'un traceur au laboratoire, le signal brut que nous analysons est la somme de trois composantes (5) :

- i) la fraction de lumière d'excitation diffusée par l'eau et les particules en suspension à la longueur d'onde d'émission du traceur recherché ;
- ii) la lumière émise par la fluorescence des substances présentes autres que le traceur dans l'eau analysée ;
- iii) la lumière émise par la fluorescence du traceur qui constitue le signal *vrai* ou *net*.

La difficulté est d'isoler la dernière composante qui correspond à la restitution vraie du signal et qui constitue l'objet même de la mesure.

Le cumul des deux premières composantes constitue ce qu'on appelle « le bruit de fond ». Plus précisément, les deux sources majeures du bruit de fond sont la fluorescence naturelle et

les matières particulaires et colloïdales en suspension, toutes deux fortement corrélées à la matière organique transportée par l'eau.

L'intensité de la contribution de la fraction de lumière diffusée au signal brut dépend aussi des caractéristiques du spectrofluorimètre, notamment de la résolution autorisée par l'appareil dans la sélection des longueurs d'onde d'excitation et d'émission.

Un bruit de fond élevé peut masquer les faibles concentrations de traceur tandis que sa variabilité peut donner l'impression d'une fausse restitution (1 ; 5 ; 8).

II.2. Exemple où l'existence du bruit de fond masque le signal du traceur

La figure 1 montre le spectre d'excitation d'un échantillon d'eau déminéralisée. (Rappel : Spectre d'excitation est la courbe intensité de la lumière émise par une substance éclairée (ou excitée) à diverses longueurs d'onde et mesurée à une longueur d'onde fixe correspondant à la longueur d'onde d'émission de la substance, dans une direction perpendiculaire à celle de la radiation d'excitation de la longueur d'onde de la radiation d'excitation).

La longueur d'onde d'émission est fixée à 585 nm (longueur d'onde d'émission de fluorescence de la sulforhodamine B). Ce spectre d'excitation, pour une longueur d'onde d'émission donnée, ne diffuse aucune radiation de fluorescence à 565 nm, qui est la longueur d'onde caractéristique d'excitation de la sulforhodamine B. Il n'y a donc aucune trace du traceur recherché dans l'eau déminéralisée (figure 1).

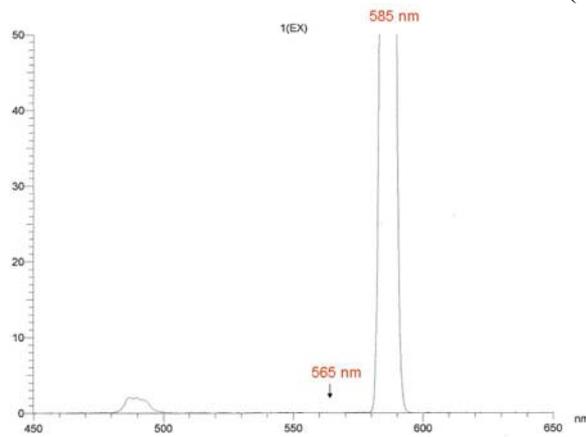


Figure 1 : Spectre d'excitation pour l'eau Déminéralisée

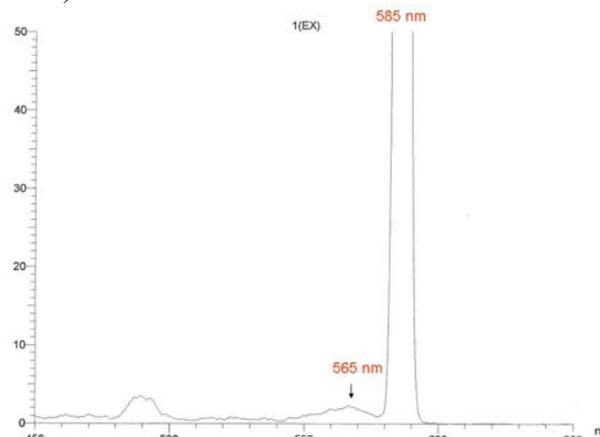


Figure 2 : Spectre d'excitation – bruit de fond faible

Sur la figure 2 est rapporté le spectre d'excitation d'un échantillon d'une eau naturelle où la présence de bruit de fond est négligeable. Malgré l'intensité très faible du signal à la longueur d'onde d'excitation de la sulforhodamine B, la résolution du spectrofluorimètre Hitachi-2500 nous autorise à conclure à la présence du traceur. Tandis que sur la figure 3, à ce spectre d'excitation présenté sur la figure 2, nous avons superposé le spectre d'excitation d'un autre échantillon d'une eau naturelle qui possède un bruit de fond très élevé. Celui-ci se traduit par la mesure d'une intensité non négligeable à la longueur d'onde d'excitation de la sulforhodamine B (signal brut), laquelle pourrait laisser croire à une restitution. Mais l'analyse spectrale nous montre qu'il est impossible de conclure en la présence ou en l'absence du traceur, faute de pouvoir discerner clairement un pic à la longueur d'excitation. Dans ce cas, l'intensité du bruit de fond masque la présence d'un éventuel faible signal net du traceur (figure 3).

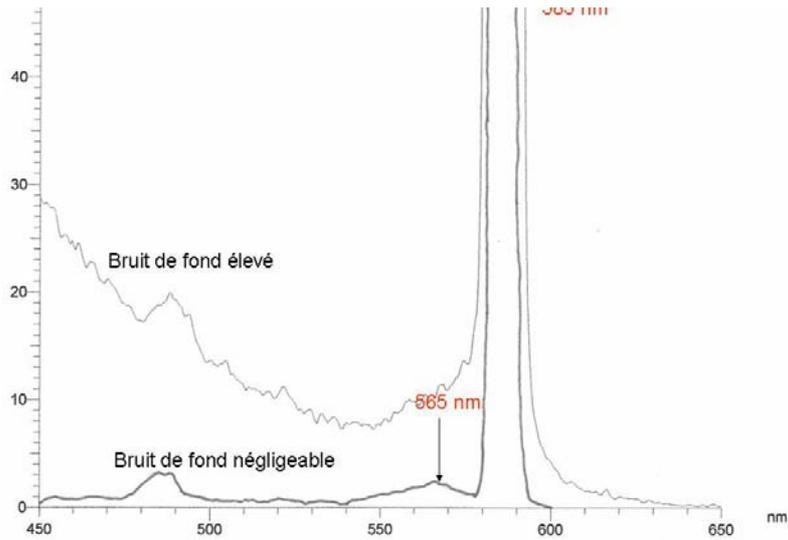


Figure 3 : Spectres d'excitation de deux échantillons naturels : bruit de fond élevé et bruit de fond négligeable

II.3. Deux Exemples où la variabilité du bruit de fond peut donner l'impression d'une fausse restitution

Exemple 1 : L'évaluation précise du signal net peut être mise en cause par la variabilité du bruit de fond. Cette variation peut entraîner une forte incertitude sur la délimitation du signal net et donc sur la forme de la D.T.S. La figure 4 illustre un exemple d'un signal brut avec 3 modes qui aurait pu être interprété comme une restitution d'Amino G. acide. En réalité, les deux premiers modes observés sont liés à l'interférence de pics de turbidité. Les spectres réalisés sur plusieurs échantillons attestent que c'est uniquement le dernier mode qui constitue le signal net de restitution.

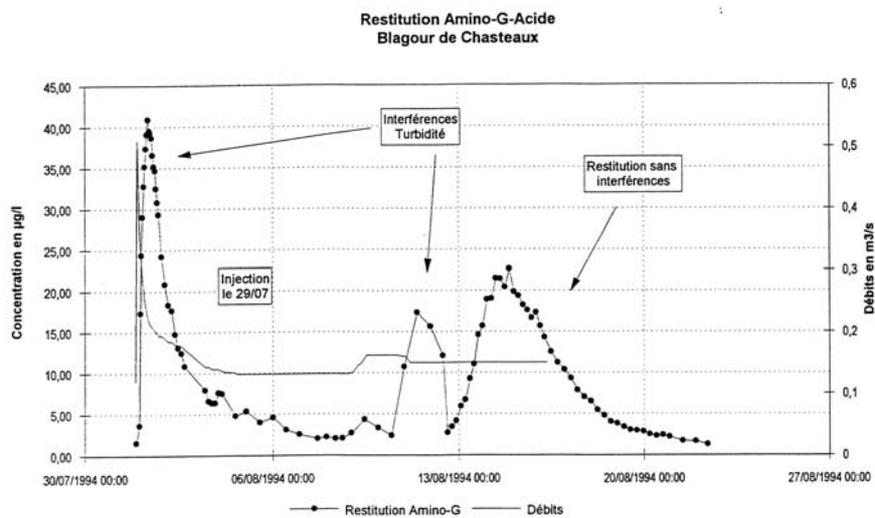


Figure 4 : Evolution de l'intensité mesurée à la longueur d'ondes d'émission et d'excitation de l'Amino G. acide (selon P.Muet)

L'évaluation des signaux des traceurs fluorescents, qui présentent des longueurs d'ondes d'excitation et d'émission proches de celle de la matière organique (Amino. G acide, Naphtionathe, Tinopal etc..) est particulièrement concernée. Mais, cet artefact ne concerne pas que les traceurs fluorescents émettant dans le bleu. D'autres traceurs fluorescents ne sont pas à l'abri de ce genre d'interférences.

Exemple 2 : Une autre difficulté apparaît lors que le signal vrai est de faible intensité et de longue durée (5).

Figure 5 montre la courbe obtenue lors d'un traçage réalisé dans la craie du Gâtinais à l'aide de la rhodamine WT (surveillance à la source de la Nivelles). L'intensité de fluorescence à la longueur d'onde d'émission du traceur augmente régulièrement donnant l'impression d'une vraie restitution. Mais les spectres d'émission et d'excitation montrent l'absence des pics caractéristiques du traceur employé. Le soi-disant signal résulte donc de l'augmentation du bruit de fond en lien avec une augmentation de la turbidité.

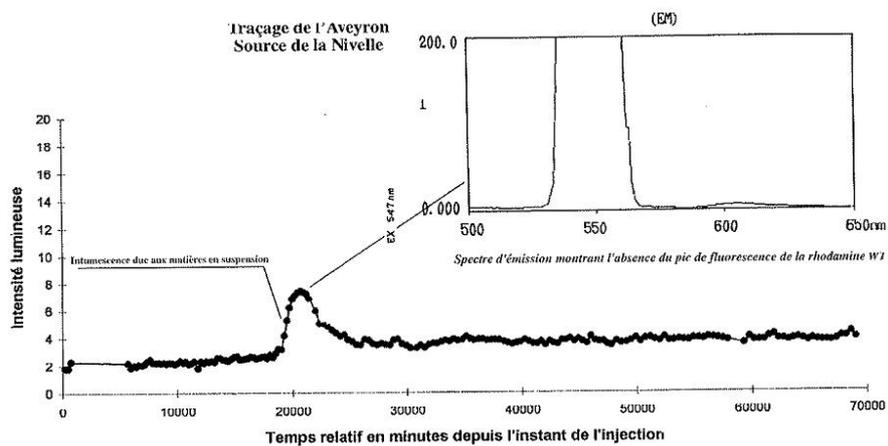


Figure 5 : Evolution de l'intensité mesurée à la longueur d'ondes d'émission et d'excitation de la Rhodamine WT (selon M. Lepiller)

III. IMPACT DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX A LA SENSIBILITE DES SIGNAUX DE RESTITUTION

La sensibilité d'une analyse fluorimétrique dépend à la fois de la capacité du traceur à transformer la fraction de la lumière d'excitation en fluorescence, et de la performance de l'appareil. Destinée à être utilisée dans le milieu naturel, la capacité de fluorescence d'un traceur est susceptible d'être influencée par plusieurs facteurs de ce milieu : lumière, pH, température, salinité, oxygène dissous etc. (4 ; 10)

Smart et Laidlaw, (10) ont étudié au laboratoire le rôle de quelques paramètres environnementaux sur la mesure de la fluorescence. Leurs travaux ont montré que différents phénomènes tels que la lumière, le pH, et la température peuvent influencer la dégradation de

la fluorescence (3). Cependant, il faudra s'attacher à respecter au laboratoire un protocole expérimental qui prenne en compte ces paramètres du milieu naturel.

Comment se traduit concrètement, à l'échelle de laboratoire l'effet de ces paramètres.

Nous avons été confrontés à un tel problème à propos du pH, dans le cadre d'une expertise analytique d'un traçage, effectué à Souillac dans le Lot : un écart important a été constaté entre les concentrations mesurées au spectrofluorimètre et les concentrations compatibles avec un taux de restitution inférieur ou égal à 100 %. Plus exactement, les concentrations mesurées donnaient un taux de restitution de 180 %, bien que les débits de l'exutoire étudiés fussent connus avec une bonne précision. Nous avons recherché des causes pouvant expliquer cette anomalie.

Tout d'abord, l'hypothèse d'une erreur d'étalonnage ou d'un « caprice » instrumental a été totalement exclue après plusieurs répétitions analytiques : répétitions de gammes étalons réalisées par deux manipulateurs différents et mettant en œuvre deux procédures différentes de passages d'échantillons dans l'appareil : un passeur automatique et une cuve manuelle de solution dans l'appareil). Ceci est un phénomène qui nous n'avions pas constaté auparavant. Jusque là, les étalons réalisés à l'aide de l'eau déminéralisée ont toujours donné des résultats en cohérence avec un taux de restitution raisonnable.

Toutefois, certains travaux (2 ; 10, etc.) ont montré que la fluorescéine subit une diminution de fluorescence dans une gamme de pH inférieure à 7,0 (diminution qui atteint 10-20 %), et que cette diminution devient encore plus importante si le pH descend au-dessous de 4,0 (figure 6).

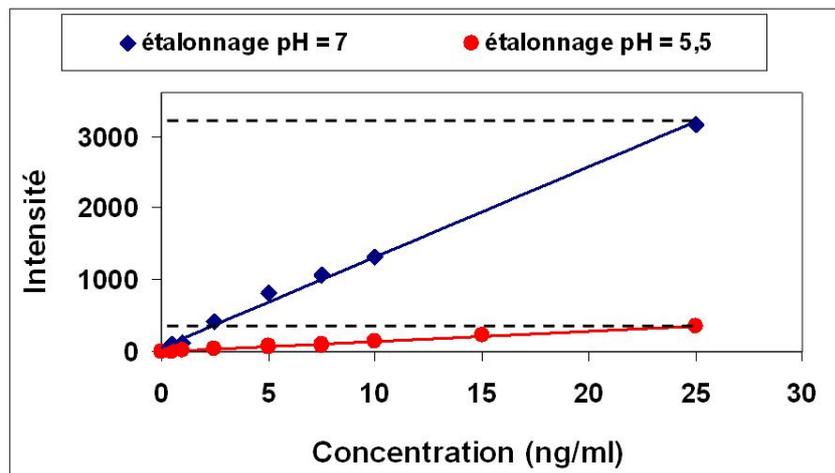


Figure 6 : Courbes d'étalonnage établies à l'eau pour deux pH différents

La mesure du pH de l'eau déminéralisée qui a été employée pour établir l'étalonnage de l'uranine utilisée pour ce traçage, variait entre 5,0 et 6,0. Nous avons refait l'étalonnage en ajustant le pH à 7,5 (valeur proche de celle de l'eau de traçage d'une part, et valeur pour

laquelle il a été établi expérimentalement que la fluorescence de la fluorescéine reste stable, d'autre part).

Plusieurs essais répétés ont montré que l'intensité de la même gamme étalon présente un écart important (d'un facteur 5) à deux pH différents (figure 5). Nous en avons donc conclu que l'eau déminéralisée employée pour confectionner les étalons a provoqué une diminution de la puissance de la fluorescence, ce qui a conduit à surestimer les concentrations des échantillons prélevés provenant d'une eau bicarbonatée calcique à $\text{pH} > 7,5$

La fiche de données de cette fluorescéine montre qu'il s'agit bien d'une fluorescéine sodique (uranine) qui normalement ne devrait pas avoir un comportement si sensible aux changements du pH (une diminution inférieure à 10-20 % de sa puissance de fluorescence)¹.

Ce résultat nous incite donc à élaborer la gamme étalon du traceur avec l'eau de l'exutoire surveillé, ou à défaut, de corriger le pH de la gamme étalon pour qu'il soit très proche de celui de l'eau de l'exutoire.

IV. ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ADSORPTION DES TRACEURS FLUORESCENTS PAR LES SEDIMENTS DE REMPLISSAGE EN MILIEU KARSTIQUE

La réalisation des traçages à l'aide des traceurs fluorescents conduit, dans certains cas, à des bilans de restitution très déficitaires. Compte tenu de l'incidence que ce phénomène peut avoir sur la forme de la distribution des temps de séjour, qui est à la base de toute l'interprétation d'un traçage, il devient nécessaire s'interroger sur les causes qui conduisent à de tels bilans négatifs. Compte tenu du fait que dans le milieu naturel les traceurs sont en contact permanent avec les roches de l'aquifère et les matières en suspension, une des pistes de recherche consiste à étudier le rôle sur d'éventuels phénomènes d'adsorption/désorption.

Une étude expérimentale de l'adsorption des traceurs fluorescents sur des sédiments de remplissage de deux systèmes karstiques différents a été entreprise dans cette perspective.

Le but a été d'étudier de manière, d'abord, qualitative le phénomène d'adsorption et d'estimer quelle part il prend dans la réduction de la masse de traceur en transit.

Cette étude d'adsorption a été effectuée sur des suspensions des sédiments présents dans deux milieux karstiques différents : le système karstique de Bange-l'Eau-Morte (massif subalpin des Bauges, Savoie et Haute-Savoie), et celui du Causse de Sauveterre. Les traceurs qui ont servi sont les traceurs fluorescents parmi les plus communément utilisés: la sulforhodamine B; la sulforhodamine G; l'éosine ; l'uranine et la rhodamine WT.

IV. 1. Caractérisation des matériaux

Les matériaux que nous avons retenus sont utilisés à l'état naturel et renferment, de ce fait, un certain nombre d'impuretés. Nous avons préféré travailler avec des matériaux bruts pour rester le plus proche possible des conditions naturelles rencontrées par le traceur.

¹ Ne connaissant pas la vraie origine de ce produit, on peut se poser des questions de savoir s'il s'agit vraiment d'une fluorescéine sodique (uranine) ou alors, d'une uranine nouvelle, qui circule depuis quelque temps sur le marché et pour laquelle l'intensité de la fluorescence présente une sensibilité particulièrement forte et inhabituelle au pH de l'eau employée pour confectionner les étalons. La faible coloration de cette uranine, observée pendant la préparation des dilutions, était assez douteuse (par exemple pour une concentration de 10^{-8} kg/l, normalement visible à l'œil nu, la fiole était plutôt incolore.

Les matériaux ont été caractérisés à l'aide des méthodes classiques telles que l'analyse chimique des oxydes, la Diffraction des Rayons-X (DRX), la mesure de la surface spécifique et de la capacité d'échange cationique (CEC), etc.. Quelques résultats sont regroupés dans les tableaux 1 et 2.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Perte en feu	Total
Bange-l'Eau-Morte	56.92	6.66	3.95	0.09	0.88	14.1	0.32	1.12	0.54	0.16	15.3	101.4
Causse de Sauveterre	6.87	3.87	1.45	0.07	15.3	24.6	0.11	0.13	0.22	0.26	43.83	96.71

Tableau 1 : Analyses chimiques des deux échantillons prélevés en milieu karstique.

	Capacité d'Echange Cationique (CEC)	% d'argile	Carbonates (CaCO ₃)
Bange-l'Eau-Morte	16 méq/100 g	10	24
Causse de Sauveterre	05 méq/100 g	-	78

Tableau 2 : Caractérisation des deux échantillons prélevés en milieu karstique.

L'ensemble des résultats nous a amené aux conclusions suivantes :

- L'échantillon de Bange-L'Eau-Morte est constitué majoritairement par des phyllosilicates regroupés en 3 phases : une phase argileuse gonflante, une phase démixée non gonflante (illite) et une phase minoritaire à chlorite. On note une quantité importante de quartz, un pourcentage non négligeable de calcite, et la présence des oxydes/hydroxydes de fer ainsi qu'une faible quantité de plagioclases
- L'échantillon de Causse de Sauveterre est caractérisé par la présence majeure des carbonates, avec la dolomite comme composante principale, et la calcite. La présence de gibbsite a été remarquée ce qui est cohérent avec la présence d'aluminium dans l'analyse chimique. On note également la présence d'oxydes/hydroxydes de fer.

IV.2. Expérience d'adsorption

Les tests d'adsorption ont été effectués en batch, par réactions d'échange entre un volume constant du traceur et une quantité constante du sédiment en suspension. Les tests ont été réalisés pour plusieurs concentrations du traceur. On a choisi d'opérer dans une gamme de concentrations très large comprises entre 10⁻² kg/l et 10⁻¹⁰ kg/l, domaine de concentrations auxquelles les traceurs sont exposés au cours de leur transit dans les systèmes karstiques. La quantité du matériau mis en suspension, pour les tests réalisés, a été de 0,300 g.

Protocole expérimental

Les expériences d'adsorption ont été répétées plusieurs fois pour affiner la méthode expérimentale (3).

Il faut souligner que la quantité de matière en suspension que nous avons prise est inférieure à celle rencontrée dans la littérature pour ce genre d'essai. Cette quantité (300 mg dans 200 ml) a été déterminée pour être compatible avec celles qu'il est possible d'observer à l'exutoire des systèmes karstiques concernés.

Le déroulement de l'expérience est le suivant:

- préparation de la solution-mère à la concentration de 0.02 kg/l de traceur ;

- préparation des solutions de concentrations recherchées (environ 205 ml) réalisées par mélange de volumes appropriés de la solution initiale du traceur avec de l'eau déionisée. La mesure des volumes est réalisée par prélèvement au moyen de pipettes de précision PIPETMAM de 100, 200, 1000 et 5000 μl , ou par pesée sur une balance ;
- prélèvement de 5 ml de chaque solution préparée pour déterminer, par analyse au Spectrofluorimétrie, les concentrations initiales exactes ;
- pesée d'échantillons de 300 mg de sédiment sec environ ;
- mise en suspension des sédiments dans 200 ml de chaque solution ;
- stabilisation du pH initial des suspensions à l'aide d'une solution de NaOH ;
- agitation pendant 12 heures sur un agitateur à plateau à la fréquence d'agitation sélectionnée de 100 cycles/min ;
- mesure du pH final des suspensions ;
- centrifugation des suspensions à 4500 t/min, pendant 30 min dans une centrifugeuse à nacelles (FIRLABO) modèle SV 8 ;
- filtration sur des filtres 0.22 μm Millipores type MF (esters de cellulose).

IV.3. Présentation des résultats

Les résultats sont présentés sous forme des courbes d'adsorption. La magnitude d'adsorption, exprimée en quantité de traceur adsorbé par quantité de matériau, est tracée en fonction de la concentration de la solution d'équilibre. Sur la figure 7-a sont rapportées les courbes d'adsorption de l'uranine, éosine, sulforhodamine B, sulforhodamine G et rhodamine WT, pour une gamme complète de concentrations initiales testées, comprises entre 10^{-10} kg/l et 10^{-3} kg/l, pour l'échantillon de Bange tandis que celles du Causse de Sauveterre figurent sur la figure 7-b.

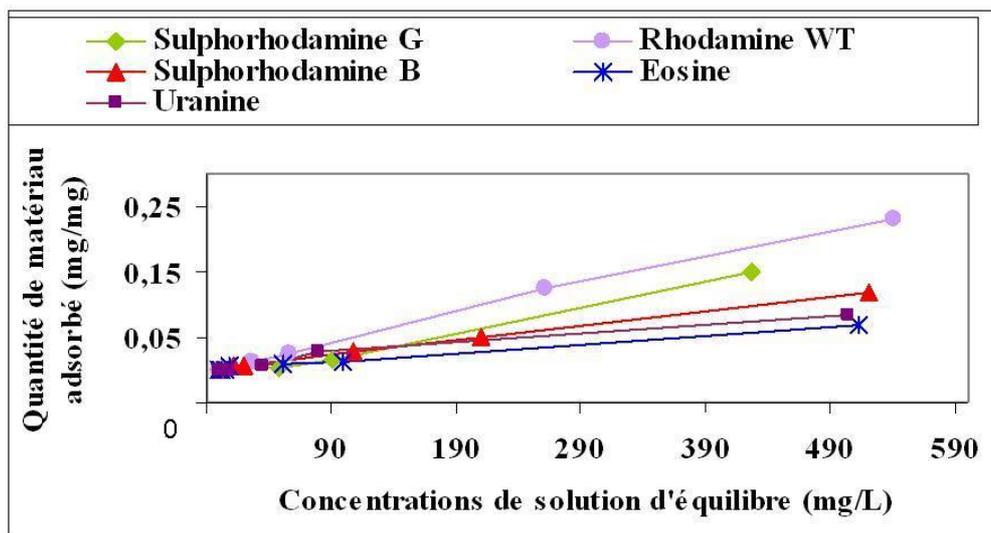


Figure 7a : Courbe d'adsorption de 5 traceurs pour l'échantillon de Bange-L'Eau-Morte

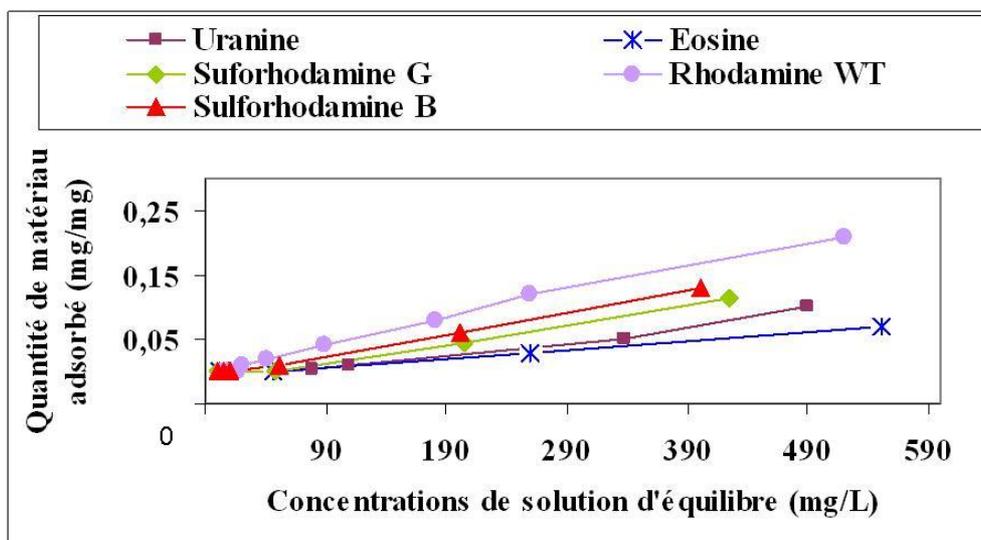


Figure 7b : Courbe d'adsorption de 5 traceurs pour l'échantillon du Causse de Sauveterre

Pour les deux sédiments, le phénomène d'adsorption se manifeste clairement. L'analyse des résultats confrontée à la comparaison empirique des courbes d'adsorption peut nous permettre d'établir un ordre relatif de la tendance à l'adsorption. Par contre, l'amplitude de l'adsorption n'est pas la même pour les cinq traceurs. Dans les deux cas, le traceur le plus résistant est l'éosine, et celui le plus adsorbé est la rhodamine WT, ce qui est en cohérence avec certains travaux antérieurs (9 ; 11) Pour l'échantillon de Bange-L'eau-Morte, on trouve par ordre croissant d'adsorption la succession suivante : l'éosine < l'uranine < sulforhodamine B < sulforhodamine G < rhodamine WT. Pour l'échantillon du Causse de Sauveterre l'ordre est légèrement différent : éosine < l'uranine < sulforhodamine G < sulforhodamine B < rhodamine WT. Dans des deux cas, le traceur le plus adsorbé reste la rhodamine WT.

Pour mieux illustrer l'ordre d'adsorption pour le sédiment de Bange, nous avons reporté sur le tableau 3, les valeurs ponctuelles de l'intensité d'adsorption, pour une concentration initiale de 10^{-5} kg/l.

solution de traceur d'une concentration de 10^{-5} kg/l	Uranine	Eosine	Sulphorhodamine G	Sulphorhodamine B	Rhodamine WT
mg de traceur adsorbé / mg de sédiment de Bange	0.005	0.004	0.0090	0.0084	0.01

Tableau 3 : Intensité d'adsorption en mg de traceur adsorbé/ mg de sédiment, pour une concentration initial de 10^{-5} kg/L (Banges - l'eau -Morte)

Sur la figure 8 sont présentées les courbes d'adsorption de l'uranine pour les deux sédiments.

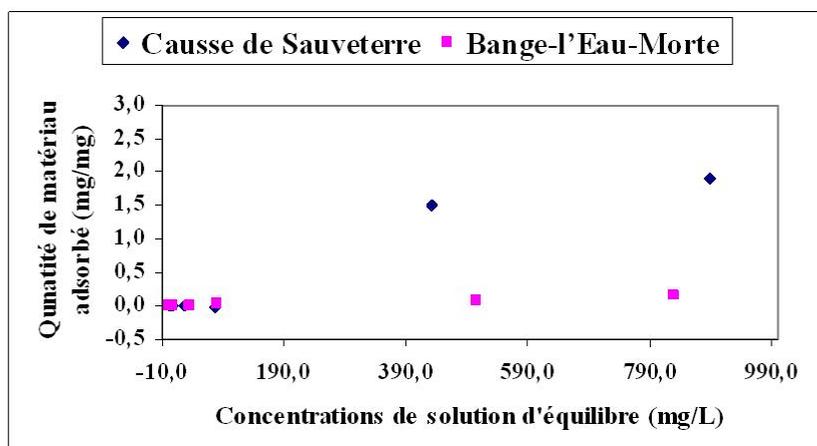


Figure 8 : Courbes d'adsorption de l'uranine pour les deux matériaux : Bange et Sauveterre

La partie de la courbe qui correspond aux concentrations relativement fortes montre une plus forte quantité de traceur adsorbée pour l'échantillon provenant du Causse de Sauveterre. Les ordres de grandeurs de l'adsorption, exprimée en quantité de traceur adsorbée par quantité de sédiment présente en suspension pour une solution d'uranine d'une concentration de 10^{-4} kg/l sont reportés sur le tableau 4.

solution d'uranine à une concentration de 10^{-4} kg/L,	Bange-L'eau-Morte	Causse de Sauveterre
mg de traceur adsorbé / mg de sédiment	0.08	1.5

Tableau 4 : Intensité d'adsorption de l'uranine en mg de traceur adsorbé/ mg de sédiment, pour une concentration initiale de 10^{-4} kg/l.

On constate que l'échantillon de Causse de Sauveterre adsorbe plus de traceur que celui de Banges. L'uranine ne résiste pas de la même manière dans ces deux milieux différents.

IV.4. Discussions et conclusions de l'étude de l'adsorption

Concernant cette étude nous ne pouvons conclure que de manière qualitative. L'interprétation des résultats a été limitée par certains facteurs. En priorité, la complexité des phases minéralogiques qui composent les matériaux ne nous permet pas d'avancer sur des aspects plus quantitatifs. Malgré cela, le phénomène d'adsorption a été mis en évidence en fonction du type de traceur ainsi que du type de sédiment. On constate cependant que l'adsorption est la plus importante sur les sédiments à dominante carbonatée (dolomite, calcite) du Causse de Sauveterre que sur ceux de Bange-L'Eau-Morte qui sont plus riches en minéraux silicatés, notamment des argiles.

Ce fait nécessite une réflexion plus approfondie sur un éventuel comportement spécifique du traceur en fonction de la diversité des milieux naturels dans lesquels il est utilisé. Il peut y avoir, sans doute, d'autres variables en fonction desquelles l'adsorption varie (9 ; 10), qui n'a pas été l'objet de mesures dans le cadre de ce travail.

Plusieurs autres questions restent cependant posées : à quoi le phénomène d'adsorption est-il dû ? Quelle est la contribution des diverses phases minéralogiques constituant les sédiments au processus d'adsorption ? Il reste surtout à avancer sur la quantification du phénomène afin de mieux situer la réponse face à la question posée au départ : quel est le rôle de l'adsorption dans la réduction de la masse de traceur en transit.

Quoiqu'il en soit, on peut en conclure que la présence de turbidité dans l'eau d'un exutoire est un facteur qui contribue à l'adsorption des traceurs lors d'une restitution et qui explique pour partie les bilans de restitutions déficitaires qui sont assez fréquemment constatés en traçage.

V. CONCLUSION

Dans l'état actuel de nos connaissances une opération de traçage se révèle comme une entreprise complexe encore largement perfectible. La conception des essais de traçage dans les règles de l'art est une condition indispensable de leur interprétation correcte. Dans l'ensemble des démarches qui interviennent, la composante analytique est d'une très grande importance (7). Aucune interprétation fiable ne pourrait être formulée à partir de résultats qui ne seraient pas basés sur une démarche analytique et des mesures rigoureusement contrôlées. La perfection de l'expertise analytique n'est rien d'autre que l'amélioration de la discrimination de la restitution et l'élimination des signaux interférents qui sont le plus fréquemment générés par les matières en suspension ou les matières organiques présentes en solution dans les eaux.

Sur la base des différentes investigations présentées ici et d'autres expériences qui n'ont pas fait l'objet de cette note, on conçoit dès lors la nécessité d'intégrer dans les protocoles existants :

- i) la caractérisation préalable de l'eau et de sa qualité, là où le traçage s'effectue ;
- ii) la maîtrise au laboratoire des paramètres environnementaux qui peuvent influencer l'évolution de la fluorescence ;
- iii) tenir compte des difficultés liées aux changements d'échelles, du laboratoire au terrain, mais aussi de l'échelle de l'essai à l'échelle du problème posé.

Références bibliographiques

- (1) **Charrière R.** 1974 – Perfectionnement à la mesure de traceurs fluorescents. Applications à l'hydrogéologie. Thèse de l'Université de Grenoble, 197 p.
- (2) **Feuerstein D.L., Selleck R.E.** 1963 – Fluorescent tracers for dispersion measurements. J. Sanit. Eng. Div. Amer. Soc. Civil.Eng., 89, SA4, p 1-21.
- (3) **Jozja N.** 2003 – Caractérisation « multi-échelle » d'une bentonite magnésienne. Impact de l'interaction avec le nitrate de plomb sur la perméabilité. Thèse de l'Université d'Orléans, 275 p.
- (4) **Kass W.** 1998 – Tracing Technique in Geohydrology. Taylor & Francis, 585 p.
- (5) **Lepiller M.** 2000 – Traçages appliqués à la dynamique des aquifères : possibilités et limites. Géologues n° 129, p.79-84.
- (6) **Mangin A., Molinari J., Paloc H.** 1976 - Les traceurs en hydrogéologie karstique. Leur apport à la connaissance des réservoirs aquifères calcaires. La Houille Blanche. N° 3-4, p. 261-267.
- (7) **Plagnes V.** 1997 – Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie des eaux. Thèse de l'Université de Montpellier II. Document BRGM 294, 375 p.

- (8) **Rochat J., Alary J., Molinari J., Charrière R.** 1975 – Séparation physicochimiques de colorants xanthéniques utilisés comme traceurs en hydrologie. *Journal of hydrology*, 26, p 277-293.
- (9) **Sabatini D.A., Austin T.A.I.** 1991 – Characteristics of Rhodamine WT and Fluorescein as Adsorbing Ground-Water Tracer. *Ground Water*. Vol. 29. N° 3, p. 341-349.
- (10) **Smart P.L. et Laidlaw I.M.S.** 1977 – An Evaluation of Some Fluorescent Dyes for Water tracing. *Water Resources Research*. Vol 13. N° 1, p. 15-33.
- (11) **Trudgill S. T.** 1987 – Soil Water Dye Tracing, with Special References to the Use of Rhodamine WT, Lissamine FF and Amino G. Acid. *Hydrogeological Processes*. Vol 1, p 149-170.