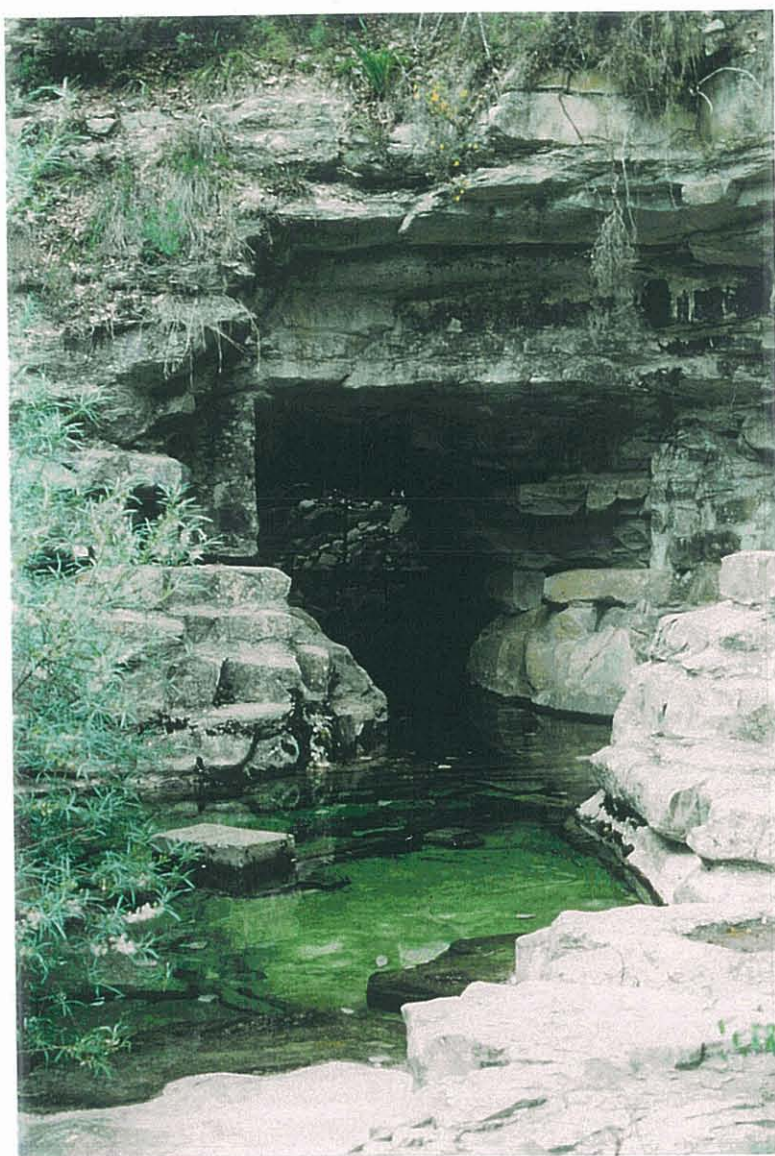




Pour une gestion active des ressources en eau d'origine karstique



Séminaire national
27, 28 et 29 novembre 1996
Hôtel du Département de l'Hérault – Montpellier

Rapport BRGM R 40126 – Juillet 1998

Mots clé : Karst, hydrogéologie, ressources en eau, gestion active, protection, méthodes.

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

BRGM Département Eau (1998) – Pour une gestion active des ressources en eau d'origine karstique.
Rapport. BRGM R 40126. 289 p.

© BRGM, 1998, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

INTRODUCTION

Les terrains carbonatés occupent plus de 160 000 km², soit 30 % de la surface de la France, et s'étendent sous plus de la moitié des régions en constituant des aquifères plus ou moins étendus. Malgré cette extension considérable, ces aquifères n'offrent pour le moment qu'une ressource en eau le plus souvent sous-exploitée et, de toute façon, non soumise à une gestion réelle. Toutefois, l'accroissement des besoins en eau et surtout l'impérative nécessité de protéger toutes les ressources des actions humaines contraignent actuellement les usagers à des actions collectives conduisant à :

- 1) connaître le fonctionnement des hydrosystèmes sur lesquels ils agissent, soit du fait de leurs activités, soit du fait de l'exploitation des ressources,
- 2) définir les conditions de leur exploitation et de leur protection,
- 3) gérer collectivement l'espace inclus dans ces hydrosystèmes afin d'en assurer la pérennité en quantité et en qualité.

Bien que récentes et introduites par la loi sur l'Eau de 1992 et, de ce fait, pas encore totalement maîtrisées, ces modalités de gestion et d'exploitation doivent être présentées à titre d'exemple, car elles sont, à notre avis, la seule solution envisageable pour prendre en considération à la fois les propriétés aquifères, souvent très intéressantes, des aquifères carbonatés, et leur particulière sensibilité aux pollutions et, éventuellement, à la surexploitation. Mais il n'est pas de gestion active de ces ressources sans une connaissance approfondie, non seulement des ressources elles-mêmes, mais aussi du fonctionnement des aquifères, de l'organisation des écoulements souterrains qui les parcourent et des relations précises entre ces eaux souterraines, leur environnement (les eaux de surface) et les activités humaines.

Les deux milieux aquifères, fissuré et karstique, considérés ici, sont différents, mais présentent cependant des aspects communs, concernant en particulier leur prospection et leur suivi hydrologique. En outre, leur différenciation n'est pas aussi franche qu'il n'y paraît, puisqu'il est maintenant connu qu'il existe une continuité entre les aquifères carbonatés fissurés et ceux au fonctionnement karstique évident. En effet, les nombreuses études menées depuis 30 ans sur ce type d'aquifère mettent en lumière non seulement l'existence de formes karstiques typiques, aussi bien de surface que souterraine, mais encore un fonctionnement hydrologique traduisant l'existence, dans ces aquifères, d'une structure des écoulements caractérisant plus ou moins une modification des propriétés aquifères d'un milieu fissuré originel par les processus karstiques. De tels caractères ne doivent pas surprendre, dans la mesure où la karstification est connue pour être un processus géologique rapide (plusieurs milliers à

quelques centaines de milliers d'années suffisent à la mise en place d'un drainage souterrain karstique), et que la France subit au moins depuis le Miocène des conditions environnementales favorables au développement du karst.

Le domaine karstique fait l'objet de recherches fondamentales en hydrogéologie et en géomorphologie (CNRS, universités). Mais comme les aquifères carbonatés sont également le fournisseur d'eau d'importantes collectivités en France (Angoulême, Montpellier, Besançon, Cannes, Paris, Nice, etc.), ainsi que dans le bassin méditerranéen, la recherche fondamentale s'appuie souvent sur des projets et des réalisations, expression de la demande en eau. Elle est alors directement associée à la recherche appliquée.

Du fait que les aquifères carbonatés représentent une ressource encore largement sous-utilisée, leur exploitation rationnelle est maintenant envisagée, notamment dans le cadre des schémas de gestion globale de l'eau impulsés par la loi sur l'eau du 3/1/1992 (SDAGE et SAGE). Ceci conduit à une demande d'amélioration des connaissances de ces systèmes de la part des gestionnaires publics dans un processus de large concertation avec les usagers tant pour optimiser leur exploitation, que pour concevoir leur suivi, évaluer leurs ressources, leur sensibilité aux aléas climatiques et aux pollutions. C'est à ce titre que plusieurs opérations ont récemment contribué à faire mieux connaître ces systèmes et à mettre en oeuvre une méthodologie d'investigation adaptée aux caractères particuliers du milieu fissuré et karstique.

C'est pourquoi le BRGM a été chargé de réunir, dans le cadre de sa mission de Service Public, les différents acteurs notamment les décideurs publics et les opérateurs techniques et scientifiques, pour dresser un état actualisé des connaissances avant de concevoir des actions concrètes visant à répondre aux préoccupations des gestionnaires publics.

Tel est le but de ce séminaire national "***pour une gestion active des ressources en eau d'origine karstique***" organisé à Montpellier avec le soutien des Agences de l'Eau, de la Direction de l'Eau du Ministère de l'Environnement et du Conseil Général de l'Hérault.

Cet ouvrage constitue un document de travail qui rassemble les textes préparés par les conférenciers invités à présenter soit des exemples concrets d'actions de prospection et de gestion de l'eau d'origine karstique, soit les concepts, les démarches et les méthodes qui paraissent actuellement les mieux adaptées au milieu karstique.

M. Bakalowicz,
Chargé de recherche au CNRS,
Responsable du programme de recherche
BRGM/CNRS sur le karst

J.P. Comte,
Responsable du Centre thématique Eau du BRGM

Sommaire

	Page
Session A : Ouverture du Séminaire	
Allocution de G. SAUMADE , <i>Député-Maire, Président du Conseil Général de l'Hérault.</i>	2
Allocution de JP. HUGON , <i>Directeur Général du BRGM.</i>	4
Allocution de JC. ARMAND , <i>Agence de l'Eau RMC.</i>	6
Allocution de E. BINET , <i>Directeur régional de l'Environnement LRO.</i>	7
Le domaine karstique du bassin Rhône-Méditerranée-Corse. Les interventions de l'Agence de l'Eau ; M. ALBINET , <i>Agence de l'Eau RMC.</i>	11
Le domaine karstique du bassin Adour-Garonne. La politique de l'Agence de l'Eau ; M. PLAUD , <i>Agence de l'Eau AG.</i>	22
Le karst. Sa place dans le monde et en Europe ; M. BAKALOWICZ , <i>CNRS/BRGM.</i>	29

Session B : Gestion et protection des ressources en eau en région karstique. Revue de cas concrets et d'expériences de terrain	
Le karst de Gervanne (Drôme). Evaluation et mobilisation de la ressource en eau ; Ph. CROCHET , <i>ANTEA Groupe BRGM, Agence LRO.</i>	34
La fin de l'exploitation minière du Bassin ferrifère de Lorraine, une hydrogéologie perturbée en milieu calcaire fissuré et karstifié ; L. CADILHAC , <i>Agence de l'eau RMC ; P. GAMEZ</i> , <i>Centre d'Etudes Géographiques Univ. Metz.</i>	56
La karstification de la craie ; N. CRAMPON , <i>IUT Béthune, Département Génie Civil.</i>	71
Difficultés de la mise en place des périmètres de protection des captages en milieu karstique. L'exemple du département de l'Hérault ; J. GREVELLEC , <i>Conseil Général de l'Hérault.</i>	85
Le karst de la Rochefoucauld. Un exemple de gestion prévisionnelle d'un aquifère karstique ; B. DE GRISSAC , <i>Conseil Général Charente ; M. LAROQUE</i> , <i>M. RAZACK</i> , <i>URA CNRS 721 HydrASA, Univ. Poitiers.</i>	94
Le karst de la Loue et ses relations avec le Doubs (Franche-Comté) ; JP. METTETAL , <i>Direction Régionale de l'Environnement de Franche-Comté ; J. MUDRY</i> , <i>Labo. de Géologie Structurale et Appliquée, Besançon.</i>	103
Les aquifères karstiques du Larzac septentrional. Leur vulnérabilité. Propositions en vue de leur exploitation et de leur protection ; J. RICARD , <i>BRGM SGR/MPY ; M. BAKALOWICZ</i> , <i>CNRS/BRGM.</i>	119

Session C : Qu'est-ce que le scientifique peut apporter aux exploitants et aux gestionnaires ?	
Structure et fonctionnement des aquifères karstiques les concepts et les approches ; A. MANGIN, <i>Labo. souterrain du CNRS.</i>	124
Approches conceptuelles de l'aquifère karstique. Problèmes méthodologiques et d'exploitation ; Ph. CROCHET, <i>ANTEA Groupe BRGM, Agence LRO ;</i> B. MARSAUD, <i>ANTEA Groupe BRGM, Agence HNO.</i>	146
Les pompages en aquifère karstique. Une démarche d'interprétation des essais adaptée au karst ; B. MARSAUD, <i>ANTEA Groupe BRGM, Agence HNO.</i>	177

Session D : Les outils et les techniques de reconnaissance des karst	
La géophysique, outil de reconnaissance des karsts ; Y. BENDERITTER, <i>CNRS (URA 1367) Garchy.</i>	203
Les traçages artificiels, outils de reconnaissance et d'étude des aquifères karstiques ; P. MEUS, <i>Labo. souterrain du CNRS, Moulis.</i>	228
Le traçage naturel des aquifères karstiques. Les apports de la chimie des eaux et des isotopes du milieu ; M. BAKALOWICZ, <i>BRGM/CNRS.</i>	247

Session E :	
Cartographie de la vulnérabilité des bassins d'alimentation des sources karstiques par une méthode multicritère ; F. ZWAHLEN, N. DOERFLIGER, <i>Centre d'Hydrogéologie Univ. de Neuchâtel.</i>	262

Session G : Table ronde, synthèses et recommandations	
Gestion et protection des ressources en eau en région karstique ; C. LEFROU, <i>Directeur Mission Service Public du BRGM.</i>	280
Qu'est-ce que le scientifique peut apporter aux exploitants et aux gestionnaires ; A. MANGIN, <i>Directeur de Recherche au CNRS.</i>	282
Table ronde du séminaire karst : Mme Oliveros-Toro, MM. Armand, Albinet, Comte, Crochet, de Grissac, Lefrou, Mangin, Plaud, Zwahlen.	284

Session A :
Ouverture du séminaire

Gérard SAUMADE

Député-Maire,

Président du Conseil Général de l'Hérault

Monsieur le Directeur, représentant Madame le Ministre de l'Environnement
Monsieur le Directeur de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse,
Monsieur le Directeur Général du Bureau de Recherches Géologiques et Minières,
Messieurs les Directeurs,
Messieurs les Professeurs,
Mesdames, Messieurs,

Je suis particulièrement heureux de vous accueillir aujourd'hui dans l'Hérault au nom d'un département qui a mis l'eau au cœur de ses préoccupations.

Le nombre et la qualité des participants à ce colloque, organisé par notre Direction de l'Eau et de l'Environnement en étroite liaison avec le Bureau de Recherches Géologiques et Minières et les Agences de l'Eau, prouvent à quel point vous êtes sensibles non seulement au sujet abordé, mais j'en suis convaincu à la manière dont nous le traitons depuis longtemps ensemble.

Et je suis très intéressé par la présence aux côtés des institutions gestionnaires au quotidien de nombreux enseignants et chercheurs reconnus dans ce domaine.

Je sais qu'à travers ces rencontres, vous avez la volonté d'échanger plus que d'enseigner et ainsi de renforcer une coopération indispensable sur ce thème crucial.

Vous le savez aussi bien que moi, la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 a affirmé que l'eau faisait partie du patrimoine commun de la nation et, à travers les SAGE, elle a prévu de nouvelles procédures de concertation.

Cette philosophie qui préside à l'intention du législateur et cette approche nouvelle, nous l'avons depuis fort longtemps mise en place dans l'Hérault.

En effet, dans ce département dominé par le régime des "oueds" où la sécheresse succède à la crue, où, donc, l'eau constitue une richesse qu'il est d'autant plus important de gérer en commun qu'elle est rarement mobilisable au moment opportun, nous avons institué une démarche globale.

C'est ainsi qu'à travers la stratégie d'aménagement des vallées, ces fameux "oueds" dont je parlais à l'instant, s'est dessinée depuis 1980 environ une politique de développement prenant en compte prioritairement les contraintes hydrauliques.

Car il ne s'agit pas que de canaliser, d'éviter les inondations, il faut savoir gérer une ressource et en assurer la qualité.

C'est la raison pour laquelle nous avons élaboré deux schémas fondamentaux à l'horizon 2010.

L'un concerne l'adduction d'eau potable et l'autre l'assainissement.

La croissance considérable de nos besoins d'ordre qualitatif mais aussi quantitatif dans un département aussi visité que l'Hérault, implique de notre part la mise en place d'outils de prévision.

Or, vous le savez peut-être, malgré le canal du Bas-Rhône, qui je l'espère sera prolongé vers la Catalogne, 90 % de notre ressource provient des nappes souterraines et 45 % de celle-ci du système karstique.

Cette situation illustre bien l'importance fondamentale de la propriété collective, sinon de la gestion au sens fermier du terme, de cette ressource.

Aussi, le Conseil Général de l'Hérault, au-delà des 5 MF annuels consacrés à la recherche d'eau, a-t-il décidé de lancer des investigations dans le karst de la Haute Vallée de l'Hérault, en cohérence avec le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (S.D.A.G.E. Rhône-Méditerranée-Corse) et en étroite concertation avec les collectivités concernées.

Ce type de recherche, nous allons aussi le conduire dans le secteur du Bassin de Thau, que vous allez visiter vendredi.

En résumé, toutes ces actions ont un triple objectif :

- solidarité dans le partage de la ressource, en particulier entre la ville et le monde rural,
- sécurité et protection de la santé,
- préservation et valorisation du patrimoine naturel.

Peut-être certains d'entre vous seront-ils surpris de constater que l'Hérault et son Conseil Général sont autant préoccupés par l'eau que par le vin. Sur ce deuxième point, l'intervention de l'homme est décisive et elle a réussi.

Sur le premier, la modestie s'impose tout autant que la solidarité.

Jean-Pierre HUGON
Directeur Général du BRGM

En tant que Directeur Général du BRGM, je me réjouis du partenariat avec la Direction de l'Eau et les Agences de l'Eau qui ont confié au BRGM l'organisation de ce séminaire sur les ressources en eau des karsts.

Je remercie le Conseil Général de l'Hérault et son Président, Gérard SAUMADE, dont je connais l'intérêt pour les problèmes de gestion de l'eau, pour l'accueil réservé à ce séminaire.

Si Marcel PAGNOL dans Manon des Sources a bien illustré la problématique de gestion des eaux souterraines, les hydrogéologues ont compris les mécanismes du cheminement des eaux souterraines dans le sous-sol. Dans les milieux perméables en petit ils savent déterminer les zones favorables à l'exploitation, quantifier les ressources disponibles et mettre à la disposition des décideurs des outils d'aide à la décision, en particulier des modèles de simulation.

Mais l'écoulement des eaux dans les formations karstiques est particulier et relève d'une approche totalement différente. L'identification de zones favorables à une exploitation pérenne, l'évaluation des ressources disponibles, la détermination de l'impact d'un prélèvement sont autant de problèmes pour lesquels on ne disposait jusqu'à présent d'aucune méthodologie fiable reconnue par la communauté scientifique.

Or, les karsts représenteraient le tiers des ressources potentielles en eau souterraine de l'Europe. Leur maîtrise est donc un enjeu économique essentiel.

Des progrès récents ont été réalisés. Ce séminaire doit permettre d'en faire le bilan afin de rendre possible la généralisation des méthodes mises au point et d'orienter les recherches futures.

Je remercie tous les participants d'avoir accepté de contribuer à cette action de mise en commun des expériences acquises.

Je profite de cette occasion pour dire quelques mots de l'évolution récente du BRGM qui vient de procéder à une réorganisation de ses structures en filialisant ses activités du domaine concurrentiel dans deux groupes de filiales. Le premier est chargé de l'exploration et de l'exploitation minière avec un partenaire australien ; le second, avec un partenaire hollandais, se consacre à l'ingénierie dans les domaines de l'eau, de l'environnement et de l'aménagement et comprend notamment une filiale ANTEA qui dispose, ici à Montpellier, d'une agence dont le Directeur est ici présent car c'est un hydrogéologue spécialiste des karsts.

L'Etablissement public BRGM s'est, lui, recentré sur ses activités de recherche et de service public. Cette clarification des structures a permis de redévelopper l'activité de service public.

Si Orléans reste le centre scientifique et administratif le plus important du BRGM, nous avons voulu redéployer de façon volontariste notre activité dans chaque région de France métropolitaine et dans les départements d'Outre-mer. Chaque région est ainsi dotée d'un service géologique régional partenaire des services déconcentrés de l'Etat et des collectivités territoriales. On y trouve des spécialistes des sciences de la terre connaissant bien à la fois la géologie régionale et les problèmes économiques impliquant la connaissance du sous-sol.

Ces spécialistes régionaux sont épaulés par des centres thématiques qui font de la recherche et apportent aux services géologiques régionaux le soutien méthodologique qui permet de garantir la qualité de nos prestations. Nous avons choisi Montpellier pour y implanter notre centre thématique sur les eaux souterraines pour deux raisons : les problèmes de gestion de l'eau y sont importants et les collectivités territoriales y sont fortement impliquées en partenariat avec les services de l'Etat et par ailleurs de nombreuses équipes scientifiques ayant des compétences complémentaires aux nôtres y sont présentes : l'Université, le CNRS, l'ORSTOM, le CEMAGREF, l'INRA, le CIRAD et d'autres encore.

Cet engagement nouveau du BRGM dans ses activités de recherche et de service public vient d'être consacré, pour ce qui concerne le domaine de l'eau, par Madame Corinne LEPAGE, Ministre de l'Environnement, qui, sur la recommandation du Conseil Général des Mines, a confié officiellement au BRGM une mission de service public portant sur l'acquisition des connaissances générales des eaux souterraines notamment les banques de données et l'ingénierie des réseaux de mesures et sur l'appui scientifique et technique aux services chargés de la police des eaux.

Je vous souhaite de bien travailler ensemble pendant ces deux jours afin que les actes de ce séminaire permettent une avancée significative dans la méthodologie d'évaluation et de gestion des ressources en eau des karsts.

Jean-Claude ARMAND

Au nom de J. CHIROUZE, Directeur de l'Agence de l'Eau
Rhône-Méditerranée-Corse

Les ressources en eau d'origine karstique, on en a fait le constat depuis longtemps, sont exploitées bien en deçà de leur potentiel. Même si les exemples ne manquent pas sur le bassin Rhône-Méditerranée-Corse de captages importants, à l'échelle de la satisfaction des besoins en eau de grandes agglomérations comme Montpellier, on sait que les volumes globalement exploités sont bien faibles en regard des volumes écoulés ; et pourtant une partie du bassin vit sous un climat semi-aride et son développement a nécessité de lourdes infrastructures de mobilisation des eaux superficielles.

Ce constat, qui peut paraître paradoxal, résulte d'une part des difficultés d'accès à la ressource souterraine inhérentes à ce type d'aquifère, simultanément de la maîtrise des techniques de construction de barrage ou de transfert d'eau superficielle, et d'autre part des connaissances pendant longtemps insuffisantes, ou insuffisamment diffusées, sur les ressources des karsts (alimentation, volumes disponibles, renouvellement...). Je crois également, pour ma part, que pèse dans ce constat l'inquiétude latente des gestionnaires : comment gérer cette ressource complexe dans sa géométrie, dans son comportement (vidange, recharge, crue), et dans ses circulations internes ?

L'objet de ce séminaire est justement d'aborder la gestion de ces ressources. Cette préoccupation, assez récente, est le signe que les connaissances de base sont aujourd'hui disponibles, au moins sur certains aquifères que l'on veut gérer, et que l'on peut maintenant se préoccuper de leur exploitation active. Le titre de ce séminaire peut paraître redondant, "pour une gestion active des ressources en eau d'origine karstique", mais ses organisateurs l'ont voulu ainsi pour insister sur les moyens de constatation. On verra donc dans les exposés techniques des exemples concrets de gestion d'aquifères karstiques, mais on verra aussi le développement de méthodes d'investigation ou de conceptualisation qui les sous-tendent.

Cette nouvelle démarche est séduisante et l'enjeu est de taille parce que ces ressources représentent, si l'on sait les gérer et les exploiter, une alternative sérieuse aux ouvrages de surface dont on perçoit mieux aujourd'hui les contraintes socio-écologiques, sinon les limites d'acceptabilité. On connaît l'impact des barrages-réservoirs sur le transport solide et l'équilibre géomorphologique des cours d'eau, l'impact paysager, l'obstacle créé aux poissons migrateurs... Cependant mon propos n'est pas ici de jeter l'anathème sur certaines options d'aménagement du territoire mais de me féliciter que la panoplie de l'aménageur et du gestionnaire se complète d'outils de gestion spécifiques aux karsts. Ces réflexions se trouvent d'ailleurs traduites dans le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du Bassin Rhône-Méditerranée-Corse, qui sera soumis à l'approbation définitive du Préfet Coordinateur de Bassin avant la fin de l'année.

Il est donc particulièrement intéressant que, dans l'ensemble de la dynamique créée par la Loi sur l'Eau du 03/01/1992, ce séminaire ait été initié par le Ministère de l'Environnement, les Agences de l'Eau et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Je souhaite qu'il soit le précurseur de nombreux travaux de réflexion, d'expérimentations, et de véritables efforts de gestion.

E. BINET

Directeur Régional de l'Environnement Languedoc-Roussillon ;

Monsieur le Président,

Messieurs les directeurs et les délégués,

Mesdames et Messieurs les élus,

Mesdames, Messieurs,

M. Pierre ROUSSEL, directeur de l'Eau, m'a chargé, en tant que directeur régional de l'Environnement, de le représenter parmi vous. Son emploi du temps ne lui permet pas en effet d'être présent ici aujourd'hui, mais il tient à saluer la tenue de ce séminaire qu'il a pris l'initiative d'organiser : *"pour une gestion active des ressources en eau d'origine karstique"*.

Immense, inexploitée ou peu exploitée, vulnérable, cette ressource est abritée dans des milieux vivants, et il est requis effectivement qu'elle fasse l'objet d'une active gestion, active parce que fondée sur une connaissance plus approfondie, mais non activiste - ce qui serait forages et captages au coup par coup, de manière précipitée et sans précaution - active, c'est à dire placée au point de convergence de la recherche scientifique et de la décision politique, et méritant le nom de gestion non seulement parce que l'exploitation et la conservation ne s'y opposeraient pas, mais parce que son utilisation progressive ne nuirait pas à la reconstitution naturelle de ce capital indispensable aux générations futures dont les besoins doivent être tout autant satisfaits que les nôtres, bref une *gestion durable*.

Si nous plaçons d'entrée notre séminaire sous le signe de la durée et du durable,

- C'est d'abord parce que la ressource elle-même est une oeuvre de la durée. Modelés par l'âge, par l'érosion, par des phénomènes physico-chimiques ou tectoniques très anciens, les milieux karstiques sont saisissants de complexité, marqués des caractères d'hétérogénéité et de discontinuité.
- C'est aussi parce que nous avons l'intuition qu'il s'agit là peut-être de la ressource en eau du 3ème millénaire, si nous comprenons peu à peu le fonctionnement de ces milieux, tant il est vrai que la productivité de ces ressources nous apparaît aujourd'hui encore sous les signes du très aléatoire.
- C'est enfin parce nous réalisons clairement que l'oeuvre à entreprendre est de très longue haleine compte-tenu des abîmes de notre méconnaissance, de la variété des contextes hydrogéologiques et de l'ampleur des ressources en jeu.

La faculté des sciences de Montpellier nous dit que les ressources en eau karstiques renouvelables du seul pourtour méditerranéen français représenteraient plus de 2 milliards de m³ par an, dont seulement 15 à 20 % sont utilisés.

Nous connaissons des zones où les calcaires affleurent, dans le Jura, dans le Doubs, dans les Grands Causses, et nous célébrons quelques sources de renommée comme celle du Lez ou Fontaine de Vaucluse, mais il est aussi des ressources que l'on ne capte qu'en profondeur comme dans le Bassin Parisien par exemple.

Or si ces milieux sont encore souvent en marge d'une demande sociale en eau, on repousse peu à peu les recherches vers les zones calcaires - ainsi en est-il dans ce département vers Causse de la Selle, comptant pour apprécier cette ressource sur sa promesse de qualité, à la fois du fait de la forte productivité du karst et du fait d'une pression polluante externe actuellement moins accentuée. Ainsi l'eau peut être d'une excellente qualité et ces sources-là qui sont des exutoires karstiques régularisent le régime des rivières. Mais chacun sait également la vulnérabilité de ces aquifères aux pollutions extérieures - notamment dans ces zones de Causses exemptes de recouvrement de sol - et l'eau y circule si vite que le transfert de pollution pourrait ainsi y être rapide.

Nous connaissons donc au moins nos handicaps, nous savons que les méthodes de prospection sont encore à approfondir, que d'amples recherches scientifiques sont à mener, et que les études en ces milieux ont un coût tel que les programmes de base ne se chiffrent pas en milliers mais en millions de francs.

Avec ses partenaires et avec les établissements publics de l'Etat, le ministère de l'Environnement a mis en place un premier réseau d'acquisition de données sur le karst et dans notre bassin RMC par exemple, des conventions lient l'Agence de l'Eau, le BRGM et notre DIREN. L'enjeu pour le ministère est bien l'acquisition de chroniques longues de données pour la compréhension des fonctionnements des systèmes karstiques.

Le groupe de travail animé par la direction de l'Eau sur les réseaux conduit simultanément à créer un réseau national de surveillance de la quantité et la qualité des aquifères, ce qui passe par une hiérarchisation, afin que ceux qui sont jugés d'intérêt national fassent l'objet prioritairement d'un suivi quantitatif et qualitatif.

Le rapport sur les eaux souterraines confié par Madame le ministre de l'Environnement à M. MARTIN, ingénieur général des Mines, conduit naturellement dans la ligne des conclusions de son auteur à la réflexion qui est en cours sur l'organisation de la police des eaux souterraines. Qu'il s'agisse de l'instruction proprement dite des dossiers, qu'il s'agisse de la définition de l'appui technique à donner aux services qualifiés, ou encore de la coordination de cette police, le chantier est désormais convenablement ouvert et nous nous approchons des solutions.

En tout état de cause les compétences de l'Etat et de ses établissements publics sont en jeu. Les missions interservices de l'Eau - les MISE - de chaque département ont et auront un rôle majeur à jouer. Des partenaires identifiés sont structurellement partie prenante dans cet enjeu, je veux citer les DDAF, par exemple pour les nappes dites "d'accompagnement" de rivières et les sources comme exutoires karstiques, les DDASS qui ont des responsabilités éminentes en matière de périmètres de protection et de suivi de l'hygiène publique, les DRIRE dont les missions sont anciennes quant aux nappes profondes et bien entendu aussi quant au suivi de la profession des foreurs, les Agences de l'Eau dont les

7^{ème} programmes en cours de définition ont vocation à cofinancer les études, et particulièrement l'évaluation de la ressource, notamment en milieu karstique, le BRGM dans sa mission Service Public dont les interventions environnementales ne cessent de croître, et qui est un opérateur précieux pour l'appui technique et l'aide à la décision.

Il y a donc un champ de compétences complexe, à l'image du milieu étudié, et je peux vous assurer de la coopération active des services de l'eau et des milieux aquatiques des directions régionales de l'Environnement, dans le cadre des missions que leur a confiées leur décret de création, et au titre du secrétariat de chaque comité technique régional de l'eau.

L'importance de mettre en place des périmètres de protection des captages, particulièrement pour ceux qui, comme l'indique la loi sur l'Eau, ne bénéficient pas " d'une protection naturelle, permettant efficacement d'assurer la qualité des eaux ", c'est-à-dire les ressources non protégées, est une exigence suffisamment pressante dans le temps, sérieuse dans l'enjeu et complexe, pour que le Conseil Supérieur de l'Hygiène Publique ait été chargé de piloter un groupe interministériel mis en place afin d'apprécier les difficultés objectives des procédures et d'étudier l'éventualité d'établir une liste de priorités. La hiérarchisation des points de captage ne saurait minorer, vous vous en doutez, ces captages en milieu karstique, compte tenu de la grande vulnérabilité de ces ressources.

Nous sommes heureux que cette gestion d'eau en milieu karstique soit un sujet abordé à Montpellier d'où le pôle de compétences Eau a vocation à rayonner, et d'abord en accueillant les compétences nationales et internationales.

Je souhaiterais que dans ce séminaire, et dans ses prolongements, nous développions toujours davantage ce qui était le coeur de notre demande en l'organisant, c'est à dire des *retours d'expérience* de gestion des karsts - expériences qui peuvent venir des distributeurs d'eau ou des milieux universitaires, de nos façons françaises d'organiser la coopération des acteurs ou d'autres exemples féconds de l'étranger.

Car gérer un milieu complexe - et ce que nous savons des difficultés en surface nous incite à être encore plus en éveil sur les ressources souterraines qui pour être jugées très obscures ne sauraient justifier des interventions trop en aveugles... gérer un milieu aquatique complexe ce n'est pas seulement gérer des données - et il y a fort à faire pour les recueillir, les rassembler, les valider, les interpréter - ce n'est pas seulement construire des modèles - et il y a d'énormes efforts à engager avant de pouvoir mettre au point des outils d'aide à la décision en milieu karstique du type de ceux qui ont été conçus pour les milieux poreux, ce qui appelle de l'Université et de la formation un potentiel de développement - c'est intervenir dans des logiques d'acteurs, et déjà certes dans l'élaboration des diagnostics car avec qui veut-on gérer ? et quels sont les effets des connaissances transmises sur les dispositifs de décision ? mais aussi dans l'établissement des programmes d'actions. Dans notre région l'exemple de Balaruc-les-Bains - Issanka dans ses relations entre aquifères karstiques, eaux thermales et étang littoral à interfaces multiples, et avec des enjeux économiques importants, est un premier essai en vraie grandeur qui sera abordé vendredi, et qui témoigne de ce type de situation où nous devons avoir une approche à la fois systémique et sociale. C'est la raison pour laquelle la DIREN s'y est particulièrement investie.

Entre les programmes de recherche qui sont à lancer de manière plus systématique et plus prospective - et non pas seulement lors de grands projets de travaux de mobilisation de la ressource en eau - et la nécessaire information des usagers, il y a place pour un développement concerté. Cet exemple le montre s'il en était besoin, vous pouvez être sûrs du

concours de l'unité Eaux Souterraines de notre DIREN - animée par Anne Laurent récemment honorée dans la catégorie Junior par l'association internationale des hydrogéologues - unité qui est l'un des pôles du service de l'Eau et des Milieux Aquatiques que dirige désormais Danièle GAY, toutes deux étant présentes ces deux jours-ci.

Ces journées vont permettre de mettre en commun des analyses et des pratiques de chercheurs, de bureaux d'études, de services publics. Je remercie chaleureusement tous ceux qui les ont organisées et le Département qui nous accueille, et je me réjouis avec vous en les ouvrant de leur très certaine fécondité.

Le domaine karstique du bassin Rhône-Méditerranée-Corse

Les interventions de l'Agence de l'Eau

M. ALBINET

Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse

Résumé

Par rapport aux autres Agences de l'Eau le territoire d'intervention de l'Agence Rhône-Méditerranée-Corse est celui où le domaine karstique est le plus étendu. La ressource en eau qu'il renferme est énorme mais son volume global reste difficile à cerner. Comparé à la totalité des volumes prélevés connus de l'Agence, le débit de certaines sources montre que ce domaine est très peu exploité.

Pourtant les actions de l'Agence sont nombreuses et variées que ce soit dans le domaine de la connaissance de ce milieu ou pour ce qui concerne les nombreuses opérations relatives à la protection des captages, au renforcement de la ressource en eau ou à la réalisation d'études diverses. La mise en place du SDAGE devrait améliorer l'exploitation et la gestion de cette ressource ainsi que sa connaissance.

Introduction

Par rapport aux autres Agences de l'Eau, le territoire d'intervention de l'Agence Rhône-Méditerranée-Corse est celui où le domaine karstique est le plus étendu. Il couvre en effet une superficie de l'ordre de 40 000 km² soit environ le 1/3 de la superficie totale du bassin. Le nombre de manifestations naturelles (grottes, cavernes, gorges, pertes, résurgences, etc.) et bien souvent touristiques est très important : rappelons que le gouffre Jean Bernard (commune de Samoens-74258), le plus profond du monde reconnu à ce jour, la célèbre Fontaine de Vaucluse (commune de Fontaine de Vaucluse-84139) et bien d'autres encore, sont situés dans ce bassin.

La ressource en eau qu'il renferme est énorme mais malheureusement d'un volume difficile à cerner de manière suffisamment rigoureuse, c'est à dire sans risque d'erreur d'appréciation au moins modeste. On peut toutefois apprécier l'ampleur de cette ressource en se référant aux débits connus des principales sources d'origine karstique du bassin Rhône-Méditerranée-Corse (cf. annexe 1). On peut aussi consulter les synthèses hydrogéologiques régionales effectuées durant la période 1983-1986 par le BRGM : on notera par exemple l'importance du volume annuel des apports nets pour certains systèmes karstiques comme celui du Vercors (n° 158) qui est estimé à 950 millions de m³ (3 fois la retenue du Mont Cenis, un peu moins que le lac d'Annecy -1123 millions de m³).

Situation

Si les ensembles de terrains constitués de roches à dominante carbonnatée (essentiellement calcaires et dolomies) qui existent dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse, présentent tous,

de par leur constitution, une porosité de fissure, tous ne peuvent répondre au qualificatif de karstique. Toutefois, à l'échelle du bassin, une délimitation précise des terrains carbonatés réellement karstiques ou non karstiques n'existe pas et les différents documents et cartes existants associent bien souvent le terme de karst à tout ensemble carbonaté. Quoiqu'il en soit et sauf la Corse, toutes les régions présentent un domaine karstique plus ou moins important ainsi qu'en témoigne la carte ci-après inspirée de celle établie par L.E. Crémille (« Protection des eaux souterraines captées en milieu karstique et destinées à l'alimentation humaine », rapport Agence de l'Eau RMC, 1988) et qui matérialise la distinction précédemment citée.

On associera à cette carte celle du SDAGE « Milieux aquatiques remarquables à forte valeur patrimoniale - aquifères karstiques » pour laquelle on se reportera à la conclusion en ce qui concerne son contenu. On notera qu'elle différencie les zones d'intérêt local dont les potentialités sont à étudier au coup par coup suivant le besoin, des zones d'intérêt régional, donc spatialement plus amples, à étudier en priorité dans le cadre plus général d'une politique de ressource en eau.

Les Prélèvements

La totalité des volumes d'eau prélevés en nappe karstique dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse est d'environ 180 millions de m³ pour l'année 1995. Traduit en débit moyen ce volume correspond à une valeur de 6 m³/s. En admettant une erreur importante (du simple au double), il n'atteint même pas la moitié du module annuel de la Fontaine de Vaucluse. Même si l'on ajoute à ce débit celui de nombreuses dérivations de cours d'eau d'origine karstique dont certaines sont importantes comme celle du canal de la Bourne dans le Vercors (5 m³/s en moyenne), le débit exploité reste faible et cela montre que l'exploitation des karsts est très modeste dans ce bassin. Comment expliquer cette disproportion ? Il est vraisemblable que l'on peut exprimer plusieurs réponses à cette question. On citera d'abord la méconnaissance des possibilités offertes par ce milieu au niveau des décideurs-utilisateurs mais aussi des hydrogéologues qui, par absence de mesures et d'observations, n'ont pas la possibilité d'afficher clairement des volumes disponibles. A ce sujet on peut citer quelques cas exemplaires (celui de la Drôme notamment sur lequel on reviendra par ailleurs) pour lesquels les élus locaux n'ont été convaincus que grâce à des études appropriées. Il y a aussi l'aspect aléatoire de la recherche d'eau, notamment par forage. On citera encore des raisons spécifiques à la constitution de ce milieu en liaison avec le type d'écoulement qui ne facilite pas l'utilisation d'outils tels que les modèles de simulation. Peut-être faut-il voir enfin le fait que, d'un point de vue géographique, les karsts ne présentent pas comme les nappes alluviales les possibilités économiques associées aux facilités de communications que l'on rencontre dans les vallées et les axes fluviaux.

En ce qui concerne l'importance des prélèvements en milieu karstique pour l'alimentation humaine, on reprendra les conclusions du rapport de L.E. Crémille précédemment cité : « la part des prélèvements dans les nappes karstiques représente une proportion déjà importante des eaux captées en nappes pour l'alimentation en eau potable mais une proportion encore faible des eaux en circulation dans le karst et un pourcentage encore inconnu des volumes d'eau stockée dans les réserves et utilisée jusqu'à présent ».

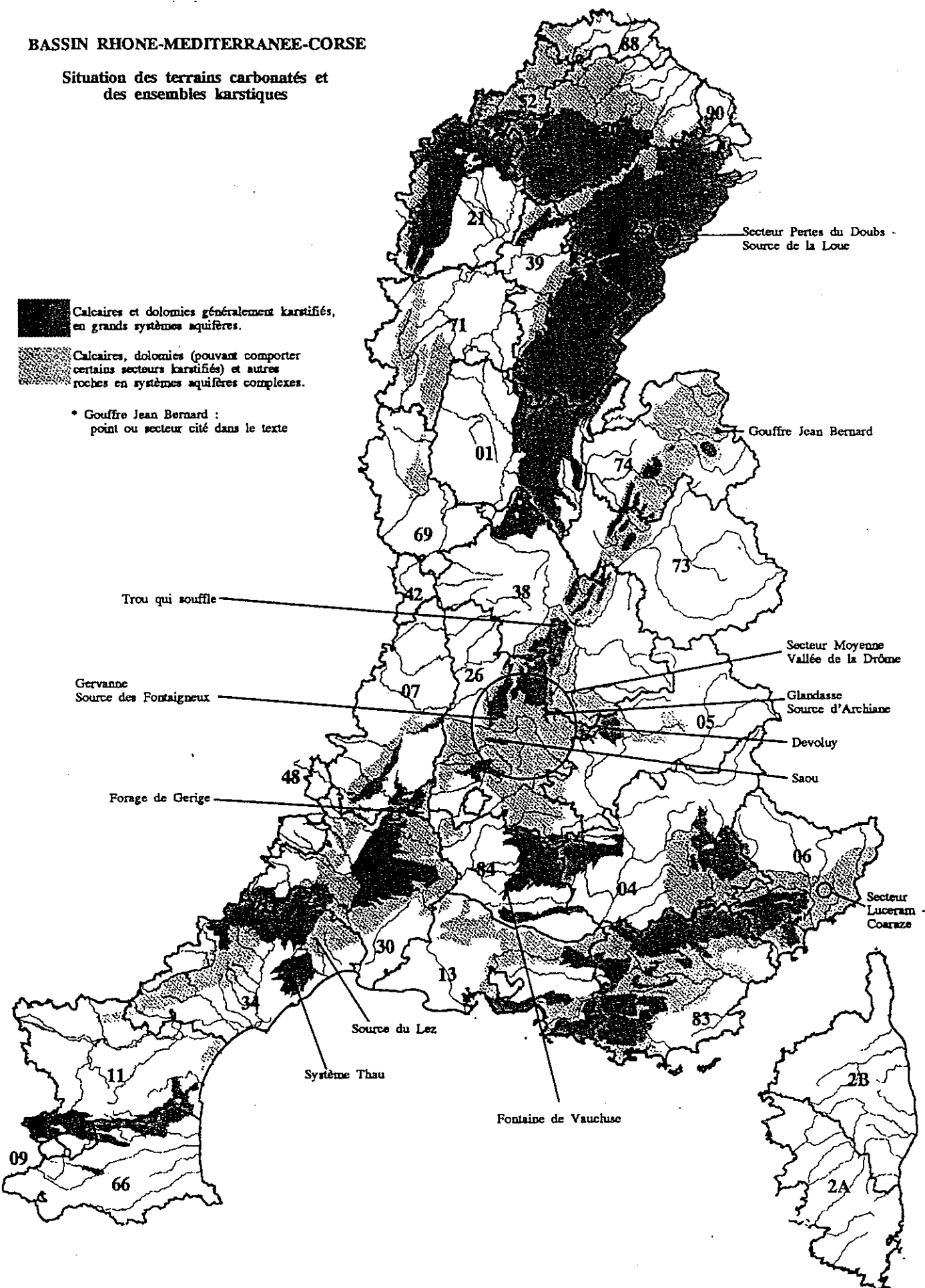
BASSIN RHONE-MEDITERRANEE-CORSE

Situation des terrains carbonatés et
des ensembles karstiques

Calcaires et dolomies généralement karstifiés,
en grands systèmes aquifères.

Calcaires, dolomies (pouvant comporter
certains secteurs karstifiés) et autres
roches en systèmes aquifères complexes.

* Gouffre Jean Bernard :
point ou secteur cité dans le texte



Les interventions de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-corse

Elles sont d'ordre multiple mais on peut les classer suivant deux catégories : celles à caractère de connaissance du milieu, celles à caractère de gestion.

Connaissance du milieu

Les opérations effectuées sont relatives à l'obtention de données brutes et à leur mémorisation sous forme informatisée, à l'établissement de documents synthétiques et l'examen d'aspects théoriques.

Données brutes

En 1986 l'Agence a fait réaliser l'inventaire des traçages en domaine karstique sur l'ensemble du bassin Rhône-Méditerranée-Corse. Ce travail a été effectué pour chaque région sous la coordination de R. Laurent (Fédération Française de Spéléologie). Au préalable, la récupération de toutes les données avait fait l'objet d'une structure ordonnée comportant de nombreuses rubriques relatives à l'injection et à la réapparition du colorant permettant une présentation homogène sur l'ensemble du bassin. Les résultats ont été diffusés sous forme de rapports avec tableaux et cartes au 1/50 000, puis informatisés sous Dbase IV (une diffusion sur disquette a été assurée à la demande) et transférés dans la banque de données Eaux Souterraines de l'Agence. L'utilisation de cette dernière permet d'obtenir rapidement les données grâce à un système d'entrées multiples : commune, département, domaine hydrogéologique, sous-secteur hydrologique, secteur défini en X, Y (sélection Lambert) associées à des possibilités de tris diverses (distances parcourues, vitesses de circulation).

En 1996 cet inventaire a fait l'objet d'une mise à jour avec transfert des nouvelles informations dans la banque de données précédemment citée.

Documents synthétiques

Les possibilités d'exploitation des synclinaux perchés du bassin Rhône-Méditerranée-Corse ont été examinées et ont fait l'objet d'un rapport interne de l'Agence de l'Eau réalisé en 1984. Outre le recensement des principaux synclinaux perchés, cette réflexion porte sur l'intérêt économique que peut apporter l'exploitation temporaire de ce type de réservoir sous forme de ressources d'appoint pour les usages AEP et irrigation ainsi que la régulation de bas débits d'étiage pour certains cours d'eau .

Des synthèses hydrogéologiques régionales ont été réalisées par le BRGM pour chaque région de programme (six) du bassin. L'intérêt principal de ce travail se manifeste par la tentative de quantification de certaines données, notamment celles du bilan entrées-sorties pour tous les domaines hydrogéologiques du bassin et donc pour ceux du domaine karstique. Ce travail bénéficie d'une présentation homogène pour l'ensemble des régions facilitant ainsi sa consultation.

Aspects théoriques

On citera "Etude des systèmes karstiques à partir des séries chronologiques de débits - Application aux karsts du Bugey et du Dévoluy" effectuée en 1991 par Ph. Crochet et M. Berthier (rapport BRGM R 33790 RHA 4S 91) dont l'objectif était de tester les possibilités offertes par l'analyse corrélatrice et spectrale dans le domaine de l'hydrogéologie karstique utilisée à l'époque par le Laboratoire de Moulis (A.Mangin, M.Bakalowicz).

Caractère de gestion

Il s'agit d'opérations entrant dans le cadre classique des interventions de l'Agence sous forme d'aides financières attribuées à des maîtres d'ouvrages en ayant fait la demande. Elles se répartissent en trois catégories qui ont trait à la protection des captages, au renforcement de la ressource et à des études de cas particuliers.

Protection des captages

Rappelons ici que les aides financières attribuées par l'Agence au titre de la protection réglementaire des captages AEP portent sur un éventail d'opérations partant de l'étude hydrogéologique préalable pour aboutir à des travaux divers (clôture du périmètre de protection immédiate, achat de terrains, etc.) en passant par toute la procédure de DUP et l'inscription des servitudes au bureau des hypothèques. Dans ce cadre de très nombreuses interventions (plusieurs centaines) ont été faites depuis 1980 parmi lesquelles un grand nombre d'études se rapportant à la définition des périmètres de protection que l'on pourrait d'ailleurs inclure dans la catégorie précédente « connaissance du milieu ». On citera par exemple l'étude des sources de la papeterie dans l'Ain réalisée par le SRAE Franche-Comté (J.P. Mettetal) en 1984.

Renforcement de la ressource

Ici encore la diversité des cas s'étale depuis l'étude de reconnaissance jusqu'à la réalisation de travaux divers comprenant les forages de reconnaissance et les forages d'exploitation. Parmi les cas les plus connus on citera celui du captage de la source du Lez pour la ville de Montpellier (34), celui du forage de Gérige pour Bourg Saint Andéol (07) et celui d'Autrans (38) dans le Vercors.

Etudes de cas particuliers

Elles se rapportent à des thèmes divers relatifs à la protection ou la recherche d'une ressource en eau et à la gestion des nappes. le nombre des interventions est également important. Pour n'en citer que quelques unes nous avons choisi celles qui nous ont paru les plus exemplaires par rapport à l'objectif recherché.

♦ Etude des systèmes karstiques de la moyenne vallée de la Drôme

Suite aux années sèches 1989-1990, le département de la Drôme, sensibilisé par des difficultés d'alimentation en eau et le tarissement de la rivière Drôme, décidait d'améliorer les disponibilités de ses ressources en eau. Parmi les solutions possibles, l'exploitation des

systèmes karstiques du Sud Vercors fut envisagée mais elle nécessitait au préalable une estimation de la ressource. Le Conseil Général, représenté par le SMARD (syndicat mixte d'aménagement rural de la Drôme), aidé financièrement par le Ministère de l'Environnement et l'Agence de l'Eau, fit appel au BRGM pour déterminer l'intérêt des formations carbonatées et/ou karstiques du bassin de la Drôme. Dans un ordre d'intérêt décroissant les secteurs de Glandasse, Gervanne, Saou et les formations carbonatées profondes furent examinés. Pour des raisons d'échelonnement des dépenses, l'effort de recherche a porté sur le secteur le plus prometteur, celui de la Gervanne avec la source des Fontaigneux. L'étude de Glandasse (source d'Archiane), d'un intérêt certain mais dont les connaissances faisaient apparaître un risque de fragmentation de la ressource, fut reportée à l'issue des travaux sur la source des Fontaigneux. Sur ce dernier site, les résultats obtenus après réalisation d'un forage de 120 mètres et d'un pompage à 100 l/s (360 m³/h) pendant 10 jours ont mis en évidence la présence de réserves importantes à l'amont de la source (de l'ordre de 6 millions de m³) pouvant être mobilisées à partir du forage existant.

Cette étude présente un caractère exemplaire à la fois :

- dans la démarche poursuivie qui, à la fin de chaque étape, fait l'objet d'une présentation technique des résultats obtenus auprès du comité de pilotage composé de plusieurs élus ayant toute latitude de décider en connaissance de cause le contenu et le financement des phases suivantes ;
- la qualité technique des travaux et les résultats obtenus (débit spécifique important) qui ont convaincu des élus, peu enthousiastes à l'origine de ce travail, sur les possibilités de mobilisation de ce type de ressource.

♦ Forage du « trou qui souffle » et forage de « Gérige »

Nous avons réuni ces deux exemples d'opérations car elles relèvent de la même démarche que celle de la source du Lez et des forages voisins réalisés, pour augmenter sensiblement la ressource exploitée : il s'agit de recouper un conduit principal par forage et pomper à un débit correspondant au besoin en eau formulé sans provoquer d'incidence majeure ou, si c'est le cas, d'assurer le système compensatoire d'alimentation de manière à éviter tout préjudice.

La reconnaissance du « trou qui souffle » dans le Vercors avait permis de mettre en évidence un siphon dénommé siphon de la Cupside, en liaison avec le réseau actif de la résurgence de la Goule Noire dont le débit est estimé à 200 l/s. Le forage du « trou qui souffle » a été effectué en 1990 pour le compte du syndicat d'Autrans-Meaudre (38) dans le Vercors. Sa profondeur est de 330 mètres (en réalité ce sont 2 forages, chacun équipé d'une pompe de 50 m³/h, qui ont été forés). L'opération a été réalisée avec succès malgré une légère erreur de repérage dont la conséquence avait abouti à situer la partie terminale de l'ouvrage à 3 mètres environ de la cavité productrice. Ceci a été solutionné par l'utilisation de dynamite assurant une fracturation suffisante.

Le forage de Gérige a été réalisé en 1984 pour le compte du S.I.V.M. de Bourg Saint Andéol (07). D'un diamètre de 350 mm et d'une profondeur de 150 mètres, sa particularité est de recouper le réseau karstique qui alimente la résurgence de la source de la Tourne située dans l'agglomération de Bourg Saint Andéol. En 1989 un forage de reconnaissance a été foré puis

alésé (de 6 à 15 pouces sur 166 mètres et de 15 à 20 pouces sur 6 mètres) pour constituer un deuxième forage d'exploitation.

♦ Pertes du Doubs et source de la Loue

Le cas célèbre de cette liaison, décelée en 1901 suite à un accident des usines Pernod, a fait l'objet de nombreuses études. Toutefois la nécessité d'assurer au Doubs en période de basses eaux un débit minimum sans pour autant réduire celui de la Loue restait en suspens. En 1993 les possibilités suivantes étaient envisagées :

- gestion du lac de Saint Point,
- restauration du Drugeon,
- contrôle des pertes par margelles,
- utilisation de la nappe de l'Arlier ou de compartiments isolés de cette nappe,
- stockage de surface ou souterrain.

Une étude fut alors décidée par le syndicat mixte d'étude pour l'aménagement de la Saône et du Doubs puis réalisée sous la coordination de la Diren-Sema qui effectua elle même une partie des prestations. Achevée en 1995 elle aboutit à une estimation du débit des pertes de l'ordre de 2 m³/s en période de basses eaux, celles-ci pouvant être totales en étiage sévère, les plus importantes se situant en aval de Pontarlier dans le secteur Arçon-Ville du Bois. La solution choisie fut celle du colmatage des pertes permettant d'espérer une augmentation de débit du Doubs de l'ordre de 200 à 500 l/s.

♦ Etude de faisabilité d'un barrage souterrain en milieu karstique à Lucéram (06)

L'idée intéressante de cette opération est d'utiliser la technique minière qui consiste à établir des batardeaux pour réaliser une retenue d'eau et pomper à l'amont des ouvrages. La tentative effectuée en 1993 sur la source de la Parre à Coaraze (06) avait bien montré l'intérêt de ce type d'exploitation mais, en raison de la fissuration importante occasionnant des pertes de débits non maîtrisées, elle avait souligné ce risque et la nécessité d'assurer une bonne obturation. Réalisée par le Centre d'Etudes du Karst l'étude s'est déroulée de fin 1994 à octobre 1995. La réalisation d'un barrage souterrain à la Fousse de Lucéram exutoire principal de la partie sud du synclinal de Peira-Cava a montré l'intérêt de cette technique mais, là encore, l'étanchéité du site du barrage n'est pas satisfaisante ce qui risque de réduire fortement, voire d'éliminer la motivation de la commune qui assure la maîtrise d'ouvrage.

♦ Etude du système jurassique Thau (34)

Le système jurassique Thau est un cas remarquable de circulations karstiques complexes associant des secteurs de nappe libre et de nappe captive en liaison hydraulique avec des aquifères contigus et dont l'exploitation multi-usages peut provoquer des contraintes « en cascade » en raison de cette continuité hydraulique. L'apparition de ces contraintes s'est manifestée très nettement à la suite d'une conjonction de facteurs défavorables : période pluri-annuelle de déficit d'alimentation naturelle (1985-1990), augmentation des prélèvements. Tout ceci eut pour effet d'accélérer la baisse du niveau piézométrique de la nappe avec des

conséquences diverses allant de difficultés dans la distribution de l'eau potable jusqu'à des problèmes d'aquaculture liés à une modification de la composition de l'étang de Thau en liaison avec la source de la Vise, point de sortie aval de ce système.

La nécessité d'une gestion globale et donc multi-usages déboucha alors naturellement sur une étude de modélisation qui fut confiée au BRGM.

Conclusions

Comme nous venons de le montrer l'action de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse se traduit par des interventions très diversifiées dans le domaine karstique.

Si on peut estimer comme satisfaisant le fait de constater cette diversité d'interventions de l'Agence cela ne doit pas masquer l'effort important qui reste à accomplir pour convaincre les usagers décideurs de mieux exploiter ce milieu. Toutefois les dispositions prévues dans le SDAGE du bassin Rhône-Méditerranée-Corse permettent d'espérer une exploitation amplifiée et donc une meilleure connaissance de ce milieu. Pour s'en persuader nous citerons les propos extraits de la carte n° 9 - Milieux aquatiques remarquables à forte valeur patrimoniale - Aquifères karstiques du volume 3 : « cette carte identifie les aquifères karstiques à fort intérêt stratégique pour les besoins en eau actuels ou futurs. Ces aquifères peuvent être situés sur des bassins versants souffrant d'une situation chroniquement et fortement déficitaire vis à vis de la ressource en eau. Le SDAGE préconise que l'opportunité d'utiliser ces aquifères pour la diversification de la ressource et la sécurisation de l'alimentation soit étudiée. Les schémas réalisés en conséquence doivent prendre en compte la spécificité de ces eaux souterraines très vulnérables à la pollution microbiologique et doivent définir une stratégie réaliste pour leur protection ».

**Principales sources d'origine karstique du bassin
Rhône - Méditerranée - Corse.**

Annexe 1

Les sources sont classées par ordre de débit décroissant quelle que soit l'expression du débit.
On notera à ce sujet la variabilité de la terminologie qui ne favorise pas un classement homogène.

Nom de la source	Domaine hydrogéologique	Commune	Code insee	Informations sur le débit	Origine de l'information
Fontaine de Vaucluse	Vaucluse - 162	Fontaine de Vaucluse	84139	débit moyen : 20 m ³ /s	Les eaux souterraines des karsts méditerranéens. Exemple de la région pyrénéo-provençale. 1983 C.Drogue, A.M.Laty, H.Paloc
Fontaine l'évêque	Plan de Canjuers - Grand plan - 167A	Bauduen	83015	débit moyen : 5 m ³ /s étiage absolu: 2,3 m ³ /s, module 5,7 m ³ /s, crue max. 19 m ³ /s pour une période de 75 ans.	idem Fontaine de Vaucluse Carte hydrogéologique du Var. Notice. R.Cova, G.Durozoy.
Source des Gillardes	Dévoluy - 161	Pellafol	38299	60 à 0,3 m ³ /s	Etude des systèmes karstiques à partir des séries chronologiques. Application aux karsts du Bugey et du Dévoluy. 199. P.Crochet, M.Berthier. Rapport BRGM R33 790RHA 4S 91
Source du Bournillon	Vercors - 158	Chatelus	38092	50 m ³ /s en crue	Carte hydrogéologique du Vercors. Notice. 1982. Ph.Rousset.
Source de l'Ain	Haut Jura - Plateau de Moirans, Champagnole, Nozeroy - 094G	Nozeroy	39391	débit moyen mensuel: de 12,4 à 1,9 m ³ /s période 05/1984 - 01/1986 débit instantané max. 59 m ³ /s	Etude de la source de la Papetterie. Rapport SRAE - Franche - Comté, 1986
Source d'Arbois	Vercors - 158	Chatelus	38092	4 m ³ /s en moyenne 40 m ³ /s en crue	Carte hydrogéologique du Vercors. Notice. 1982. Ph.Rousset
Source de la Loue	Haut Jura - Haut Doubs 094i	Ouhans	25440	4,25 à 3,5 m ³ /s - pic de crue 30,5 m ³ /s - période du 14/09 au 13/11/1995	Etude du système hydrologique Doubs - Loue. 1995. Rapport DIREN - SEMA Franche - Comté.
Source de la Diau	Préalpes du Nord - Bornes - 543A	Thorens - Glières	74282	débit maximum 8 à 9 m ³ /s	Hydrogéologie des systèmes karstiques de l'unité delphno - helvétique inférieure entre les vallées du Fier et du Borne (massif des Bornes, Hte Savoie). 1991 Thèse Ph.Mondain.
Source d'Arcier	Jura centre - Plateau d'Ornans - 093A	Vaire - Arcier	25575	débit moyen mensuel : 2,91 à 0,252 m ³ /s du 10/83 au 09/84 débit instantané max. mensuel: 5,8 à 0,350 m ³ /s	Etude de la source d'Arcier et de son bassin versant. Rapport du SRAE Franche - Comté. 1985.

Goule Noire	Vercors - 158	Rencurel	38333	2,5 m3/s	Carte hydrogéologique du Vercors. Notice.1982.Ph.Rousset
Source du Lez	Garrigue Ouest - 142	Saint - Clément	34247	2,2 m3/s	Les eaux souterraines des karsts méditerranéens. Exemple de la région Pyrénéo-Provençale.1983 C.Drogue,A.M.Laty,H.Paloc
Font Estramar	Corbières Orientales - Fenouillèdes - 145A	Salses	66190	médiane 1963-1975:2,170m3/s	Banque hydro
Source d'Archiane	Vercors - 158	Treschenu - Creyers	26354	débit moyen:1,03 à 1,827 m3/s débit max. 7,05 à 21,4 m3/s débit mini. 0,072 à 0,421 m3/s période : 1970 - 1990	Approche de la structure et du fonctionnement du système karstique du Glandasse.1992.Rapport BRGM R 34 392 RHA 4S 92.Ph.Crochet,B.Marsaud,Ph.Razin.
Source du pont de pierre	Préalpes du Nord - Bauges - 543A	Thotens - Glières	74282	débit max. 1,89 m3/s	Hydrogéologie des systèmes karstiques de l'unité delphino - helvétique inférieure entre les vallées du Fier et du Borne(massif des Bornes Hte Savoie).1991 Thèse Ph.Mondain.
Source de Sauve	Garrigue Ouest - 142	Sauve	30311	1,5 m3/s	Les eaux souterraines des karsts méditerranéens. Exemple de la région Pyrénéo-Provençale.1983. C.Drogue,A.M.Laty,H.Paloc.
Goule Blanche	Vercors - 158	Villard de Lans	38548	1,1 m3/s	Carte hydrogéologique du Vercors. Notice.1982.Ph.Rousset.
Source sous marine de Port Miou	Bassin du Beausset - 166	Cassis	13022	débit d'étiage >1 m3/s	Les eaux souterraines des karsts méditerranéens. Exemple de la région Pyrénéo-Provençale.1983. C.Drogue,A.M.Laty,H.Paloc.
Foux de la Vis	Larzac Nord - Causse de Campestre - 141B	Vissec	30353	débit d'étiage 1 m3/s	Carte hydrogéologique de la région karstique Nord - montpelliéraine.Notice.1966.H.Paloc.
Source du Jaur	Sud du Massif Central - Haut Minervois,Lodévois 558B	St.Pons de Thomières	34284	1 à 0,7 m3/s	Les eaux souterraines des karsts méditerranéens. Exemple de la région Pyrénéo - Provençale.1983. C.Drogue,A.M.Laty,H.Paoc.
Source des Fontaignieux	Royans - 159	Beaufort sur Gervanne	26035	0,963 m3/s	Carte hydrogéologique du Vercors. Notice.1982.Ph.Rousset
Source chez Party	Préalpes du Nord-Chablais Faucigny - 543C	Magland	74159	0,916 m3/s 04/09/1989	Resau régional de surveillance quantitative dans la région Rhône - Alpes.Etude de prefaisabilité d'équipement de sources karstiques.1990.P.Jerphanion.Rapport BRGM R.30826.RHA.45/90.
Foux de Draguignan	Région de Draguignan - 168C	Draguignan	83050	0,8 m3/s	Les eaux souterraines des karst méditerranéens. Exemple de la région Pyrénéo - Provençale.1983. C.Drogue,A.M.Laty,H.Paloc.
Source de la Papetterie	Haut Jura - Plateau de Moirans,Champagnole, Nozeroy - 094G	Sirod	39517	débit moyen mensuel:0,732 à 0,380-débit instantané maxi. mensuel connu:1,20 m3/s période 05/1984 - 01/1986	Etude de la source de la papetterie. Rapport SRAE Franche - Comté.1986.
Source de l'Adouin	Vercors - 158	St.Martin en Vercors	26315	0,560 m3/s	Carte hydrogéologique du Vercors. Notice.1982.PH.Rousset.

Source d'En Gornier	Pyrénées Orientales - Synclinal de Villefranche 620B	Ria Sirach	66161	débit moyen 0,6 m3/s	Les eaux souterraines des karsts méditerranéens. Exemple de la région Pyrénéo - Provençale. 1983. C.Drogue, A.M.Laty, H.Paloc.
Source du Théron	Bas Languedoc - Mouthoumet, Corbières 557B	Alet les Bains	11008	0,357 m3/s	Etude des aquifères karstiques de la partie occidentale du massif du Mouthoumet. 1991. Thèse AE. Bouchaala.
Source des Frayères	Plan de Canjuers - Bois de Prannes - 167D	Chateaudouble	83038	débit moy. en 1969: 0,340 m3/s	Carte hydrogéologique du Var. Notice. R. Cova, G. Durozoy.
Source des Plagnes	Préalpes du Nord - Chablais, Faucigny-543C	Vailly	74287	débit moyen annuel: 0,183 m3/s (1977), 0,146 m3/s (1978), 0,206 (1979).	Contribution à l'étude hydrogéologique, chimique et isotopique du massif karstique du Niffon (Chablais-Hte Savoie). Thèse 3° cycle. G. Vuylsteek.
Source du Réal	Pyrénées Orientales - Synclinal de Villefranche 620B	Réal	66159	débit moyen 0,150 m3/s	Les eaux souterraines des karsts méditerranéens. Exemple de la région Pyrénéo - Provençale. 1983. C.Drogue, A.M.Laty, H.Paloc.
Source de Fontrabieuse	Pyrénées Orientales-Synclinal de Fontrabieuse 620B	Fontrabieuse	66081	débit moyen 0,1 m3/s	Les eaux souterraines des karsts méditerranéens. Exemple de la région Pyrénéo - Provençale. 1983. C.Drogue, A.M.Laty, H.Paloc.
Source de la Brouzinadouïre	Larzac Sud, Serrane, Causse de la Selle 141A	St. Etienne de Gourgas	34251	débit étiage 0,1 m3/s	Carte hydrogéologique de la région karstique Nord - Montpelliéraine. Notice. 1966. H. Paloc.

Pour l'ensemble du bassin Rhône-Méditerranée-Corse 20 sources figurent dans le catalogue de la Banque Hydro avec des périodes d'observation différentes: quatre (Arcier, Gillardes, Lez, Frayères) figurent dans ce tableau.

Le domaine karstique du bassin Adour-Garonne la politique de l'Agence de l'Eau

Michel PLAUD

Agence de l'Eau Adour-Garonne

Résumé

Les systèmes aquifères carbonatés, dont une grande partie est karstifiée, s'étendent très largement dans le bassin Adour-Garonne. Leur rôle dans l'hydrologie du bassin est capital. Leurs ressources, importantes, sont globalement sous exploitées.

Après un bref historique de l'exploitation de ces eaux et des problèmes qu'elle a posés, les réponses apportées par l'Agence sont décrites.

Des perspectives d'intense exploitation durable paraissent possibles sous condition d'en fixer les limites et les effets. Les préconisations de l'Agence dans ce domaine iront dans ce sens.

Introduction

Des six Agences de l'eau, Adour-Garonne est avec Rhône-Méditerranée-Corse, celle où les roches carbonatées, compactes, simplement fissurées ou karstifiées, occupent à l'affleurement entre le quart et le tiers de la superficie de leur Bassin (cf. carte). En ce qui concerne le Bassin Aquitain, ce n'est que la partie émergée de l'iceberg puisqu'il a été rencontré des karsts dans le Crétacé et le Jurassique jusqu'à 7 à 800 mètres de profondeur contenant de l'eau en abondance et douce de surcroît à plus de cent kilomètres des affleurements.

Cette présence quasi générale qui place les systèmes aquifères karstiques à l'un des tous premiers rangs quant à la ressource en eau, n'est pas leur seule vertu. Leurs affleurements, perchés par rapport au niveau de base des vallées sont drainés par les rivières, soit sous forme diffuse, soit ponctuellement au niveau de grosses exurgences parfois en position sous-fluviale. Ces apports contribuent ainsi à régulariser le régime des cours d'eau et à maintenir les parties captives en pression. Leur situation en altitude (haute ou moyenne) à la périphérie du Bassin leur confère de ce point de vue une situation stratégique pour les zones de plaine qui reçoivent ainsi spontanément chaque année plusieurs milliards de mètres cube d'eau. Les principaux cours d'eau du Bassin, que ce soit la Garonne et notamment ses affluents rive droite, le Tarn et le Lot ou la Dordogne avec ses affluents rive droite ou encore la Charente, tous traversent au moins un système aquifère karstique et non des moindres.

Ce sont donc des réservoirs naturels qui déversent leur réserve dynamique tout au long de l'année dans les cours d'eau. Ce déversement spontané n'est pas maîtrisé. Son régime est fonction de la structure interne du massif karstique et des précipitations de l'année, mais fréquemment des volumes bien plus considérables situés au-dessous du niveau de base des vallées ont été mises en évidence. Ces réserves sont exploitées dans le centre du bassin par assez peu de forages, pour l'eau potable ou la géothermie.

Un peu d'histoire

Jusqu'à une époque pas très éloignée, dans la plus grande partie karstique du Bassin Adour-Garonne, les systèmes aquifères ont été exploités au fil de l'eau de leurs sources sans amoindrir sensiblement leur débit pour les usagers de l'aval. Le seul problème consiste fréquemment à traiter la turbidité passagère de l'eau et à préserver sa qualité, car dans l'immense majorité des cas les sources karstiques sont captées à des fins d'eau potable.

Dans ces régions, la réalisation de forages est venue perturber ces pratiques, notamment dans les zones d'affleurement, comme dans le bassin de la Charente par exemple où le tarissement artificiel des sources et les assecs des cours d'eau sont de plus en plus nombreux, fréquents et précoces. Là, les limites à l'exploitation de ces ressources ont été insidieusement atteintes, voire dépassées chaque année, créant les méfaits précédemment évoqués. Une situation analogue commence à voir le jour dans certaines régions du département de la Dordogne.

Ailleurs, les prélèvements dans le karst affectent apparemment peu la ressource et les écoulements superficiels, ce qui laisse penser qu'il y a encore de fortes potentialités d'exploitation.

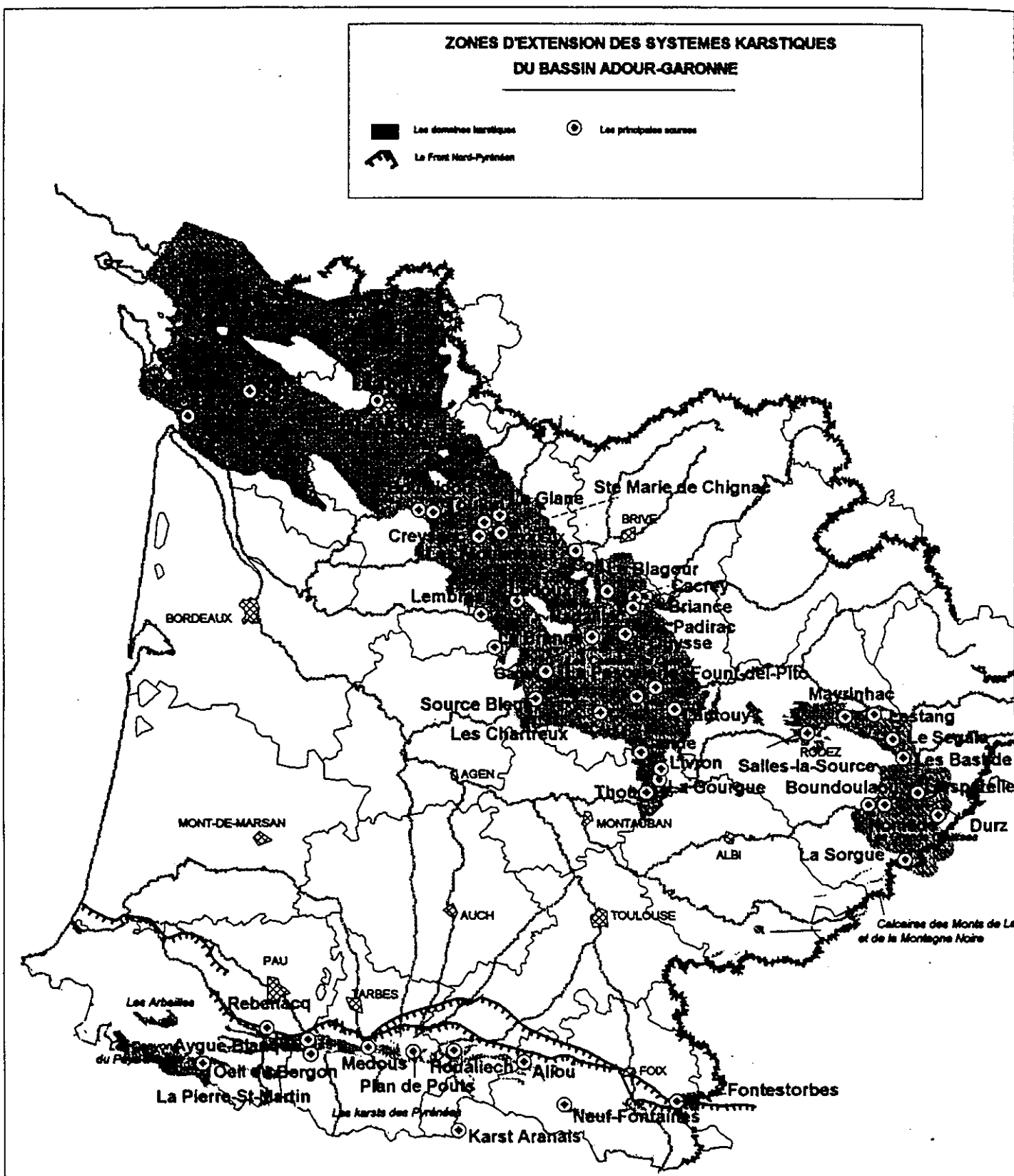
Dans les zones où le karst est sous recouvrement, des volumes de quelques millions de m³ d'eau d'excellente qualité extraits chaque année provoquent seulement les abaissements classiques de potentiel sans influence néfaste avérée.

Par contre, la croissance des prélèvements dans les cours d'eau durant les deux dernières décennies, notamment en plaine en période de tarissement, crée des situations de pénurie que différentes actions s'efforcent de résorber ou seulement d'atténuer : barrages de retenue de toutes capacités et économies d'eau représentent, en effet, des solutions qui ont leur propres limites.

L'idée de faire appel plus intensément aux eaux karstiques, n'est venue que plus récemment dans le Bassin. Mais exploiter cette ressource au-delà des débits naturels ne s'improvise pas du jour au lendemain. Cela nécessite un degré de connaissance que nous ne possédons pas et qui ne s'acquiert et ne s'affine dans un premier temps, qu'au fil d'une patiente observation des phénomènes naturels. Ultérieurement, des expériences de pompage intensif momentané nécessitant des investissements importants doivent être menées.

On peut donc distinguer trois époques qui ont en fait un certain recouvrement :

- celle de l'exploitation insouciante d'une ressource abondante par rapport aux besoins et qui satisfaisait l'essentiel des besoins locaux en eau potable nonobstant quelques problèmes de turbidité de l'eau des sources captées ;
- celle, intermédiaire, au cours de laquelle on a assisté à la montée en puissance incontrôlée des prélèvements par pompage et de la contamination de la ressource ;
- celle, actuelle, des problèmes quantitatifs localement aigus et ailleurs, des perspectives d'une nouvelle forme d'exploitation, fondée sur la prévision des conséquences.



Politique de l'agence

A chacune de ces époques, qui en fait ne se sont pas partout succédées au même moment dans le Bassin, a correspondu une réponse adaptée de la part de l'Agence, au travers d'une politique fondée sur la mise en valeur et la protection des eaux souterraines.

Première époque :

C'est ainsi que les premières études avaient trait à la protection des sources captées à des fins d'eau potable, ce qui a chaque fois nécessité de rechercher « l'origine de l'eau... » prévue par la réglementation. De façon très générale, les aménageurs s'en préoccupaient moins que la turbidité. Les plus importantes exurgences du bassin alimentant les villes moyennes ou des syndicats de communes ont été concernées. On peut citer quelques exemples d'opérations choisies dans les départements du pourtour du Bassin pour lesquelles l'Agence a apporté son concours technique et financier. Il s'agit toujours d'une étude préalable à l'expertise préconisant les périmètres de protection.

- (1978 à 1985) - Diverses études sur le régime et la définition des périmètres de protection des sources de la Touvre (16). Deuxième source vaclusienne de France avec un débit moyen annuel supérieur à 10 m³/s. Elle alimente le Grand Angoulême.
- (1988) - Etude hydrogéologique du bassin d'alimentation de la source du Ponty alimentant la commune de la Couronne (16).
- (1995) - Etude hydrogéologique du bassin d'alimentation de la source de Lucérat alimentant en partie la ville de Saintes (17).
- (1984) - Etude hydrogéologique de l'exurgence des Moulineaux captée par le Syndicat d'AEF de Coulounieix-Razac (24).
- (1984) - L'étude hydrogéologique de la source alimentant la ville de Boulazac (24).
- (1983) - Etude hydrogéologique des sources « Fonts chaudes » et « Dumont » alimentant la ville de Bergerac (24).
- (1994) - Etude hydrogéologique de la source du Toulon captée par la ville de Périgueux (24).
- (1987) - L'étude hydrogéologique de la Doux de Coly (19) alimentant la ville de Brive.
- (1992) - Etude hydrogéologique de la source bleue de Soturac pour le compte du SIAEP de la basse Vallée du Lot (46).
- (1995) - L'étude du massif karstique de l'Est du département de Tarn-et-Garonne (82).
- (1991) - Définition du bassin d'alimentation de la source de l'Espérelle alimentant la ville de Millau (12).
- (1988) - L'étude hydrogéologique de l'unité karstique alimentant la résurgence de l'Oeil du Nez captée par la ville de Pau (64) depuis 1865. Elle sort des calcaires urgo-aptiens à un débit moyen annuel de 3,4 m³/s.

A ces quelques exemples, s'ajoutent plusieurs dizaines d'études ayant la même finalité. Elles ont contribué à une meilleure connaissance des ressources.

On peut noter cependant qu'il apparaissait déjà un manque chronique de données concernant le régime des sources et la qualité de l'eau. Cette pénurie a renchéri le coût de ces études ou a rendu approximatifs leurs résultats. Le système de financement (cofinancement et maîtrise d'ouvrage publique) des actions nécessaires pour pallier cette situation n'a pas permis de concrétiser les préconisations de l'Agence dans ce domaine.

Deuxième époque :

Au cours de cette période, la protection des captages et surtout la réalisation de forages proches des sources ont permis généralement de s'affranchir des problèmes de qualité et de faire face à l'augmentation des besoins en eau potable. Les prélèvements intensifs du secteur agricole développés à partir d'initiatives individuelles ont cependant déstabilisé la situation, tant en ce qui concerne les potentiels que la qualité de l'eau. L'absence de réglementation adaptée et appliquée a contribué à cette déstabilisation.

Ces événements se sont produits également dans un contexte de méconnaissance à peu près totale des aquifères fissurés et karstifiés ; aucun dispositif d'observation généralisé et permanent tant des potentiels et des régimes des sources que de la qualité des eaux n'ayant été mis en place dans le Bassin. La recherche de méthodes d'investigation spécifique aux aquifères karstiques était en cours, suite au constat de l'inaptitude des méthodes développées pour les milieux poreux à donner des résultats satisfaisants.

Des études et quelques équipements d'observation ont cependant été réalisés durant cette période afin de dégrossir les problèmes qui risquaient de se poser à l'avenir ou de démarrer les chroniques d'observation dont on pourrait avoir besoin pour la mise en valeur des ressources karstiques. Ces études ont eu un certain développement dans les Pyrénées afin d'évaluer les ressources sur lesquelles on pourrait compter le moment venu et en Charente (karst de La Rochefoucault) pour tenter d'évaluer la limite au-delà de laquelle il serait déraisonnable de développer l'exploitation en cours.

Citons quelques exemples :

- (1982) - Etude des karsts pyrénéens
- (1988) - Potentialités des karsts en Midi-Pyrénées
- (1989) - Etude hydrogéologique de l'unité karstique des Arbailles (64)
- (1989) - Equipement et étude des émergences des Eschourdes et du Marseillon (40)
- (1989) - Programme d'études des conditions de surexploitation momentanée des eaux du karst de La Rochefoucault (16) dont les sources de la Touvre sont les exutoires principaux.

Ce projet n'a pas eu de suite du fait de son caractère trop interventionniste qui tranchait avec la nature des actions proposées dans le passé. Mal accepté localement, car sans doute, aussi, maladroitement proposé, ce projet constitue le type d'intervention qu'il faudra bien se résoudre à réaliser préalablement à la mise en oeuvre des programmes d'aménagements d'une certaine importance, si l'on veut prévoir leurs conséquences sur le milieu et apprécier leur acceptabilité.

Troisième époque :

Le début de la troisième époque a démarré avec la réalisation à titre expérimental d'un pompage en Ariège sur le site pilote du Baget où le CNRS effectuait des mesures hydrauliques, hydrochimiques et biologiques depuis une vingtaine d'années.

- (1990) - Test de pompage en aquifère karstique dans le gouffre de la Peyrère (09)

Sachant que ce n'était pas forcément le meilleur site pour mettre en évidence la possibilité d'extraire en continu des débits importants, des résultats déterminants étaient attendus et ont été obtenus sur le plan de l'architecture et du fonctionnement de ce type de *karst qui permettent de définir les conditions d'exploitation et leurs conséquences*. Des possibilités de pompage intermittent significatives ont été mises en évidence localement sans créer de désordres inacceptables.

L'étude préalable à l'institution des périmètres de protection des sources issues du plateau du Larzac septentrional (12) réalisée entre 1994 et 1996 marquera également une étape importante dans la façon d'aborder les problèmes de connaissance du karst. Cette étude réalisée par le BRGM pour le compte du Syndicat intercommunal d'alimentation en eau potable du Larzac représentant toutes les collectivités concernées, fait l'objet d'une communication mettant notamment en exergue l'apport des observations hydrochimiques dans *la gestion active de la protection de la qualité de l'eau des sources*.

Une dernière étude vient de commencer avec pour objectif la définition des programmes d'actions futurs sur les systèmes aquifères karstiques en Midi-Pyrénées. Les karsts recèlent en effet la plus grande partie des ressources souterraines de cette région. Cette étude fait le point des connaissances et établira le cahier des charges d'une série d'interventions qui pourront être déclenchées au moment le plus opportun compte tenu des problèmes qui se posent déjà ou se poseront à l'avenir. Le coût de ces programmes sera évalué en termes d'investissement et de fonctionnement.

Perspectives

Il apparaît que globalement à l'heure actuelle dans le bassin Adour-Garonne, l'exploitation des ressources en eau des karsts n'en est qu'à ses débuts. Sauf exception, ces ressources ne satisfont que des besoins permanents modestes par rapport aux perspectives qu'elles semblent offrir. Or, la caractéristique de la demande en eau à satisfaire à l'avenir est d'être importante, temporaire et estivale. Le principal besoin est celui du maintien au minimum d'un débit objectif d'étiage (DOE) quelques mois par an dans certains cours d'eau.

L'exploitation intensive de l'eau des karsts apportera-t-elle une réponse adaptée ?

On peut supposer que oui, dans la mesure où entamer leur réserve au cours d'un cycle hydrologique ne produira probablement pas d'effet au-delà de son terme tant leur capacité à s'alimenter est importante.

Par ailleurs, on sait maintenant ce qu'il faut faire et comment il faut le faire, pour prévoir les effets de tels pompages. Cet aspect du problème de l'exploitation des eaux karstiques est important de manière à pouvoir apprécier le coût des compensations à apporter et éventuellement les réduire en définissant des modalités de pompage adaptées.

Il serait inexcusable de laisser se développer, comme cela s'est produit localement dans le passé, l'exploitation de cette ressource sans en avoir fixé les limites ni en contrôler les effets.

Vérifier dans quelle mesure les réserves en eau des karsts peuvent participer à la satisfaction massive des besoins, passent dans l'immédiat par le développement d'un réseau d'observation pérenne du régime des principales exurgences et la promotion ensuite, là où cela se justifie, des tests de pompages. A ce jour, il n'a été fait qu'un petit pas dans cette voie. La route est tracée.

Le karst. Sa place dans le monde et en Europe

M. BAKALOWICZ

Chargé des programmes de recherches CNRS-BRGM en hydrogéologie karstique,
CNRS, GBE, Université de Montpellier 2, Case 057, F-34095 Montpellier CEDEX 5
BRGM, Direction de la Recherche, 1039 rue de Pinville, F-34000 Montpellier

Les formations carbonatées susceptibles d'être karstifiées couvrent des étendues importantes à l'échelle des continents (fig. 1) : 40 millions de km², soit environ 10 % des surfaces émergées; elles sont souvent présentes aussi sous des recouvrements plus ou moins importants. Elles constituent des aquifères qui sont souvent la seule ressource en eau exploitable, au point que quelques grandes civilisations antiques, comme les Grecs, les Mayas ou les Chinois se sont développées autour de sources karstiques en les exploitant. Mais le karst offre aussi d'autres ressources économiquement intéressantes : des paysages souterrains et de surface attirant parfois un grand nombre de visiteurs, des ressources minérales et pétrolières dans des paléokarsts. Ici, les ressources en eau du karst seront prises en considération.

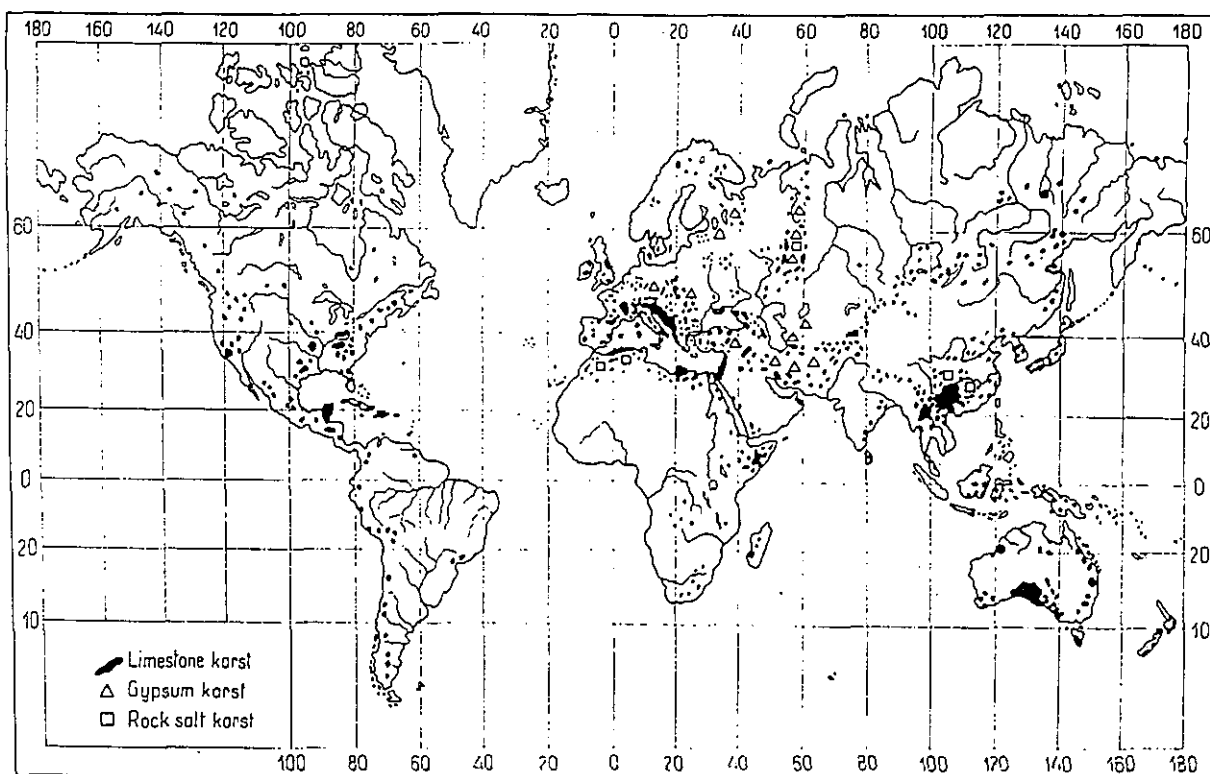


Figure 1. Distribution à l'échelle mondiale des régions karstiques (d'après Balazs, 1962).

Les principales régions karstiques du monde sont : l'Extrême-Orient, avec la Chine (1,2 million de km²) et l'ensemble carbonaté de Chine du sud, du nord du Vietnam et de Thaïlande (près de 2 million de km² d'un seul tenant), l'Amérique du Nord (Etats-Unis, 1,4 millions de km², soit 15 % du territoire) et centrale (la ceinture carbonatée du golfe du Mexique, 500 000 km²), l'Europe (3 millions de km², soit 35%) dont la ceinture carbonatée méditerranéenne (fig. 2).

En Europe, sous l'égide de l'Union Européenne, un groupe de travail, l'Action COST 65 « Protection des ressources en eau des régions karstiques », regroupant 16 pays, a dressé un état des connaissances, des démarches mises en oeuvre, des réalisations et de la réglementation en matière de gestion des eaux souterraines dans le karst. Une enquête sommaire, réalisée dans ce cadre (tabl. 1), montre que le karst satisfait, selon les pays, de 5 à 50 % des besoins en eau potable, et parfois la totalité des eaux souterraines exploitées dans ce but. En Europe, les adductions d'eau potable de villes comme Vienne, Rome, Neuchâtel, Rijeka, Innsbruck, Malaga, sont en totalité alimentées par des aquifères karstiques. Autour de la Méditerranée, quelques grandes villes, Damas, Beyrouth, Antalya, puisent aussi leur eaux dans des aquifères karstiques.

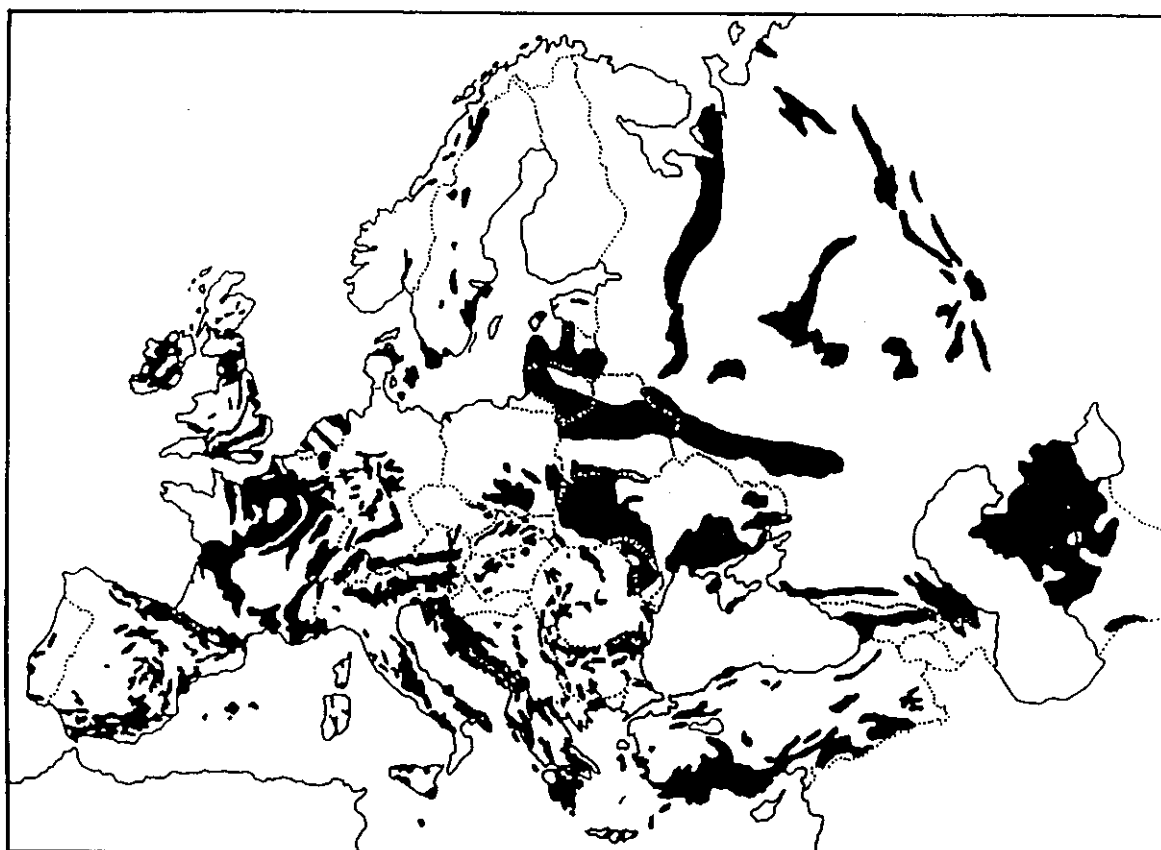


Figure 2. Distribution en Europe des formations carbonatées susceptibles d'être karstifiées (Action COST 65, 1995).

Dans la plupart des cas, les sources karstiques sont exploitées uniquement à leur plus faible débit, sans aucune surexploitation saisonnière, selon une économie traditionnelle de type « cueillette », sans véritable gestion des ressources. Partout, les eaux de surface et les autres eaux souterraines ont été préférées aux ressources en eau des karsts, parce que les aquifères karstiques sont traditionnellement considérés comme des aquifères complexes, imprévisibles et particulièrement sensibles aux pollutions. Pourtant, les eaux souterraines des régions karstiques sont souvent de bonne qualité, représentent une importante ressource et sont une excellente alternative aux autres ressources en eau.

Ses caractères particuliers imposent que le karst et les aquifères qu'il renferme soient étudiés par des méthodes qui leur soient appropriées, mises en oeuvre par des spécialistes des problèmes qu'il pose, comme c'est le cas pour l'étude et la gestion des eaux de surface ou celles souterraines en milieux poreux et fissurés. Seule cette démarche devrait limiter les échecs dans l'exploration comme dans l'exploitation, la gestion et la protection des ressources en eau du karst. Enfin, comme l'a conclu le groupe constituant l'Action COST 65, il devrait être mise en place une réglementation prenant en compte les caractères propres au karst, dans le but de protéger et de gérer les ressources en eau souterraine.

Country	total area km ²	carbonate outcrops km ² (%)	percent of groundwater in total water supply	percent of karst water in total water supply
Albania	28,748	4,300 appr. (15)		
Austria	83,856	19,900 (23.7)	98	50
Belgium	30,513	4,400 (14)	90	31 (46)
Belorussia	207,600	115,400 (55.6)		
Bulgaria	110,912	25,000 (22.5)		
Croatia	56,538	22,600 (40)	90	36
Czekia	78,970	8,000 appr. (10)		
Denmark	43,070	6,500 appr. (15)	35	
Estonia	45,100	30,000 (67)	80	16
Finland	337,030	3,500 appr. (1)		
France	547,026	180,000 (33)	45	25
Germany	356,910	23,000 (6.5)	70	6.3
Greece	131,944	60,000 (45)		
Hungary	93,030	1,350 (1.45)	10	2.8
Iceland	102,845	0 (0)		
Ireland	70,282	32,000 (45)	25	5
Italy	301,230	43,000 (14.2)	?	23 of g.w.
Lettonia	64,589	55,700 (87.4)		
Latvia	65,200	52,000 (80)		
Luxemburg	2,586	30 appr.(90)		
Malta	320	300 appr.(90)		
Moldavia	33,700	30,300 (89.9)		
Netherlands	41,500	50 appr.(0.1)		
Norway	324,219	4,800 (1.5)		
Poland	312,680	30,800 (9.8)	14.3	4.0
Portugal	92,082	2,100 (2.3)	60.0	10.0
Romania	237,499	4,400 (1.8)	13.0	2.0
Russia (Europe)	3,956,000	1,400,000 (75)		
Serbia, Bosnia, Macedonia	179,000	27,000 (15)		
Slovakia	48,900	3,082 (6.3)	85.0	27.0
Slovenia	20,251	8,780 (43)	90.0	50.0
Spain	504,750	112,650 (22.3)	25.0	12.5
Sweden	449,964	3,000 (0.7)		
Switzerland	41,290	8,000 (20)	80.0	15.0
Turkey	780,776	260,000 (33)	6.0	1.5
Ukraine	603,700	373,800 (62.5)		
United Kingdom	244,820	32,900 (22)	30.0	20.0
TOTAL	10,606,782	3,050,000 appr.(29)		

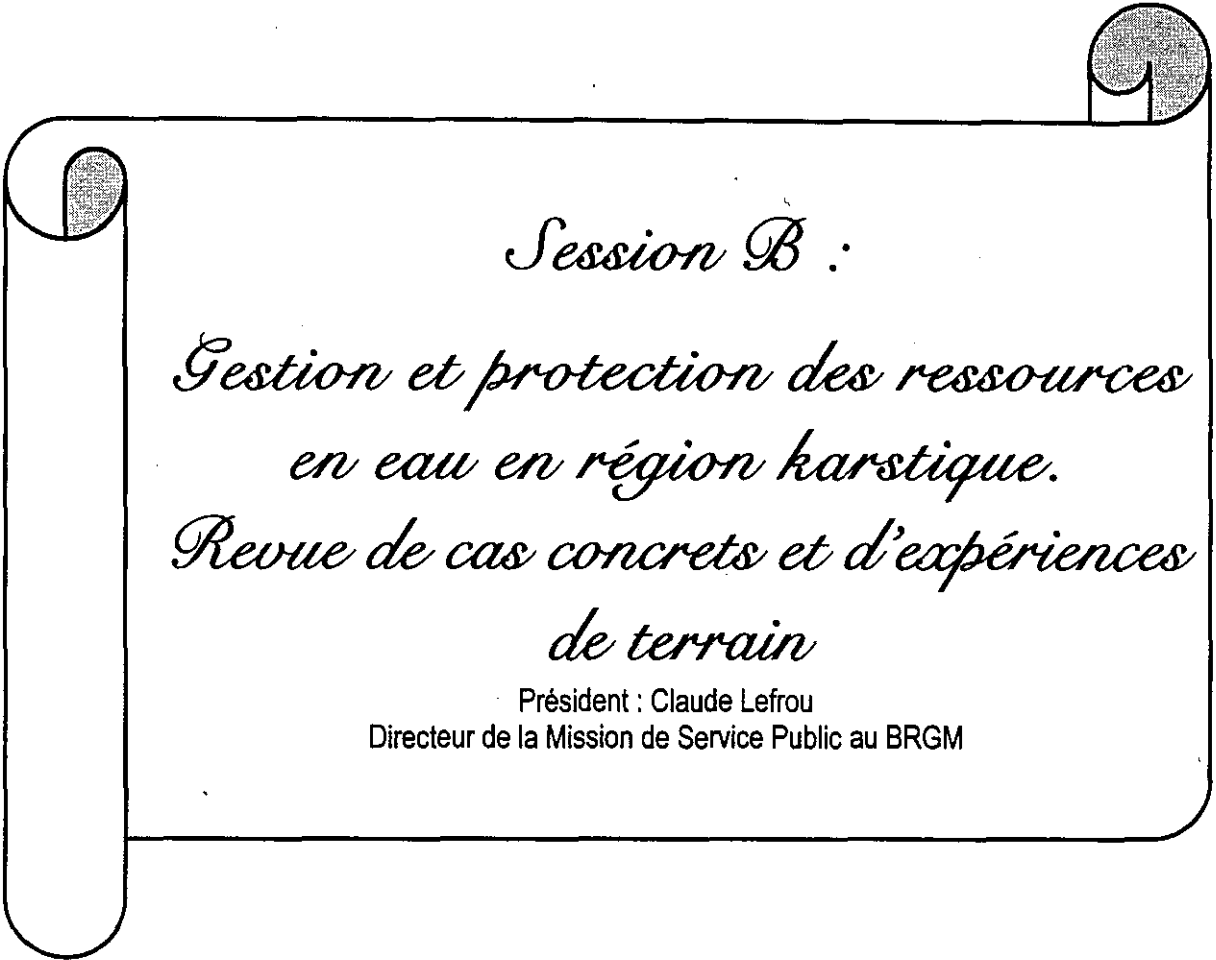
Tableau 1. L'origine de l'eau d'alimentation en Europe, d'après Action COST 65.

Quelques grands chantiers nationaux en cours de réalisation concernent de grands ensembles karstiques et leurs aquifères : les autoroutes A 20, traversant les causses du Quercy, et A 75, traversant les Grands Causses, la liaison fluviale Rhin - Saône, traversant la Franche-Comté par la vallée du Doubs, les tracés du TGV en Provence et en Languedoc-Roussillon. Ces chantiers, comme tous les autres plus modestes, dont le séminaire présentera certains exemples, doivent être l'objet d'attentions particulières, conformes aux spécificités des karsts.

Références.

Balazs, D. (1962). Beiträge zur Speläologie des südchinesischen Karstgebietes. Karszt-és barlang-kutatas, 2, p.3-82.

COST Action 65 (1995). Karst groundwater protection. Final Report, EUR 16547 EN, 446 p.

A decorative scroll frame with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both with rounded ends and a shaded interior. The text is centered within the horizontal strip.

Session B :

*Gestion et protection des ressources
en eau en région karstique.*

*Revue de cas concrets et d'expériences
de terrain*

Président : Claude Lefrou
Directeur de la Mission de Service Public au BRGM

Le karst de Gervanne (Drôme). Evaluation et mobilisation de la ressource en eau.

Ph. CROCHET (1)

(1) ANTEA Groupe BRGM - Directeur agence Languedoc Roussillon
Parc Club du Millénaire Bât. 19 - 1025 rue Henri Becquerel - 34036 Montpellier Cedex 1

Résumé

Le département de la Drôme est touché depuis quelques années par un contexte de pénurie en eau. Face à cette situation, le Conseil Général de la Drôme, représenté par le SMARD (Syndicat Mixte d'Aménagement Rural de la Drôme), le Ministère de l'Environnement et l'Agence de Bassin Rhône Méditerranée Corse ont confié au BRGM une étude dont l'objectif est d'évaluer la ressource de quatre systèmes karstiques de la Drôme (Haute-Gervanne, Archiane, Saou et les aquifères carbonatés profonds de la moyenne vallée de la Drôme).

La première phase d'étude avait pour objectif de *caractériser* chacun de ces aquifères. Outre l'approche "traditionnelle" visant à définir la géométrie du réservoir, cette phase s'est appuyée sur certaines méthodes analytiques spécifiques aux aquifères karstiques basées sur l'analyse du fonctionnement des systèmes (étude des débits classés, courbes de récession, analyses corrélatoires et spectrales).

Il est apparu que le système de la Gervanne présentait des indices favorables à une exploitation, en raison d'une part de l'existence d'un axe de drainage karstique "fonctionnel" (constituant une structure favorable à une zone noyée en amont de la source), d'autre part de l'inertie du système (traduisant la présence de réserves).

C'est dans ce contexte qu'une deuxième phase de *démonstration* comprenant des reconnaissances complémentaires a été engagée pour confirmer la présence d'une zone noyée et mieux apprécier les caractéristiques hydrauliques de cet aquifère. Cette phase a débuté par la réalisation d'un sondage de reconnaissance en amont immédiat de la source des Fontaigneux. Ce forage a recoupé en profondeur un axe de drainage important confirmé par deux traçages.

Les pompages d'essai réalisés mettent en évidence qu'il est possible de mobiliser à partir du forage un débit significatif provenant des réserves. Il apparaît donc possible d'exploiter cet aquifère karstique à un débit important en période d'étiage.

Au delà des résultats obtenus, cette étude constitue avant tout un exemple représentatif d'une démarche spécifique appliquée au karst basée sur une analyse de son fonctionnement (phase préalable de caractérisation) pour en tirer des conclusions sur sa structure et définir ainsi l'aménagement le mieux adapté à son exploitation.

1. Contexte de l'étude

La rivière Drôme connaît depuis plusieurs années des étiages sévères, liés aux caractéristiques de son bassin, qui sont accentués par des prélèvements agricoles importants pouvant dépasser certaines années les capacités de la ressource. Il en a résulté, en 1989 et 1990, un tarissement de la rivière dans sa partie aval, préjudiciable aux différents usages de l'eau.

Compte tenu de ce contexte de pénurie en eau, il s'est avéré nécessaire d'étudier la faisabilité d'un soutien des étiages. Un recours plus large aux eaux souterraines a été envisagé compte tenu de la moindre sensibilité des nappes aquifères aux variations climatiques, avantage auquel s'ajoutent une moindre vulnérabilité aux pollutions et une disponibilité à proximité des lieux d'utilisation.

Or, il existe dans le bassin de la rivière Drôme des aquifères peu exploités et encore peu connus, pouvant répondre au problème posé. C'est le cas de plusieurs systèmes karstiques du Sud-Vercors et du Diois qui sont susceptibles de renfermer des ressources en eau importantes.

Compte tenu de ces potentialités, le Conseil général de la Drôme, représenté par le SMARD (Syndicat Mixte d'Aménagement Rural de la Drôme), le Ministère de l'Environnement et l'Agence de Bassin Rhône Méditerranée Corse ont confié au BRGM, puis à ANTEA, une étude dont l'objectif est d'évaluer la ressource de quatre systèmes karstiques de la Drôme (Haute Gervanne, Archiane, Saou et les aquifères carbonatés profonds de la moyenne vallée de la Drôme).

Les objectifs étaient les suivants :

- améliorer la connaissance hydrogéologique de ces différents aquifères karstiques ;
- caractériser leur comportement ;
- identifier celui (ou ceux) présentant une configuration favorable à une exploitation ;
- préciser le fonctionnement des éventuelles zones noyées ;
- proposer un type d'aménagement en adéquation avec la structure du système.

Cette note présente les reconnaissances et études effectuées sur le système de la Gervanne.

2. Présentation du système karstique de Gervanne

2.1. Situation géographique

Le bassin versant de la Gervanne est situé à l'extrémité Sud-Ouest du massif du Vercors, dans le Diois nord-occidental, à une vingtaine de kilomètres à l'Est de Die. Cette rivière prend naissance dans le vallon de l'Omblèze, au pied des plateaux calcaires du Vercors, et chemine sur 25 km vers le SSW, pour se jeter dans la Drôme à Blacons.

2.2. Cadre hydrogéologique

Le bassin versant de la Gervanne occupe une vaste structure synclinale Nord-Sud encadrée d'une part par les anticlinaux de Die et de l'Omblèze à l'Est, d'autre part par l'anticlinal des Monts du Matin (cf. figure 1). Le centre du synclinorium est principalement constitué par les formations calcaires et marno-calcaires du Barrémo-Bédoulien. Cet ensemble, épais de 200 à 400 m, repose partout sur une importante série marneuse d'âge néocomien.

La source des Fontaigneux, située au Sud de Beaufort, constitue l'exutoire principal du système karstique de la Gervanne. Sa localisation peut s'expliquer par la concordance de plusieurs paramètres géologiques :

- elle se situe dans une zone de transition entre la série très carbonatée qui se développe vers le Nord et la série plus marneuse, donc moins perméable, qui s'étend vers le Sud ;
- la région de Beaufort correspond à une cuvette tectonique à l'intersection entre deux ondulations synclinales N-S et E-W qui favorisent la concentration des écoulements ;
- la faille de Boussonelle provoque le contact entre les formations barrémiennes et alboaptiennes marneuses.

Cette source est pérenne avec un débit moyen de 900 l/s. Son débit d'étiage moyen est d'environ 270 l/s (débit minimal sur la période 1970-1990 : 160 l/s en décembre 1985).

Les principaux phénomènes karstiques du système de la Gervanne sont situés dans la partie aval du bassin versant et constituent des exutoires temporaires fonctionnant en trop-plein lors des crues. Le principal d'entre eux est la Bourne, située 860 m en amont de la source des Fontaigneux. Cette galerie a été reconnue en plongée sur plus de 2 km. Son débit peut atteindre plus de 2 m³/s.

Un kilomètre à l'amont de l'exutoire, la Gervanne se perd en partie. Ces pertes sont suffisamment importantes pour capturer entièrement le cours d'eau à l'étiage.

Plusieurs colorations et traçages, effectués par le passé, ont mis en évidence deux axes de circulation :

- Bourne → sources des Fontaigneux,
- pertes de la Gervanne → Bourne et sources des Fontaigneux.

La superficie de l'impluvium du système karstique, déterminée à partir des limites géologiques et du bassin versant de surface, est estimée à 200 km². Cette valeur est cohérente avec les volumes annuels écoulés aux Fontaigneux (28 000 000 m³) et à la Gervanne (31 000 000 m³).

2.3. Stations de mesure

La zone étudiée comprend une station météorologique située à Beaufort-sur-Gervanne, correspondant à la partie la moins élevée (400 m) du système, le plateau supérieur étant à une altitude de 1000 m.

La moyenne inter-annuelle des précipitations pour la période 1971-1990 est de 820 mm. Le maximum des précipitations est à l'automne et le minimum en juillet. Il faut noter le caractère orageux des précipitations de juillet et août.

Du point de vue hydrométrique, le bassin de la Gervanne comprend :

- deux stations de jaugeage sur la Gervanne (Plan-de-Baix et Beaufort) ;
- une station sur la source des Fontaigneux.

La chronique des débits aux Fontaigneux comporte de nombreuses lacunes à partir de 1976. En conséquence, seuls les cycles 1970 à 1975 ont été utilisés pour les différentes analyses statistiques nécessitant des chroniques complètes (analyses corrélatoire et spectrale - débits classés).

3. Caractérisation du système

La phase de caractérisation constitue une étape préliminaire dont le but est d'étudier le fonctionnement d'un système karstique afin d'en tirer des conclusions sur sa structure. Elle s'appuie sur différentes méthodes dont certaines sont spécifiques à l'hydrogéologie karstique :

- analyse des débits classés (fonctionnement de l'exutoire),
- analyse des courbes de récession (classification du système et évaluation du volume dynamique),
- analyse spectrale et corrélatoire afin de déterminer l'importance des fonctions transmissives (drainage) et capacitives (réserves) au travers de l'inertie du système.

3.1. Analyse des débits classés

Ce type d'analyse, couramment utilisé dans le domaine de l'hydrologie de surface à des fins de prévision des régimes des cours d'eau. Elle repose sur un classement et une représentation des débits journaliers sous la forme d'une courbe de distribution des fréquences : celle-ci fournit les valeurs de débits Q atteintes ou dépassées pour un nombre de jours (ou pourcentage du temps total d'observation). Divers paramètres sont ensuite calculés à partir de cette représentation. L'ajustement de lois statistiques (Galton, Gauss) permet de "réduire" cette courbe à une expression analytique.

Dans le cas de l'étude des aquifères karstiques, l'approche est de type descriptive : le but est de comprendre le comportement du système et non de faire des prévisions basées sur des lois probabilistes.

L'analyse a été réalisée sur six cycles hydrologiques concomitants (de 1970 à 1975) en adoptant des classes de débits de 50 l/s (cf. figure 2). L'ajustement obtenu, de type arithmétique, est caractéristique d'une infiltration lente.

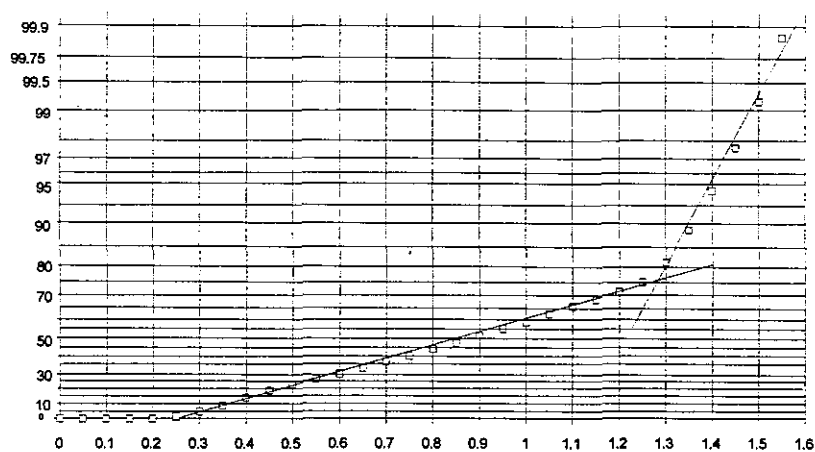


Figure 2. - Analyse des débits classés (classes de $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$)

La rupture de pente à $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la droite représentative est a priori due au rôle du trop-plein de la Bourne (aucun jaugeage ne permettant actuellement de connaître précisément les valeurs de débit des Fontaigneux pour lesquelles la Bourne entre en fonctionnement).

3.2. Traitement par moyennes mobiles

La chronique issue du filtrage des précipitations (figure 3) met nettement en évidence le caractère déficitaire des cycles 1970, 1973 et 1974, alors que les cycles 1971, 1972 et 1975 sont excédentaires.

La chronique filtrée des débits a une structure très modulée. Les cycles déficitaires et excédentaires sont peu marqués. On remarque que les débits du cycle 1973 sont peu affectés par la déficience des précipitations sur ce cycle. La diminution des débits ne se fait sentir qu'au cours du cycle 1974.

Ces éléments montrent que le système a un comportement régulateur important à l'échelle pluri-annuelle.

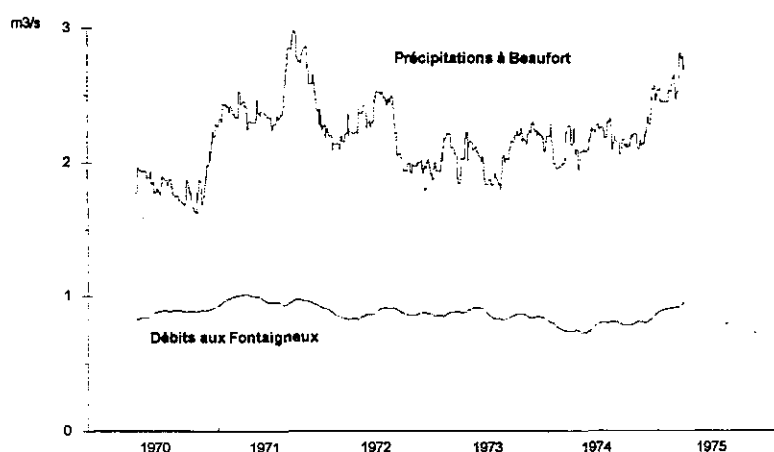


Figure 3 - Moyennes mobiles annuelles sur les chroniques de pluie à Beaufort et de débit aux Fontaigneux

3.3. Analyse des courbes de récession.

Ce type d'analyse, couramment utilisé dans le domaine de l'hydrologie de surface à des fins de prévision des régimes des cours d'eau, consiste à étudier la partie décroissante de l'hydrogramme (la récession).

La méthode repose sur une représentation conceptuelle de l'aquifère. Celui-ci est assimilé à un réservoir qui se vidange au travers d'un bouchon poreux. Dans le cas d'aquifères karstiques, ce modèle a été amélioré par MANGIN (1970) pour prendre en compte l'écoulement lié à l'infiltration dans la zone non saturée du karst. Cet écoulement est représenté par un second réservoir qui alimente le premier avec un débit d'infiltration (q_i).

Deux parties sont distinguées dans les courbes de récession :

- la *décru*, durant laquelle l'infiltration (q_i) influence la vidange du réservoir,
- le *tarissement*, qui débute à l'instant où le débit d'infiltration (q_i) devient nul, la vidange du réservoir principal obéissant alors uniquement à la loi de Maillet.

L'étude des récessions permet donc de caractériser le système à l'aide de différents paramètres que l'on rapproche d'une part du fonctionnement de la zone d'infiltration (ε et η'), et d'autre part de l'écoulement dans la zone noyée (α).

De plus, elle permet le calcul du volume dynamique qui est le volume du karst noyé participant à l'écoulement et entraînant des variations de débits à l'exutoire (volume souterrain emmagasiné dans l'aquifère qui se vidange au cours de la phase de tarissement). Il s'agit par conséquent d'une estimation minimale du volume d'eau contenu dans la zone noyée.

L'écrtage des crues à la source des Fontaigneux par le trop-plein de la Bourne entraîne une incertitude dans la détermination des paramètres de la décrue préjudiciable à l'étude de la fonction d'infiltration. Par contre, les paramètres calculés sur la partie correspondant au tarissement (en particulier le volume dynamique) ne sont pas entachés par cette erreur.

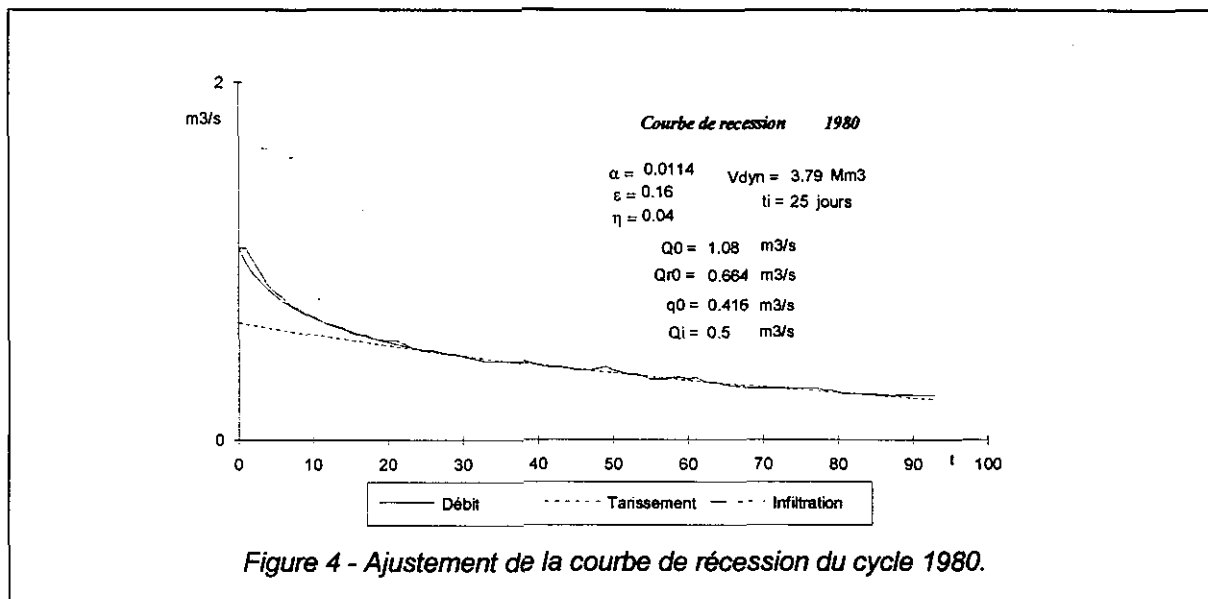
Treize courbes de récessions ont été retenues sur la période 1970-1990, parmi lesquelles sept ont une durée inférieure à 120 jours, les autres s'étendant jusqu'à 205 jours (1985). Un exemple d'ajustement est reporté à la figure 4.

Les paramètres d'ajustement déterminés (cf tableau 1) sont dispersés. Les valeurs de volume dynamique varient de 3 à 8 millions de m^3 .

Paramètres	Minimum	Moyenne	Maximum
Coefficient de tarissement	0.0031	0.0058	0.0078
Volume dynamique	$3.2 \cdot 10^6 m^3$	$4.9 \cdot 10^6 m^3$	$8.6 \cdot 10^6 m^3$
Coefficient d'hétérogénéité d'écoulement	0.04	0.05	0.19
Coefficient d'infiltration	0.009	0.0109	0.233
Tableau 1 – Paramètres statistiques de l'ajustement des courbes de récession			

Les valeurs de volume dynamique sont l'indice de la présence de réserves importantes.

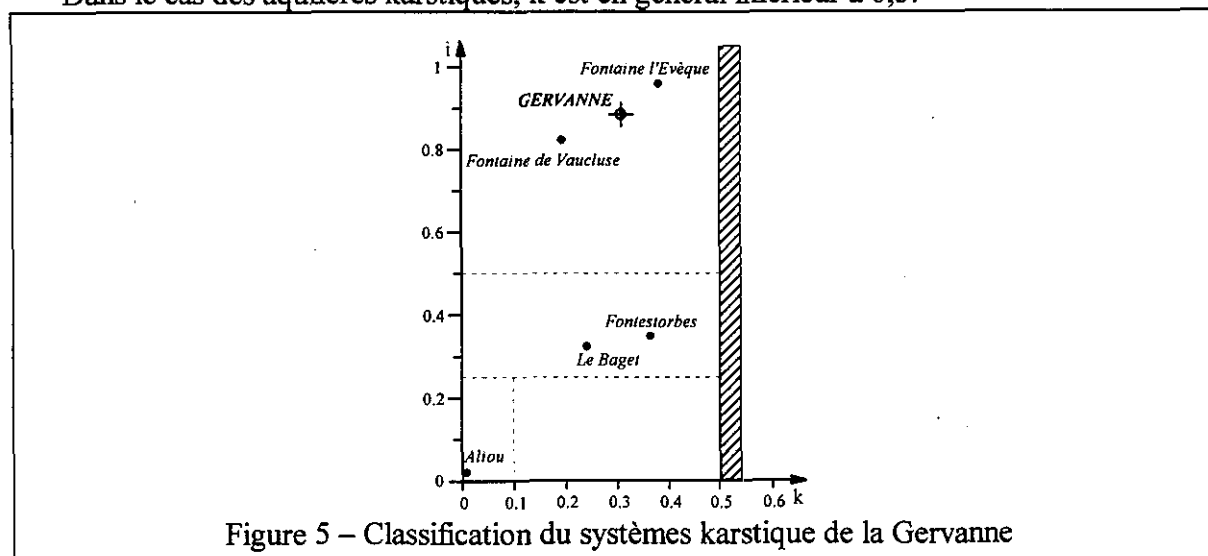
Il apparaît que la zone noyée est en régime influencé durant une grande période, ce qui est a priori dû aux pertes importantes de la Gervanne à l'amont des Fontaigneux.



3.4. Classification du système

Cette classification, s'appuie sur la calcul de deux coefficients obtenus à partir des paramètres des courbes de récession :

- i** : ce coefficient , compris entre 0 et 1, caractérise les retards à l'infiltration. Une forte valeur traduit une infiltration lente ou complexe contribuant à une meilleure régulation de l'écoulement, alors qu'à l'inverse une faible valeur est le signe d'un transit rapide des eaux vers la zone noyée
- k** : ce paramètre est égal au rapport entre le volume dynamique maximum obtenu sur une grande période et le volume de transit inter-annuel sur la même période. Il traduit l'aptitude de la zone noyée du karst à stocker les précipitations et les restituer progressivement dans le temps. Plus le pouvoir régulateur de l'aquifère est élevé, plus ce rapport tend vers 1. Dans le cas des aquifères karstiques, k est en général inférieur à 0,5.



Les valeurs obtenues sont de 0.31 pour k et 0.89 pour i . D'après la classification de Mangin (cf. figure 5), le système de Gervanne fait partie des systèmes complexes qui possèdent un fort pouvoir régulateur et des retards à l'alimentation importants, traduisant la présence de réserves (comme la Fontaine de Vaucluse et Fontaine l'Evêque).

3.5. Analyses corrélatoires et spectrales

Les analyses corrélatoires et spectrales s'inscrivent dans le cadre de l'approche systémique du karst. L'aquifère karstique est assimilé à un système de type boîte noire dont la pluie et le débit à l'exutoire représentent respectivement l'entrée et la sortie du système. Les traitements portent sur des chroniques de pluie et le débit au pas journalier. Deux types d'analyse sont employés :

- *l'analyse simple* permet d'identifier les composantes d'une chronique à partir de deux "outils" :
 - le *corrélogramme* qui traduit la dépendance dans le temps des événements affectant la chronique, selon des intervalles de temps de plus en plus grands. Cet effet mémoire traduit l'inertie de l'aquifère et la présence de réserves ;
 - le *spectre de densité de variance* qui permet l'identification des événements périodiques par la détermination de leur fréquence. Dans le cas d'une chronique de débit, il fournit le temps de régulation qui représente la durée de l'influence d'événements pluvieux sur le système, ainsi que la mesure de la fréquence de coupures qui est la durée minimale que doit avoir une pluie pour influencer sur le système.
- *l'analyse croisée* permet l'étude de la relation pluie-débit et fournit une bonne image de la réponse impulsionnelle du système par le corrélogramme croisé. Celui-ci est précisé par quatre fonctions dans le domaine fréquentiel :
 - fonction d'amplitude (plage de fréquence pour laquelle la relation s'établit),
 - fonction de phase (déphasage entre l'entrée et la sortie),
 - fonction de gain (atténuation ou amplification des précipitations par le système)
 - la fonction de cohérence (traduisant la linéarité du système)
- *Analyse globale à long terme de la chronique de débits*

Sur la période d'étude (1970 à 1975), le corrélogramme simple et le spectre (cf. figures 6 et 7) révèlent une périodicité bien marquée à 365 jours, soulignant le rôle régulateur du système. Le spectre présente un pic de faible ampleur à 100 jours, attribuable à la neige dont le rôle apparaît limité vis-à-vis de la dynamique du système.

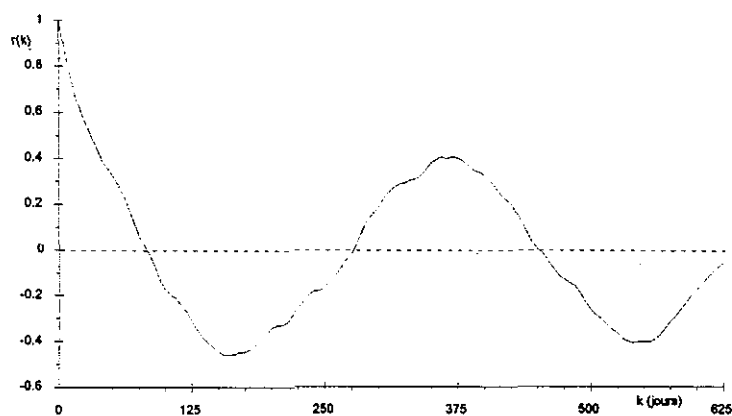


Figure 6 - Corrélogramme des débits à long terme

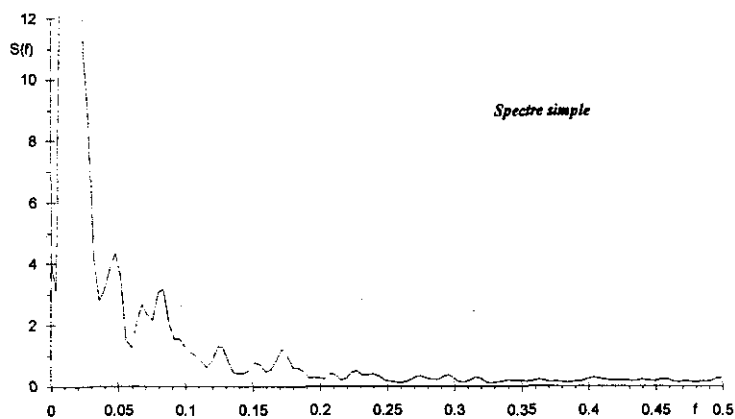


Figure 7 - Spectre des débits à long terme

- **Analyse simple à court terme de la chronique de débit.**

Le corrélogramme des débits (cf. figure 8) présente une décroissance très lente et un effet mémoire important (64 jours). Le spectre (cf. figure 9) montre un fort effet filtre du système (fréquence de coupure = 0.11), alors que le temps de régulation atteint la valeur de 63 jours. L'ensemble de ces paramètres est représentatif d'un comportement très inertiel.

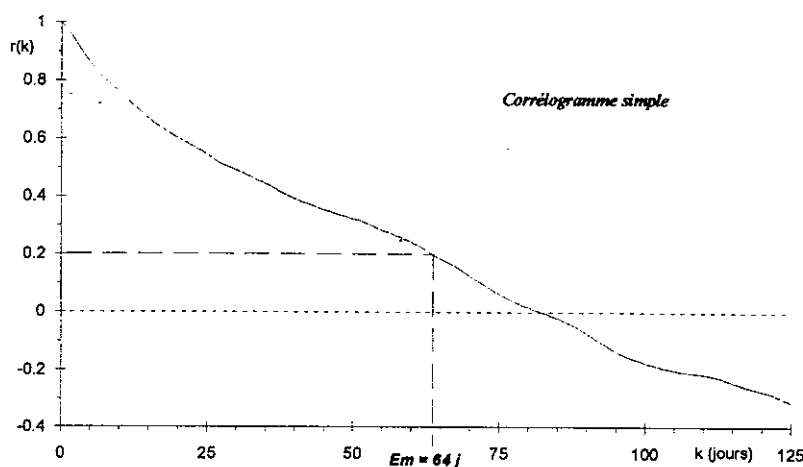


Figure 8 - Corrélogramme simple des débits (période 1970-1975)

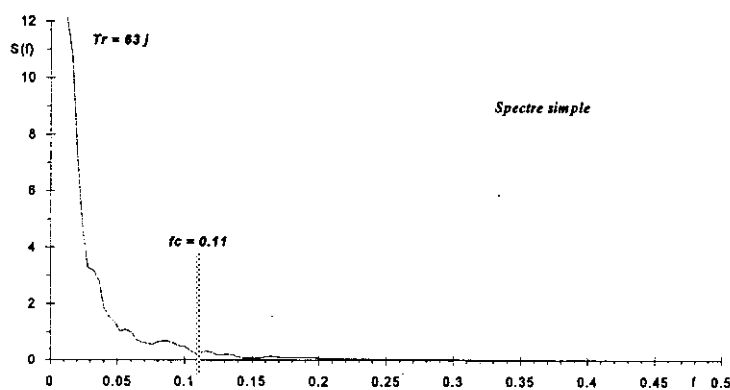


Figure 9 - spectre simple des débits (période 1970-1975)

- **Analyse croisée pluie-débits à court terme**

Le corrélogramme croisé (figure 10) est constitué d'une réponse bien individualisée. La montée rapide est significative d'un comportement en charge de la zone noyée. La décroissance lente représente l'effet d'inertie du système.

La réponse impulsionnelle fournie par ce corrélogramme croisé ne possède pas de pic caractéristique d'un comportement de système karstique évolué et bien drainé. Ce résultat doit cependant être considéré comme représentatif uniquement de la source des Fontaineux et non de l'ensemble du système. Le transit rapide, signe d'un comportement karstique pourrait en effet être assuré dans le cas présent par les écoulements du trop-plein de la Bourne.

Plusieurs observations peuvent être faites sur les autres figures :

- la fonction d'amplitude (cf. figure 11) montre que la relation s'établit principalement à long terme, les événements pluvieux de courte durée influençant peu le système ;
- le déphasage calculé pour la fréquence de coupure ($f_c = 0,11$) est inférieur à la journée (0.8 jour), ce qui signifie que la montée de crue s'effectue sur des durées très courtes. Ceci corrobore l'hypothèse l'écoulement en charge au voisinage de l'exutoire ;

- la fonction de cohérence (cf. figure 12) a une valeur faible mais relativement stable. A une forte pluie correspond une forte mise en réserve. En outre, la stabilité relative est imputable au rôle de la Bourne, qui entre en fonctionnement pour des valeurs de débit à l'exutoire relativement constantes.

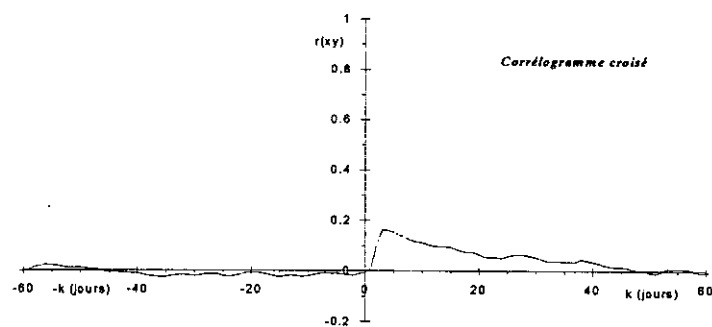


Figure 10 - Corrélogramme croisé pluie-débit (période 1970-1975)

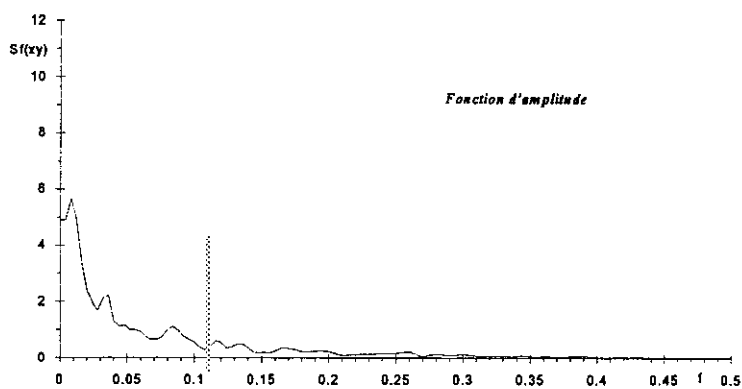


Figure 11 - Fonction d'amplitude (période 1970-1975)

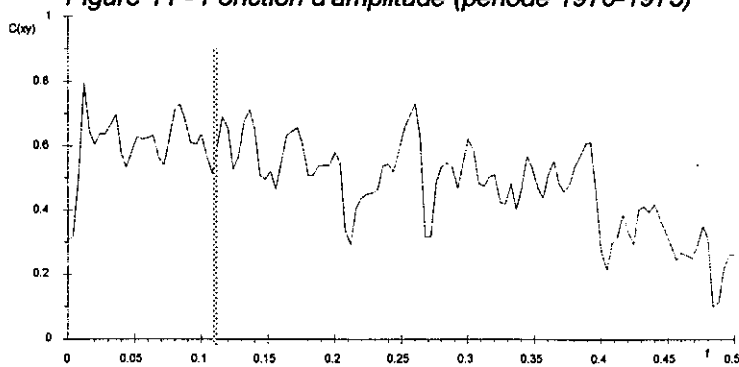


Figure 12 - Fonction de cohérence de la période 1970-1975.

3.6. Conclusions de la phase de caractérisation

A l'issue de cette phase de caractérisation, le système de Gervanne apparaît intéressant d'un point de vue hydrogéologique car il possède un fort pouvoir régulateur garantissant a priori une ressource durant les périodes d'étiage. Par ailleurs, le volume dynamique, traduisant la présence de réserves, est important (3 à 8 millions de m³).

Les analyses corrélatrice et spectrale révèlent un système de type inertiel, avec une régulation pluri-annuelle. La réponse impulsionnelle est très étalée, de type capacitive et la montée rapide du corrélogramme traduit un écoulement en charge dans la zone noyée.

Tous ces éléments traduisent la présence probable d'une zone noyée en amont immédiat de la source des Fontaigneux, présence cohérente avec la structure et la géométrie du système. Il restait toutefois à préciser le fonctionnement de cette zone noyée, plusieurs hypothèses pouvant être envisagées à ce stade de l'étude pour expliquer le comportement très inertiel et peu transmissif du système :

- zone noyée peu karstifiée se comportant comme un milieu fissuré homogène,
- zone noyée présentant une configuration vaclusienne,
- zone noyée correspondant à une structure bien organisée, mais barrée à l'exutoire.

Compte tenu de ces résultats, il a été décidé d'engager la phase de démonstration de la ressource sur ce système.

4. Démonstration de la ressource

4.1. Réalisation d'un forage de reconnaissance

Compte tenu de l'absence de regard sur le karst noyé et de la configuration de la source de Fontaigneux (vasque sans conduit ne permettant pas de descendre une pompe en profondeur), la phase de démonstration de la ressource sur le système de Gervanne a nécessité la réalisation d'un forage de reconnaissance.

Le risque d'un forage sec, toujours possible dans les aquifères karstiques, a été estimé limité compte tenu des résultats de la phase de caractérisation (forte probabilité d'une zone noyée importante en amont immédiat de l'exutoire présentant une configuration vaclusienne avec des écoulements en charge).

Le forage a été implanté à 230 m au Nord de la source. Il a été réalisé en deux temps :

- avril 1993 : foration au Marteau Fond de Trou jusqu'à 54 m de profondeur. Deux venues d'eau principales, recoupées à 42 et 50 m, ont fournis des débits instantanés importants (de l'ordre de 500 m³/h)
- août 1994 : réalésage au tricône à l'air comprimé jusqu'à 120 m de profondeur. une seule venue d'eau supplémentaire a été rencontrée à 64 m (débit estimé : environ 90 m³/h).

Le niveau statique est à environ 4 m de profondeur par rapport au terrain naturel.

4.2. Traçages

4.2.1. Description des traçages

Deux opérations de traçage ont été effectuées sur le système karstique de Gervanne dans le cadre de l'étude afin d'approfondir la connaissance du fonctionnement de la zone noyée au voisinage de l'exutoire (degré de karstification, appréciation du volume des réserves intéressées par le traçage) :

- ① entre la Bourne et les Fontaigneux (15/06/93),
- ② entre le forage de reconnaissance et les Fontaigneux (21/06/93).

	Bourne Fontaigneux	Forage-Fontaigneux
Masse injectée de fluorescéine	500 g	500 g
Distance linéaire	810 m	235 m
Durée de restitution	480 mn	190 mn
Vitesse maximale	250 m/h	400 m/h
Vitesse modale	190 m/h	265 m/h
Masse restituée	463 g	386 g
Taux de restitution	93 %	77 %
Temps moyen de séjour	292 mn	65 mn
Vitesse apparente	166 m/h	215 m/h
Volume de Allen	12000 m ³	2500 m ³

Tableau 2 - Caractéristiques des traçages.

Dans les deux cas, l'échantillonnage à la source des Fontaigneux a été effectué par un préleveur automatique (pas de temps de 30 mn) et complété par un échantillonnage manuel. Les débits de la source ont été systématiquement contrôlés. Les analyses ont été réalisées avec un spectrofluorimètre à absorption (seuil de détection : $5 \cdot 10^{-5}$ mg/l).

Les courbes de distribution des temps de séjour obtenues pour les deux traçages sont reportées à la figure 13.

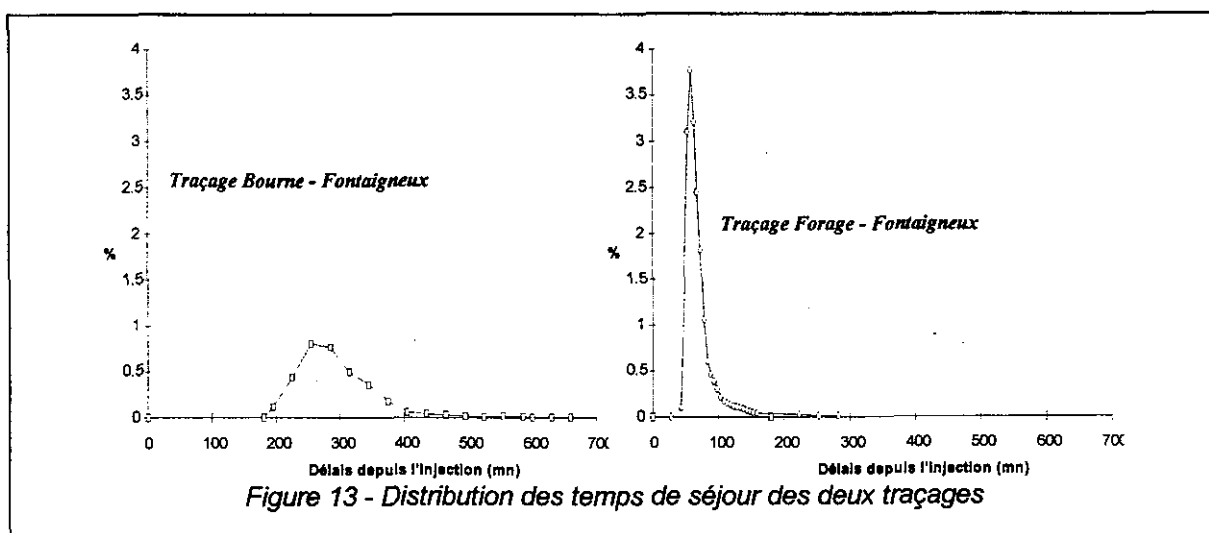


Figure 13 - Distribution des temps de séjour des deux traçages

4.2.2. Traçage Bourne -Fontaigneux

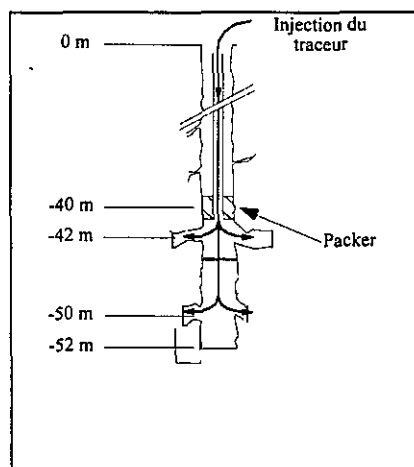
Le traçage entre la Bourne et les Fontaigneux est caractérisé par un excellent taux de restitution (93 %). Il n'y a donc pas de piégeage de traceur dans le système. La valeur élevée obtenue pour la vitesse apparente de transit (165 m/h) traduit une circulation du traceur dans une zone karstifiée, avec des écoulements bien organisés. Par ailleurs, la faible valeur du volume de Allen témoigne d'un parcours dans une zone transmissive plutôt qu'une zone capacitive.

L'ensemble de ces éléments montre de façon indiscutable que le trop plein de la Bourne est en liaison avec l'axe de drainage aboutissant à la source des Fontaigneux. Cependant, l'allure générale de la DTS (pic à base assez étalée suivie d'une légère traîne) prouverait que la connexion ne s'effectue pas directement mais plutôt au travers d'une zone où les écoulements sont légèrement plus lents.

4.2.3. Traçage Forage-Fontaigneux

Le traçage sur le forage a été réalisé avant son réalésage. La méthode retenue a consisté à réaliser une injection quasi instantanée après mise en place d'un packer permettant d'isoler un espace de 10 mètres de hauteur entre la première venue d'eau (42 m) et le fond du forage (52 m).

Dans le cas du traçage réalisé entre le forage de reconnaissance et la source des Fontaigneux, le taux de restitution est plus faible (77%), ce qui peut être dû à une perte de fluorescéine au travers du tubage du forage lors de l'injection. Le signal est toutefois suffisamment marqué pour écarter l'hypothèse d'un piégeage du traceur.



La vitesse apparente de transit (215 m/h) est plus importante qu'entre la Bourne et les Fontaigneux, ce qui confirme que la circulation jusqu'à la source s'effectue dans une zone noyée bien karstifiée, avec une bonne connexion entre le forage et l'axe de drainage. Le faible volume d'eau tracé montre, quant à lui, que le forage n'est pas situé sur une zone latérale de réserves, mais sur le drain ou au voisinage immédiat de celui-ci.

4.2.4. Conclusions

Les deux expériences de traçage effectuées sur le système de Gervanne ont permis de mieux appréhender le fonctionnement de la zone noyée du karst en amont de la source des Fontaigneux. Dans les deux cas, les vitesses de circulation sont importantes et le volume tracé est faible.

Les résultats obtenus permettent d'arriver aux conclusions suivantes :

- le trop-plein de la Bourne est en liaison avec l'axe de drainage ;

- le forage de reconnaissance n'est pas situé sur une zone de réserves annexe mais sur l'axe de drainage ou sur une digitation de celui-ci ;
- la zone noyée située sous la source des Fontaigneux est bien karstifiée, l'organisation du drainage se développant probablement en profondeur sous l'exutoire

En outre, ces résultats laissent supposer que l'exutoire est dû à un barrage tectonique lié à la présence de la faille de Boussonelle. Cette structure du réservoir, corroborée par la nature captive du système, est caractéristique d'une source de type vauclusien avec un axe de drainage en position basse par rapport aux zones de réserves.

4.3. Pompages d'essai

4.3.1. Description des pompages

Deux pompages d'essai ont été réalisés sur le forage de reconnaissance :

- le premier test a eu lieu fin juin 1993 après la réalisation du forage. Il a compris (cf tableau 3):
 - un essai par paliers de débit croissant (20, 40, 60, 80 m³/h) d'une durée d'une heure chacun séparés d'un temps d'arrêt d'une heure entre chaque palier ;
 - un pompage d'une durée de 48h au débit de 80 m³/h

Ce pompage a été effectué après une période pluvieuse importante alors que le système était en fin de décrue. A l'exception du premier essai réalisé au débit de 20 m³/h où une légère turbidité a été constatée, les caractéristiques physico-chimiques des eaux d'exhaure sont restées stables tout au long de l'essai (conductivité : 400 µS/cm ; température : 11.3°C ; pH = 7.3).

Débit de pompage	Durée des pompages	Rabatement au forage	Débit spécifique
20 m ³ /h	1 h	0.02 m	0.27 m ³ /s/m
40 m ³ /h	1 h	0.04 m	0.27 m ³ /s/m
60 m ³ /h	1 h	0.06 m	0.27 m ³ /s/m
80 m ³ /h	1 h	0.11 m	0.20 m ³ /s/m
Tableau 3 - Résultats du pompage d'essai par paliers			

- le deuxième test a eu lieu fin septembre 1995 en situation d'étiage : il a consisté en un pompage de 10 jours à fort débit (370 m³/h) destiné à créer une différence de charge suffisante entre le drain et les réserves pour solliciter celles-ci de façon significative, l'objectif étant de préciser la connexion entre le drain sur lequel se trouve le forage et les réserves. Le rabattement a été de 0,22 m, ce qui représente un débit spécifique de 0.46 m³/s/m.

4.3.2. Interprétation des pompages

Le niveau dynamique se stabilise immédiatement dès le début du pompage avec un rabattement très faible. Ensuite, les seules variations observées sont liées à la décrue naturelle du système ou à l'influence de précipitations. Ce comportement confirme que le forage est en connexion directe avec le drain qui se comporte comme une conduite en charge.

Le pompage entraîne une diminution immédiate et brutale du débit de la source des Fontaineux. Le débit manquant à la source est largement inférieur au débit prélevé au forage, ce qui traduit la libération d'une certaine quantité d'eau provenant des réserves.

A l'arrêt des pompages, le retour à l'équilibre s'effectue de façon quasi instantanée dans le forage et à la source des Fontaineux qui retrouve un débit naturel normal. Les prélèvements effectués n'ont donc pas perturbé le système, ce qui signifie que la mobilisation des réserves n'a pas entraîné une baisse notable de celles-ci.

- volume qui se serait écoulé naturellement à la source ($Q = 300$ l/s) : $V_n = 259\,200\text{ m}^3$
- volume pompé au forage ($Q = 103$ l/s) : $V_p = 88\,990\text{ m}^3$
- volume réellement écoulé à la source pendant le pompage ($Q = 240$ l/s) : $V_s = 207\,370\text{ m}^3$
- volume total sorti du système ($V_p + V_s$) : $V_t = 296\,360\text{ m}^3$
- volume provenant de la réserve : $V_r = 37\,160\text{ m}^3$

Le pompage a permis de prélever un volume d'environ $37\,000\text{ m}^3$ sur la réserve sans entraîner de diminution notable de son stock ni de variation significative du régime de la source des Fontaineux à l'issue du pompage.

Le coefficient R_p , ou rendement, permet de traduire la capacité de l'aquifère à libérer ses réserves. il est calculé à partir du débit manquant à l'exutoire par rapport au débit prélevé. Son expression est la suivante :

$$R_p = \frac{Q_p - \Delta Q_s}{Q_p} \text{ avec : } \begin{array}{l} \Delta Q_s = \text{débit manquant à l'exutoire} \\ Q_p = \text{débit de pompage} \end{array}$$

Les rendements obtenus sur les deux essais pompages sont récapitulés dans le tableau ci-après :

	Débit naturel de la source	Débit de pompage	Rabattement au forage	Diminution débit source	Rendement (R_p)
Juin 1993	520 l/s	22 l/s	0.11 m	14 l/s	36 %
Septembre 1995	300 l/s	103 l/s	0.22 m	68 l/s	34%

Tableau 4 - Calcul du rendement pour les deux pompages

La faible valeur obtenue peut être due à des pertes de charge entre le drain et le(s) système(s) annexe(s). La mobilité des réserves apparaît donc relativement limitée, mais leur importance garantit a priori une pérennité d'exploitation répondant à l'objectif fixé. En d'autres termes, le fait que le forage soit implanté sur l'axe de drainage permet de solliciter les réserves de façon globale, mais uniquement de façon indirecte avec une certaine inertie.

Ce résultat prouve qu'il n'est pas nécessaire de pomper à un débit supérieur au débit de la source pour pouvoir mobiliser les réserves du système de Gervanne, ce qui offre une certaine marge de manoeuvre pour "surexploiter" temporairement l'aquifère sans tarir la source.

5. Conclusion

Cette étude constitue un exemple d'approche des aquifères karstiques prenant en compte leur diversité. Le principe adopté est que la structure interne du magasin ne peut être connue a priori et qu'il est nécessaire de l'aborder au travers d'une stratégie d'étude en plusieurs phases.

La première phase de *caractérisation* a pour objectif d'appréhender le fonctionnement global du système à partir de l'analyse des débits de l'exutoire, sans mettre en oeuvre immédiatement des moyens de reconnaissance importants et parfois risqués tels que les forages. Cette démarche permet de sélectionner les aquifères présentant caractéristiques favorables. La phase de *démonstration* est alors adaptée en fonction des résultats obtenus.

Dans le cas présent, la réalisation d'un forage a été décidée après avoir mis en évidence par les différentes méthodes indirectes (analyse des courbes de récession, analyse corrélatrice et spectrale) la présence probable d'une zone noyée captive à l'aval du système. Les résultats obtenus à l'issue des traçages et des pompages ont confirmé la présence de réserves importantes pouvant être mobilisées à partir du forage effectué.

A ce stade, il n'est plus nécessaire d'effectuer de nouvelles reconnaissances ou études qui n'apporteraient que peu d'information complémentaire par rapport à la connaissance actuelle du système. La démarche proposée consiste en une mise en exploitation progressive du forage avec des débits croissants. Ce procédé permet d'affiner le débit d'exploitation en fonction des résultats acquis en cours d'exploitation et des conditions hydrologiques.

Références bibliographiques

CROCHET Ph. & MARSAUD B., 1992 : *Etude des systèmes karstiques de la moyenne vallée de la Drôme. Synthèse de la première phase et propositions complémentaires.*, Rapport BRGM, R 35 892 RHA 4S 92, 23 p.

CROCHET Ph., MARSAUD B. & RAZIN Ph., 1992b : *Approche de la structure et du fonctionnement du système karstique de la Gervanne.*, Rapport BRGM, R 35 307 RHA 4S 92, 35 p.

CROCHET Ph., MARSAUD B., & RAZIN Ph., 1992d : *Approche de la structure et du fonctionnement d'un système karstique dans le cadre d'une étude préliminaire. Application au système de Glandasse (Drôme, France).*, 5° Colloque d'Hydrologie en pays Calcaire, Neuchâtel, T 1, 8 p.

CROCHET Ph., MARSAUD B. & RAZIN Ph., 1993 : *Etude des systèmes karstiques de la moyenne vallée de la Drôme. Etude de reconnaissance du système karstique de Gervanne.*, Rapport BRGM, N 0303 RHA 4S 93, 22 p.

CROCHET Ph. & MARSAUD B., 1995 : *Système karstique de la Gervanne. Test de mobilisation de la ressource par essai de pompage sur un forage.*, Rapport ANTEA, A04105.

MANGIN A., 1970 : *Contribution à l'étude d'aquifères karstiques à partir de l'analyse de courbes de décrue et de tarissement.*, Annales de Spéléologie, t 25, 3, pp 581-609.

MANGIN A., 1971 : *Etude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique.*, Annales de Spéléologie, t 26, 2, pp 283-329.

MANGIN A., 1975 : *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques.*, Thèse de Docteur ès Sciences, Université de Dijon, (Ann. Spéol., 1974, 29, 3, pp 283-332; 1974, 29, 4, pp 495 - 601 ; 1975, 30, 1, pp 21 - 124), .

MANGIN A., 1984 : *Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrales**, Journal of Hydrology, 67, pp 25-43.

MARSAUD B., 1996 : *Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux*, Thèse BRGM-Univ Paris Sud-CNRS, Sous presse.

CONFÉRENCE :

Ph. CROCHET

Le karst de la Gervanne (Drôme). Evaluation et mobilisation de la ressource.

Intervenant

J.P. FAILLAT

ISAMOR - Technopôle Brest-Iroise
29280 Plouzané

Question ou intervention

Quel est le système d'exploitation choisi ?
Le trop plein a-t-il été envisagé ?

Réponse

Ce système d'exploitation choisi est le forage sur la zone noyée compte tenu de la structure du système karstique.

L'exploitation du trop plein était possible (elle a d'ailleurs été adoptée par un syndicat) mais l'objectif de l'étude était une approche patrimoniale visant à définir le type d'aménagement le mieux adapté.

Intervenant

J. LAFOSSE

Hydrogéologue DIREN Rhône-Alpes
Service de l'eau et des milieux aquatiques

Question ou intervention

Coût des études déjà engagées :

1,1 MF sur l'étude préalable des 4 systèmes "karstiques" identifiés dans le bassin versant de la Drome - abondé par 40 % Ministère Environnement - 40 % Agence de l'Eau RMC - 20 % Conseil général.

Phase complémentaire à venir sur le système le plus intéressant : Gervanne - pompage 100 j à 100 l/sec.

+ 1,2 MF pour un complément d'amélioration du dispositif d'hydrométrie compris sur résurgence affectée,

+ 0,1 MF pour l'installation d'un système de mesures hydrométrie-piézométrie sur le système moins intéressant ARCHIAME - abandonné après retrait partiel du Ministère de l'environnement (40 % → 30 %), 50 % Agence de l'Eau RMC et 20 % Conseil général.

Total général actuel : 2,4 MF.

Réponse

précisions apportées sur les financements :

1ère phase : 1 MF	40 % Agence de l'Eau RMC
	40 % DIREN
	20 % Conseil général
nouvelle phase :	60 % Agence de l'Eau RMC
	40 % Conseil général

Intervenant

M. ALBINET

Agence de l'Eau RMC
69000 Lyon

Question ou intervention ?

Réponse de Ph. Crochet

Apport concerté possible avec la stratégie adoptée d'une étude par étapes $\Rightarrow$ implication des décideurs.

Intervenant

B. BLAVOUX

Université d'Avignon

Question ou intervention

Avez-vous une idée sur la localisation des réserves ? On doit considérer qu'une partie des réserves peut provenir des flux en transit dans la zone non saturée des karts quand elle est très épaisse.

Réponse

Nécessité de croiser les résultats de l'analyse statistique avec le contexte géologique.

Intervenant

Alain MANGIN

CNRS - Laboratoire Souterrain de Moulins

Question ou intervention

A la question posée par B. Blavoux sur la localisation des réserves entre zone noyée et zone d'infiltration, on peut répondre que les méthodes de traitement permettent de dire si la réserve correspond ou non à la zone noyée car les réponses sont différentes. L'utilisation des méthodes par des modèles le confirment d'ailleurs.

Intervenant

C. LEFROU

BRGM / MSP
BP 6009 - 45060 Orléans Cédex 2

Question ou intervention

L'intérêt de l'exploitation du karst par forage plutôt que du captage de l'exutoire est mesuré par le rendement. Peut-on prévoir l'évolution de ce rendement dans le temps ou avec l'augmentation du débit de pompage ?

Réponse

Le rendement est un paramètre quantitatif utilisé pour caractériser l'aptitude à mobiliser les réserves d'un karst à partir d'un forage (les paramètres hydrodynamiques usuels n'étant pas

applicables). C'est un nouveau paramètre introduit par *B. Marsaud*. Par ailleurs, on n'a pas de connaissance actuellement sur l'extension en profondeur de la zone noyée.

Intervenant

M. RAZACK

Université de Poitiers

Question ou intervention

Peut-on se contenter d'un forage unique (ou en nombre limité) pour la reconnaissance et l'exploitation d'un karst ?

Réponse

La position du forage est adaptée avec la structure du karst de Gervanne (zone noyée avec drain profond - configuration vaclusienne), et avec l'objectif, qui est d'avoir un débit maximum.

La fin de l'exploitation minière du Bassin ferrifère de Lorraine, une hydrogéologie perturbée en milieu calcaire fissuré et karstifié

Laurent CADILHAC (1), Patrice GAMEZ (2)

(1) Agence de l'eau Rhin-Meuse , (2) Centre d'Etudes Géographiques de l'Université de Metz

Résumé

L'exploitation des mines de fer de Lorraine dans la région comprise entre Metz, Jarny, Longwy et Thionville (1000 km²) a profondément bouleversé les équilibres naturels tant pour le milieu souterrain que pour les écoulements superficiels.

La couche de minerai de fer aalénien étant située au dessous du puissant aquifère karstique des calcaires du Dogger, les travaux miniers ont entraîné un drainage des eaux de cet aquifère par le réseau de galeries sous-jacent. Les mines de fer de Lorraine, dans le cadre de leurs activités, étaient ainsi amenées à exhaurer des quantités d'eau considérables (de l'ordre de 200 millions de mètres-cubes d'eau par an en moyenne).

Cette pratique a conduit à rabattre de façon très importante le niveau des écoulements de l'aquifère principal, en faisant disparaître les émergences et en favorisant l'infiltration des cours d'eau notamment à l'aplomb des travaux miniers.

Les eaux souterraines exhaurées étaient pour une part utilisées après traitement simple, pour l'alimentation en eau potable des collectivités du Bassin ferrifère (près de 300 000 habitants) et pour satisfaire les besoins industriels et pour une autre part rejetées dans le réseau hydrographique superficiel de la région.

Ces apports massifs ont conduit à une artificialisation des écoulements des cours d'eau.

Aujourd'hui, l'arrêt de l'exploitation minière et des pompages d'exhaures se traduit par un ennoyage progressif du réseau de galeries et de l'aquifère sus-jacent. Cet arrêt a de nombreuses conséquences sur la disponibilité et la qualité de la ressource en eau, aussi bien pour la satisfaction des usages domestiques et industriels que pour l'alimentation du réseau hydrographique superficiel.

Cet ennoyage doit aboutir à un nouvel équilibre hydrologique qui n'est pas totalement prévisible dans un contexte où les bassins versants hydrogéologiques et hydrologiques originels ont été profondément modifiés par la création de vides et de communications hydrauliques artificielles au sein de cet aquifère calcaire karstifié.

Depuis une dizaine d'années un certain nombre de mesures ont été prises afin de répondre à ces bouleversements, cependant des difficultés persistent. C'est à ces difficultés que le Schéma d'aménagement et de gestion des ressources en eau (SAGE) mis en oeuvre sur le Bassin ferrifère doit s'efforcer de répondre.

1. Le contexte géomorphologique et hydrogéologique

La région concernée par les exploitations minières du Bassin ferrifère Lorrain (Bassins de Thionville et de Briey) se superpose aux bassins hydrographiques de l'Orne et de la Fensch affluents de la Moselle et du bassin amont de l'Othain, affluent de la Meuse. Elle couvre un secteur dont l'extension Nord-Sud atteint 50 km et l'extension Est-Ouest de 10 à 30 km (fig. 1).

Cette région de plateau, située entre 250 et 450 m d'altitude correspond au revers structural de la cuesta de Moselle (Pays Haut). Le front de cette dernière regarde vers l'Est et la vallée de la Moselle puis s'infléchit vers l'Ouest le long de la frontière belgo-luxembourgeoise, au Nord. Ce plateau essentiellement calcaire (Bajocien) de pendage général OSO, passe progressivement vers le Sud-Ouest à la dépression marno-calcaire (Bathonien), puis argileuse (Callovien) de la Woëvre. Il est coupé par des failles d'orientation générale NNE-SSO et est échancré par les vallées de la Fensch au Nord-Est et de l'Orne au Centre (fig. 2).

La couche de minerai de fer oolithique aalénien qui affleure sur le flanc de la cuesta et des vallées à l'Est est surmonté par une alternance de formations calcaires (aquifères) et marneuses (semi-perméables à "imperméables") du Jurassique moyen dont les épaisseurs et les faciès varient latéralement (fig. 3).

La profondeur maximale d'exploitation avoisinait 250 m.

2. Le karst du Pays Haut

Les principaux horizons karstifiés sont représentés par les **calcaires à Polypiers** ainsi que les **calcaires oolithiques de Jaumont et de Doncourt** (Bajocien moyen et supérieur).

Les intercalaires argilo-marneux déterminaient, avant exploitation minière, l'étagement des circulations karstiques et la distribution des émergences sur les versants des vallées et au front de la cuesta.

La localisation des phénomènes karstiques a été commandée par le contexte morpho-structural (fig. 4) :

- sur calcaires affleurants épais, on trouve essentiellement des vallons secs ou des vallées à écoulements intermittents et pertes diffuses ;
- sur calcaires affleurants minces ou envahis par un faciès moins perméable, se développent des dolines et gouffres-pertes menant à faible profondeur au réseau de drainage souterrain ;
- sur les contacts stratigraphiques marne/calcaire se localisent les principaux systèmes karstiques d'introduction du ruissellement (karsts de contact lithostratigraphiques).

3. L'exploitation minière et ses conséquences

L'extension progressive des sièges exploitant la minette a considérablement perturbé l'hydrologie et l'hydrogéologie naturelle complexe du Pays Haut.

L'exploitation du minerai de fer aalénien était conduite par "traçage" (réalisation de galeries parallèles à l'intérieur de la couche exploitée), puis "dépilage" (exploitation des piliers laissés

entre les galeries jusqu'à ce qu'ils soient près de s'affaisser). Les piliers étaient ensuite "foudroyés" à l'arrière du front d'exploitation entraînant un effondrement du toit de la couche exploitée et une intense fracturation des couches géologiques la surmontant.

La rupture de l'écran imperméable que constituent les marnes micacées (de faible épaisseur et peu plastiques) à la base de l'aquifère principal du Dogger, ainsi que le développement d'une fracturation induite dans les horizons supérieurs, ont entraîné une mise en connexion des aquifères superposés et des réseaux karstiques existants avec le réseau de galeries minières sous-jacent (fig.5). La création de ces drains verticaux a également favorisé l'infiltration de certains cours d'eau notamment à l'aplomb des travaux miniers.

Les eaux collectées dans ces mêmes galeries étaient évacuées gravitairement ou recueillies et stockées dans des réservoirs souterrains ("albraques") avant d'être évacuées vers l'extérieur. L'exhaure représentait un volume annuel qui variait entre 120 et 250 millions de mètres-cubes (soit 4 à 8 m³/s en moyenne). Les eaux extraites du sous-sol étaient pour une part, utilisées après traitement simple pour l'alimentation en eau potable des collectivités du bassin ferrifère (300 000 habitants), pour une autre, satisfaire les besoins industriels et, pour la plus grande part, rejetées dans le réseau hydrographique superficiel.

Les pratiques d'exploitation et l'exhaure ont ainsi concouru à rabattre très fortement le niveau des écoulements de l'aquifère principal, ce qui a fait disparaître les anciennes émergences qui alimentaient naturellement les cours d'eau, alors que par ailleurs, le rejet massif de grandes quantités d'eau dans le milieu hydrographique a conduit à une artificialisation du régime hydrologique de maints cours d'eau.

L'exhaure représentait pour l'exploitant minier des charges très élevées¹, les hauteurs de relèvement pouvant être très importantes (plus de 200 m). Aussi, très tôt les exploitants ont-ils recherché des solutions afin de limiter les quantités d'eau à exhauser. Pour cela des investigations ont été réalisées sur les plateaux afin de rechercher les écoulements karstiques existants à faible profondeur qui rejoignaient les travaux miniers. Les circulations découvertes étaient ainsi captées et rejetées dans le réseau hydrographique superficiel ce qui limitait d'autant les arrivées d'eau en fond de mine.².

D'autre part il est intéressant de remarquer que le foudroyage qui n'était normalement pas réalisé à l'aplomb des cours d'eaux superficiels favorisait tout de même l'infiltration de ceux-ci à l'aplomb des travaux miniers, des campagnes de jaugeage réalisées ont montré que les recyclages d'eau d'exhaure pouvaient avoisiner les 20 % à 30 %.

Dans le sous-sol les différentes exploitations minières ont été le plus souvent pratiquées de manière jointive puis connectées à l'occasion de fusions successives. Le contexte structural et notamment l'existence de failles orientées NNE-SSE à rejets importants ont conduit à la

¹ Pour 1 t de minerai extraite, il était nécessaire d'exhauser 7 t d'eau.

² Un bel exemple est celui du Puits de la Forêt à Mancieulles (54), où une circulation karstique a été mise à jour à 10 m de profondeur dans l'*oolithe de Jaumont* surmontant les *marnes de Longwy* (ou *calcaires siliceux de l'Orne*) au dessus de la mine de St Pierremont. Le débit du ruisseau souterrain variait entre 80 l/s à l'étiage et près de 800 l/s en crue. La station de pompage mise en place comprenait 4 pompes et autorisait un débit de 2400 m³/h.

formation de trois grands ensemble de vides interconnectés: les bassins Nord, Centre et Sud (fig.1).

4. L'arrêt de l'exploitation minière et ses conséquences

L'arrêt de l'exploitation minière signifie également l'arrêt des pompages d'exhaures. Cet arrêt des exhaures a de multiples conséquences sur le régime et la qualité des eaux souterraines et superficielles.

A l'exception du bassin Nord où une mine est encore en exploitation (sa fermeture est programmée pour le courant de l'année 1997), sur les bassins Centre et Sud l'arrêt de l'exploitation minière et des exhaures corrélatives se traduit actuellement par un ennoyage du réseau artificiel de galeries et d'une partie de l'aquifère sus-jacent (fig. 5).

Sur le plan quantitatif, l'impact sur le milieu est important, les bassins versants hydrogéologiques et hydrologiques ayant profondément été bouleversés par la création de vides et de communications hydrauliques artificielles.

L'ennoyage conduira à un équilibre hydrologique et hydrogéologique très différent de celui qui prévalait avant la période minière.

Sur le plan qualitatif on assiste à une importante détérioration de la qualité de l'eau stockée dans les réservoirs qui acquière une minéralisation très élevée (TH pouvant atteindre 200° F).

Au contact des parois et du toit effondré, l'eau se charge notamment en sulfates (jusqu'à 2,5 g/l) par oxydation des sulfures (pyrite) contenues dans les intercalaires marneux et parfois en sodium.

L'arrêt des exhaures posent donc deux types de problèmes :

1. Pour l'alimentation en eau potable et industrielle

- Cessation de la fourniture d'eau aux collectivités qui doivent se rendre autonomes pour leur alimentation,
- Détérioration de la qualité de l'eau stockée qui voit sa minéralisation augmenter et qui se charge en sulfates et parfois en sodium bien au delà des normes admises pour l'eau brute (SO_4^{--} : 250 mg/l, Na^+ : 150 mg/l).

Cette situation de détérioration de la qualité est cependant réversible, à condition que les eaux stockées soient vidangées et renouvelées à plusieurs reprises sans dennoyage des galeries. Naturellement, le processus est assez long (plusieurs années voire une à deux décennies), mais il y a toujours possibilité d'accélérer artificiellement ce renouvellement par surpompage.³

³ Cette technique a d'ailleurs été mise en oeuvre avec succès dans plusieurs mines (Saizerais, Serrouville, Errouville, ...) par les producteurs d'eau à un coût de surpompage de l'ordre de 10 à 40 centimes le m³ suivant la hauteur de relèvement.

2. Pour le réseau hydrographique superficiel

- Ddéplacement des sorties de l'aquifère qui deviennent différentes des anciens points de rejet de l'exhaure:

Certains cours d'eau ou portions de cours d'eau voient leur débit baisser de façon significative, d'autres au contraire verront leur débit croître du fait de nouveaux points de débordements.

5. Les principales mesures déjà prises

Dès 1980, les pouvoirs publics, à la demande de la Mission déléguée de bassin, ont établi un *schéma de restructuration des mines de fer*.

Une réflexion prospective a été menée notamment par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse faisant le point sur les problèmes consécutifs à la fermeture progressive des mines de fer et à l'arrêt programmé des exhaures et relatifs à **l'alimentation en eau potable des populations** et aux **modifications du régime des cours d'eau**.

Cette réflexion prospective a guidé la programmation des équipements nécessaires, pour la **restructuration de l'approvisionnement en eau potable des populations**.

Le schéma de substitution des ressources des collectivités repose selon la situation de ces dernières, sur trois types d'orientations techniques:

- soit substitution totale des ressources ;
- soit substitution partielle afin d'assurer une dilution des eaux trop fortement minéralisées ;
- soit traitement de la minéralisation et des sulfates en l'absence d'autre possibilité (un procédé par nanofiltration a été retenu à l'issue d'essais pilotes).

Pour les **écoulement superficiels**, les solutions retenues consistent à maîtriser les débordements des mines grâce à des aménagements tels que la réalisation de barrages en galerie, de façon à répartir aux mieux l'émergence gravitaire des eaux d'ennoyage mais aussi, le cas échéant, à soutenir les débits d'étiage de certains cours d'eau par pompage en mine ennoyée, là où cela paraît indispensable en fonction des usages⁴.

Par ailleurs parallèlement au **suivi quantitatif et qualitatif de la ressource** des réservoirs prescrits à l'exploitant minier pendant toute la durée de l'ennoyage, un suivi de l'évolution des niveaux et de la qualité des eaux de l'aquifère du Dogger est réalisé conjointement par la DIREN Lorraine et l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse avec l'aide du BRGM.

Le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) du Bassin ferrifère

Depuis l'année 1994, une Commission Locale de l'eau (CLE) a été mise en place pour élaborer le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) du Bassin ferrifère.

⁴Dans le cadre des arrêtés préfectoraux d'abandon, le soutien d'étiage d'un certain nombre de cours d'eau qui aurait vu sans cela leur cours s'assécher, a été imposé à l'exploitant minier (pompage à partir d'anciens puits de mine ennoyée).

Les enjeux majeurs identifiés, pour ce SAGE, par la CLE sont :

- garantir l'alimentation en eau potable de la population et protéger la ressource en eau souterraine qui constitue une réserve importante pour l'avenir ;
- restaurer et préserver les rivières menacées d'altération ou de disparition partielle ;
- concilier les divers usages de l'eau, notamment ceux de loisir et ceux aux fins d'alimentation humaine et industrielle ;
- mieux prévenir les inondations.

La CLE du Bassin ferrifère a d'ores et déjà engagé les actions suivantes :

- élaboration, en première priorité, d'un schéma de renforcement de la sécurité de l'alimentation en eau potable (sur le plan quantitatif et qualitatif) ;
- élaboration d'un schéma d'assainissement ;
- réflexion sur l'utilisation et la mise en valeur des rivières, notamment par fixation d'objectifs de débit ;
- mise en place d'un observatoire de suivi des ressources en eaux souterraines.

Une phase transitoire et des questions en suspens

Aujourd'hui nous nous trouvons sur le bassin ferrifère dans une phase transitoire: l'ennoyage est en cours, il devrait aboutir à un nouvel équilibre hydrodynamique et hydrochimique des eaux souterraines.

Sur le plan quantitatif :

Au rythme actuel de l'ennoyage, les débordements attendus ne devraient pas intervenir avant 1 an et demi à 2 ans (cote 223 m sur le bassin centre et 172 m sur le bassin Sud)⁵.

En dépit des études réalisées, pour les deux sous-bassins en cours d'ennoyage, des incertitudes demeurent sur les cotes réelles de débordement des réservoirs et les lieux d'émergence futurs. Des risques de mise en communication hydraulique entre les différents réservoirs et les vallées encaissées dans la masse des calcaires existent, que cela se produise à la faveur d'anciens travaux miniers, de fractures existantes ou même d'anciens conduits karstiques fossiles.

Sur le plan qualitatif :

Le temps nécessaire au renouvellement de l'eau des réservoirs constitués et au recouvrement d'une qualité acceptable pour l'alimentation eau potable est, en l'état des connaissances actuelles, quasi-impossible à estimer, mais sera sans doute de une à plusieurs décennies.

Cette période transitoire doit donc être une période d'observation à partir de laquelle il sera possible de conforter le schéma de gestion de l'eau entrepris.

⁵ Pour les 10 premiers mois de l'année 1996, période il est vrai de déficit hydrique, l'évolution des niveaux d'eaux étaient de 1,5 m/mois pour le Bassin Centre et de 4,3 m/mois pour le Bassin Sud.

Cependant, se pose d'ores et déjà, pour les gestionnaires de l'alimentation en eau potable, le problème de la mise en place des périmètres réglementaires pour la protection des points de captage déjà en service sur le Bassin ferrifère, dans un secteur où les futurs écoulements de la nappe par sous-bassins versants hydrogéologiques ne sont toujours pas connus et où la situation hydrogéologique ne sera pas stabilisée avant plusieurs années.

Pour l'avenir il importera de mettre à jour les cartes de vulnérabilité existantes et de délimiter les bassins versants des exutoires de la nappe.

6. La gestion d'un réservoir en milieu calcaire intensément fissuré et karstifié

Le réservoir qui est en train de se constituer dans le Bassin ferrifère lorrain (vides miniers et aquifère calcaire fissuré sus-jacent) suite à l'arrêt des exhaures constituera à terme, après débordement et recouvrement d'une qualité satisfaisante, une réserve de plusieurs centaines de millions de mètres-cubes (300 ?).

En terme quantitatif, cela le positionne comme la troisième ressource en eau souterraine du bassin Rhin-Meuse et l'une des toutes premières ressources de la France de l'Est aux confins de la Belgique et du Luxembourg.

Cependant cette ressource en milieu calcaire intensément fracturé et karstifié aussi bien naturellement qu'*artificiellement* est très vulnérable.

La pression de pollution demeure encore très présente en dépit de la récession économique qu'a connu la région après la crise de la sidérurgie (pollution domestique, industrie, agriculture, ...). De plus la qualité des eaux superficielles est globalement peu satisfaisante dans le bassin ferrifère. Elle est fortement altérée par les rejets industriels et domestiques, l'assainissement urbain étant encore insuffisamment développé. Cela fait courir des risques notables pour les eaux souterraines du fait de leur grande vulnérabilité vis-à-vis des transferts rapides démontrés entre eaux superficielles et eaux souterraines.

Parmi les sources de pollution actuelles, les activités du passé on laissé subsister des contaminations historiques (sites et sols pollués, ...).

Il est donc nécessaire de prendre dès à présent des dispositions strictes en vue de réduire fortement le risque de pollution de nappe pour les projets d'implantation d'activité économique présentant un risque. L'orientation de ces activités économiques devra se faire vers des zones moins vulnérables.

Du fait de l'intensité des inter-relations entre eaux superficielles et eaux souterraines, comme cela a été démontré précédemment, il est nécessaire de garder à l'esprit que la sauvegarde de cet aquifère stratégique pour les décennies futures passe par une **protection et une restauration de la qualité de la ressource en eau dans sa globalité** à l'échelle de la région considérée.

Une structure de gestion adaptée existe aujourd'hui avec la CLE du Bassin ferrifère, mais il est impératif que l'ensemble des acteurs poursuivent et intensifient les actions déjà entreprises.

Bibliographie

AMMOU M., HERVE D., RAMON S. (1982) - Mécanisme de sulfatation des eaux des mines de fer de lorraine ; - Revue de l'industrie minière - Les techniques, n° 5, pp. 318-326.

DAGALLIER G., DEMASSIEUX L. (1988) - Origine des teneurs en sodium des eaux des mines de fer en cours d'exploitation ou après ennoyage. Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, 73 p.

DIREN Lorraine, DRIRE Lorraine, Agence de l'Eau Rhin-Meuse (1996) - Eléments pour le livre blanc du Bassin ferrifère dans le domaine de l'eau, 18 p. Inédit.

HERVE D. (1980) - Etude de l'acquisition d'une teneur en sulfate par les eaux stockées dans les mines de fer de Lorraine. Thèse Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, 130 p.

JOLY H. (1937) - Les relations des ruisseaux souterrains de la région de Tucquegnieux avec les venues d'eau souterraine. Revue de l'industrie minière.

MAUBEUGE P.L. (1956) - Hydrologie du Bassin ferrifère lorrain (1ère note). Bulletin technique des mines de fer de France n° 42.

MAUBEUGE P.L. (1968) - Hydrologie du Bassin ferrifère lorrain (2ème note). Bulletin technique des mines de fer de France n° 90.

Mission déléguée de bassin Rhin-Meuse (1980) - Schéma de restructuration des exhaures des mines de fer.

RAMON S. (1992) - Le problème posés par l'arrêt des exhaures du bassin ferrifère lorrain - Techniques des sciences municipales, Eau, pp. 63-67.

RIOLLOT J. (1932) - Nouvelle contribution à l'étude de la circulation des eaux souterraines dans le bassin de Briey. - Revue de l'industrie minière.

Figure 1

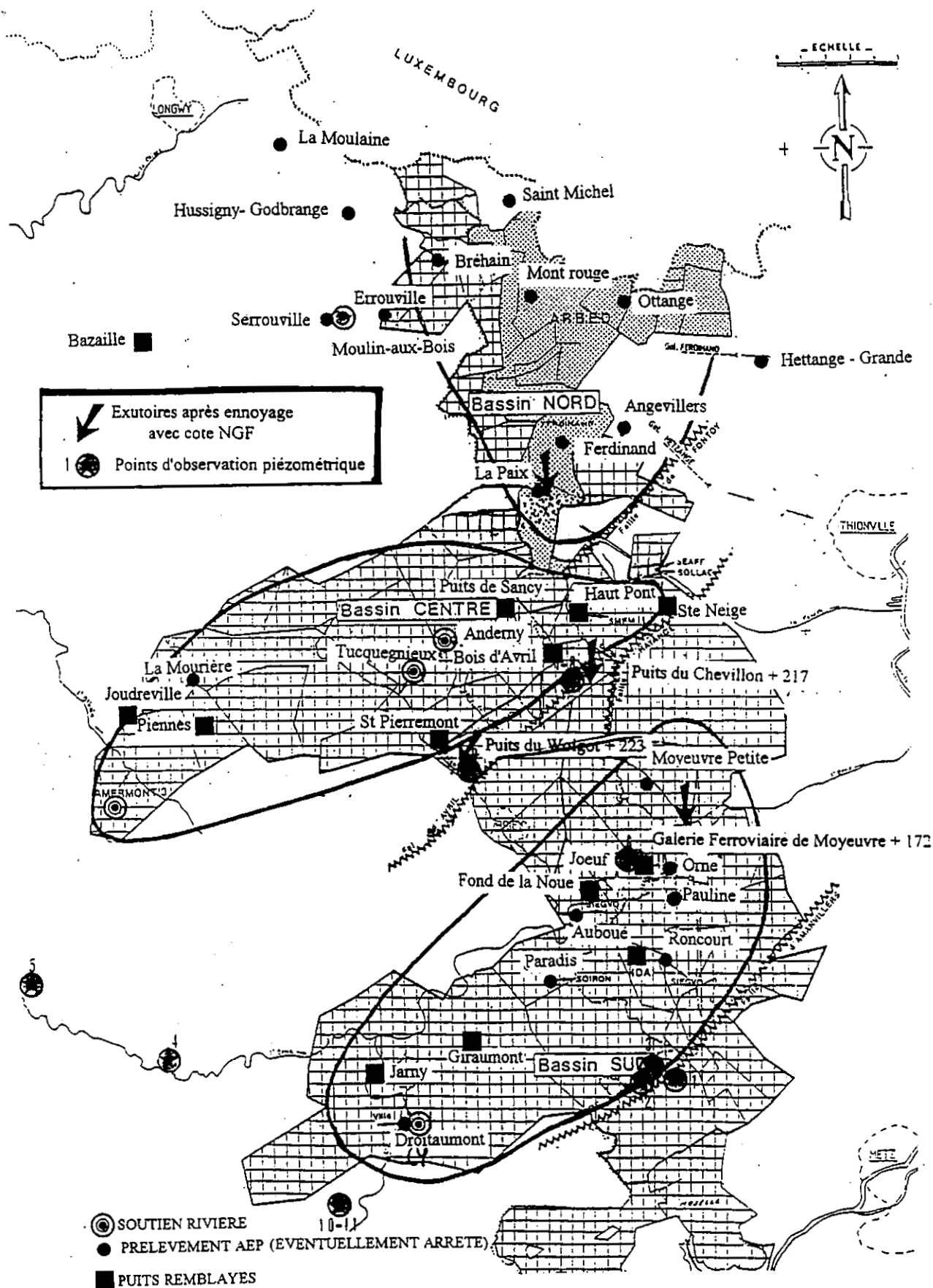
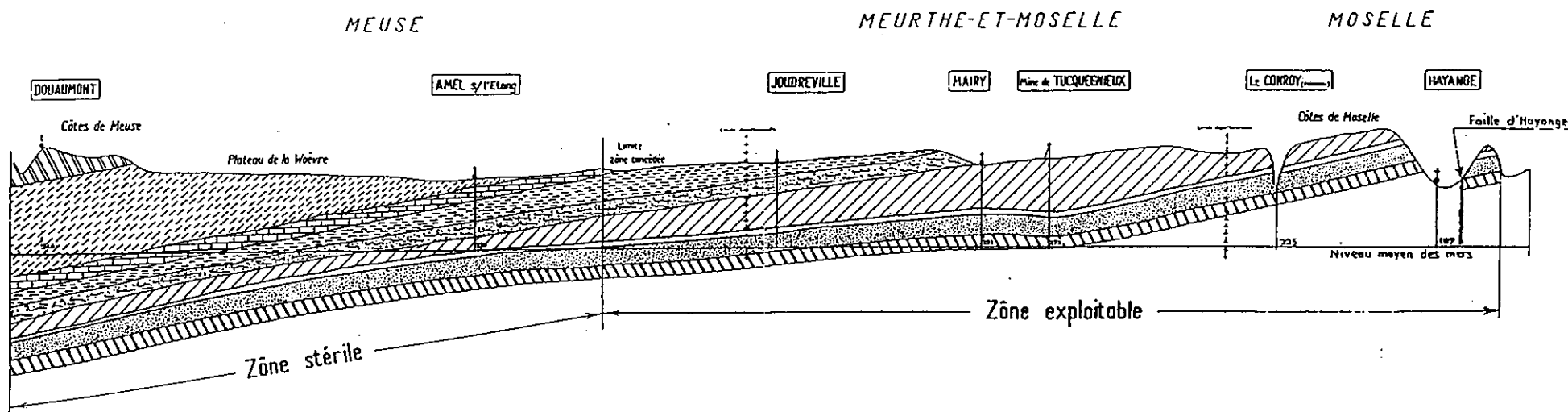


Figure 2

Session B : La fin de l'exploitation minière du Bassin ferrifère de Lorraine, une hydrogéologie perturbée en milieu calcaire fissuré et karstifié ; L. Cadilhac, P. Gamez

BASSIN FERRIFERE DE LORRAINE

Coupe géologique d'Ouest en Est



LEGENDE

- | | | | |
|--|------------------------------------|--|---------------------------|
| | Rouracien et Argovien | | Bajocien inférieur |
| | Oxfordien - Collovien | | Marnes micacées |
| | Batonien supérieur (Dalle d'Etoin) | | Minéral de fer oolithique |
| | — moyen | | Toarcien |
| | Bajocien supérieur | | |

Figure 3

Coupe géologique schématique

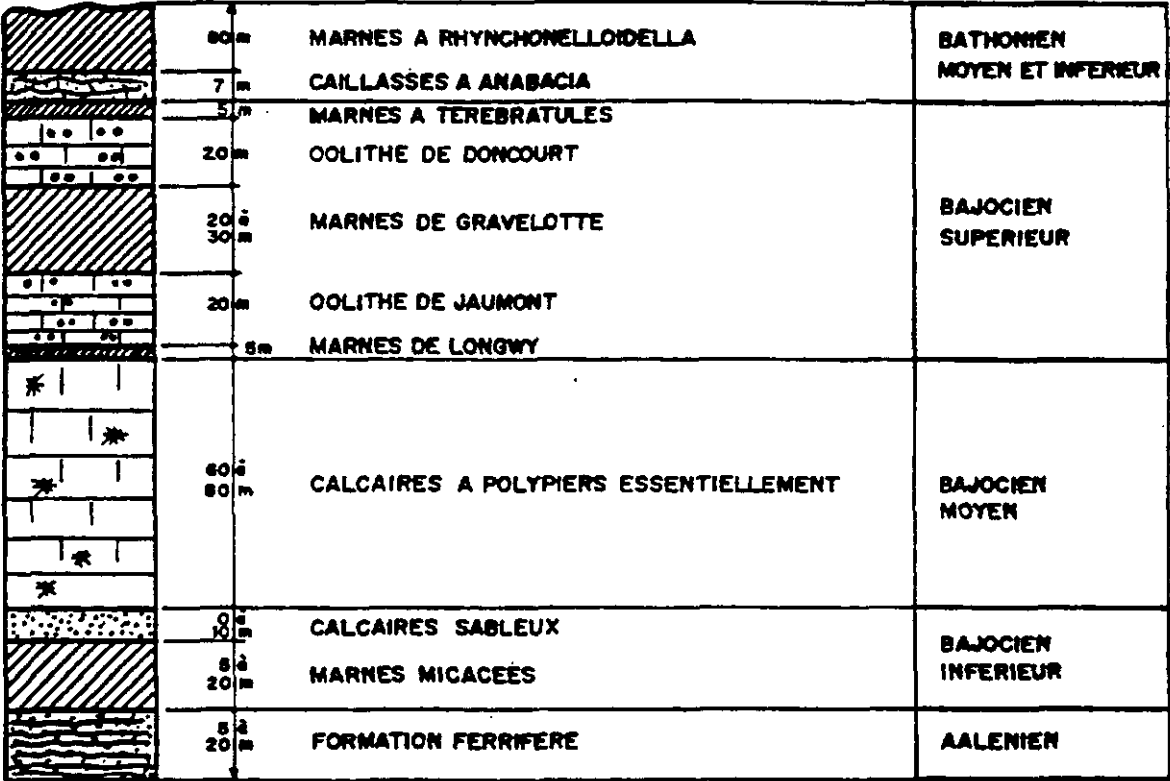


Figure 4

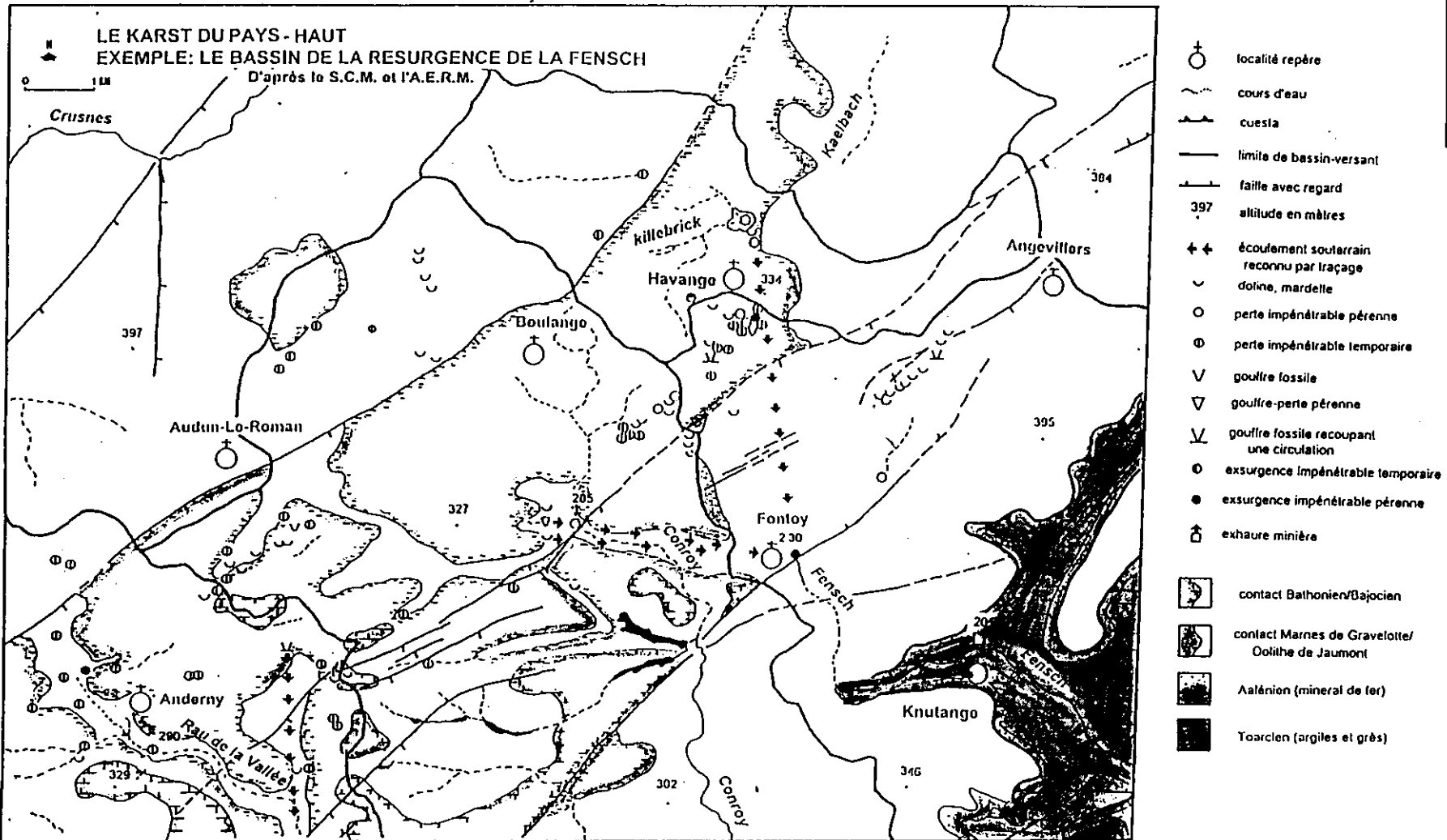
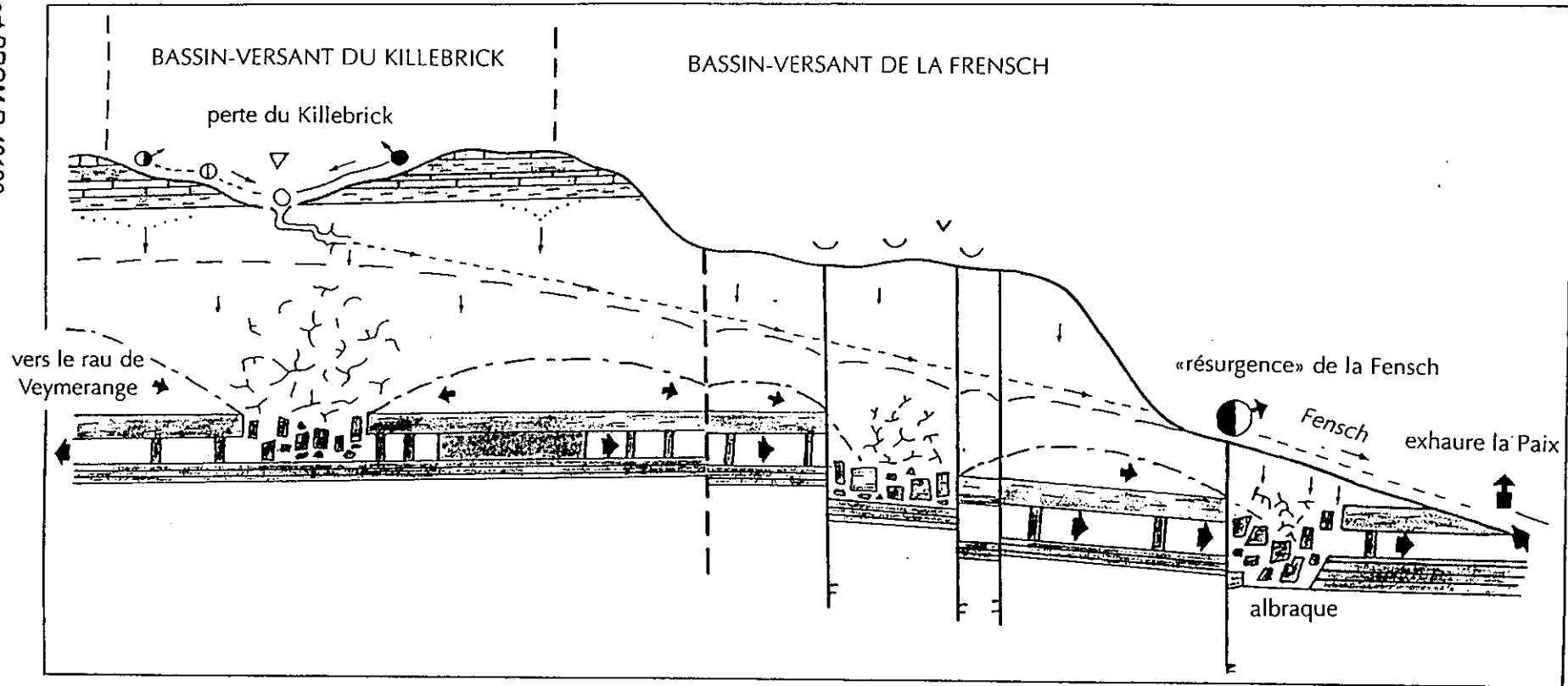


SCHÉMA DES CIRCULATIONS DE L'EAU DANS LE BASSIN SUPÉRIEUR DE LA FENSCH



BAJOCIEN SUPÉRIEUR
(marnes et marno-calcaires)

BAJOCIEN SUPÉRIEUR ET MOYEN
(calcaires)

BAJOCIEN INFÉRIEUR
(marnes micacées)

AALÉNIEN
(minerai de fer)

TOARCIEN
(argiles et grès)

zone défilée

zone tracée

intense fracturation

piezométrie
probable originelle

piezométrie
probable actuelle

drainance

infiltrations

sens d'écoulement
des eaux

exhaure

ruissellement

écoulement souterrain
ancien

perte imperméable

perte perméable

doline

gouffre-perte

gouffre-fossile

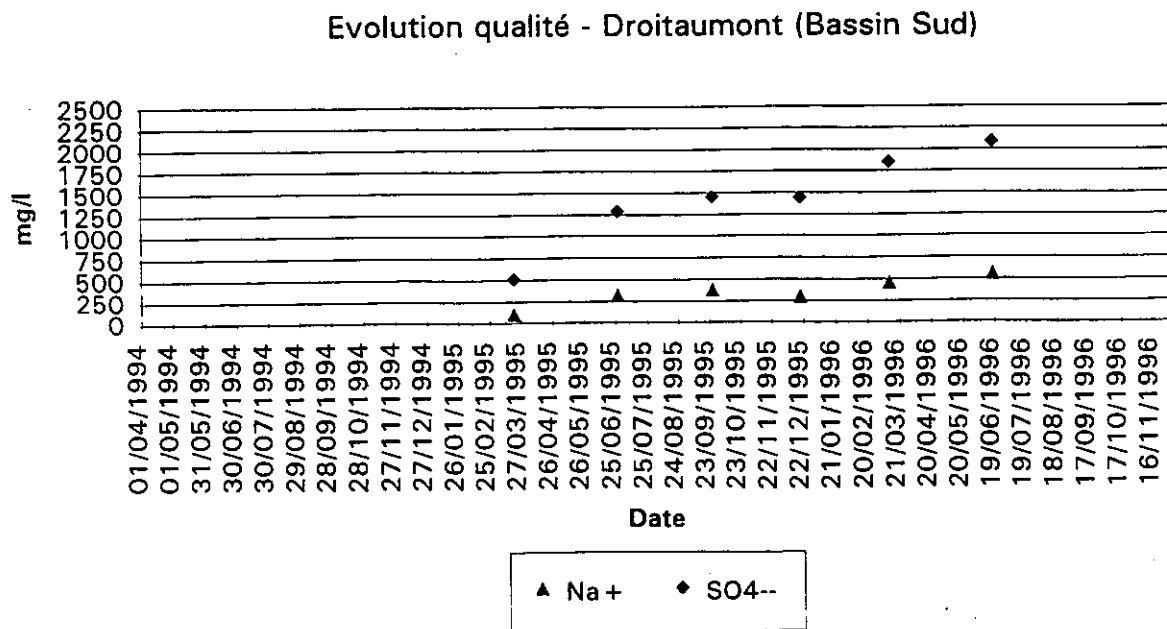
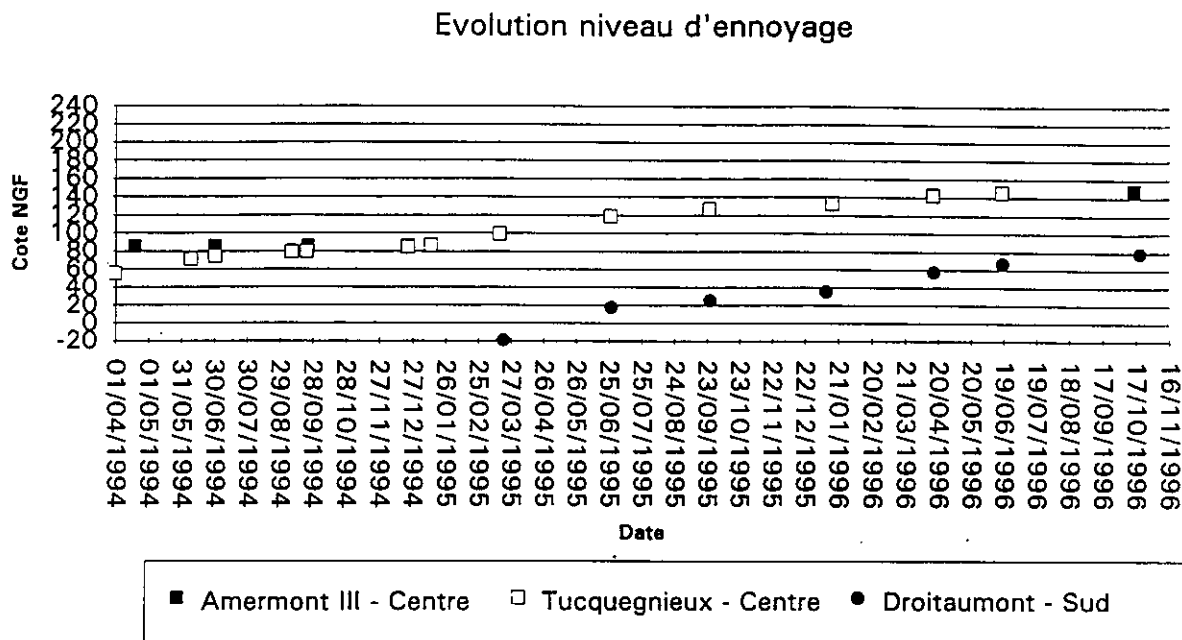
exsurgence pérenne

exsurgence temporaire

Figure 5

Session B : La fin de l'exploitation minière du Bassin ferrifère de Lorraine, une hydrogéologie perturbée en milieu calcaire fissuré et karstifié ; L. Cadilhac, P. Gamez

Figure 6



CONFÉRENCE :

L. CADILHAC et P. GAMEZ

Le karst et la fin de l'exploitation minière en Lorraine : une hydrogéologie perturbée.

Intervenant

N. CRAMPON

Laboratoire Hydrogéologie SN5

USTL - 59655 Villeneuve d'Ascq Cédex

Question ou intervention

Dans les années 70-75, l'Agence Rhin-Meuse avait déjà entrepris une recherche sur la méthodologie des périmètres de protection à appliquer à l'ensemble du bassin ferrifère. Il me semble qu'il s'agissait de périmètres de protection rapprochés quasiment contigus, compte tenu de la coexistence des différentes exploitations minières (alors en train de fermer l'une après l'autre) avec un périmètre de protection éloigné commun. A l'époque déjà, lors de la fin des travaux de création de l'autoroute Paris-Metz-Strasbourg, des traçages avaient été faits (notamment un dans un fossé de drainage de l'autoroute où affleurait le calcaire bathonien, en limite de recouvrement des argiles de Woëvre). Ils avaient montré une arrivée dans la mine en moins de 24 h, alors que l'exhaure était déjà distribuée pour l'AEP d'un groupe de communes (24 communes pour 1 seule exhaure).

Quel est l'état actuel de cette mise en place des périmètres de protection ? Faut-il encore vraiment faire de nombreuses études, sous réserve que les bassins d'alimentation risquent d'évoluer ? et la population qui boit cette eau pendant ce temps ...

Réponse ?

Intervenant

J. C. ROUX

AIH - Co / BRGM / MSP

BP 6009 - 45060 Orléans Cédex 2

Question ou intervention

Dans quelle approximation a-t-on pu déterminer le délai d'achèvement de remontée des niveaux dans le système d'exploitation minière, ainsi que le retour à une qualité normale des eaux d'exhaure ?

Réponse de L. Cadilhac

Sur la question des délais nécessaires à l'établissement d'un nouvel équilibre, on se base sur les volumes des réservoirs miniers concernés (section en galerie, longueur, taux de défruits ...) ainsi que sur la connaissance des apports en fond de mine (statistiques d'exhaure, pluviométrie ...).

Sur le plan qualitatif, les observations et expérimentations réalisées sur des réservoirs miniers isolés des trois grands bassins hydrauliques individualisés, ont montré que par un renouvellement de la ressource équivalent à 3 fois environ la réserve (sans dénoyage des galeries), on parvenait à retrouver la qualité originelle.

En se basant sur ce postulat et sur le renouvellement à attendre suivant le contexte géographique, structural et pluviométrique, on arrive à des fourchettes comprises entre 10 et 30 ans.

La karstification de la craie.

Un caractère supplémentaire d'hétérogénéité dans les écoulements souterrains à prendre en compte dans la gestion et la protection de la ressource en eau souterraine.

Norbert CRAMPON

Département Génie Civil - IUT de Béthune - Université d'Artois - 62408 Béthune Cédex
et JE 231 *Hydrogéologie, Structure et Matériaux des Milieux Carbonatés* - Université des Sciences et Technologies
de Lille - Bât. SN5 - 59655 Villeneuve d'Ascq Cédex

En Europe du N.-O. les dépôts crayeux du Crétacé supérieur et de la base du Paléocène s'étendent principalement sous la Mer du Nord et dans les pays avoisinants : Nord de la France, S.E. de l'Angleterre, Belgique, Hollande, Allemagne du Nord, Danemark et extrême Sud de la Suède, avec des épaisseurs atteignant 2000 m dans le graben Central de la Mer du Nord. En France, la Craie couvre près de 110 000 km² (20 % du territoire métropolitain) dont les 2/3 en affleurement et 1/3 sous recouvrement tertiaire épais (centre du Bassin de Paris, où son épaisseur peut atteindre 700 m, et Flandre). Hors de ces zones de couverture épaisse, la Craie constitue un aquifère majeur, avec une ressource renouvelable annuelle de l'ordre de 10 à 12 milliards de mètres-cubes et des prélèvements de l'ordre du milliard de mètres-cubes par an. Dans certaines régions, comme le Bassin Artois-Picardie, le réservoir Craie fournit plus de 95 % de l'alimentation en eau potable.

1. La Craie, un aquifère multi-poreux et multi-perméable

La craie en tant que magasin et aquifère est un milieu composite, multi-poreux et multi-perméable, homogène (isotrope ou anisotrope) ou hétérogène selon l'échelle d'investigation.

Les craies les plus pures atteignent 99 % de CaCO₃ (Hancock 1993). Matériau peu compacté, sa porosité matricielle varie, selon les régions, de 15 à 44 %, avec des ouvertures moyennes de pores généralement inférieures à 1 mm, ce qui en fait un matériau aquiclude mais non aquifère, à très basse perméabilité, de l'ordre de 10⁻⁹ à 10⁻⁸ m.s⁻¹ (Price 1993, Price *et al.* 1993, Crampon *et al.* 1993 a & b). Cette première particularité a des conséquences pratiques non négligeables :

- un volume énorme d'eau de rétention, non mobilisable, mais pouvant jouer un rôle considérable dans les échanges par diffusion et rétrodiffusion avec l'eau mobile circulant en fissures, fractures ou karst, quand cette eau véhicule des produits solubles.
- une frange capillaire épaisse de plusieurs dizaines de mètres (de l'ordre de 30 m selon Lloyd 1993), qui peut expliquer les réactions rapides (transfert de pression) d'un niveau piézométrique inférieur à cette profondeur, tandis que le transfert vertical de masse (d'un soluté) reste considérablement plus lent.

Pour devenir aquifère, la Craie doit être recoupée par des fissures ou fractures suffisamment ouvertes et interconnectées. Cette fracturation est généralement en relation avec l'histoire tectonique de la région (directions des contraintes, compression ou distension, rejeu de failles du socle, proximité de grands accidents, etc.). A faible profondeur, mais plus particulièrement dans les vallées, parfois conditionnées elles-mêmes par des accidents majeurs, l'altération climatique accentue la fissuration. Les propriétés aquifères de la Craie dépendent donc, en premier lieu, de la répartition et du développement d'un réseau de fissures et de fractures permettant l'écoulement gravitaire de l'eau, ce qui signifie que l'épaisseur de la nappe ne peut que très rarement correspondre à la différence entre le niveau hydrostatique et le toit des premières formations sous-jacentes à dominante argileuse, comme le soulignent les mesures en forages, au micro-moulinet. A cette échelle relativement locale, on doit aussi tenir compte de l'hétérogénéité verticale des faciès successifs (bancs indurés, niveaux marneux, etc.) qui peut engendrer une superposition plus ou moins locale de nappes (avec parfois des différences sensibles de niveaux piézométriques). Les propriétés hydrodynamiques de la Craie aquifère varient en conséquence selon les secteurs et les faciès, avec des valeurs moyennes de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-3} m.s⁻¹ pour la conductivité hydraulique (10^{-5} à 10^{-2} m².s⁻¹ pour la transmissivité) et 2 à 6 % pour la porosité efficace (2 à $5 \cdot 10^{-4}$ pour le coefficient d'emmagasinement en nappe captive).

Le découpage de ce milieu aquifère, à l'échelle régionale, par un ensemble de fractures de plus grande ampleur, mais moins nombreuses, conduit à mettre en évidence une structure compartimentée du réservoir, avec des comportements hydrauliques différents selon les "casiers" (Bracq *et al.* 1992, 1996) dont il doit être tenu compte dans la modélisation des écoulements (Louche 1996), les limites pouvant, par ailleurs se comporter, selon les cas, en barrière partielle ou totale, ou en axe préférentiel de drainage. L'analyse morphostructurale peut être d'une grande utilité pour la délimitation de ces compartiments structuraux et hydrogéologiques (Bracq 1992, Bracq *et al.* 1992 a, 1996 a).

Le dernier "niveau" de porosité et de perméabilité, qui accentue encore l'hétérogénéité de l'aquifère de la Craie, correspond évidemment à l'existence de systèmes karstiques, permettant lorsqu'ils sont, même temporairement, fonctionnels, des transferts de masse très rapides, en zone non saturée, du sol à la nappe, puis latéralement en zone noyée, avec des vitesses pouvant être 100 fois supérieures à celles de l'écoulement général en nappe.

2. Karstification de la Craie

En tant que roche calcaire largement fracturée et localement karstifiée, la Craie est donc assez semblable aux autres roches carbonatées. Mais par rapport aux calcaires compacts, elle présente deux singularités essentielles : une fissuration généralement assez dense et développée pour que l'on puisse (avec une approximation plus ou moins justifiée selon les secteurs) l'assimiler à un aquifère poreux (à porosité de fissures au lieu de porosité d'interstices) et bien évidemment sa très grande porosité matricielle (qui ne joue pratiquement aucun rôle dans l'écoulement). C'est du

reste cette dernière (due à la relativement faible compaction et à l'absence de ciment interstitiel) qui est souvent avancée pour expliquer le (relativement) faible développement de la karstification. Pour notre part, nous pensons que c'est au contraire le développement d'une fissuration dense et fine qui réduit fortement le potentiel de karstification, en dispersant l'énergie et diminuant les vitesses d'écoulement, par rapport à des zones de craie plus compacte (moins fissurée) dans lesquelles l'eau peut agrandir plus facilement, par dissolution et entraînement, des fractures de plus grande portée linéaire ou des joints de stratification. Il y aurait donc des faciès et des secteurs plus karstifiables que d'autres dans la Craie, en raison notamment :

- de l'existence d'une *fracturation* bien développée *en distension*,
- de la *production de CO₂* par les sols,
- de la possibilité d'infiltration rapide liée à l'*absence de couverture*, comme l'a rappelé récemment Maqsoud (1996).

Bien sûr, on peut se demander avec Lepiller (1996) si la karstification est un phénomène exceptionnel dans la Craie ou un processus nécessaire et banal. Il n'en reste pas moins que des régions sont, au moins en apparence, plus karstifiées que d'autres. Les départements de Seine-Maritime et de l'Eure comptent actuellement près de 900 cavités explorées, avec un développement total de plus de 17 km, des puits ou cheminées naturels de plus de 25 m sont connus dans le Pays d'Othe (Yonne et Aube) et des réseaux visitables de plus de 30 m de dénivelée dans la Montagne de Reims (Rodet 1992). Dans d'autres régions comme le Bassin de Mons, on ne connaît que des formes exokarstiques de faible ampleur (Quinif *et al.* 1996). Le Nord-Pas de Calais a longtemps été considéré comme exempt de manifestations karstiques dans la Craie, malgré certaines observations anciennes, souvent oubliées. On commence pourtant à y déceler nombre de signes de karstification : dolines, pertes localisées de cours d'eau, conduits décimétriques à métriques en zone non saturée, effondrements actifs, circulations rapides démontrées par traçage.

3. Caractères de quelques régions connues pour leurs karsts de Craie

Sans vouloir ni pouvoir reprendre ici une typologie des karsts de la Craie, principalement étudiée par Rodet (1992, 1996), on peut tenter de résumer les caractères essentiels des grandes régions karstifiées de France.

Le karst de la Côte d'Albâtre (de la Somme à la Seine) est étagé, non seulement en raison de la présence de niveaux imperméables au sein de la masse crayeuse (émergences à flanc de falaise : les "pisseuses"), mais aussi en fonction des variations glacio-eustatiques au cours du Quaternaire (cavités parfois à remplissage de gélifracts). Des conduits actifs profonds y sont néanmoins connus et exploités (1 500 litres/seconde à Yport).

Dans la Basse-Seine, les karst visibles sont plutôt des "paléokarsts" : "conduits reliques, isolés de leur contexte géomorphologique par le découpage des pitons crayeux et des versants réglés périglaciaires. Souvent, ils ne sont plus fonctionnels, privés d'un bassin d'alimentation par l'évolution quaternaire des méandres de la Seine qui les a recoupés." Il s'agit "souvent de conduits de grandes dimensions, pour la région, dans lesquels les remplissages tiennent une grande place" (Rodet 1992). Toutefois, des rivières souterraines circulent encore (rivière des Robots dans le karst de Caumont, Eure, au débit de 4 à 7 litres/seconde) et des captages A.E.P. utilisent le drainage actif ($500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ au forage des Varras à Mauny).

Les karsts du Pays d'Othe et de la Montagne de Reims se rangent, toujours selon Rodet (1992), dans la catégorie des karsts de cuesta. Le développement du karst y est en effet surtout limité à la cuesta crayeuse. L'endokarst n'y serait connu qu'à la faveur d'effondrements, parfois récents, de cheminées et de travaux de captage qui en rendent l'accès possible. C'est dans cette région que Martel définissait la Craie comme une "roche karstifiée et sans nappe" (in Rodet 1992). Sur le revers, le sous-dimensionnement face aux apports des grosses précipitations engendre la création de cheminées d'équilibre (les bîmes) qui peuvent alimenter des rus temporaires. Les formes d'effondrement sont nombreuses sur le plateau et dans les vallées. Sur le front, les bassins d'alimentation sont réduits mais le karst y est très développé. Les cavités fossiles sont peu nombreuses et l'essentiel des circulations souterraines font l'objet de captages d'A.E.P. (Maqsoud 1996).

4. Indices de karstification en régions réputées peu ou pas karstiques

Dans de telles régions crayeuses, par suite de l'absence d'observation de cavités ou de conduits visitables et de la rareté ou du faible développement des formes exokarstiques, peut-il exister des systèmes endokarstiques cachés qui modifieraient l'écoulement souterrain supposé ne s'effectuer qu'en nappe ?

Certains indices permettent de le supposer, dans le Nord-Pas-de-Calais notamment. Les poches de dissolution avec argile résiduelle ou remplissage limoneux, de plusieurs mètres de profondeur sont fréquentes en Artois-Picardie, comme dans bien d'autres régions (Angleterre, Normandie, ...) mais ne sont pas nécessairement en rapport avec un endokarst, comme on peut le constater dans le Pays de Caux par exemple. Les dolines comptent parmi les formes exokarstiques le plus souvent signalées en terrain crayeux. Sommé (1980) en a signalé la présence dans certains secteurs de l'Artois. Un inventaire systématique sur cartes à 1/25 000 a débuté dans les années 90 à l'initiative de Colbeaux sur l'ensemble des affleurements du Bassin de Paris (Bracq *et al.* 1994). Dans le Nord-Pas-de-Calais, le nombre de dolines semble statistiquement plus élevé dans l'Artois, au Sud d'Arras. Dans le Gâtinais, Bracq *et al.* (1996 a) distinguent des compartiments structuraux relativement peu fracturés ou à fracturation relativement fine et dispersée, où l'infiltration serait lente et les dolines nombreuses et des compartiments avec peu de dolines, à fracturation plus localisée dans lesquels la percolation se serait concentrée en un moins grand nombre de points et aurait facilité le développement d'un endokarst. Des phénomènes beaucoup

plus brusques, tels qu'effondrements et fontis, se produisent encore actuellement. Certains sont spectaculaires, comme celui qui, aux sources de la Lys, a englouti un tronçon important d'une rue du village de Lisbourg (Pas-de-Calais) le 11 février 1984, dans un "gouffre" d'au moins 10 m de profondeur, ou celui qui s'est produit en 1994 dans un champ à l'interfluve des ruisseaux de la Dordogne et de la Course (affluents de la Canche) créant un puits vertical de 3 m de diamètre et 6 m de profondeur (selon Louche (1996) on dénombre une quarantaine de tels "faux-puits" dans ce secteur), sans oublier les effondrements survenus en février 1988 dans le vallon de Fourdebecques près de Wavrans-sur-l'Aa, ou dans la haute vallée de la Sensée, à St Léger, lors de la construction de la ligne du TGV Nord. Ces quelques exemples laissent supposer qu'il existe bien des conduits karstiques actifs ou se réactivant par décolmatage, lors de périodes de fortes pluies ou par suite de pompages intensifs dans les secteur (cas de St Léger). Dans certains cas une forte turbidité peut se manifester à l'exutoire, quand on le connaît (sources de la Lys).

5. Approche du fonctionnement karstique par l'étude des écoulements

En l'absence de possibilité d'observation directe de l'endokarst, une approche hydrologique et hydrochimique des hydrosystèmes souterrains peut être utilisée sur les émergences dont on connaît ou l'on soupçonne l'origine karstique. Cette démarche a été appliquée par Maqsoud (1996) à sept groupes de sources de la Craie du Bassin de Paris (quatre en Pays de Caux, une en Basse-Seine, une dans le Gâtinais (Trois-Fontaines) et une dans le Pas-de-Calais : la Lys), au moyen de méthodes développées pour les systèmes karstiques par Mangin (1975, 1982 a & b), Bakalowicz (1979) et Mudry (1987) : évolution des débits classés, courbes de récession, analyse corrélatrice et spectrale à long et court terme des débits, analyse croisée pluie-débit, distribution des fréquences de la conductivité électrique, analyse en composantes principales des données hydrochimiques. Il en ressort des comportements souvent différents d'un cycle à l'autre, avec des réponses franchement karstiques soit en hautes-eaux (la Rançon), soit en basses-eaux (Lys et Fontaine-sous-Préaux), avec un effet mémoire très variable selon ces cycles et des degrés différents d'organisation du drainage. Certains systèmes manifestent la présence de réserves importantes. Un rôle important semble joué par les structures de drainage paléokarstiques, habituellement non fonctionnelles, mais réactivées dans certaines conditions hydrologiques.

Quand on peut disposer à la fois de formes d'introduction (pertes, gouffres, bétoires) et d'émergences relativement bien localisées (sources, forages d'A.E.P.), un des moyens importants d'approche est évidemment le traçage artificiel qui permet non seulement de mettre en évidence des relations d'écoulement (relations entrées-sorties), mais aussi les vitesses de transport. Certes, la méthode est indirecte et ne démontre pas l'existence d'un endokarst fonctionnel, mais seulement la présence de drains suffisamment ouverts pour permettre une circulation rapide. Toutefois, quand on sait, par traçage également, que les vitesses habituelles de transfert de masse dans la Craie fissurée sont de l'ordre de 0,5 à 2 m/an pour l'infiltration verticale en zone non-saturée et de 0,5 à 1 m/heure (vitesses effectives) en nappe (1 à 5 m/h pour les vitesses maximales) et que l'on constate des transferts de masse variant entre 50 et 500 m/h, on est en

droit de se poser la question de l'existence d'un système de drainage karstique (Crampon *et al.* 1993 a & b, 1996).

Si un drainage karstique s'inscrit dans un système plus général d'écoulement en nappe dans l'aquifère crayeux, il devrait se déceler dans la configuration piézométrique, comme cela a pu être montré par Lasne (1992) pour le système des Trois-Fontaines (Gâtinais) et Lepiller (1993) pour celui de la rivière souterraine de la Guinand (Sormery, Yonne). Mais en l'absence d'une densité suffisante de piézomètres, un tel système de drainage peut passer inaperçu dans une cartographie piézométrique régionale basée sur les quelques points d'observation disponibles et calquée, bien souvent, sur la topographie qu'on suppose souvent être reproduite de façon atténuée par le toit de la nappe, postulat pourtant fréquemment démenti en région de cuesta et bien souvent en région karstique où les bassins versants superficiels coïncident rarement avec les hydrosystèmes souterrains, comme le soulignent les exemples suivants.

A Quesques, sur la cuesta crayeuse de la boutonnière du Boulonnais, trois dépressions dolinaires (abusivement appelées "gouffres") absorbent les eaux de ruissellement au milieu d'un hameau (Le Verval) où se trouve également un puits inutilisé (niveau d'eau à 49 m de profondeur) qui laisse entendre un bruit de circulation d'eau. Un déversement d'eau de Javel concentrée, effectué en 1990, dans l'un de ces "gouffres" aurait mis environ 5 heures pour parvenir au captage communal, situé en pied de cuesta à quelque 1575 m à vol d'oiseau, impliquant une vitesse d'environ 300 m/h. La dénivellation topographique (entrée-sortie) est de 85 m et le gradient hydraulique moyen de 1/40. L'eau souterraine s'écoule ici à contre-sens des eaux superficielles du bassin versant dans lesquels s'inscrivent les forme d'introduction (Maqsoud *et al.* 1996) qui n'ont pas été incluses dans le Périmètre de Protection, même éloignée du captage !

Près du Cap Banc Nez, un captage d'A.E.P. drainant la Craie du Cénomanién supérieur du Cran d'Escalles est « protégé » par des Périmètres de Protection définis en fonction de la configuration piézométrique régionale. Une station d'épuration avec lagunage et réinjection dans la craie du Turonien moyen, après filtration sur sable, était prévue dans un vallon sec, à proximité d'un puits perdu aménagé dans une ancienne perte pour absorber les eaux pluviales du hameau de Tappecul. La station étant en dehors des Périmètres de Protection, l'avis de l'Hydrogéologue Agréé ne devait pas présenter de difficulté. Toutefois, la configuration en vallons secs, segmentés en tronçons rectilignes et soulignés par des rideaux longitudinaux, nous ayant fait craindre un écoulement préférentiel et éventuellement rapide selon ces directions (non conformes à celles que l'on peut déduire de la carte piézométrique), un traçage artificiel a été réalisé fin 1989, mettant en évidence une relation rapide : arrivée du traceur aux sources de la falaise (et au captage) en moins de 42 h selon un trajet apparent de 2275 m, en suivant les fonds de vallons, trajet confirmé par des prélèvements intermédiaires dans un puits situé à l'intersection vallon de Tappecul et du vallon principal d'Escalles, soit une vitesse maximale de l'ordre de 56 m/h, incluant la percolation verticale à travers 57 m de craie non saturée (Bracq *et al.*, 1992 b, 1994, Crampon *et al.*, 1994, Maqsoud *et al.*, 1996). La dénivellation topographique totale était de 81 m et le gradient hydraulique moyen dans le vallon sec de Tappecul de 1/83 (1/99 en moyenne sur l'ensemble des deux vallons).

Aux environs des Andelys (Eure), un projet de décharge d'ordures avait été établi dans un vallon sec, dont le tracé évoque le forme d'un vilebrequin, creusé dans la craie campanienne et aboutissant au Nord d'Harquency, village de la vallée du Gambon, ruisseau qui rejoint la Seine aux Andelys. Là encore, topographie et piézométrie (toujours établie à petite échelle) laissaient supposer un drainage de la nappe de la Craie par le Gambon, dans le lit duquel apparaissent quelques sources et dans les alluvions duquel sont implantés les forages d'A.E.P. des Andelys (au Radeval). Les paléokarsts de la basse vallée de la Seine sont connus dans le secteur avec de nombreuses cavités explorées (Mont Pivin, Trou Bournichon, grotte St Jacques, etc.), mais à des altitudes généralement comprises entre 80 et 70 m selon Rodet (1992) et apparemment non reliés à des conduits noyés fonctionnels. A partir d'une bétoire (entonnoir de 4 m de diamètre sur 1,5 à 2 m de profondeur) située dans la partie amont du vallon sec à une altitude de 100 m et où le toit de la nappe est estimé être à la cote + 60, deux injections ont été effectuées (deux traceurs différents à 40 jours d'intervalle). Malgré la traversée de 40 m de craie non saturée et une distance linéaire de 3000 m, les délais d'arrivée aux captages de Radeval ont été très courts (entre 8 et 10h pour le 1er traçage et 10h30 pour le second), soit des vitesses maximales respectivement de 500 m/h et 286 m/h pour un même parcours (apparent) à deux périodes différentes. La dénivellation topographique entrée-sortie est de 65 m et le gradient hydraulique apparent d'environ 1/120. De plus, Le forage d'A.E.P. d'Harquency, situé dans la même vallée, mais à 1,5 km en amont de la sortie du vallon sec et donc du village, a, contre toute attente, été lui-même atteint par les deux traceurs, de façon très diluée mais indubitable, montrant toutefois que des transferts souterrains étaient possibles dans cette direction à 90° de la précédente. Là encore la carte piézométrique régionale se trouvait contredite (Crampon 1992, Bracq *et al.* 1994, 1996 b).

6. Récapitulation des méthodes de reconnaissance

Les méthodes de prospection, d'investigation et de protection sont, en gros, les mêmes dans le karst de la Craie que dans le karst développé en roches carbonatées compactes. Toutefois, comme les signes extérieurs de karstification peuvent rester particulièrement discrets dans certaines régions crayeuses, il convient de mettre conjointement en oeuvre plusieurs méthodes d'approche.

Tout d'abord prêter une attention particulière aux zones les plus favorables à une karstification, selon les critères précédemment soulignés, c'est-à-dire :

- présentant des différences sensibles d'altitude : cuestas, bords de vallées relativement encaissées, environs de falaises, où peuvent s'établir des gradients hydrauliques assez forts,
- sans couverture importante, une couverture limoneuse n'excluant pas un endokarst sous-jacent, ni le développement de formes exokarstiques,
- en bordure de couverture imperméable, où les eaux superficielles peuvent se concentrer et s'infiltrer de façon très localisée en débouchant sur la craie nue,

- présentant des failles ayant joué ou jouant encore (néotectonique) en distension (voir analyse structurale).

Dans ces zones, en principe plus favorables à la karstification, mais aussi dans les autres régions crayeuses, a priori moins favorables mais où, selon Lepiller (1996), la karstification pourrait néanmoins ne pas être exceptionnelle, il importe de recenser et cartographier systématiquement tous les signes extérieurs pouvant trahir la présence ne fut-ce que d'une ébauche de karstification : dolines, bétouilles, pertes localisées de cours d'eau, conduits décimétriques à métriques en zone non-saturée avec le type de discontinuité qui paraît les guider (failles, diaclase, joints de stratification, etc..., avec leurs directions), effondrements brusques récents ou anciens, sources à gros débit présentant notamment de fortes variations de régime ou à turbidité temporaire. L'écoute des témoignages ou de récits locaux peut se révéler fort utile, à condition d'être critique. La présence de conduits en zone non-saturée n'apporte pas la preuve de leur fonctionnalité, mais les études hydrologiques (Maqsoud, 1996) montrent que certains paléokarsts peuvent redevenir temporairement fonctionnels dans certaines conditions hydrologiques, se décolmater (effondrements de Wavrans ou de St Léger) ou ne pas empêcher la présence de systèmes actifs plus profonds (les Andelys), bien que cela ne semble pas être le cas en Angleterre selon Price (1996).

Effectuer une analyse morphostructurale des zones d'investigation, avec relevé sur carte topographique, complété en tant que de besoin par des vérifications sur photographies aériennes ou imagerie satellitaire, des linéaments, tronçons rectilignes de cours d'eau, thalwegs, vallées ou vallons secs, "rideaux", "creuses" et dépressions fermées (dolines), suivi d'un traitement statistique après digitalisation pour mettre en évidence, sectoriellement, les principales familles directionnelles de ce qui pourrait correspondre à une fracturation et à des concentrations de caractères exokarstiques. La cartographie correspondante permet de délimiter des compartiments différents, tant sur le plan structural qu'hydrogéologique, voire de localiser des drains, karstiques ou non, correspondant à des fractures.

A cette analyse morphostructurale mérite d'être associée une analyse structurale, notamment par la réinterprétation de tous les sondages disponibles et fiables, qui peuvent mettre en évidence des failles non cartographiées. Seront bien évidemment mises aussi en lumière les failles ayant joué en distension, ce qui peut nécessiter des investigations complémentaires ou des vérifications sur le terrain.

La cartographie hydrogéologique est un outil précieux, mais toute carte piézométrique sera critiquée avant d'être utilisée, surtout si elle est ancienne et réalisée à petite échelle. De nouvelles campagnes de relevés piézométriques sont généralement nécessaires, pour tenir compte des ouvrages récents et de l'état actuel des niveaux, si possible en basses-eaux et en hautes-eaux. Tous les points d'observation, avec cote du niveau d'eau, devront figurer sur la carte, afin de souligner le degré de crédibilité des tracés d'isopièzes. Quand les données sont en nombre suffisant, la distribution des conductivités hydrauliques pourra être une aide précieuse pour déceler un éventuel système de drainage, peut-être ou probablement karstique.

Quand on dispose d'un exutoire accessible et de points d'introduction, les traçages artificiels permettent de mettre en évidence l'existence ou l'absence de relations d'écoulement. Comme ces relations peuvent dépendre des conditions hydrologiques et n'être que temporaires, il convient de répéter les mêmes essais à des périodes différentes. L'intérêt des traçages en milieu fracturé ou karstique est : de préciser la zone d'alimentation de l'exutoire à protéger, d'obtenir des ordres de grandeur des vitesses maximales (arrivée du soluté) et effective, d'avoir une idée de la dispersion et des dilutions et, avec le taux de restitution, de pressentir soit un piégeage (peut-être temporaire), soit l'existence d'autres sorties.

L'approche hydrologique sur les émergences comprend l'étude des régimes d'écoulement, les corrélations avec les précipitations, l'observation des conditions d'apparition d'une turbidité éventuelle et l'étude de cette turbidité en elle-même (Beaudeau *et al.*, 1996, Leboulanger *et al.* 1996), celle des fréquences de la conductivité électrique et l'analyse des correspondances entre les données hydrochimiques (Maqsoud, 1996).

Ce n'est qu'au prix de tous ces efforts conjoints d'investigation, tant sur le terrain, que sur carte et en laboratoire, que les systèmes karstiques de la Craie pourront être pris en compte pour améliorer la productivité des ouvrages de captage à implanter, optimiser la gestion de la ressource et en même temps protéger sa qualité, en établissant notamment des cartes de vulnérabilité adaptées aux systèmes karstiques (Doerfliger, 1996).

Références bibliographiques

- BAKALOWICZ M. (1979) - Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et à la karstification. Thèse Doc. Etat Univ. Paris VI, 269 p.
- BEAUDEAU P., LEBOULANGER T. & HANNETON S. (1996) - Prévion des crues turbides aux sources d'Yport (Pays de Caux). Colloque La Craie, objet géologique, réservoir, matériau et paysage, Arras.
- BRACQ P. (1992) - L'effet d'échelle sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif de l'aquifère crayeux - Apports de l'analyse morphostructurale. Thèse Doc. Univ. Lille I. Soc. Géol. du Nord, Publication n° 21 (1994), 244 p.
- BRACQ P., COLBEAUX J.P., MAQSOUUD A., DELAY F. & CRAMPON N. (1992 a) - Vers une nouvelle définition du concept de "Bassin Versant" en pays crayeux fracturé. 5ème Colloque Internat. Hydrologie en Pays Calcaire et en Milieu Fissuré, Neuchâtel & Ann. Scient. Univ. Besançon, Mémoire hors-série n°11, 77-87.
- BRACQ P., HANICH L., DELAY F. & CRAMPON N. (1992 b) - Mise en évidence par traçage d'une relation rapide entre la surface et les eaux souterraines, liée à de sphénomènes de dissolution dans la Craie du Boulonnais (Nord de la France). Bull. Soc. Géol. de France, 1992, 163, n°2, 195-203.
- BRACQ P., CRAMPON N. & COLBEAUX J.P. (1994) - Karstic phenomena in the Chalk of Northern France and particularly in the Nord-Pas-de-Calais Region - Consequences for groundwater flow and quality. 163-178. In Basic and Applied Hydrogeological Research in French Karstic Areas, edited by CRAMPON N. & BAKALOWICZ M., COST 65 Action, "Hydrogeological Aspects of Groundwater Protection in Karstic Areas", European Commission, Bruxelles, 178 p.
- BRACQ P., COLBEAUX J.P. & CRAMPON N. (1996 a) - Apports de l'analyse morphostructurale à la connaissance de la répartition des systèmes karstiques en pays crayeux : application à la délimitation de zone productives dans le Gâtinais (S.E. du Bassin de Paris, France). Ann. Soc. Géol. du Nord, 4 (2ème sér.), 83-90.
- BRACQ P., CRAMPON N., LEBOULANGER T., HANICH L., MAQSOUUD A. & DZIKOWSKI M. (1996 b) - Traçage en milieu crayeux fracturé ou karstifié aux Andelys (Eure, France) : apports de l'analyse morphostructurale. Hydrogéologie, 1996, 1, 15-24.
- CALBA F. (1980) - hydrogéologie du karst crayeux du Pays de Caux (France). Etude de deux bassins. Thèse 3ème Cycle, Univ. Paris VI, 189 p.
- CALBA F., CHARRIERE G., CONRAD G., LEFEBVRE D. & RODET J. (1979) - Relations entre le développement du karst de la craie, la dynamique et la qualité des eaux souterraines du Pays de Caux. Bull. Trim. Soc. Géol. Normandie et Amis Muséum Hist. Nat. du Havre, LXVI (4), 45-68.

Colloques

1971 : Hydrologie en Pays Calcaire - 1er Coll. Internat. Besançon, 8-9 octobre 1971. Actes du Colloque, 348 p.

1976 : Hydrologie en Pays Calcaire - 2ème Coll. Internat. Besançon-Neuchâtel, 7-10 octobre 1976. Ann. Scient. Univ. Besançon, Géologie, Fasc. 25 (3ème sér.), 435 p..

1978 : Hydrogéologie de la Craie du Bassin de Paris - Assoc. Géol. Bassin Paris & BRGM. Coll. Régional. Rouen, 25 & 26 mai 1978. Documents du BRGM n° 1.

1982 : Hydrologie en Pays Calcaire - 3ème Coll. Internat. Neuchâtel-Besançon, 7-10 octobre 1982. Ann. Scient. Univ. Besançon, Géologie, Mémoire n°1, 281 p.

1988 : Karst et Quaternaire de la Basse-Seine - Mont-Saint-Aignan, 14 mai 1988. Actes du Museum de Rouen.

1988 : Hydrologie en Pays Calcaire et en Milieu Fissuré - 4ème Coll. Internat. Besançon, 29 septembre -1er octobre 1988. Ann. Scient. Univ. Besançon, Géologie, Mémoire hors-série n°6, 461 p.

1989 : Chalk - Proceed. Internat. Chalk Symposium. Brighton, 4-7 septembre 1989. Thomas Telford ed., London (1990), 695 p.

1992 : Hydrologie en Pays Calcaire et en Milieu Fissuré - 5ème Coll. Internat. Neuchâtel, 16-18 octobre 1992. Ann. Scient. Univ. Besançon, Mémoire hors-série n°11, 361 p.

1996 : La Craie, objet géologique, réservoir, matériau et paysage - Soc. Géol. du Nord, Soc. Géol. de France, Groupe Français du Crétacé . Arras, 15 & 16 novembre 1996.

CRAMPON N., HANICH L., MAQSOUUD A., BRACQ P. & DZIKOWSKI M. (1992) - Projet de décharge à Harquency - Etude par traçage des relations possibles avec les captages de Radeval (Les Andelys) et d'Harquency (Eure). Rapport Géométra Conseil, 20 p.

CRAMPON N., ROUX J.C. & BRACQ P. (1993 a) - France. Chap. 7, 113-152. In The Hydrogeology of the Chalk of the North-West Europe, edited by DOWNING R.A., PRICE M. & JONES G.P. Oxford Science Publications, Clarendon Press, Oxford, 300 p.

CRAMPON N., ROUX J.C. & BRACQ P. (1993 b) - Hydrogéologie de la Craie en France. Hydrogéologie, 1993, 2, 81-123.

CRAMPON N., ANOUAR K., BRACQ P., CARLIER E., DZIKOWSKI M., HANICH L., POREL G. & WANG H.Q. (1994) - Transport in groundwater flow - Researches on characterization of solute transport in relation with aquifer structure and flow conditions. In Trends in Hydrology, 1 (1994), 257-266. Edited by S.G. PANDALAI, Research Trends, Council of Scientific Information, Trivandrum (India).

CRAMPON N., CUSTODIO E. & DOWNING R.A. (1996) - The hydrogeology of Western Europe : a basic framework. Quarterly Journal of Engineering Geology, 29, 163-180.

- DOERFLIGER N. (1996) - Advances in karstic groundwater protection strategy using tracing tests analysis and multiattribute vulnerability (EPIK method). Thèse Doc. ès Sciences, Univ. Neuchâtel, Suisse), 261 p.
- HANCOCK J.M. (1993) - The formation and diagenesis of chalk. Chap. 2, 14-34, Chap. 3, 35-58. In *The Hydrogeology of the Chalk of the North-West Europe*, edited by DOWNING R.A., PRICE M. & JONES G.P. Oxford Science Publications, Clarendon Press, Oxford, 300 p.
- LASNE E. (1992) - Etude de la structure et du fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique d'un système hydrologique karstique en milieu crayeux - Conceptualisation et modélisation de ce milieu à triple porosité - Exemple du système de sources des Trois Fontaines (Saint-Loup-de-Gonois, Loiret). Thèse Doc. Univ. Orléans, 437 p.
- LEBOULANGER T., LACROIX M., WANG H.Q., FEENY V., DUPONT J.P. & MEYER R. (1996) - Identification des M.E.S. dans les eaux karstiques - Interprétation en termes de traceurs. Colloque La Craie, objet géologique, réservoir, matériau et paysage, Arras.
- LEPILLER M. (1993) - Réflexions sur l'hydrogéologie karstique de la Craie du bassin de Paris à partir d'exemples régionaux (Normandie, Gâtinais). *Hydrogéologie*, 1993, 2, 151-161.
- LEPILLER M. (1996) - La karstification de la Craie : phénomène exceptionnel et spécifique ou processus nécessaire et banal ? le point de vue d'un hydrogéologue. Colloque La Craie, objet géologique, réservoir, matériau et paysage, Arras.
- LLOYD J.W. (1993) - The hydrogeology of the British Chalk. *Hydrogéologie*, 1993, 2, 125-134.
- LOUCHE B. (1996) - Limites littorales de la nappe de la Craie dans la Région Nord Pas-de-Calais - Relations eaux souterraines - eaux superficielles - mer. Thèse Doc. Univ. Lille I, 289 p.
- MANGIN A. (1975) - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doc. Etat, Univ. Dijon. *Annales de Spéléologie*, 29 (3), 283- 332, 29 (4), 495-601, 30 (1), 21-124.
- MANGIN A. (1982 a) - Mise en évidence de l'originalité et de la diversité des aquifères karstiques. 3ème Colloque Intern. Hydrologie en Pays Calcaire, Neuchâtel & Ann. Scient. Univ. Besançon, Mémoire n°1, 159-172.
- MANGIN A. (1982 b) - L'approche systémique du karst, conséquences conceptuelles et méthodologiques. Réunion Monografica sobre el karst, Larra-Isaba, Navarra, 141-147.
- MAQSOUUD A. (1996) - Approche hydrologique et hydrochimique du caractère karstique éventuel d'hydrosystèmes souterrains de la Craie du Bassin de Paris. Thèse Doc. Univ. Lille I, 324 p.
- MAQSOUUD A., BRACQ P., CRAMPON N. & COLBEAUX J.P. (1996) - La craie du Bassin Artois-Picardie peut-elle être karstifiée ? *Ann. Soc. Géol. du Nord*, 4 (2ème sér.), 99-109.
- MEGNIEN C. (1959) - Le karst et la nappe de la craie turonienne et sénonienne du Bassin de la Vanne (Yonne). *Bull. Soc. Géol. de France*, 1 (7ème sér.), 456-460.

MEGNIEN C. (1960) - Observations hydrogéologiques sur le Sud-Est du Bassin de Paris - Les circulations aquifères dans le Jurassique et le Crétacé de l'Yonne. Thèse 3ème Cycle, Univ. Paris. Mémoire BGRM n° 25 (1964), 288 p.

MUDRY J. (1987) - Apports du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés. Thèse Doc. Etat, Univ. Besançon. Ann. Scient. Univ. Besançon, Géologie, Mémoire n°4, 383 p.

PRICE M. (1993) - Groundwater movement in the Chalk aquifer in England. Hydrogéologie, 1993, 2, 147-150.

PRICE M., DOWNING R.A. & EDMUNDS W.M. (1993) - The Chalk as an aquifer. Chap. 3, 35-58. In The Hydrogeology of the Chalk of the North-West Europe, edited by DOWNING R.A., PRICE M. & JONES G.P. Oxford Science Publications, Clarendon Press, Oxford, 300 p.

PRICE M. (1996) - Multi-porosity behaviour in the Chalk aquifer. Colloque La Craie, objet géologique, réservoir, matériau et paysage, Arras.

QUINIF Y., BAELE J.M., CHARLET J.M., DE PUTTER T., DUPUIS C., RORIVE A. & VANDYCKE S. (1996) - A la recherche du karst perdu des craies du Bassin de Mons. Colloque La Craie, objet géologique, réservoir, matériau et paysage, Arras.

RODET J. (1992) - La craie et ses karsts. Thèse Doc. Etat, Univ. Aix-Marseille II. Public. Centre Normand d'Etude du Karst et des Cavités du Sous-sol & Groupe Seine, 560 p.

RODET J. (1996) - Typologie des karsts dans la Craie. Colloque La Craie, objet géologique, réservoir, matériau et paysage, Arras.

ROUX J.C. (1963) - Contribution à l'étude hydrogéologique du Bassin de la Somme. Thèse 3ème Cycle, Univ. Paris, 509 p.

SOMME J. (1980) - Nord de la France : Géomorphologie, Formations superficielles, Quaternaire. Carte à 1/200 000, 2 feuilles polychromes. Institut de Géographie, CNRS Paris.

CONFÉRENCE :

N. CRAMPON

Le problème de la karstification dans les aquifères carbonatés poreux. Cas de la craie.

Intervenant

J.C. ROUX

AIH - Co / BRGM / MSP
BP 6009 - 45060 Orléans Cédex 2

Question ou intervention

Il est relativement normal que, dans les cas présentés, les directions d'écoulement de la nappe de la craie mises en évidence par traçages soient différentes, voire perpendiculaires, de celles établies par les courbes piézométriques.

En effet, les cartes piézométriques utilisées dans les exemples ont été établies à partir d'un nombre de points de mesure très insuffisant et mal répartis dans l'espace. Ceci provenant principalement de la profondeur importante de la nappe (près de 80 m de profondeur à proximité du littoral de la Manche et 50 à 60 m sous les plateaux de la région des Audelys). Il s'agit donc de cartes très générales qui ne reflètent pas les directions d'écoulement dans le détail, notamment les drainages induits par le littoral en pied de falaise (zone du cap Blanc Nez) ou les vallées sèches (zone des Audelys).

Intervenant

J. CORNET

BRGM / CTeau
1039 rue de Pinville - 34000 Montpellier

Question ou intervention

La piézométrie régionale est effectivement insuffisante pour connaître localement les directions d'écoulement. La connaissance de la structure et de la tectonique peut apporter des compléments utiles.

Difficultés de la mise en place des périmètres de protection des captages en milieu karstique L'Exemple du Département de l'Hérault

J. GREVELLEC

Hydrogéologue Départemental
Conseil Général de l'Hérault

Résumé

La mise en place des périmètres de protection en milieu karstique est difficile compte tenu de l'importance des surfaces concernées, de l'hétérogénéité du milieu, de la vitesse de transferts. Ces difficultés sont liées à la définition des périmètres de protection relativement mal adaptée à ce genre d'aquifère. L'hydrogéologue agréé a tendance à vouloir tout protéger par de très grands périmètres de protection rapprochée. Ceci suscitant le plus souvent l'hostilité des populations concernées.

Par ailleurs, ces grands périmètres de protection rapprochée devraient être réservés aux secteurs les plus sensibles aux risques de pollution, le périmètre de protection éloignée s'appuyant lui, le plus possible, sur la réglementation existante. Ceci nécessite de la part de l'hydrogéologue agréé plus de travail et une concertation avec les acteurs concernés par ces périmètres.

Introduction

En 1974, le Conseil Général de l'Hérault mettait en place le Programme de Recherche d'Eau Potable pour les collectivités rurales (Communes, Syndicats de Communes). Ces travaux sont réalisés en Maîtrise d'Ouvrage et Maîtrise d'Oeuvre du Conseil Général.

En 1990, ce programme était complété, avec l'aide financière de l'Agence de l'Eau, par un programme d'aide aux collectivités distributrices d'eau potable pour l'établissement des périmètres de protection et l'autorisation de leurs captages.

En fait, il s'agit là d'une aide administrative et financière au montage du dossier de D.U.P., suivie de l'inscription des servitudes créées par l'Arrêté Préfectoral à la conservation des hypothèques.

Le Conseil Général est donc impliqué dans la gestion et la protection de ses ressources en eaux souterraines depuis de nombreuses années.

Actuellement, l'alimentation en eau potable du Département de l'Hérault est assurée à 90 % par des eaux souterraines, la moitié de celles-ci étant d'origine karstique.

En milieu karstique, il s'agit de captages de sources ou de forages dont les débits d'exploitation sont très divers puisqu'ils vont de quelques mètres cubes/heure à plus d'un mètre cube/seconde (Source du LEZ).

1. Difficultés liées à la définition des périmètres de protection

La loi sur l'Eau du 3 janvier 1992, complétant l'article L.20 du Code de la Santé Publique oblige les collectivités à mettre en place les périmètres de protection des captages qui ne bénéficient pas *"d'une protection naturelle permettant efficacement d'assurer la qualité des eaux"*, ceci pour tous les captages qui n'en disposaient pas à la suite de la Loi du 16 décembre 1964.

Ceci ne va pas sans difficulté pour les ressources karstiques, du fait de la définition même des périmètres de protection, mais aussi de la mise en application des prescriptions émises par l'Hydrogéologue Agréé.

Selon la Circulaire du Ministère de la Santé du 24 juillet 1990, les périmètres de protection viennent compléter la réglementation générale pour préserver les points de prélèvement des risques de pollution provenant des activités exercées à proximité.

Cette même Circulaire précise que : *"vis-à-vis des risques de pollutions accidentelles mettant en jeu des substances dangereuses, toxiques ou indésirables, l'étendue des périmètres est calculée de manière à assurer un temps de transfert de ces substances jusqu'au captage, suffisamment long, permettant ainsi de déclencher l'alerte et d'envisager une intervention en temps utile"*.

Les concentrations mesurées au captage doivent être réduites et maintenues à un niveau acceptable pour la santé publique.

Ce texte prévoit également que, pour les roches calcaires, la protection des eaux captées est à rapprocher, dans ses principes, de la protection des eaux superficielles (périmètre de protection rapprochée réduit, périmètre de protection éloignée rarement nécessaire).

Cependant, dans la pratique, les Hydrogéologues Agréés se réfèrent à la définition des périmètres de protection relatives aux eaux souterraines.

Ainsi, dans le cas des périmètres de protection rapprochée des captages d'eaux souterraines, la Circulaire de 1990 préconise la notion de base suivante pour délimiter ce périmètre de protection :

- ⇒ la durée et la vitesse de transfert de l'eau entre les points d'émission de pollutions possibles et le point de prélèvement dans la nappe ;
- ⇒ le pouvoir de fixation et de dégradation du sous-sol vis-à-vis des polluants ;

⇒ le pouvoir de dispersion des eaux souterraines.

En conséquence, pour l'Hydrogéologue Agréé chargé de la définition des périmètres de protection d'un captage en milieu karstique :

⇒ Le milieu est hétérogène, les vitesses de transfert sont mal connues, elles varient en fonction de l'état de la nappe, tout affleurement un tant soit peu karstifié peut être en relation avec un drain où les circulations sont très rapides. Dans ces conditions, tout affleurement calcaire devient un point possible d'émission de pollution.

⇒ Dans nos régions de garrigues calcaires, l'absence de sols, fait que le pouvoir de fixation et de dégradation vis-à-vis des polluants est très faible, voire nul.

L'ensemble des surfaces calcaires et des zones drainées vers ces sources sont donc considérées à juste titre comme vulnérables et, le plus souvent, l'Hydrogéologue Agréé les englobe dans un périmètre de protection rapprochée qui peut dépasser plusieurs kilomètres carrés, voire plusieurs dizaines de kilomètres carrés (Source des Fontanilles en 1979 et Source du Lez en 1973).

L'évaluation des risques effectifs de pollution et de la protection naturelle est un élément qui n'est généralement pas pris en compte par les Hydrogéologues Agréés : dans notre région, une bonne partie des zones d'affleurements calcaires correspondent à des zones boisées ou à des zones d'élevages extensifs sans risque de pollution majeure.

L'Hydrogéologue Agréé considérera que l'on ne connaît pas l'avenir de ces régions quasi désertiques (terrains actuellement sans grandes valeurs, risques d'aménagements futurs), et que si l'on veut les maintenir dans la situation actuelle, il faut les intégrer au périmètre de protection rapprochée.

Par prudence, l'Hydrogéologue Agréé définira un périmètre de protection rapprochée très vaste englobant toutes ces zones et s'étendant sur plusieurs communes.

Reste donc aux collectivités locales concernées et aux Services de l'Etat à mettre en oeuvre les servitudes créées par ces périmètres.

2. Difficultés liées à l'application des périmètres de protection

2.1. Rappel de la procédure

La collectivité territoriale concernée par le captage existant ou le futur captage va devoir préparer un dossier de **Demande d'Utilité Publique**. Dans ce dossier, le rapport de l'Hydrogéologue Agréé constitue la composante essentielle. Il définit les limites des zones concernées et les futures servitudes. En effet, celles-ci ont pour conséquences des travaux et aménagements à réaliser sur les installations existantes (routes, assainissement ...) pour les améliorer, des indemnités éventuelles liées aux servitudes, dont le coût doit apparaître dans le dossier de D.U.P..

Par la suite, le dossier sera soumis à l'Enquête Publique, si les résultats de cette enquête sont favorables, l'Arrêté Préfectoral est pris après l'avis du Conseil Départemental d'Hygiène.

L'Arrêté de D.U.P. qui institue les servitudes grevant les périmètres de protection devront être annexées aux POS des communes concernées sous 3 mois.

De la même manière, les servitudes du périmètre de protection rapprochée doivent être publiées à la Conservation des Hypothèques. Cette publication se fait à l'échelle de la parcelle et du fichier propriétaire de la Conservation des Hypothèques.

Les conséquences issues de périmètres de protection très étendus sont donc multiples.

2.2. Les réactions des populations concernées :

Les prescriptions formulées par les Hydrogéologues Agréés reviennent bien souvent à des interdictions de construire (quelquefois même sur les constructions existantes), y compris à proximité d'agglomérations (interdiction des canalisations d'eaux usées par exemple).

Certaines prescriptions gelant démesurément le P.O.S. paraissent donc très pénalisantes pour les populations concernées, d'où un rejet catégorique des mesures proposées.

Ainsi, le Captage du Lez avait fait l'objet d'un premier rapport d'Hydrogéologue Agréé en 1973, qui avait suscité une opposition globale des populations et des élus concernés par des périmètres de protection rapprochée et éloignée, s'étendant sur une trentaine de communes.

Un nouvel avis était formulé en 1979 par un autre Hydrogéologue Agréé : le périmètre de protection rapprochée était réduit à moins d'un kilomètre carré et correspondait au bassin géographique de l'aquifère. Dans le périmètre de protection éloignée [très vaste : plus de 400 km²] l'Hydrogéologue Agréé définissait des zones sensibles correspondant aux tracés des principaux talwegs dans lesquels les rejets toxiques étaient interdits. Ces zones sensibles n'ont pas été retenues par l'Arrêté de D.U.P..

En 1989, un dossier concernant une source karstique dont le périmètre de protection rapprochée s'étendait sur plus de 78 km² et concernait 6 communes n'a pas abouti pour les mêmes raisons.

Très récemment, une autre expertise était revue pour l'adapter aux réalités locales.

2.3. Le coût des servitudes et des aménagements liés aux périmètres de protection

S'agissant de grands périmètres de protection, les prescriptions de l'Hydrogéologue Agréé peuvent entraîner des aménagements importants des installations existantes ou des zones à risques (aménagements routiers ...).

De même, elles multiplient les restrictions au droit de propriété et les cas pouvant donner lieu à indemnisation (droit de construire par exemple).

Le coût de ces aménagements et de ces servitudes est à la charge de la collectivité qui demande la D.U.P.. Il vient s'ajouter au coût du projet proprement dit.

Cette évaluation économique du projet est un élément essentiel du dossier de D.U.P., et dans ces conditions, peut constituer un élément limitant à l'utilisation des ressources karstiques par rapport à l'utilisation d'autres ressources (eaux de surface par exemple).

Ceci a entraîné, dans des zones trop urbanisées l'abandon de certains aquifères karstiques pour la production d'eau potable.

2.4. Annexion au POS :

L'Arrêté de D.U.P. étant pris, les périmètres de protection doivent être annexés aux Plans d'Occupation des Sols des communes concernées sous 3 mois.

Selon la Circulaire du 24 Juillet 1990, les terrains constituant un périmètre de protection rapprochée doivent être classés en zone NC (zones de richesse économique ou naturelle).

Ceux du périmètre de protection éloignée en zone naturelle ND ou NC, voire NB (zone d'habitats très diffus).

De grands périmètres de protection rapprochés englobant des zones agglomérées sont donc, à priori, incompatibles avec les Plans d'Occupation des Sols. De plus, lorsque les prescriptions des Hydrogéologues Agréés représentent une restriction au droit de propriété, car contraire au règlement du POS, le propriétaire des parcelles concernées est en droit de demander une indemnisation (interdiction ou limitation au droit de construire dans les conditions initiales de délivrance du permis de construire).

2.5. La publication des servitudes aux hypothèques

Cette publicité foncière est obligatoire pour les interdictions et recommandations imposées dans le périmètre de protection rapprochée (restriction à l'exercice du droit de propriété).

Elle doit donc se faire à l'échelle de la parcelle et nécessite parfois, en limite de périmètre, le découpage de parcelles existantes.

Il s'agit d'une procédure lourde et coûteuse, pratiquement irréalisable pour des périmètres de protection rapprochée dépassant une quinzaine de kilomètres carrés (soit plus de 2000 parcelles et de 2000 propriétaires).

Le coût de la publicité foncière est fonction du nombre de propriétaires (de l'ordre de 200 F. par propriétaire).

3. Comment définir les périmètres de protection en milieu karstique

L'hétérogénéité des aquifères karstiques, l'importance des surfaces concernées rendent donc difficile la mise en place des périmètres de protection des captages.

Les textes dont dispose l'Hydrogéologue Agréé pour définir des périmètres de protection sont plutôt mal adaptés à ce type d'aquifères.

Par prudence, il a tendance à vouloir imposer une protection maximum :

- **contre les risques de pollutions diffuses** : dans notre région, il s'agit essentiellement de pollutions bactériologiques, ceci bien que naturellement la qualité bactériologique de ces eaux soit relativement bonne et que tous ces captages soient dotés de station de désinfection ;
- **contre les risques de pollutions accidentelles** : en considérant que toute zone d'affleurement, même quasiment inoccupée, est un secteur à risque potentiel.

On se retrouve donc avec de grands périmètres de protection rapprochée qu'il est difficile à mettre en oeuvre. Pour toutes les raisons évoquées précédemment, et contrairement aux préconisations de la Circulaire de 1990 pour les eaux superficielles, il serait préférable de faire l'économie de grands périmètres de protection rapprochée, en affectant le maximum de surface possible en périmètre de protection éloignée.

En effet, ce dernier peut se justifier lorsque l'instauration de prescriptions particulières est de nature à réduire les risques de pollution de façon significative.

Ceci est possible en s'appuyant déjà sur la réglementation existante :

- **la loi sur l'Eau de 1992 et ses décrets d'application** ont considérablement renforcé les normes de rejet dans le milieu naturel ; ainsi, à titre d'exemple, un gros effort est fait ces dernières années au niveau des routes départementales par le Conseil Général pour traiter les eaux de ruissellement des chaussées de routes, en fonction du milieu naturel concerné ;
- **les P.O.S.** réglementent déjà sur les territoires communaux de nombreuses activités (assainissement, constructions, carrières ...). Dans les zones ND, NC et parfois NA cette réglementation peut répondre, pour une bonne part, aux exigences d'un Hydrogéologue Agréé.

Il est préférable, quand on le peut, de réserver les périmètres de protection rapprochée aux secteurs les plus sensibles aux risques de pollution (zones de pertes ou de rejets ...). Ceci revient à créer des périmètres de protection rapprochées satellites ciblant les zones à risques majeurs.

En complément de ces périmètres de protection, il faut prévoir des dispositifs d'alerte (plan CODIS par exemple) en cas de pollutions accidentelles. Ceux-ci peuvent intéresser des surfaces plus importantes que les périmètres de protection et sont faciles à mettre en oeuvre.

Dans tous les cas, la mission confiée à l'Hydrogéologue Agréé va être plus difficile et délicate que lorsqu'il s'agit des autres aquifères.

Cela va concerner des étendues relativement importantes, et compte tenu des conséquences économiques des prescriptions qu'il va formuler, le travail de l'Hydrogéologue Agréé va demander :

- **plus de temps** (étude des P.O.S. des différentes communes, bibliographie ...) ;
- **plus de concertations** avec les acteurs concernés par les périmètres de protection, en particulier les élus communaux, éventuellement les représentants des éleveurs et des agriculteurs, services en charge des routes ...

Sans cette concertation, les prescriptions de l'Hydrogéologue Agréé risque d'être mal comprises, voire rejetées ; les exemples passés le prouvent. Ceci constitue le principal risque d'échec de la procédure de D.U.P..

Références Bibliographiques

Circulaire du 24 juillet 1990 relative à la mise en place des périmètres de protection des points de prélèvements d'eau destinée à la consommation humaine (Art. L.20 du Code de la Santé Publique)

Loi n° 93-3 du 3 janvier 1992 sur l'Eau

Circulaire n° 1 du 8 janvier 1993 concernant l'article 13-1 complétant les dispositions de l'article L.20 du Code de la Santé Publique

Décret n° 93-742 du 29 mars 1993 relatif aux procédures d'autorisation et de déclaration prévue à l'article 10 de la Loi sur l'Eau

Décret n° 95.363 du 5 avril 1995 modifiant le décret du 3 janvier 1989 modifié relatif aux eaux destinées à la consommation humaine

Code de la Santé Publique, Titre 1er mesures sanitaires générales, Chapitre III des eaux potables

Avis hydrogéologiques et sanitaires relatifs à la définition des périmètres de protection de captages du Département de l'Hérault

Bulletin de liaison des Hydrogéologues Agréés du Département de l'Hérault n° 1 - Avril 1993 et n° 2 - Septembre 1994

D.D.A.S.S. de l'Hérault - 1995 - Alimentation en Eau Potable des Collectivités Publiques : procédure administrative préalable à l'autorisation de réaliser et exploiter un captage d'eau destinée à la consommation d'eau humaine

DELTOUR P. - 1994 - prise en compte dans les P.O.S., Journées périmètres de protection des captages d'eau destinées à la consommation humaine

DROGUE C. - 1969 - Contribution à l'étude quantitative des systèmes hydrologiques karstiques d'après l'exemple de quelques karts périméditerranéens - Thèse de Doctorat Etat Sc. Nat. - 482 p. Montpellier

LALLEMANT-BARRES A., ROUX J.C. - Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eaux souterraines destinées à la consommation humaine, manuels et méthode n° 19 - Editions du B.R.G.M.

MANGIN A. - 1975 - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques - Thèse Doct. Etat - Dijon Ann. Spéléo 1974, 29.3 et 29.4 ; 1975 , 30.1

MOREL C. - 1994 - Prescriptions à l'intérieur des captages d'eau destinée à la consommation humaine, Journées périmètres de protection des captages d'eau destinés à la consommation humaine.

CONFÉRENCE :

J. GREVELLEC

Difficulté de la mise en place des périmètres de protection des captages en milieu karstique. L'exemple du département de l'Hérault.

Intervenant

P. BERARD

BRGM / SGR Languedoc-Roussillon
1039 rue Pinville - 34000 Montpellier

Question ou intervention

En terrains karstiques, il convient d'être excessivement prudent et d'adapter les aménagements en fonction des secteurs les plus vulnérables (ex. autoroutes, eaux usées, assainissement). Propositions :

- création de commissions *ad hoc* de réflexion à la demande de l'hydrogéologue agréé,
- mise en place de dispositifs d'alerte, "truitomètre" sur les captages ou autres

LE KARST DE LA ROCHEFOUCAULD. UN EXEMPLE DE GESTION PREVISIONELLE D'UN AQUIFERE KARSTIQUE

B.de Grissac *, M.Laroque** et M.Razack**

* Chargé de mission, Conseil Général de la Charente, Hôtel du Département, 31 BdEmile Roux, BP 1404, 16017 Angoulême cedex

**Laboratoire d'Hydrogéologie, URA CNRS 721 HydrASA, Université de Poitiers, 40 avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers cedex, e-mail razack@hydrogeo.univ-poitiers.fr

Introduction

L'aquifère karstique de La Rochefoucauld, situé dans le Département de la Charente, s'étend sur plus de 450 km² entre Angoulême et la marge occidentale du Massif Central (Fig.1). Cet aquifère renferme d'importantes ressources en eaux exploitées pour l'industrie, l'agriculture et l'AEP des collectivités. La contribution de l'eau des résurgences de cet aquifère au débit du fleuve Charente est également importante. Les pouvoirs publics ont très vite constaté le besoin d'une gestion active de ces ressources pour préserver l'équilibre entre le fonctionnement hydrologique du système et la satisfaction des besoins multiples. Cette nécessité de gérer les ressources intervient notamment en période estivale lorsque les niveaux piézométriques sont bas et les besoins en agriculture élevés.

La source de la Touvre (l'expression 'source de la Touvre' recouvre un ensemble constitué par trois points de sortie: le Bouillant, le Dormant et la Fontaine de Lussac) est la principale résurgence de cet aquifère. C'est par son débit annuel moyen (13.5 m³/s) la deuxième résurgence de France. Elle alimente en eau potable l'agglomération urbaine d'Angoulême (>100 000 habitants) et contribue de manière importante au débit du fleuve Charente. *La gestion de l'exploitation du karst vise un objectif bien précis, celui d'assurer en période d'étiage un débit minimum à la source de la Touvre.* Cette gestion est à l'heure actuelle basée sur un outil numérique statistique qui permet d'estimer le débit à la Touvre en fin d'étiage (vers la mi-septembre) à partir de mesures du niveau de la nappe dans un piézomètre de référence.

Cependant la diversité des utilisateurs aux intérêts parfois contradictoires donne indéniablement à ce problème de gestion un caractère multi-critères. La gestion multi-critères des eaux souterraines repose avant tout sur une connaissance suffisante de l'aquifère. D'autres travaux ont dans ce sens été entrepris afin d'acquérir une connaissance physique suffisante du système karstique et élaborer un modèle mathématique distributif de simulation et de gestion de cet aquifère.

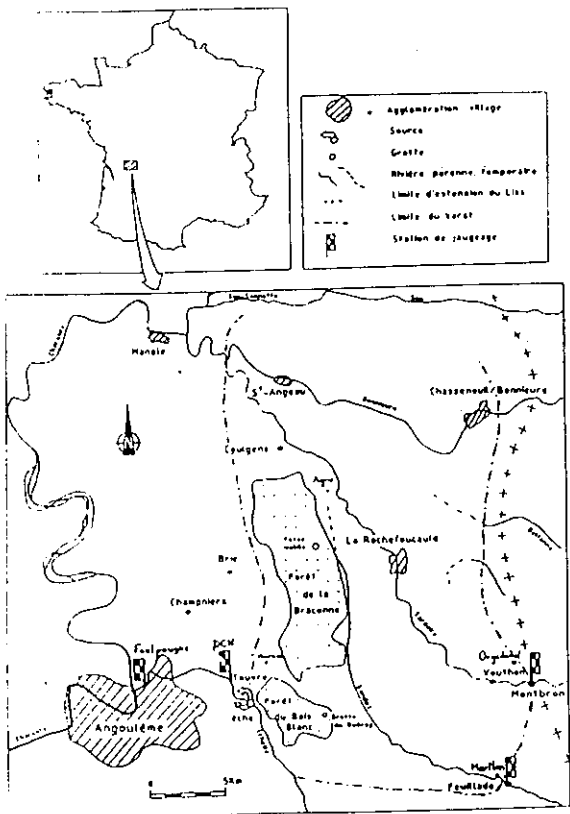


Figure 1 - Localisation géographique du karst de La Rochefoucauld

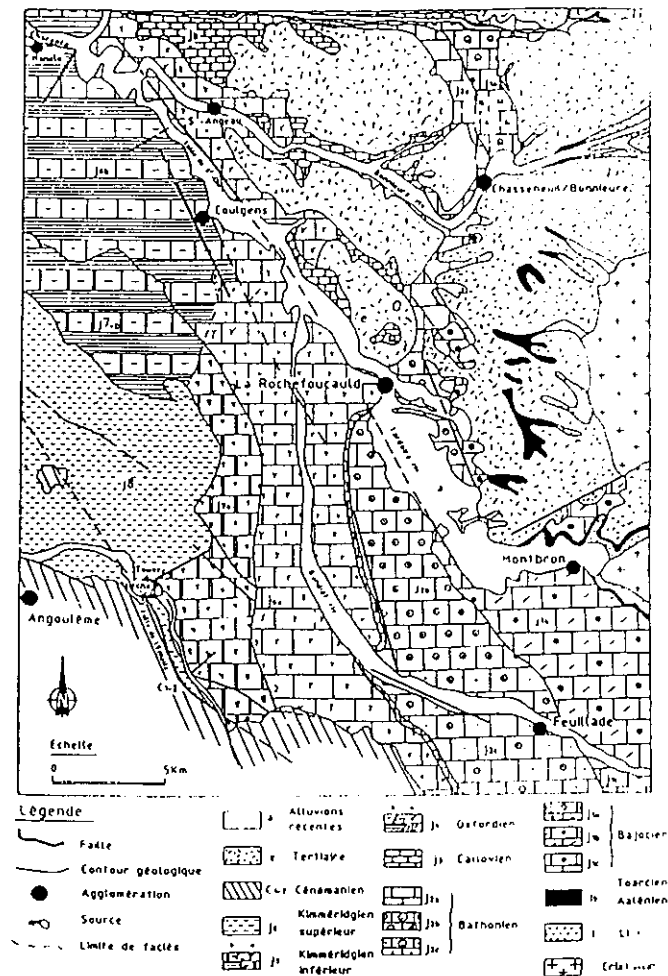


Figure 2 - Contexte géologique du karst de La Rochefoucauld

Contexte hydrogéologique et ressources en eaux.

L'aquifère karstique est développé dans les formations carbonatées du Jurassique moyen et supérieur (Bajocien au Kimméridgien inférieur, Fig.2). Ces formations sont très fracturées et karstifiées. Le résultat des différents épisodes tectoniques (tectonique hercynienne et pyrénéenne) en jeux et rejeux, distensifs et/ou compressifs, a abouti à une structure actuelle relativement complexe, sous forme d'une succession de panneaux effondrés de l'Est vers l'Ouest. La karstification affecte principalement les calcaires récifaux de l'Oxfordien et du Kimméridgien. Les formations du Jurassique moyen sont par contre moins intensément karstifiées.

L'importante faille de l'Echelle, de direction NW-SE, met en contact l'aquifère avec l'épaisse série des marnes et calcaires marneux du Kimméridgien supérieur et les argiles du Cénomanién, créant un barrage souterrain aux écoulements. Les eaux remontent en surface à la faveur de cet accident et forment l'ensemble des sources de la Touvre.

Un relevé piézométrique, effectué en basses eaux (septembre 95), est reporté sur la figure 3. La nappe est libre dans la quasi-totalité de l'aquifère. On observe cependant des mises en charge sous les calcaires marneux du Kimméridgien et sous les argiles du Cénomanién. L'écoulement général de la nappe se fait d'Est en Ouest vers la Touvre, avec des gradients allant de 0.7% en amont de Marthon jusqu'à 0.16 % entre Marthon et la Touvre. Dans la zone de La Rochefoucauld, des gradients plus élevés (2%) sont mis en évidence. Ce relevé montre les relations entre les rivières (Tardoire, Bandiat, Bonnieure) et la nappe. La Tardoire commence à être perchée en aval de Rochebertier et se détache rapidement de la nappe. La liaison entre le Bandiat et la nappe disparaît à hauteur de Chazelles. Les relations avec la Bonnieure sont moins bien établies. En période de hautes eaux (Fig. 4; piézométrie de mars 1994, relevée par Hydro-Invest), les relations sont bien différentes. Le Bandiat reste par exemple en liaison directe avec la nappe. La surface piézométrique change ainsi de morphologie entre les périodes de hautes eaux et de basses eaux. Le bassin hydrogéologique du karst déduit de la piézométrie présente une superficie de 615 km² en basses eaux et de 495 km² en hautes eaux.

L'établissement d'un bilan annuel hydrique sommaire, d'après les données fournies par l'Entreprise Hydro-Invest (1991), permet de se rendre compte des ressources disponibles. Ce bilan est présenté ci-dessous sous la forme d'un tableau.

ENTREE		SORTIES	
Pluie brute	471,7	Evapotranspiration	306,6
Tardoire à Montbron	194,6	Touvre	438,9
Bandiat à Feuillade	124,5	Tardoire à Coulgens	112,8
Pertes Bonnieures	34,7	Prélèvements	13,7
Echelle	5		
Autres pertes	9,5		
Total	840	Total	872

Tableau 1. Bilan hydrique annuel moyen du karst de La Rochefoucauld (en hm3).

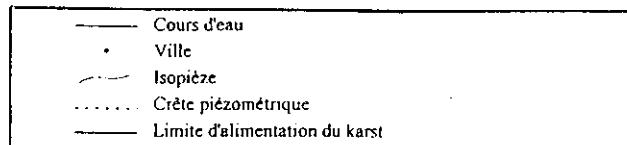
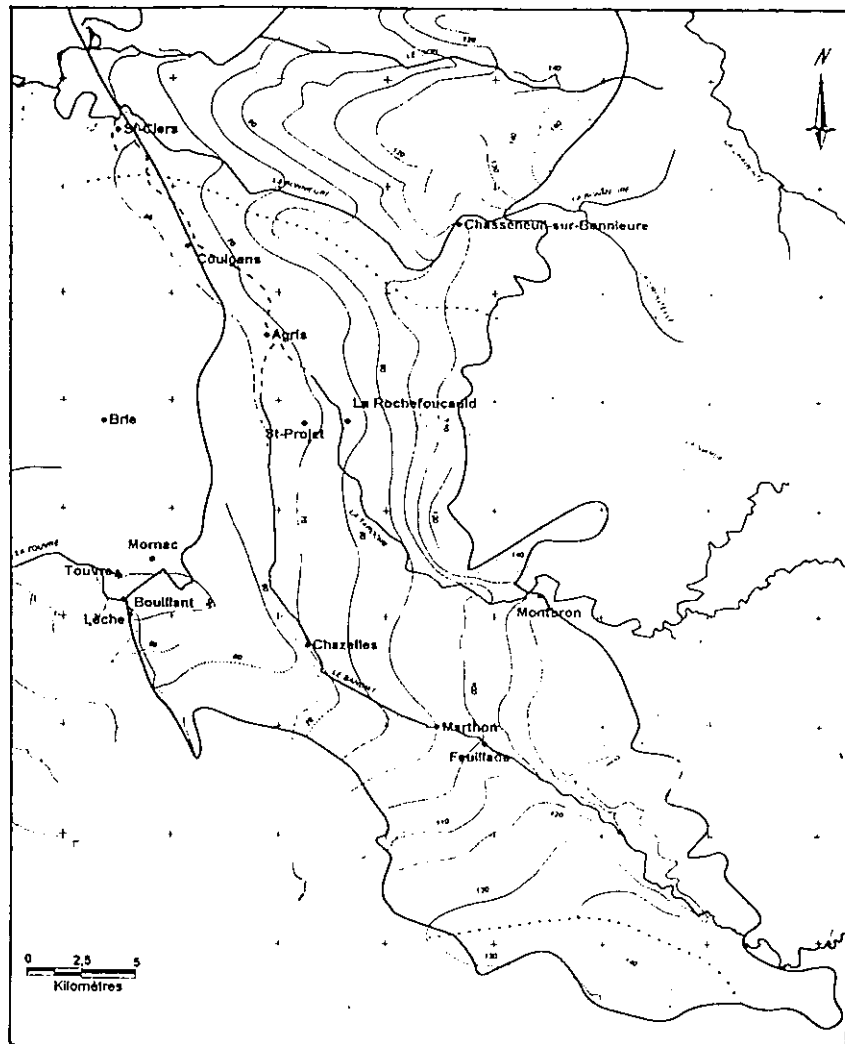


Figure 4 - Relevé piézométrique en hautes eaux
(mars 94 - Hydro-Invest)

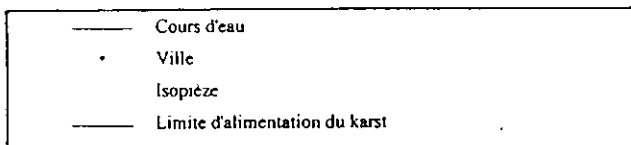
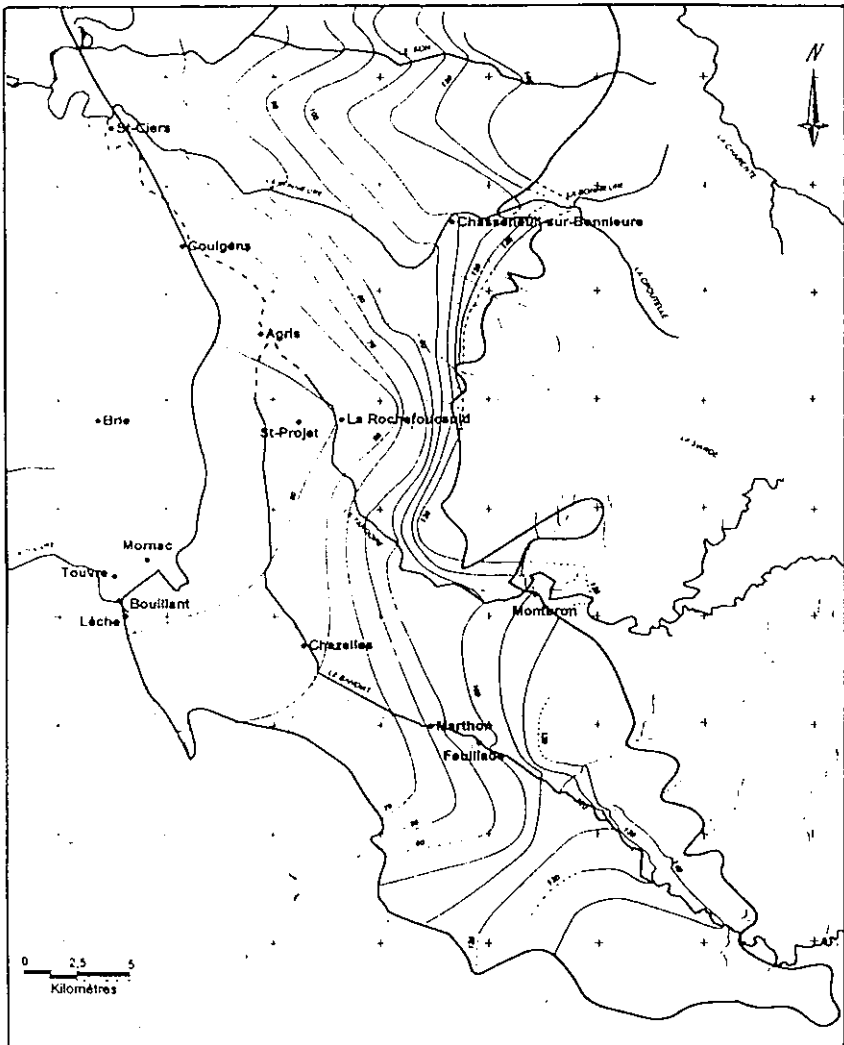


Figure 3 - Relevé piézométrique en basses eaux
(septembre 95 - LHUP)

La différence entre les entrées et sorties, égale à 32 hm³ (soit #1m³/s) provient pour une bonne part de l'imprécision liées aux données. On peut toutefois émettre l'hypothèse qu'une partie du débit entrant qui manque correspond aux pertes occultes dans la partie occidentale du karst, au nord des sources de la Touvre.

Les prélèvements sont composés de 300 10³ m³ pour les industries, de 9300.10³ m³ pour les collectivités et de 4156.10³ m³ pour l'agriculture.

Gestion prévisionnelle actuellement en service

Objectif de gestion

Rappelons que l'objectif de gestion est d'assurer un débit minimum aux sources de la Touvre dont dépend l'agglomération d'Angoulême pour son alimentation en eau potable.

Données disponibles

Les données disponibles sont constituées pour les sources de la Touvre par des mesures hebdomadaires de débit instantané depuis 1949 à la DCN de Ruelle (arsenal militaire situé à 3,8km à l'aval des sources) et par des mesures en continu réalisées par la DIREN sur la station de jaugeage de Foulpougne située à 9,5 km à l'aval des sources. Pour le karst on dispose de mesures piézométriques journalières (ou de fréquences supérieures) sur un certain nombre de piézomètres. Huit piézomètres sont reliés au réseau régional, dont deux appartiennent au Conseil Général et présentent un intérêt particulier: i) le piézomètre de La Rochefoucauld (mesures manuelles journalières de 1976 à 1989 puis mesures automatiques horaires depuis 1989); ii) le piézomètre de Mornac situé à 2 km à l'amont des sources, en service depuis 1991, donne des mesures de niveau au mm. Il est influencé par toutes les modifications du niveau du plan d'eau à l'émergence des sources.

Construction de l'outil

La construction de l'outil statistique prévisionnel est faite en deux temps.

- i) Prévision des niveaux piézométriques à moyen terme. A partir des chroniques disponibles, une décrue théorique non influencée par des précipitations a été reconstruite pour le piézomètre de La Rochefoucauld (Fig.5). Un polynôme de degré 3 a été ajusté à cette courbe. A noter que cette courbe de vidange est tracée en absence de pluie. Elle correspond à la situation la plus pessimiste, que toute pluie améliore. Ce qui est un important élément de sécurité.
- ii) Estimation des débits à partir d'un niveau piézométrique. A partir des mesures de niveau à La Rochefoucauld et des mesures de débit de la Touvre à la DCN de Ruelle et de Foulpougne, une équation d'estimation d'un débit minimal à partir du niveau piézométrique a été élaborée (corrélation et régression linéaire).

Ainsi à partir des mesures de niveau de la première quinzaine de juin, une prévision de niveau à La Rochefoucauld est faite à la mi-septembre. L'équation de régression niveau-débit permet ensuite d'établir une prévision de débit à la Touvre. L'outil prévisionnel permet donc, à chaque instant, de prévoir l'état de la source, dans la pire hypothèse (absence de pluie) à la fin de l'été

Utilisation comme outil de réglementation

Les restrictions d'utilisation correspondent donc à des courbes qui se terminent donc à différents niveaux au 15 septembre. Ces valeurs, largement discutées, sont acceptées par tous les partenaires de la gestion.

Les débits objectifs déclenchant les restrictions sont les suivants:

- $Q > 6 \text{ m}^3 \Rightarrow$ pas de restriction
- $6 > Q > 3,5 \text{ m}^3/\text{s} \Rightarrow$ sensibilisation, auto-réduction
- $3,5 \text{ m}^3/\text{s} > Q > 2,8 \text{ m}^3/\text{s} \Rightarrow$ interdiction de l'irrigation 8h/jour
- $Q < 2,8 \text{ m}^3/\text{s} \Rightarrow$ interdiction totale

La robustesse des fonctions intervenant dans l'outil de réglementation a pu être testée grâce à des chroniques de données suffisantes et surtout à la bonne sensibilisation des usagers. Les points forts de cette gestion sont :

- la fiabilité et la lisibilité des mesures qui sont accessibles par un simple Minitel à tous les usagers
- le caractère prévisionnel de cette gestion, orientée vers la fin de la saison de l'été.

Des travaux sont en cours pour améliorer la fiabilité prévisionnelle de ce type d'outil, en testant d'autres points de mesures dans le karst, notamment le piézomètre de Mornac.

Modélisation du système karstique.

Outre l'outil statistique précédemment décrit, les gestionnaires de la ressources souhaitent se doter d'outils de gestion plus sophistiqués, compte tenu de la nature multi-critères du problème. D'autres travaux ont donc été entrepris visant l'élaboration d'un *modèle distributif de simulation et de gestion du système karstique*. Un tel modèle intègre les propriétés physiques du système. Son caractère opérationnel repose bien évidemment sur sa représentativité par rapport au système naturel.

Préalablement aux travaux de modélisation, les données disponibles (pluies, débits, piézométries) ont été traitées à l'aide des *méthodes d'analyses corrélatoire et spectrale* (travaux réalisés en collaboration avec A.Mangin, Laboratoire Souterrain du CNRS, Moulis). Ces analyses préliminaires permettent en effet d'orienter le choix des hypothèses simplificatrices à introduire dans la modélisation. Les résultats de ces analyses ne sont pas reportés ici. Ils ont permis d'appréhender l'importance relative des écoulements rapides et lents qui ont lieu dans l'aquifère et de relativiser le degré de karstification du système. Il reste cependant que les connaissances quantitatives sont encore très insuffisantes sur ces 2 types d'écoulement, sur leurs interactions et sur leurs variations dans le temps et dans l'espace.

Les travaux de modélisation sont à l'heure actuelle dans leur première phase. L'approche choisie est simplifiée et repose sur l'hypothèse d'un milieu continu, d'un régime laminaire et d'une échelle de travail suffisamment grande pour englober le volume élémentaire représentatif. Le domaine modélisé, les différentes limites géographiques sont représentés sur la figure 6. Les paramètres du modèles ont été déterminés comme suit:

- discrétisation du domaine: mailles carrées 500m*500m,
- épaisseur de l'aquifère définie d'après les coupes de forages disponibles.

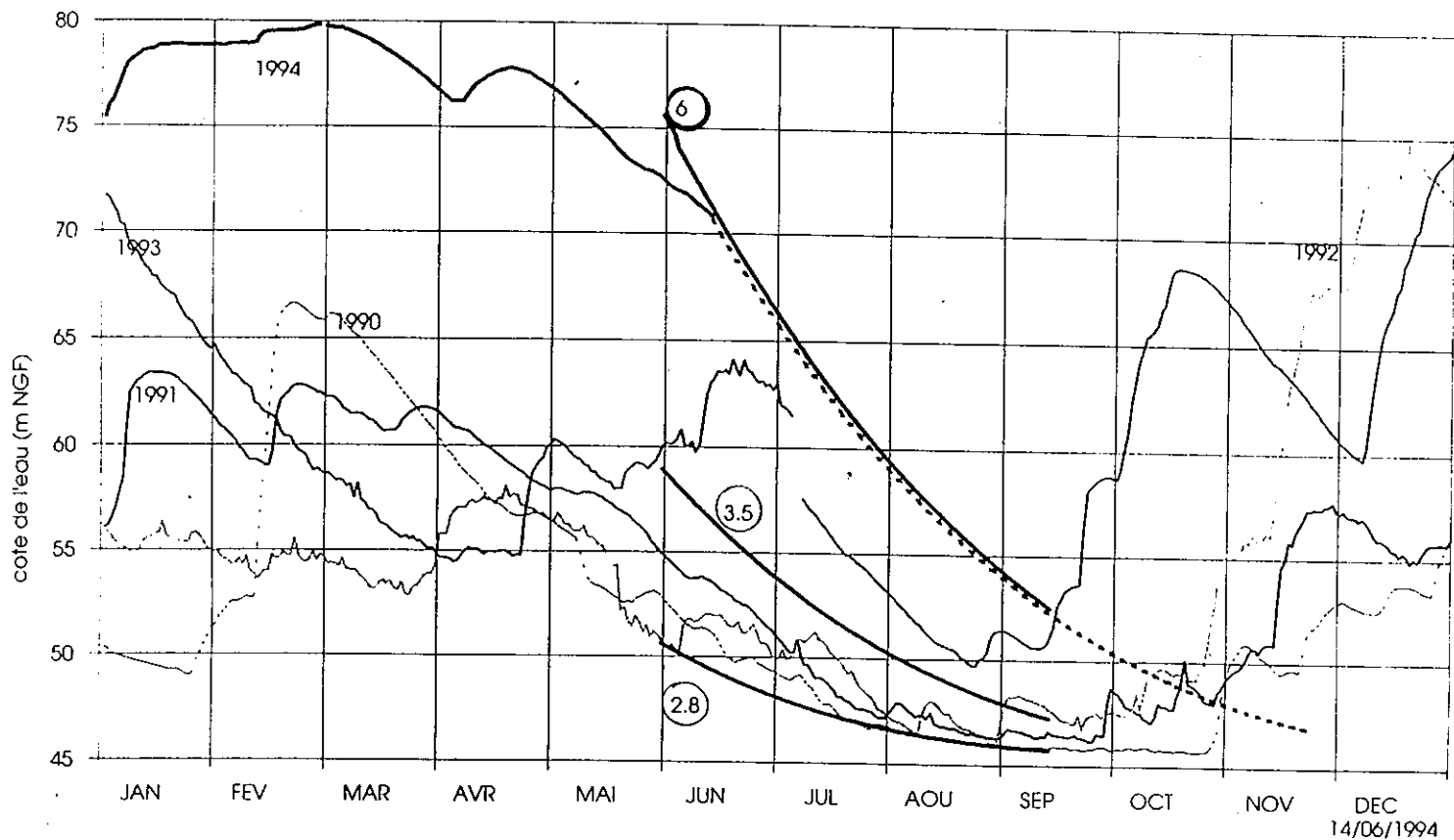


Figure 5 - Fluctuations piézométriques enregistrées sur le forage de La Rochefoucauld
et ajustement d'un polynôme de degré 3 sur la courbe de vidange.
(les débits correspondant à la Touvre sont entourés)

- conditions sur les limites: limite Est (contact calcaire-socle) à flux nul; limite Ouest à flux nul sauf sur le secteur des sources de la Touvre; limite Nord à flux nul formée par la ligne de partage des eaux; limite Sud à flux nul, formée par la limite de partage des eaux,.
- représentation des rivières: selon leur liaison avec la nappe, les rivières sont représentées par des mailles à charge imposée ou à flux imposés ;
- représentation des sources: les sources de la Touvre et de la Leche sont représentées par une limite à charge imposée;
- évaluation de la recharge: elle a été faite sur la base d'un bilan hydrique sommaire du sol (couche de sol de 1m dans laquelle il y a une évapotranspiration avec une RFU donnée);
- prélèvements: introduits dans le modèle en fonction des données disponibles;
- Conductivités hydrauliques: les caractéristiques hydrodynamiques déterminées par pompage d'essai pour le karst sont ponctuelles et représentent difficilement la grande hétérogénéité spatiale du milieu. Les conductivités hydrauliques ont donc été déduites par ajustement.

La modélisation a d'abord été effectuée en hautes eaux. La figure 7 illustre la piézométrie simulée. La concordance entre les courbes simulées et observées est assez bonne. Les débits observés à la Touvre sont bien reconstitués: Sans qualifier le modèle de représentatif, ces premiers résultats sont assez encourageants et incitent à approfondir la modélisation. Des méthodes numériques plus appropriées à la modélisation d'un milieu fortement hétérogène sont en cours d'application.

Conclusion.

Il est bien évident que la nécessité de se doter d'outils de gestion des ressources en eau d'origine karstique n'est plus discutable, compte tenu de la diversité des utilisateurs et de l'augmentation des besoins. L'exemple du karst de La Rochefoucauld montre qu'un outil prévisionnel simple peut être construit et conduire à une action de gestion active visant un objectif bien précis. L'élaboration d'outils plus complet, tenant compte de la nature multi-critères du problème de gestion, passe par la connaissance et la modélisation du système karstique. Quelle quantité d'informations doit-on avoir à disposition pour prétendre 'connaître' un système karstique? La question est posée.

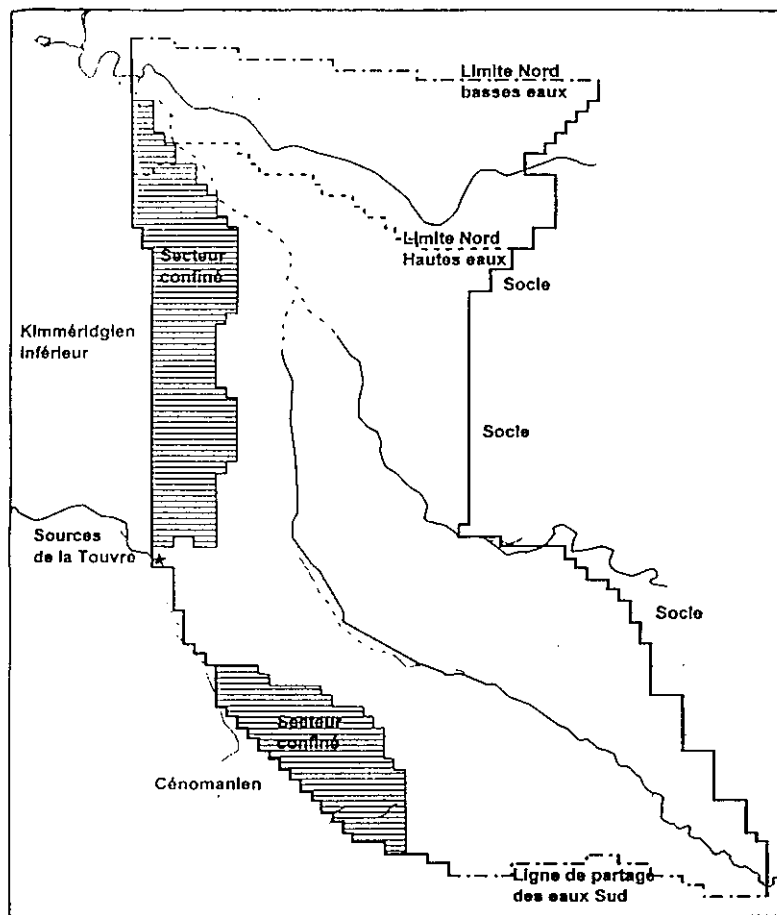


Figure 6 - Délimitation de l'aquifère en vue de la modélisation

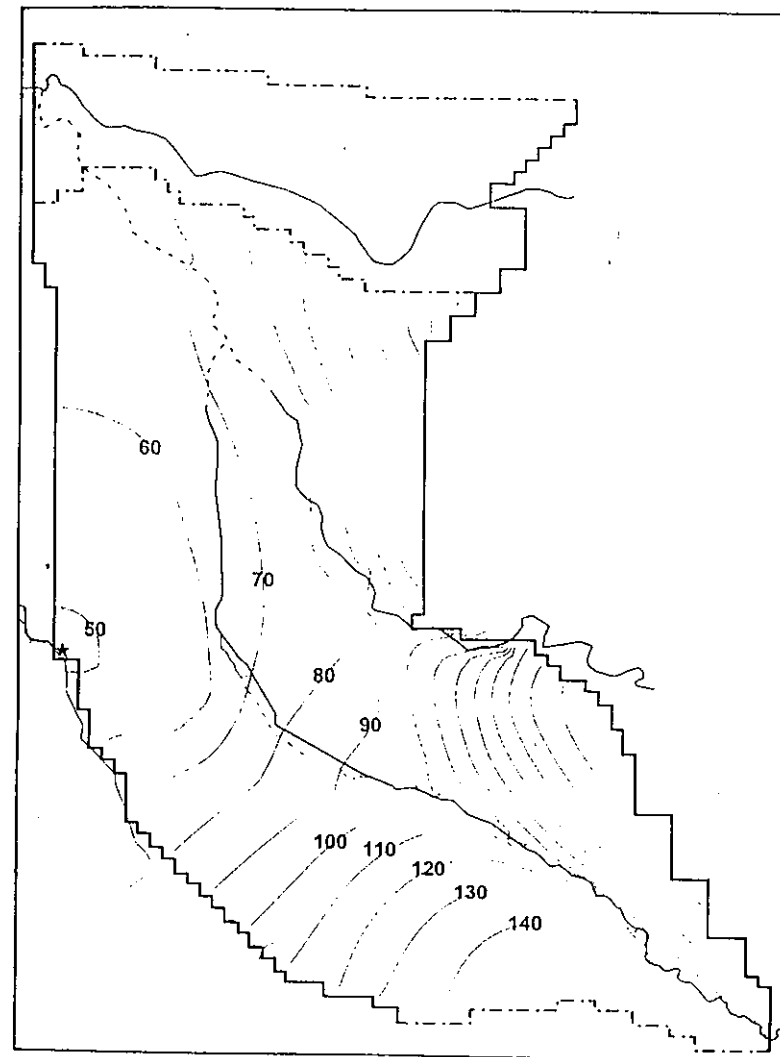


Figure 7 - Piézométrie simulée en période de hautes eaux

Le karst de la Loue et ses relations avec le Doubs (Franche-Comté)

Jean-Pierre METTETAL (1) et Jacques MUDRY (2)

(1) Direction Régionale de l'Environnement de Franche-Comté, 5 rue Sarraill, BP 137, 25014 BESANCON
CED ; (2) Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée, Place Leclerc, 25030 BESANCON CEDEX

Résumé

Démontrée en 1901 par le premier traçage à l'absinthe de l'histoire, la communication entre les pertes du Doubs à Pontarlier et la célèbre source de la Loue fait depuis cette période l'objet d'un conflit d'usage entre les riverains des deux cours d'eau. La connaissance de la relation a été récemment améliorée par une étude de 1,6 MF cofinancée par l'Agence de l'Eau RMC et le Syndicat mixte Saône-Doubs, confiée à la DIREN de Franche-Comté.

Le contexte structural révèle le rôle de l'accident de Pontarlier sur le mur marneux de la série du Malm ("canyon").

L'hydrochimie et l'hydrologie isotopique apparentent la source de la Loue aux eaux du Haut-Doubs plissé malgré sa situation au sein de l'ensemble karstique des plateaux.

D'un point de vue hydrologique, les 13 limnigraphes et piézographes installés permettent d'estimer à 1/3 le débit de la Loue en provenance des pertes du Doubs en période d'étiage.

La prospection géophysique détaillée (géoradar, magnétisme, microgravimétrie et électrofiltration) montre que les pertes du Doubs sont nombreuses et de faible importance chacune.

Cette connaissance du fonctionnement du système Haut-Doubs - Loue permet de proposer des aménagements destinés à conserver au Doubs son aspect naturel (débit minimum de 500 l/s), sauf en cas de grand étiage où les dérivations étanches seraient court-circuitées pour réalimenter les pertes.

1. Historique et problématique

A l'aval de la ville de Pontarlier (fig. 1), le cours du Doubs s'assèche en période d'étiage. Divers projets dont le relèvement du niveau du lac Saint-Point ont été envisagés dès 1863 pour remédier à cet assèchement estival. La source de la Loue, utilisée depuis le Haut Moyen-âge comme force motrice (moulins ...), est la quatrième émergence de France. A partir de 1873, diverses études sont menées (Fournier, 1913).

Un traçage avec 5 tonnes de sel a été pratiqué dans l'écoulement du Doubs-même, lorsque le cours d'eau se perdait totalement. Un important sous-écoulement a permis sa restitution dans le Doubs à l'aval, la faible quantité de traceur directement passée dans les pertes n'ayant pas été détectée à la source de la Loue. En 1900, une importante sécheresse met en chômage les usiniers de la vallée du Doubs.

Le 11 août 1901, l'usine Pernod brûle à Pontarlier et 1 million de litres d'absinthe sont déversés dans le Doubs et dans le substratum. Deux jours après injection du traceur, la source de la Loue avait une odeur et une saveur prononcées d'anis. Le chimiste Marcellin Berthelot, secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, concluait [qu'] "aucun corps de ce genre ne saurait préexister dans une eau naturelle". Voyant ce résultat, les riverains du Doubs commencèrent à obturer les pertes les plus visibles.

La relation Doubs-Loue fut confirmée par Fournier, Martel et Maréchal par un traçage avec 100 kg de fluorescéine effectué en 1910. Le traceur ayant été injecté dans une vraie perte, aucune trace ne fut détectée dans le Doubs à l'aval. A l'issue de cet essai, Fournier concluait qu'il ne servait à rien de colmater les pertes : cela priverait la Loue, sans aucun profit pour le Doubs, de tout le surplus des eaux moyennes ; les crues seraient aggravées à l'aval.

En 1901, la relation entre le gouffre de Jardel et la source, et en 1979, la communication entre la perte des égouts de Sombacour et la source de la Loue furent démontrées, prouvant ainsi l'existence d'un impluvium propre à cette émergence sur le plateau de Levier.

Le problème posé est de maintenir à la fois un écoulement à l'aval de la zone de pertes et dans la haute Loue.

2. Contexte hydrogéologique

La source de la Loue est située au fond d'une profonde reculée de Jurassique supérieur entaillée dans le plateau de Levier. La haute vallée du Doubs est entièrement incluse dans la Haute Chaîne du Jura, succession d'anticlinaux de Jurassique supérieur calcaire et de synclinaux crétacés où alternent calcaires et marnes, souvent recouverts par des dépôts quaternaires (alluvions, moraines, tourbières, fluvio-glaciaire...). La dénivelée entre la zone des pertes et la source de la Loue est de 275 m, mais d'importants noyaux marneux anticlinaux (Mont Pelé et Mont des Uzières) barrent les écoulements entre les pertes et la Loue (fig. 2). Seule la zone broyée matérialisant le passage de l'accident de Pontarlier est susceptible de livrer un passage aux eaux (Chauve *et al.*, 1995). Cet accident subméridien qui tronçonne toute la Haute Chaîne du Jura présente la particularité de limiter deux compartiments dont les axes de plis ne se correspondent pas, leur nombre et leur géométrie variant entre les compartiments est et ouest.

D'un point de vue traçage naturel, les valeurs d'oxygène-18 de la Loue (Blavoux *et al.*, 1979 ; Mudry, 1987) apparentent cette source au domaine plissé de la Haute Chaîne, alors que toutes les autres émergences de la vallée de la Loue appartiennent au type "plateau". Le traitement multivariables de la physico-chimie (Mudry *et al.*, 1979) apporte la même discrimination (fig. 3), la Loue présente une chimie caractéristique des eaux du Haut-Doubs.

A l'issue de ces résultats hydrogéologiques demeuraient plusieurs problèmes en suspens :

- si l'accident de Pontarlier permet le passage des eaux perdues par le Doubs, cette rivière constitue-t-elle une limite à potentiel imposé ?

- la Loue ayant une marque qualitative du Haut-Doubs, quelle part représente donc la rivière dans le débit total de la source ?

Le récent programme d'études de la Diren tente de répondre à ces questions à l'aide des données géophysiques, hydrologiques et piézométriques.

3. Apport de la géophysique

Quatre méthodes ont été mises en oeuvre sur les zones de pertes : géoradar (Société ARPE - KEC, 1993), électromagnétisme, potentiel spontané et microgravimétrie (Cabinet Horizons ; Lefebvre et Lenclud, 1994).

3.1 Géoradar

Le radar géologique SIR10 de GSSI permet l'examen des 10 à 20 premiers mètres du sous-sol. Il se compose d'une antenne émettrice-réceptrice et d'une unité centrale servant à l'alimentation, à la réception et à l'enregistrement des données, par ailleurs visibles sur écran en continu. Pour la reconnaissance des pertes, une antenne de 500 MHz, permettant une pénétration de 0,5 à 5 m a été utilisée sur des profils journaliers de 500 m de longueur en moyenne. Ainsi, 4100 m ont été étudiés sur les zones de pertes repérées antérieurement par des pêcheurs. Les images produites, spectaculaires et pédagogiques, permettent de différencier les pertes remplies d'air, d'eau ou d'argile, sans toutefois préjuger de leur capacité d'absorption ni de leur débit. Le coût peut se révéler prohibitif pour l'apport (250 kF).

3.2. Electromagnétisme

Afin d'évaluer le "risque" d'observer des pertes, le substratum des alluvions a été prospecté, les pertes connues étant toutes implantées dans les calcaires du Malm (fig. 4).

3.3. Polarisation Spontanée

12 km de cours d'eau ont été prospectés par cette méthode. On mesure et on enregistre la différence de potentiel entre une électrode rejetée à l'infini (200 à 300 m) et une électrode mobile placée au fond du lit. La méthode permet de situer et de hiérarchiser les zones fuyardes, les écoulements souterrains engendrant des courants d'électrofiltration (fig. 5).

3.4. Microgravimétrie

Le gravimètre Lacoste et Romberg D n° 7, avec une sensibilité de 1 μ gal, permet de détecter à faible profondeur des terrains décomprimés moins denses pouvant être interprétés comme des zones de fuites. L'orientation des anomalies peut être précisée. Compte tenu du coût élevé, seuls quelques sites ont été testés (fig. 6).

4. Apport de l'hydrologie

Les études antérieures ont fait apparaître deux faiblesses :

- les mesures de débit dans le cours du Doubs, à l'amont et à l'aval de la zone de pertes ne permettaient pas de quantifier les pertes ;
- le débit de la Loue n'était paradoxalement connu en continu qu'à Vuillafans, à une dizaine de km à l'aval de la source. Un nouvel équipement, avec 4 stations limnigraphiques (fig. 7), permet la mesure à la source-même : vasque amont, cheminée d'équilibre EDF, sources annexes du Pont et du canal.

Les mesures différentielles fines dans le Doubs démontrent que les pertes se produisent sur un linéaire important : probablement dès la sortie du lac Saint-Point, jusqu'à Ville-du-Pont en aval. Le bassin du Dugeon perd également des eaux de surface, mais sans qu'on connaisse actuellement leur lieu de restitution. La zone la plus fuyarde du cours du Doubs est située entre Arçon et Maisons-du-Bois. Les débits perdus sont réguliers (en dehors des étiages sévères) et de l'ordre de $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, sans excéder $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Lorsque le débit du Doubs ne dépasse pas $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, les pertes sont totales, mais à débit égal, la zone de débit nul peut se déplacer sans explication apparente. En hautes eaux, l'accroissement du débit du Doubs n'induit pas d'augmentation du débit de la Loue, les pertes sont donc saturées.

Deux ans de mesures sur la source de la Loue permettent de démontrer que les sources annexes, qui représentent 30% du débit total, forment un système distinct de celui de la vasque amont, ce que permet de confirmer la physico-chimie. Les pertes du Doubs soutiennent le débit de la Loue, mais celui-ci reçoit en permanence un apport important de l'infiltration diffuse sur son bassin propre (fig. 8), qui représenterait environ $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ minimum, plus vraisemblablement $1,5$ à $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en étiage moyen (fig. 9). Les débits d'étiage mesurés à Vuillafans excèdent d' $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ceux de la source, alors qu'en moyennes ou hautes eaux, Vuillafans représente le double de la source.

En termes de bilan interannuel, les bassins hydrogéologiques et topographiques sont très différents : à Ville-du-Pont, le bassin réel du Doubs doit être réduit de près de moitié, alors que celui de la source doit être doublé.

Tous ces calculs doivent être confirmés par d'autres cycles de mesures, mais on peut d'ores et déjà pressentir que des aménagements visant à limiter les quantités d'eau perdues (200 à $500 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$) n'auraient qu'un impact limité sur le débit de la Loue, pour autant qu'ils puissent être réversibles.

5. Apport de la piézométrie

13 forages, dont 3 de 30 m et 10 de 10 m de profondeur ont été réalisés pour évaluer la connexion hydraulique entre cours d'eau et circulations souterraines dans la zone des pertes. Le premier forage de 30 m, situé à l'amont des pertes montre un niveau d'eau situé 10 m sous la rivière, le forage situé au milieu des pertes est en équilibre avec le Doubs, alors que le forage aval, situé à l'entrée des gorges du Doubs, est totalement sec.

Les petits forages, réalisés sur les zones supposées les plus fuyardes, ont rencontré des vides, mais aussi des zones peu fissurées aquifères ou non.

La piézométrie suggère l'abandon d'un projet de colmatage ou de busage systématique des pertes, irréaliste au vu de leur nombre, et irréversible, au profit d'une gestion plus sophistiquée, plus souple et réversible.

6. Conclusion et propositions

6.1. Conclusion

La cartographie à objectif hydrogéologique a confirmé le rôle de l'accident de Pontarlier dans le passage des eaux souterraines à travers les noyaux anticlinaux imperméables.

Si la physico-chimie des eaux de la Loue l'apparente au groupe du Jura plissé, elle ne permet pas de préciser la part de son alimentation provenant des pertes et celle de l'infiltration diffuse sur son impluvium propre.

L'étude de détail de la zone de pertes montre que les plus importantes se produisent sur les 4 premiers kilomètres avec exceptionnellement une perte totale à l'entrée des gorges. Les pertes actives, situées en substratum calcaire, sont petites et nombreuses, souvent en zone non-saturée (piézométrie indépendante du niveau du Doubs). Elles peuvent être remplies d'eau, d'air ou d'argiles. Leur débit total est régulier, avec une saturation en hautes eaux.

Le débit de la Loue à l'étiage n'est constitué que d'1/3 d'eau en provenance des pertes, cette contribution tombe à 1/6° pour la moyenne.

6.2. Aménagements

Les études menées sur le système Doubs-Loue permettent d'en proposer une gestion raisonnée en gardant comme double objectif de redonner vie au Doubs l'été tout en conservant l'alimentation de la Loue.

Le Doubs, entre Arçon et Maisons-du-Bois montre une très faible pente ; il est barré de petits épis obliques maintenant une tranche d'eau de 20 à 60 cm d'épaisseur. Ce comportement naturel de la rivière sert de modèle à la proposition de traitement de la zone de pertes :

- remontée du niveau d'étiage par petits seuils,
- création de bras latéraux étanchéifiés, séparés du lit fuyard par des îles longitudinales de faible hauteur,
- en période d'étiage, guidage des eaux vers ces bras latéraux étanches aménagés soit dans le lit, soit dans la berge; les îles seront submergées par le Doubs hors période d'étiage afin d'alimenter les pertes,
- contrôle du débit détourné par des "vannes-seuils" amovibles.

Ces aménagements ont pour caractéristiques leur intégration au milieu naturel et leur réversibilité, permettant à tout moment à la Loue de reprendre ses conditions naturelles d'alimentation. Ces systèmes, dont le coût est évalué de 5 à 10 MF, permettraient de dériver 500 l.s⁻¹ sur l'aval du Doubs, en réservant 1 m³.s⁻¹ à la Loue. Ainsi rendre un écoulement au Doubs en période d'étiage n'amputerait la Loue que d'1/9° de son débit.

Bibliographie sommaire

BLAVOUX B., BURGER A., CHAUVE P. & MUDRY J. (1979) - Utilisation des isotopes du milieu pour la prospection hydrogéologique de la chaîne karstique du Jura. *Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys.* (Paris), 21, 4, 295-306.

CHAUVE P., CHOULOT S., CORNU S., ROLLET M., SCHMIDT S. (1995) - Études géologiques dans le secteur Doubs-Loue à l'aval de Pontarlier - Cartographie géologique et structurale - Rapport LGSA, inédit

COLIN E., METTETAL J.P., MARTIN D. et RUOTOLO J.M. (1995) - Étude du système hydrologique Doubs-Loue (pertes du Doubs-source de la Loue) Rapport inédit DIREN Franche-Comté, SEMA, 62 p.

FOURNIER E (1913) - Le Doubs et la Loue - Communication des pertes du Doubs avec la Loue - Imp. Jacques et Demontrond, Besançon

Karst Eau Concept (1993) - Auscultation du lit du Doubs entre Arçon et Ville-du-Pont pour la localisation des zones de pertes. Rapport inédit, 77 p.

LEFEBVRE T. et LENCLUD F (1994) - Etude hydrogéologique et géophysique des pertes du Doubs à l'aval de Pontarlier. Rapport inédit Horizons n° 4305, 22 p. + annexes.

MUDRY, J. (1987) - Apports du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés. Thèse d'état Univ. Franche-Comté, 381 p.

MUDRY J., KIRALY L., MULLER I. (1979) - Analyse multivariée du chimisme de quelques sources karstiques du Jura. *Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel* (Suisse), 3, 183-221, 20 fig., 4 tab.

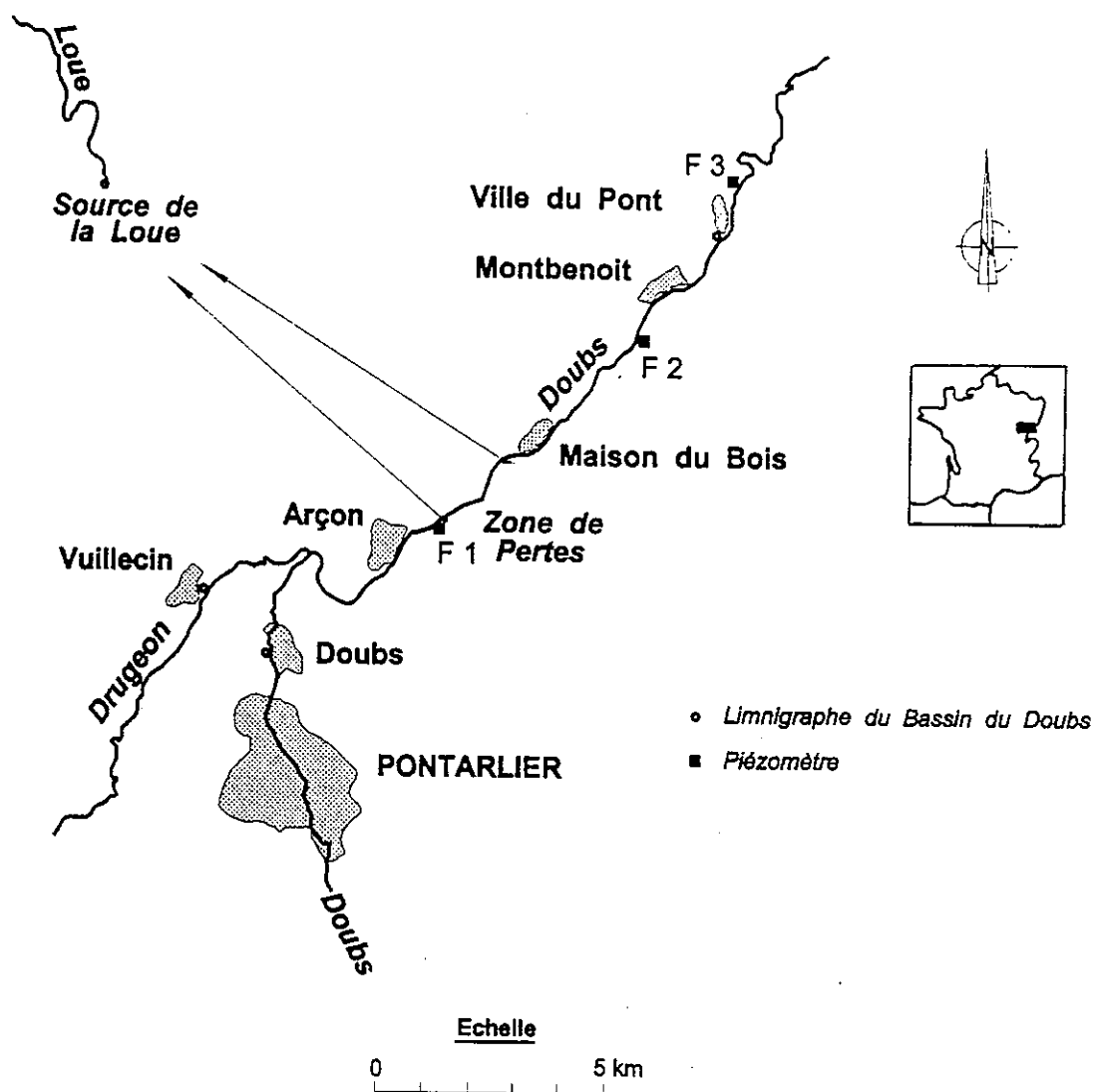


Fig. 1 : Situation des pertes du Doubs et de la source de la Loue (Colin *et al.*, 1995)

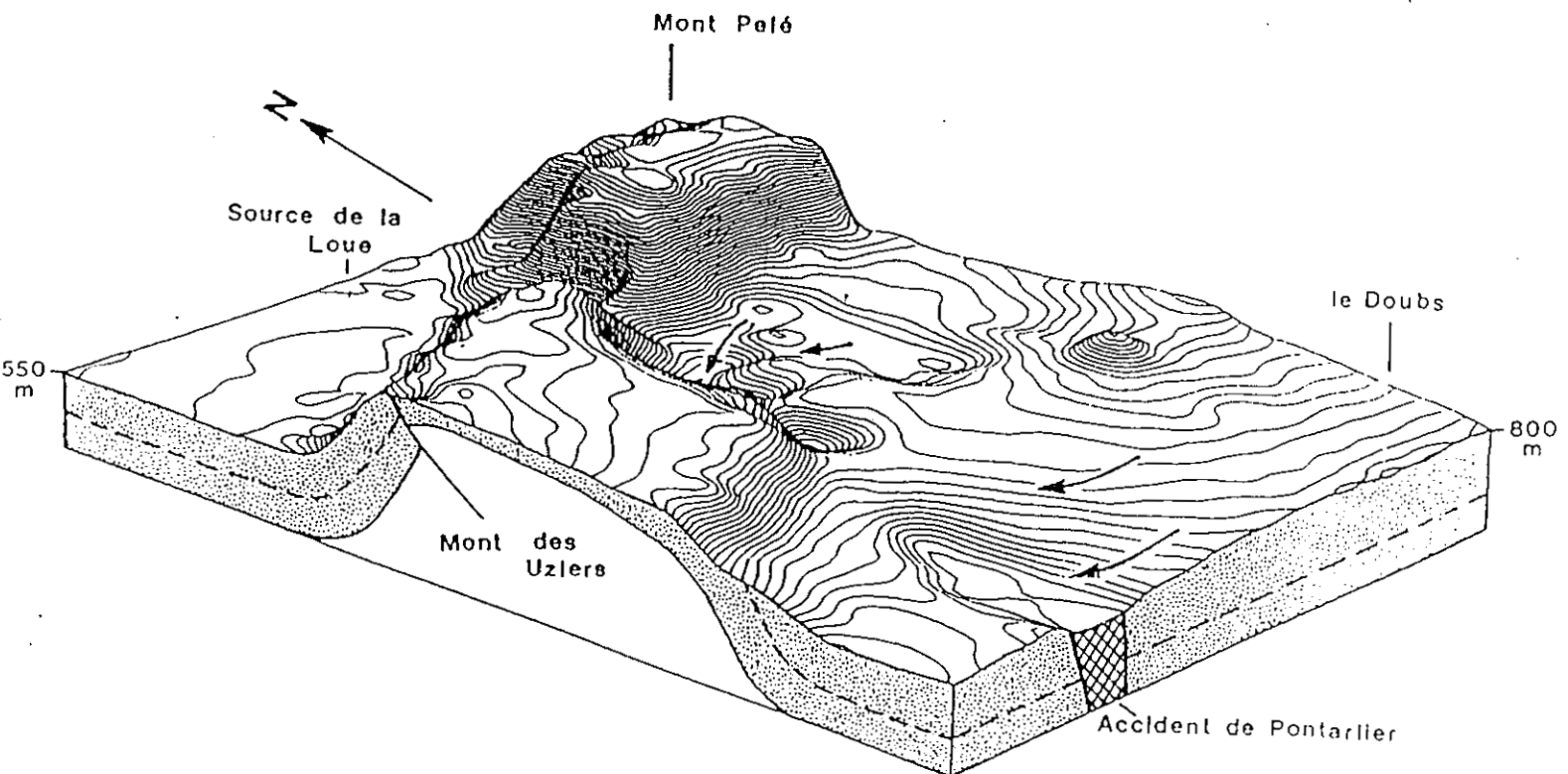


Fig. 2 : Bloc diagramme de la carte structurale au toit de l'"Argovien" marneux
(Chauve *et al.*, 1995)

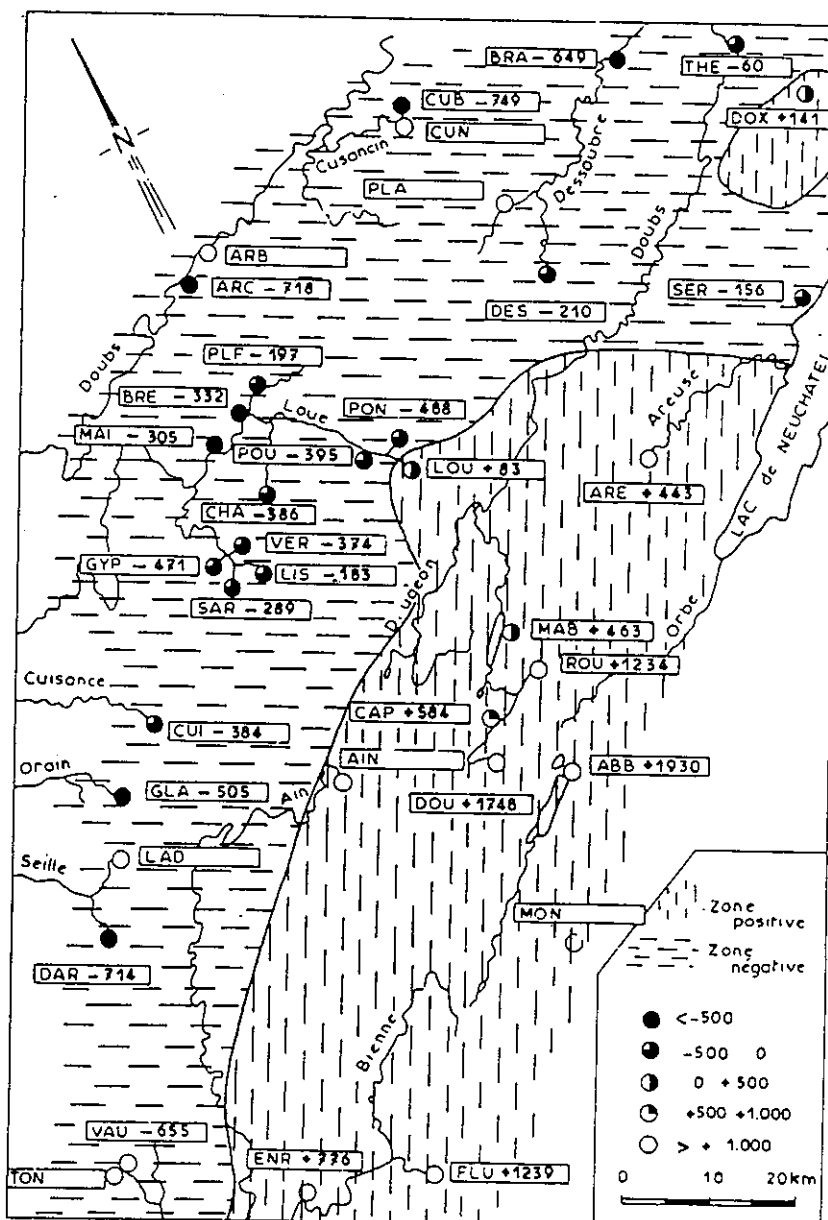


Fig 3 : Analyse factorielle des correspondances, valeurs classées de la physico-chimie des principales sources jurassiennes - tarissement. Valeur du premier facteur. (Mudry *et al.*, 1979).

$C < 10$ mmhos/m : calcaires. $10 < C < 20$: calcaires fracturés.

$C > 20$ mmhos/m : calcaires marneux

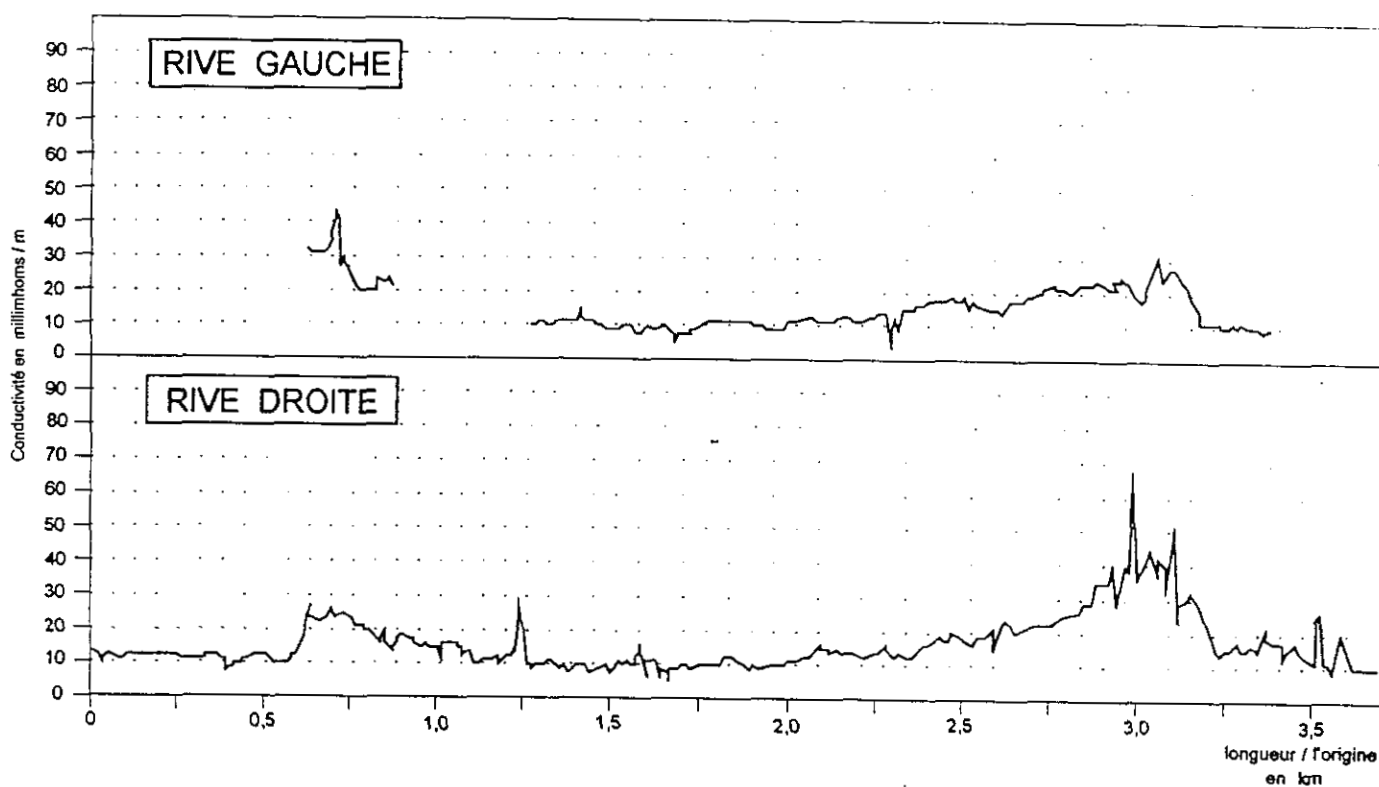


Fig. 4 : Mesures électromagnétiques - Exemple : amont d'Arçon (Lefebvre et Lenclud, 1994)

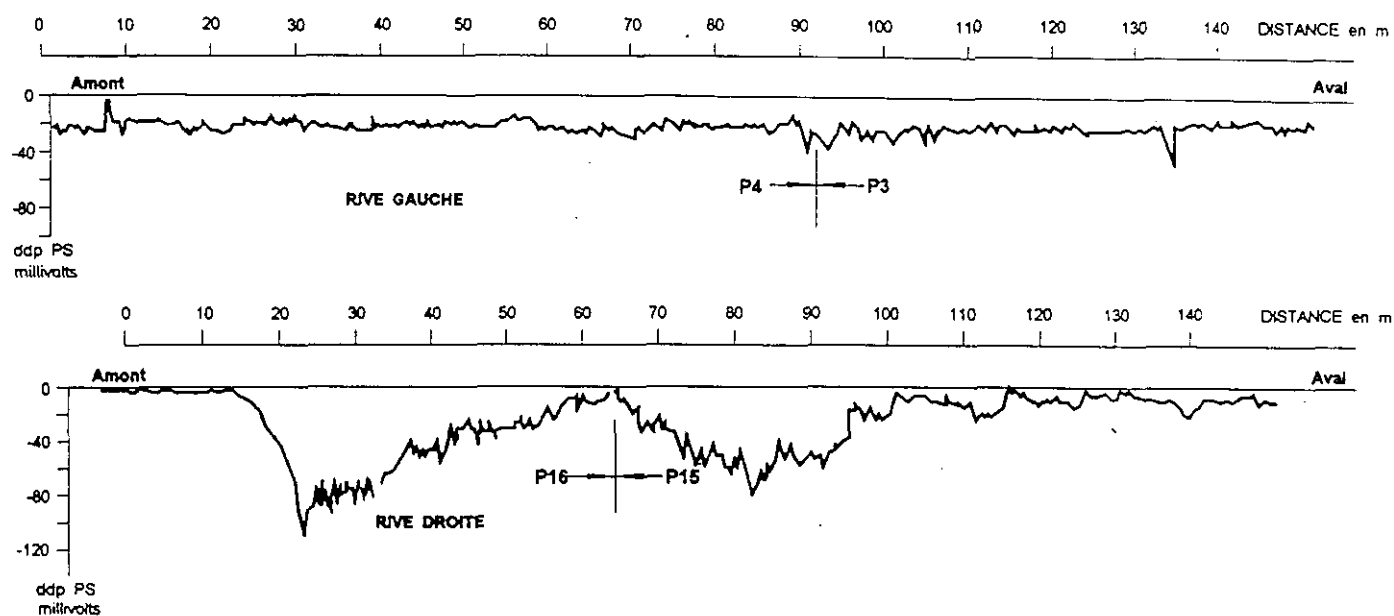


Fig. 5 : Mesures du potentiel d'électrofiltration - Zone du Gros Foyard
(Lefebvre et Lenclud, 1994)

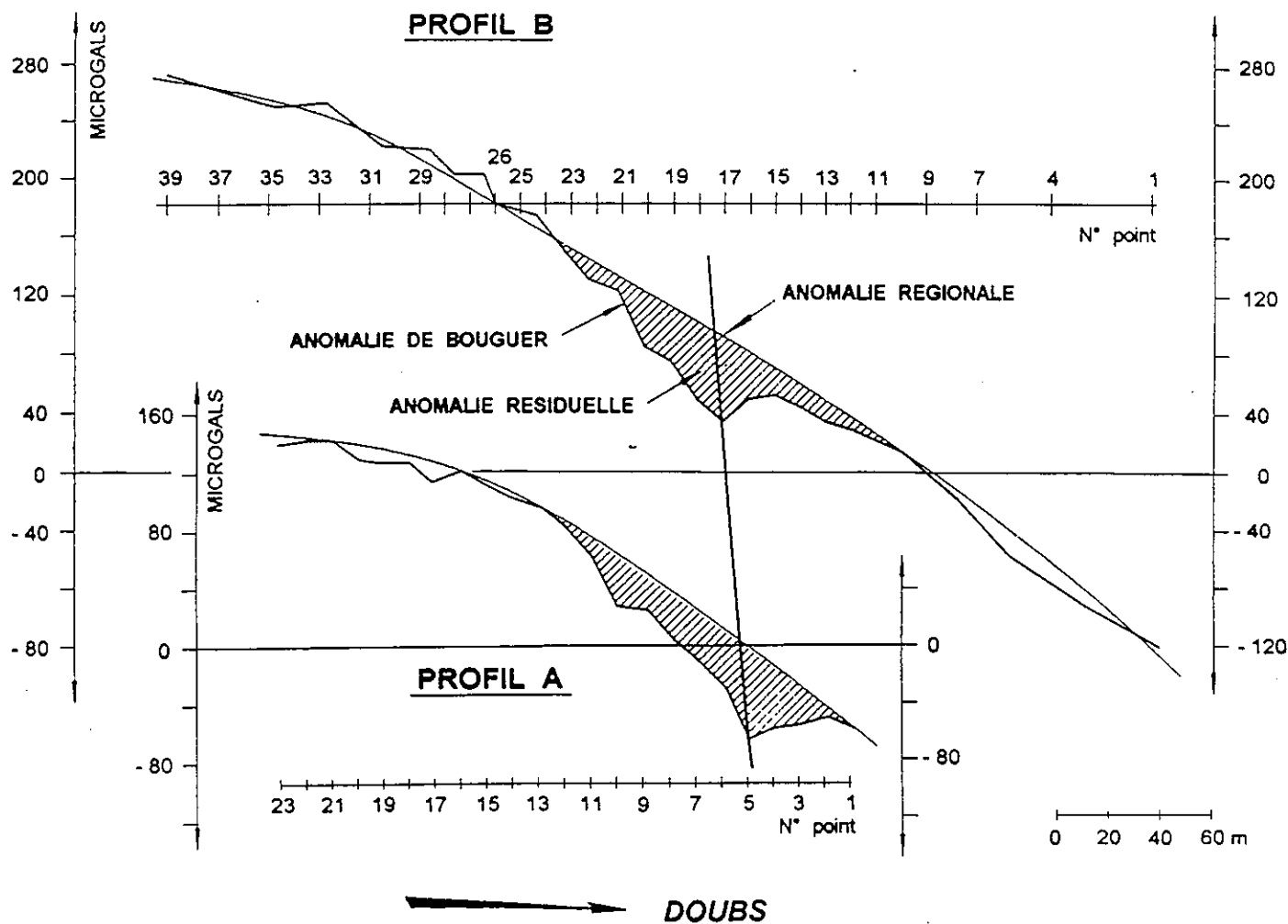


Fig. 6 : Mesures microgravimétriques - Zone du Gros Foyard (Lefebvre et Lenclud, 1994)

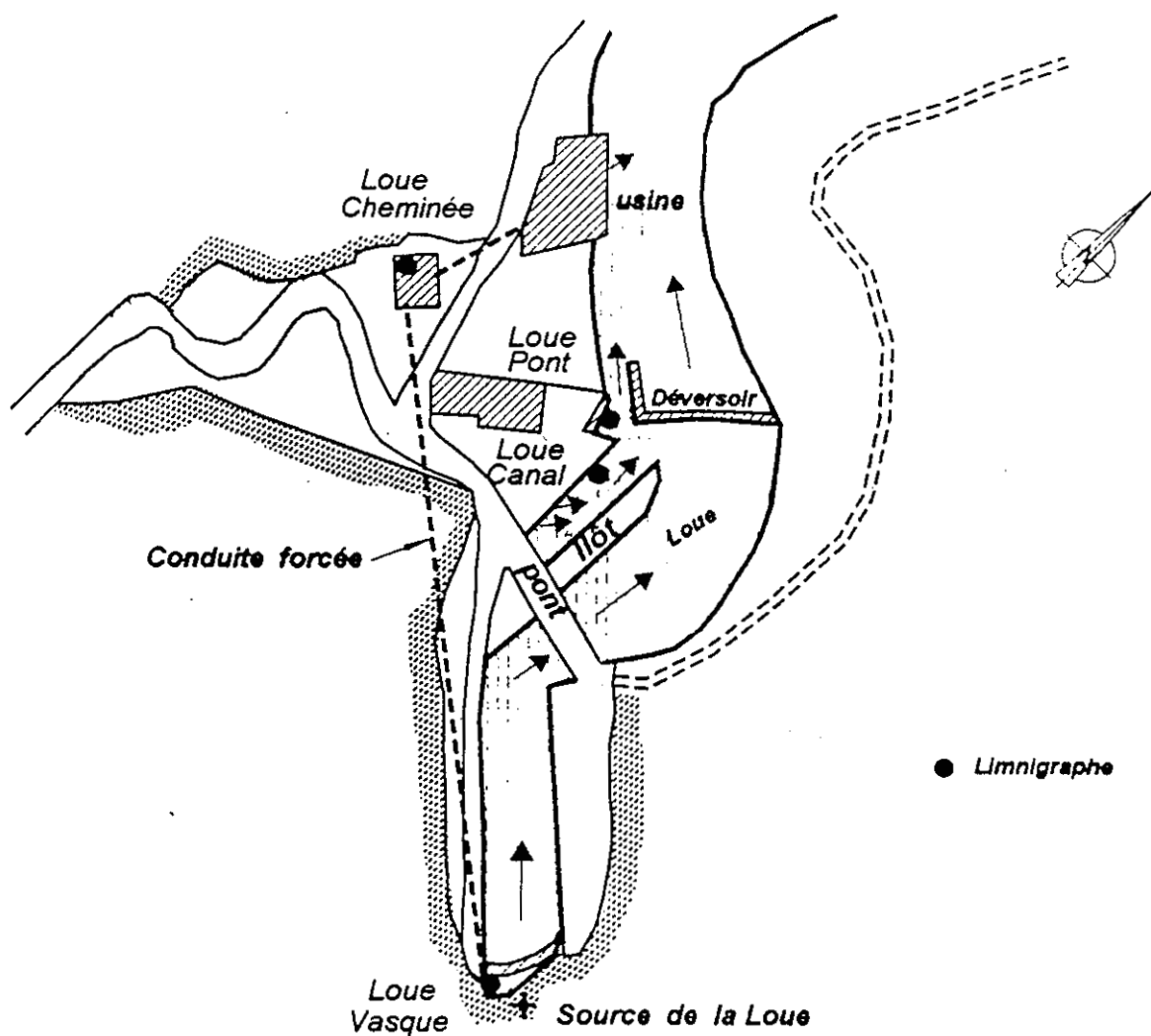


Fig. 7 : Équipement hydrométrique de la source de la Loue (Colin *et al.*, 1995)

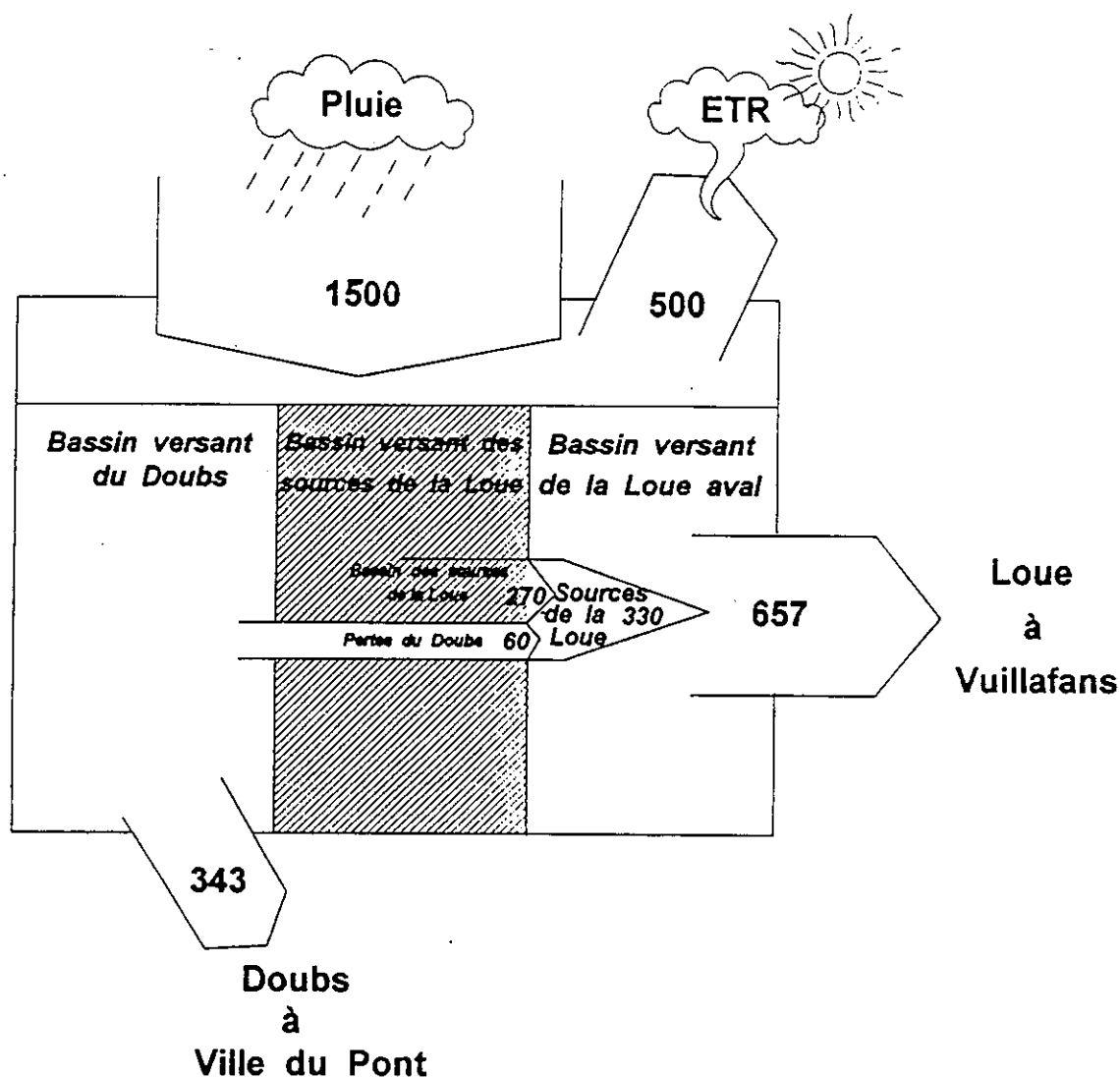


Fig 8 : Bassin Doubs-Loue - Volumes écoulés en Mm³ pour une année moyenne - (Colin *et al.*, 1995)

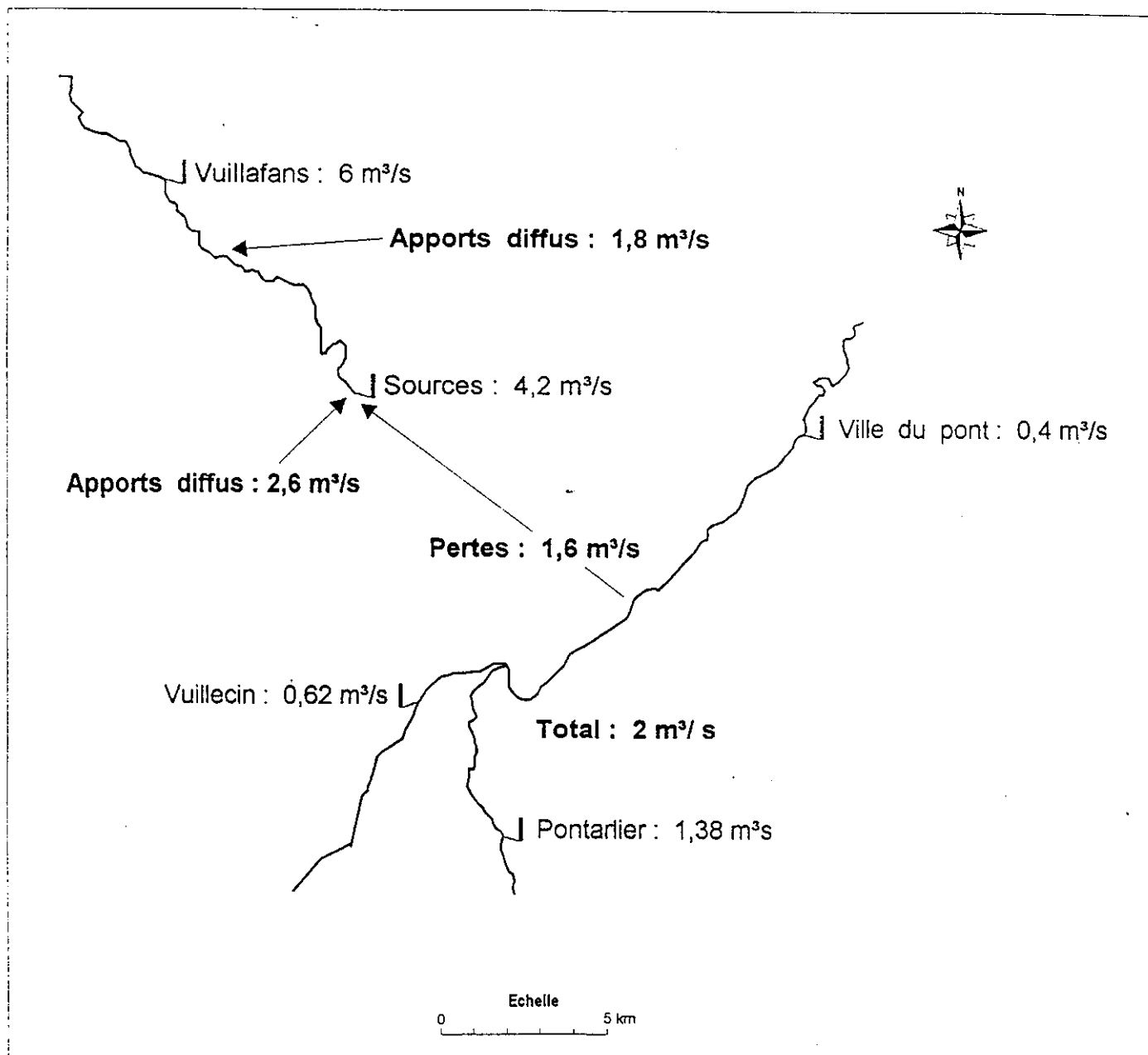


Fig. 9 : Bassin Doubs-Loue - Débits moyens journaliers. Tarissement du 23/10 au 13/11/1995
(d'après Colin *et al.*, 1995)

CONFÉRENCE :

J. P. METTETAL et J. MUDRY

Le karst de la Loue et les relations avec le Doubs (Franche-Comté).

Pas de question ni d'intervention

**Les aquifères karstiques du Larzac septentrional.
Leur vulnérabilité.
Propositions en vue de leur exploitation et de leur protection.**

Jacques RICARD et Michel BAKALOWICZ

La partie septentrionale du Causse du Larzac est un plateau karstique dominant de près de 400 m les vallées de la Dourbie, au nord, du Tarn, à l'ouest, et du Cernon au sud. Hormis ces vallées, cette région ne présente pas d'écoulements de surface ; elle est soumise à des écoulements souterrains en direction de sources de type karstique. Ces sources sont, pour la plupart, utilisées soit pour les AEP de l'agglomération de Millau, soit pour des piscicultures. Leurs eaux contribuent fortement à l'alimentation des écoulements de surface, particulièrement en saison de basses eaux.

La protection de ces ressources en eaux souterraines passe par une bonne connaissance des limites des bassins d'alimentation de ces sources, du fonctionnement de ces aquifères et de la nature des relations entre eaux souterraines et activités humaines, et par une évaluation des impacts de ces activités sur les eaux, en qualité et en quantité. Les limites des bassins d'alimentation des sources ont pu être déterminées par des approches complémentaires : définition du cadre géologique, expériences de traçage artificiel, bilan hydrologique et bilan de matières dissoutes.

L'étude avait pour but de caractériser les sources les unes par rapport aux autres, notamment en ce qui concerne leur sensibilité aux pollutions, de façon à définir les grands traits de leur fonctionnement, à évaluer leurs ressources et les réserves associées et à mettre en évidence la vulnérabilité des aquifères aux actions anthropiques.

La définition des limites des bassins d'alimentation des sources montre qu'aucune n'est alimentée par une infiltration concentrée à partir de pertes de rivières de surface.

Le drainage karstique est en général assez peu développé dans des zones noyées, qui possèdent des réserves souvent considérables. Le rôle d'un colmatage généralisé, freinant les écoulements et masquant le fonctionnement karstique, a été envisagé ; mais aucun élément, notamment les données hydrogéochimiques, ne va dans ce sens. La cause probable paraît être un abaissement du niveau de base trop récent pour permettre la mise en place d'un drainage efficace.

Les conditions d'infiltration jouent un rôle décisif dans l'organisation des écoulements souterrains et dans la vulnérabilité des aquifères : il existe des zones avec un stockage en subsurface lié à un épikarst bien développé et sans drainage karstique vers la profondeur (zones hautes des dolomies ruiniformes), opposées à des zones déprimées, occupées par des formations détritiques (argiles à chailles) et drainées efficacement par des conduits bien ouverts dans la zone d'infiltration.

L'existence de ces possibilités d'infiltration rapide concentrée dans les zones déprimées, les plus anthropisées, entraîne une certaine vulnérabilité des eaux souterraines. La protection des ressources passe nécessairement par des mesures spécifiques : assainissement et traitement des eaux usées rejetées en surface, maintien de la couverture sédimentaire du karst retardant l'infiltration, limitation de l'infiltration concentrée ou mieux remplacement de tous les dispositifs d'infiltration concentrée par une infiltration dispersée à l'écart des zones karstiques d'infiltration préférentielle, gestion concertée et commune du territoire et des eaux souterraines et de surface.

Des critères d'identification et de quantification de la sensibilité de ces aquifères à la surexploitation et aux pollutions sont ensuite définis. Ils permettent de réaliser des cartes de vulnérabilité, document de base pour l'aménagement du territoire, et de définir les conditions de gestion des ressources en eau. Les études réalisées sur le Larzac septentrional servent à préciser et à affiner ces critères et à expérimenter la démarche.

CONFÉRENCE :

M. BAKALOWICZ et J. RICARD

Les aquifères karstiques du Larzac septentrional. Leur vulnérabilité. Propositions en vue de leur exploitation et de leur protection.

Intervenant

P. BEAUDEAU

Laboratoire du Havre

Question ou intervention

La loi de 1992 possède des dispositions facilitant la mise en place des périmètres de protection. Le problème qui demeure reste la gestion au quotidien des servitudes décidées au terme de la procédure. En particulier la possibilité d'investiguer sur les terrains privés.

Réponse

Recherche d'une adhésion des acteurs en dehors de l'aspect police (répression, contrôle...).

Intervenant

C. MOREL

DDASS Hérault

Question ou intervention (suite à la question de M. Beaudeau)

Attention à la nature des prescriptions, il faut qu'elles soient facilement vérifiables. Si le non respect de certaines de ces prescriptions mettait en péril la ressource et l'eau captée il ne faut pas autoriser le captage.

Contrôle des prescriptions : d'abord le maître d'ouvrage, puis en second rang, l'Etat.

La protection des eaux captées passent par d'autres outils que les périmètres de protection, y compris la concertation.

Nécessité d'une véritable usine de traitement sur les captages dans le karst pour la sécurisation de l'AEP.

Intervenant

B. BLAVOUX

Université d'Avignon

Question ou intervention

Concernant le respect des interdictions, ou plutôt des recommandations, définies pour les périmètres de protection, une méthode efficace commence par l'explication et l'information auprès des utilisateurs et des élus.

Intervenant

B. de GRISSAC

Conseil Général de la Charente

Question ou intervention

La protection des captages ne doit pas se concevoir uniquement dans la mise en place des périmètres. L'animation est essentielle dans l'efficacité des mesures de protection.

La profession agricole n'est pas réceptive à la contrainte, elle est prête en revanche à modifier ses pratiques dans le cadre de mesures constructives (amélioration des pratiques culturales).

Intervenant

P. BERARD

Question ou intervention

Périmètre de protection : il existe des règlements sanitaires de protection.

Capter plus en aval des sources. Une nappe alluviale engendre une filtration naturelle efficace.



Session 6 :

*Qu'est-ce que le scientifique peut
apporter aux exploitants et aux
gestionnaires ?*

Président : A. Mangin
Directeur de Recherche au CNRS

Structure et fonctionnement des aquifères karstiques les concepts et les approches

A. MANGIN (1),

(1) Directeur du Laboratoire Souterrain du CNRS

Résumé

Le caractère très particulier de l'hydrodynamisme des aquifères karstiques réside dans l'apparition de fortes non linéarités, comme le montre l'exemple de convolution réalisée sur le système d'Aliou (Pyrénées, France). De ce fait, l'approche classique fondée sur la connaissance préalable des paramètres intervenant dans la dynamique des systèmes (variables d'état) et de leurs structures de couplages (équations différentielles) ne rend pas compte correctement de la réalité du fonctionnement de ces aquifères. C'est pourquoi, il est proposé une approche phénoménologique traitant des différents observables physiques qui caractérisent la dynamique de l'aquifère : c'est le cas des débits aux exutoires et de la piézométrie. Les méthodes utilisées : analyses des récessions et des débits classés, analyses corrélatoires et spectrales, fournissent des critères permettant une représentation mieux adaptée des aquifères karstiques. Cette représentation est complétée par des méthodes qui prennent en compte la géométrie du milieu, telle la détermination de la loi de distribution des plans de drainage ; ces méthodes sont abordées dans l'optique d'une approche dynamique. Les résultats obtenus ont conduit à proposer une schématisation de l'ensemble de l'aquifère karstique où chaque partie est bien identifiée avec ses caractéristiques propres. Le fonctionnement de ces parties permet d'expliquer comment interviennent les non linéarités et comment elles peuvent être prises en compte.

1. Particularités des aquifères karstiques

Comme nous allons le voir, les particularités des aquifères karstiques résident essentiellement dans leur comportement non linéaire. C'est cette caractéristique qui doit, avant tout, être explicitée.

1.1. Les pertes de charges quadratiques

Il existe un accord général pour considérer les aquifères karstiques comme étant particuliers. La cause en est la présence de grands vides engendrés par les processus de dissolution (karstification), qui introduit des conditions hydrauliques singulières. En effet, dans ces cavités sont souvent observés des écoulements rapides (de 0,1 à 1 m/s par exemple). De telles vitesses font apparaître des pertes de charge quadratiques qu'il est difficile à la fois d'estimer et de prendre en compte dans la modélisation. En premier lieu ces conditions font douter de la validité de la loi de Darcy (A. Mangin, 1975). Il est vrai que la non adéquation à cette loi

complique énormément la reconnaissance des paramètres caractérisant les écoulements dans ce type d'aquifère et par voie de conséquence leur représentation.

1.2. La variabilité de la réponse impulsionnelle

Il apparaît aujourd'hui que la différence avec les aquifères poreux ou fissurés est beaucoup plus marquée que ce que l'on pouvait imaginer.

Prenons un exemple pour illustrer ce propos. Cet exemple est celui du système karstique d'Aliou, situé dans les Pyrénées et qui a été défini comme étant le système pour lequel l'effet de la karstification était poussé à l'extrême : drains très développés, absence de réserves... (A. Mangin, 1975, B. Marsaud, 1995). Afin de mettre en évidence le comportement particulier de cet aquifère, nous utiliserons sa réponse impulsionnelle, c'est-à-dire l'hydrogramme unitaire. En effet, la réponse du système à une pluie unitaire traduit très exactement son fonctionnement, c'est en quelque sorte sa signature. La méthode utilisée pour définir cette réponse impulsionnelle est celle qui sera évoquée plus loin, elle passe par la détermination du corrélogramme croisé (A. Mangin, 1984 b).

La série traitée va de juillet 1993 à février 1996 et a été subdivisée en 9 périodes voisines de 3 mois chacune. Le pas d'échantillonnage intervenant de façon non négligeable sur les résultats (A. Mangin, 1984a), il a été choisi d'une demi-heure. L'examen attentif et détaillé des courbes (fig. 1 à 9), conduit aux remarques suivantes :

- la réponse impulsionnelle diffère d'une période à l'autre,
- elle ne varie pas de façon anarchique mais très progressivement,
- sa forme évolue entre deux limites peu éloignées, tout en gardant des caractéristiques communes,
- elle ne reproduit jamais exactement la même forme,
- elle peut parfois présenter deux ou même plusieurs modes (réponse composite).

La variabilité de la réponse impulsionnelle n'est pas un constat nouveau. Dès 1979, S. J. Dreiss travaillant au laboratoire de Neumann à l'Université de Stanford, sur des sources karstiques du Mark Twain National Forest au Sud-Est de l'état du Missouri aux USA, avait noté cette variabilité suivant la période de l'année. La méthode d'obtention de cette réponse était différente, c'était celle proposée par S. P. Neuman et G. de Marsily (1976).

La nature composite de la réponse impulsionnelle recoupe également des résultats antérieurs, obtenus lors d'essais par déconvolution (L. Bourguet et Ratsimiébo, 1970 ; G. de Marsily et A. Mangin, 1971).

Comme le soulignait S. J. Dreiss l'absence d'une réponse impulsionnelle constante traduit, par définition, un système non linéaire. L'exemple d'Aliou apporte des informations complémentaires. On sait, en effet, que tout système peut être représenté dans un espace défini par les variables qui en caractérisent le fonctionnement : c'est l'espace des phases (P.

Bergé et al., 1994). Si le système est linéaire, la représentation qui en résulte est un tore appelé attracteur. Or, la façon dont varie la réponse impulsionnelle d'Aliou indique que cet attracteur est particulier, ce serait un attracteur étrange (P. Bergé et al., *loc. cit.*). C'est l'indice d'une importante non linéarité qui détermine une forte dépendance sensitive aux conditions initiales et donc un certain caractère imprédictible.

1.3. Les discontinuités du fonctionnement de l'aquifère

Toujours à partir de l'exemple d'Aliou, il est possible de préciser comment les non linéarités interviennent dans le fonctionnement. Pour cela on définit une réponse impulsionnelle moyenne. Elle est établie à partir du corrélogramme croisé réalisé sur l'ensemble de la période de 1993 à 1996 (fig. 10).

A partir de cette réponse impulsionnelle, il est possible de reconstituer la chronique des débits à partir de celle de la pluie. On utilise pour cela la convolution. Or, cette opération, par définition, suppose que le système soit linéaire. Ainsi, la comparaison entre la chronique réelle et la chronique reconstituée va permettre d'obtenir des informations sur les non linéarités. Un tel traitement (fig. 11 à 14) montre les résultats suivants :

- en hiver, il apparaît des crues journalières sur la chronique réelle, que la convolution ne reproduit pas,
- en moyennes eaux, la reconstitution est généralement bonne, à quelques détails près,
- l'étiage reconstitué est toujours plus faible que l'étiage vrai,
- toujours en étiage, la reconstitution fait apparaître des crues qui n'existent pas en réalité,
- les fortes crues ne sont jamais rendues dans la simulation, il y a toujours sous-estimation.

A travers ces résultats on voit clairement que le fonctionnement des systèmes karstiques est encore beaucoup plus complexe que ne le laissaient présager les constats précédents. Non seulement la réponse impulsionnelle varie, mais d'autres non linéarités sont présentes. En premier lieu la pluie n'est pas la seule fonction d'entrée, la neige en hiver, lors de sa fonte, est responsable des crues journalières. En été, les pluies ne provoquent aucune crue. Mais ce qui est surtout particulier c'est le comportement différent du karst suivant l'impact des impulsions ; tout ce passe comme si l'on avait affaire à 3 aquifères différents : le premier, en crue, aurait des réponses courtes et de forte amplitude, le deuxième, en moyennes eaux, aurait un comportement plus modelé et le troisième, en basses eaux, aurait un fonctionnement plus inertiel.

L'approche des aquifères karstiques va donc devoir prendre en compte ces faits.

2. Approche proposée

Comme l'analyse des particularités des aquifères karstiques fait ressortir une constance correspondant à l'existence de non linéarités, c'est essentiellement cette propriété qui va intervenir dans le choix des méthodes. Nous avons vu que, non seulement, il existait plusieurs cas de non linéarité, mais, surtout, il y avait une gradation.

- la non linéarité intervient dans les pertes de charge quadratiques et cela a une incidence sur l'utilisation de la loi de Darcy,
- la réponse impulsionnelle est variable, traduisant le fait que les caractéristiques du milieu sont elles aussi variables : perméabilité, emmagasinement ...,
- le fonctionnement est discontinu et c'est surtout ce point qui est le plus contraignant.

2.1. Non adéquation de l'approche classique

Tout aquifère est abordé en tant que système dynamique. Ce système est supposé connu explicitement par les paramètres d'état qui le caractérisent et qui définissent son nombre de degrés de liberté, et par la structure de couplage entre ces paramètres (systèmes d'équations différentielles).

Fondés sur la loi de Darcy, qui impose une homogénéité à l'échelle macroscopique, les écoulements peuvent être abordés à partir de modèles simples. Par exemple, pour un aquifère captif, la relation est la suivante (G. de Marsily, 1981) :

$$\operatorname{div}(\vec{\operatorname{grad}} \varphi) = \frac{S}{T} \frac{\delta \varphi}{\delta T},$$

φ étant le potentiel, S le coefficient d'emmagasinement et T la transmissivité.

Cette équation est ensuite intégrée à partir des conditions aux limites et des conditions initiales.

Il est évident que la non validité de la loi de Darcy constitue un obstacle à cette approche. Toutefois, il est possible d'introduire dans les équations des termes quadratiques et, de toute manière, les non linéarités à ce niveau peuvent souvent être assimilées à de simples perturbations modifiant peu le fonctionnement du système. La prise en compte des caractéristiques du milieu, comme des variables et non comme des constantes, est beaucoup plus délicate. Mais, ce sont surtout les discontinuités qui sont un obstacle sérieux à l'intégration des équations et qui, dans l'état actuel des connaissances sur la manipulation de ces équations, nous font rejeter cette approche.

2.2. Analyse des observables physiques

Avec les systèmes complexes, fortement non linéaires dans leur comportement, il est fait appel à une approche expérimentale. L'information recueillie sur la dynamique est alors acquise par échantillonnage de quelques observables physiques. Cette démarche couramment utilisée en thermodynamique est de type phénoménologique.

Les observables physiques utilisés correspondent aux grandeurs qui, dans leur évolution par rapport au temps, rendent compte du fonctionnement dynamique du système. Les grandeurs privilégiées sont donc celles qui traduisent très directement l'hydrodynamisme : les débits et la piézométrie. Suivant le lieu d'observation, l'information fournie concerne une partie ou la totalité du système. Il existe également d'autres grandeurs qui, de façon plus indirecte, ont un lien étroit avec la dynamique du système : c'est le cas de tous les paramètres géochimiques, des paramètres isotopiques, de la thermique des eaux, ou même des réponses biologiques (A. Mangin, 1994).

2.3. Les outils utilisés

Les outils utilisés se réfèrent très directement à ceux développés en physique dans de pareils cas, avec comme objectif la caractérisation de la dynamique du système. Les observables physiques se présentent sous la forme de séries temporelles et, dans, un premier temps, ce sont les propriétés de ces séries qui sont mises en évidence. Dans un deuxième temps, ces propriétés sont interprétées en terme d'hydrogéologie utilisable pour définir le fonctionnement et la structure des systèmes karstiques. Actuellement, trois méthodes sont couramment employées : l'analyse corrélatoire et spectrale, l'analyse des courbes de récession et celle des débits classés.

- *Analyse corrélatoire et spectrale*

Cette méthode cherche à identifier les différentes composantes contenues dans la série temporelle : la tendance linéaire ou non, les réponses déterministes approchées par des séries périodiques et le bruit de fond aléatoire (A. Mangin, 1984b, 1994). Cette identification s'effectue à partir d'indices statistiques qui sont : le **corrélogramme** et le **variogramme** dans l'espace physique (ici le temps) et le **spectre de densité de variance** dans l'espace fréquentiel, mieux adapté pour caractériser les composantes périodiques.

L'analyse est pratiquée soit en considérant le signal seul (analyse simple), soit en comparaison avec les causes qui l'ont produit (analyse croisée). Dans ce dernier cas, la série temporelle étudiée est assimilée à la réponse d'un système dont l'entrée est connue. Il en est ainsi lorsque l'on détermine les variations de débits ou piézométriques par rapport aux pluies.

L'analyse corrélatoire et spectrale détermine une série de caractéristiques permettant de préciser la nature des systèmes karstiques étudiés et de les comparer. Ce sont : le **corrélogramme croisé** qui fournit une approche de la réponse impulsionnelle, le **temps de régulation** qui correspond à la durée de la réponse impulsionnelle, la **largeur de bande spectrale** déterminée par la fréquence de coupure et qui rend compte de l'inertie du système, et l'**effet mémoire**, (temps correspondant à une autocorrelation négligeable) indice de l'importance des réserves.

Cette approche a permis de proposer une classification des aquifères karstiques en fonction de leur structure (fig. 15).

- *Courbes de récession*

L'analyse des courbes de récession, correspondant à la décrue et au tarissement, se fonde en théorie sur une caractérisation de la réponse impulsionnelle à partir d'un modèle physique rendant compte de la vidange d'un réservoir. Malheureusement la réponse impulsionnelle n'est pas facilement déterminable et seule est accessible la réponse à une suite d'impulsions quelconques. C'est la raison pour laquelle n'est prise en compte que la partie décroissante de l'hydrogramme (courbe de récession) et qu'il est nécessaire d'avoir le tarissement pour pouvoir réaliser l'analyse (A. Mangin, 1975). Quoiqu'il en soit, l'étude du tarissement permet d'obtenir une idée de l'importance des réserves à partir de l'évaluation du **volume dynamique** (A. Mangin 1975, B. Marsaud, 1995). De même, l'analyse fournit des indications sur la manière suivant laquelle s'effectue l'infiltration.

- *Courbes de débits classés*

Si l'on considère la série chronologique, réponse d'un système, comme la réalisation d'une fonction aléatoire, la courbe de débits classés correspond à la densité de probabilité de premier ordre de cette fonction. Dans le cas d'un système homogène, cette densité de probabilité de premier ordre peut être identifiée par une fonction simple comme la fonction de Laplace, particulièrement bien adaptée (A. Mangin, 1974, 1975).

Par anamorphose de la fonction cumulée, ce qui a pour conséquence de linéariser la représentation, il est possible de mettre facilement en évidence toute anomalie traduisant l'hétérogénéité du système.

Cette méthode a été utilisée pour détecter la présence de trop-pleins, de fuites du système karstique, etc.

- *Nouvelles méthodes*

De nouvelles méthodes sont actuellement proposées ; elles ont pour but de préciser certains caractères particuliers du fonctionnement des systèmes karstiques dans le but de les modéliser. Les paramètres recherchés sont ici : la **dimension de l'espace des phases** qui fournit une indication sur le nombre de variables entrant dans les équations différentielles, la **K-entropie** qui donne une évaluation du poids de chacune de ces variables, l'**exposant de Lyapounov** qui introduit le degré de prédictibilité que peut atteindre le modèle.

Ces méthodes font appel à des techniques récemment mises au point en physique, ce sont : l'analyse par ondelettes et l'analyse des attracteurs.

2.4. Approche de la géométrie du réservoir

Dans la modélisation des aquifères karstiques, si l'identification des propriétés du fonctionnement du système est absolument nécessaire, en revanche elle n'est pas suffisante. Il faut, en effet, connaître deux caractéristiques importantes qui doivent être déterminées à l'échelle du système. C'est, d'une part, la géométrie de l'aquifère qui permet d'ailleurs d'introduire ensuite les conditions aux limites ; c'est, d'autre part, les propriétés intrinsèques du milieu qui sont indépendantes des écoulements, pour ce qui est de leur origine, mais qui

ont une influence sur eux. Parmi ces propriétés on trouve essentiellement la perméabilité, indispensable à l'initiation de l'organisation du drainage ; elle est due à la fracturation qui introduit une forte anisotropie.

L'étude fine de la géologie, portant aussi bien sur une analyse lithologique que structurale, permet d'obtenir ces données relatives à la géométrie de l'aquifère. Il faut y ajouter l'évolution géomorphologique parce que les paléostructures, réactivées en période de crue, interviennent dans le fonctionnement de l'aquifère ; elles sont souvent responsables d'apparition de fortes non linéarités.

La seconde caractéristique est plus difficile à appréhender. En effet, toutes les fractures ne sont pas utilisables par l'eau, seules celles qui sont en extension peuvent jouer un rôle : on les appelle **plans de drainage**, parce que, potentiellement, elles peuvent permettre à l'eau de circuler. L'expérience montre que, quel que soit l'âge de leur formation, et même si elles ont été par la suite colmatées, la perméabilité qu'elles ont initiée constitue des voies de circulation préférentielles, systématiquement réutilisées par les écoulements actuels. La méthode pour les mettre en évidence est celle proposée par A. Eraso en 1985, sur la base des travaux de F. Arthaud et P. Choukroune (1971). Fondée sur le relevé, sur le terrain, des tectoglyphes permettant de reconstruire l'ellipsoïde des déformations, elle va conduire à définir une loi de distribution des plans de drainage (voir comme exemple, fig. 16). Les relevés correspondant à cet exemple sont effectués sur le Causse du Larzac et montrent la distribution de fréquence des plans de drainage par rapport à la direction dans l'espace ; la représentation sur diagramme de Schmidt fournit, en outre, l'inclinaison de ces plans.

L'organisation du drainage, qui dépend des propriétés hydrodynamique du système, résultera de la combinaison entre la loi de distribution des plans de drainage et la loi de distribution des potentialités d'écoulement.

3. Structure des systèmes karstiques

Les différentes études conduites sur les systèmes karstiques ont permis d'en proposer une représentation qui, schématiquement, peut être décomposée en trois parties principales (A. Mangin, 1975, 1994, fig. 17 et 18).

- *La portion non karstique*

L'aquifère karstique peut être connecté à un impluvium non karstique et cette partie doit être intégrée au système si la totalité de son drainage se perd au contact des calcaires. La présence ou l'absence de cet impluvium distingue les **systèmes binaires** des **systèmes unaires**.

- *La zone d'infiltration*

Dans cette zone, l'hétérogénéité de l'aquifère karstique apparaît de façon forte. Tout d'abord, il faut, en surface, mettre à part la zone épikarstique (A. Mangin 1974) qui présente une forte porosité (5 à 10 %). Cette zone correspond à la partie supérieure très altérée des massifs karstiques dont l'épaisseur ne dépasse pas généralement quelques mètres. Sa répartition peut

être discontinue, et elle assure l'interface entre le karst et les phénomènes géodynamiques externes. C'est grâce à ses réserves qu'une grande partie de l'évapotranspiration s'effectue.

Dans la zone d'infiltration proprement dite, on distingue deux parties. La première, constituée de fissures largement ouvertes et karstifiées, autorise un écoulement important, de type monophasique. A l'inverse, la seconde est le siège d'un écoulement diphasique (air et eau) qui s'effectue dans une fine fissuration. La porosité de l'ensemble de la zone d'infiltration est de 2 % environ et le rapport entre l'écoulement monophasique et diphasique est variable suivant les systèmes karstiques.

Les écoulements verticaux dans la zone d'infiltration tendent ensuite à acquérir une forte composante horizontale, mais sans qu'il y ait saturation ; cette partie est appelée **zone de ruissellement souterrain**.

• La zone noyée

La zone noyée correspond à la partie saturée de l'aquifère et elle est souvent localisée uniquement vers l'aval.

C'est dans la zone noyée proprement dite que l'organisation de l'aquifère est la plus marquée, avec un réseau de drainage (domaine des rivières souterraines) et des systèmes annexes au drainage (SAD) : ensembles indépendants les uns des autres, mais tous en relation avec le drainage. Tantôt les systèmes annexes alimentent les drains, tantôt ils sont alimentés par eux. La porosité de la zone noyée peut atteindre 15 %, c'est bien évidemment la zone la plus intéressante à exploiter.

4. Incidence de la structure des karsts sur leur fonctionnement

Comme la réponse impulsionnelle est l'opérateur qui traduit très exactement la dynamique d'un système, sa forme rend compte des différentes composantes qui le constituent et des liens existants entre ces composantes. A partir de la connaissance que nous avons des karsts, on peut essayer de retrouver dans la forme de la réponse impulsionnelle le rôle des différents niveaux structuraux mis en évidence et leur impact sur le fonctionnement du système.

- Incidence de l'impluvium non karstique et de l'aquifère épikarstique.

Cette partie du fonctionnement est cruciale puisqu'elle intervient sur la fonction d'entrée. Que ce soit le ruissellement sur l'impluvium non karstique ou la mise en réserve dans l'aquifère épikarstique, l'effet qui en résulte est essentiellement un retard ; c'est en conséquence la fonction de phase de l'analyse spectrale qui constitue le meilleur indicateur de son influence. Quant à l'impact sur la forme de la réponse impulsionnelle, elle est difficile à percevoir. L'impluvium non karstique et la zone épikarstique sont en fait des systèmes qui étalent la fonction d'entrée ; il en résulte une réponse globale beaucoup plus amortie, effet indissociable de celui produit par l'aquifère proprement dit.

La neige provoque le même effet.

- Incidence de la structure de la zone d'infiltration

Comme le montrent les différents modèles utilisés, l'effet de l'infiltration, (A. Mangin, 1975), se traduit essentiellement sur la réponse impulsionnelle par la valeur du mode et la vitesse de décroissance de la courbe à son voisinage.

Il est important, toutefois, de signaler que l'observation de cet effet sur l'infiltration n'est possible qu'à condition qu'il existe dans la zone noyée un drainage suffisant. Dans le cas contraire, le filtre induit par une zone noyée peu transmissive occulte complètement l'observation sur l'effet de l'infiltration.

- Incidence de la structure de la zone noyée

C'est surtout au niveau de la traîne de la réponse impulsionnelle que se manifeste la façon dont la zone noyée intervient dans le fonctionnement du système. Pour un système bien drainé la traîne est inexistante. Pour un système avec des réserves, la traîne a une grande importance. Et, comme il vient d'être souligné, en l'absence de drainage, la zone noyée masque tout.

- La plurimodalité de la réponse impulsionnelle

Jusqu'à présent lorsque la réponse impulsionnelle est bimodale, le système a été interprété comme étant composite (A. Mangin et A. Pulido-Bosch, 1982, J. Benavente et A. Mangin, 1984). L'évocation des non linéarités conduit à reprendre cette interprétation. Dans l'hypothèse où les non linéarités seraient faibles, la bimodalité impose d'avoir deux sous-systèmes en parallèle avec des fonctionnements indépendants l'un de l'autre. En effet, des sous-systèmes en série ne permettent pas d'avoir cette bimodalité. Aussi, la nature composite a été associée, soit à l'existence de deux bassins hydrogéologiques quasi indépendants et drainés par la même source, soit à la présence de structures paléokarstiques réactivées. Dans les deux cas, la nature composite est également détectable sur le corrélogramme simple qui montre une rupture marquée.

Dans l'exemple d'Aliou, il en va différemment et la bimodalité observée n'est pas le résultat de systèmes composites. En fait, cette bimodalité est liée au caractère non linéaire du système. On sait, en effet, que les non linéarités dans le cheminement vers un comportement chaotique font apparaître des phénomènes de dédoublement (P. Manneville, 1991 ; J. E. Gouyet, 1992, A. Medio, 1992) se traduisant ici par une réponse oscillante : ce phénomène est appelé par les auteurs cités **intermittence** (il ne doit pas être confondu avec le mécanisme du même nom, spécifique aux aquifères karstiques, mais qui fait appel à un modèle hydraulique totalement différent). Ce phénomène d'intermittence par non linéarité a été particulièrement bien décrit en turbulence avec des réponses par bouffées (M. Lesieur, 1994).

- La variabilité de la réponse impulsionnelle

La structure de la zone noyée explique bien la variabilité de la réponse impulsionnelle. En effet, les drains déterminent la fonction transmissive et les systèmes annexes au drainage la fonction capacitive. Ces deux fonctions sont donc dissociées, mais, surtout, le contraste entre ces deux fonctions, pour ce qui est des paramètres hydrauliques, est très important, souvent de plusieurs puissances de dix. Dans le fonctionnement dynamique du système, les constantes de temps ne sont donc pas comparables et, dans ces conditions, la durée des impulsions d'entrée va jouer un rôle important. En crue par exemple, l'alimentation de toute la partie amont du système karstique provoque une impulsion brutale et les systèmes annexes n'ont pas le temps de vraiment réagir : l'aquifère est ainsi réduit, pour la zone noyée, aux drains. En moyennes eaux, les temps mis en jeu sont tels que les relations drains-systèmes annexes au drainage fonctionnent au mieux. En étiage, seule la partie aval, où sont situées les réserves, alimente l'exutoire. On comprend dès lors que, suivant le type de crue, tout se passe comme si l'on avait affaire à des aquifères différents. La modélisation va devoir prendre en compte cette caractéristique.

- L'impact de la fonction d'entrée pluie

La présence d'un drainage important dans les aquifères karstiques conduit une bonne partie de la pluie rapidement à l'exutoire. De ce fait, toutes les variations à court terme observées lors d'un épisode pluvieux vont se retrouver dans les débits. L'étude du signal pluie, à partir des analyses corrélatoire et spectrale, indique une grande complexité de ce signal surtout à court terme. Or, l'inertie des aquifères poreux ou fissurés est suffisamment importante pour filtrer complètement ces effets. Ce n'est pas le cas avec le karst. A cause de cela, une bonne partie de la complexité de la réponse de ces aquifères est en fait attribuable à la fonction d'entrée.

5. Conclusions

Si actuellement il fallait caractériser en quelques mots l'originalité des aquifères karstiques pour les distinguer des aquifères poreux ou fissurés, c'est avec l'évocation des non linéarités qu'il faudrait le faire. Ces non linéarités sont d'ordre varié : pertes de charge quadratiques, variabilité des caractéristiques d'état du système, discontinuité dans le fonctionnement. L'utilisation des modèles linéaires devient impossible, même comme approximation, dès l'instant où la karstification est vraiment développée. L'approche proposée est, comme dans tous les cas de ce type, une approche phénoménologique, basée sur l'observation et l'expérimentation. Elle permet, à l'heure actuelle, d'avoir une représentation satisfaisante des systèmes karstiques, mais, surtout, de proposer des outils pour aborder ce milieu particulier et pour le modéliser.

Travaux cités

- ARTHAUD, F., et 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. *Rev. Inst. Franç. Pétrole*, p. 715-731.
- BOURGUET, L. et RATSIMIEBO - 1970 - Tentatives d'application de la déconvolution au problème des bilans prévisionnels de quelques bassins hydrogéologiques. In: Réunion du groupe de travail "Bassins versants souterrains" organisé à Douai, avril 1970 par le secrétariat permanent pour l'Etude des problèmes de l'Eau, 3 p.
- BENAVENTE, J. et A. MANGIN - 1984 - Aplicacion del analisis de series de tiempo al sistema espeleologico hundidero-gato. *Actes I Congreso Español de Geologia*, 3, p. 541-553.
- BERGE, P., POMEAU, Y. et M. DUBOIS-GANCE - 1994 - Des rythmes au Chaos. Odile Jacob, Paris, 295 p.
- DREISS, S. J. - 1979 - An application of systems analysis to karst aquifers. In: Thèse, Université de Stanford, 193 p.
- ERASO, A. - 1985 - Metodo de prediccion de las direcciones principales de drenaje en el karst. In: *Kobie (serie ciencias naturales) Bilbao*, n° XV, p. 15-122.
- GOUYET, J. F. - 1992- Physique et structures fractales. Ed. Masson, Paris, 234 p.
- MANGIN, A. - 1975 - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doct. ès Sci., Université de Dijon, Dijon (*Ann. Spéléol.*, 1974, 29 (3), p. 283-332 ; 1974, 29 (4), p. 495-601 ; 1975, 30 (1), p. 21-124).
- MANGIN, A. - 1984a - Incidence du choix du pas de discrétisation d'un processus sur la simulation à partir de modèles. *Hydrogéol.- Géol. Ingén.* 3, p. 317-321.
- MANGIN, A. - 1984b - Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *J. Hydrol.* 67, p. 25-43.
- MANGIN, A. - 1994 - Karst hydrogeology. *Groundwater Ecol.*, p. 43-67.
- MANGIN, A. et A. PULIDO-BOSCH - 1982 - Aplicacion de los analisis de correlacion y spectral en el estudio de los acuiferos karsticos. *Tectniterrae*, 51, p. 53-65.
- MANNEVILLE, P. - 1991 - Structures dissipatives, chaos et turbulence. Ed. Aléa Saclay, CEA, 417 p.
- MARSAUD, B. - 1996 - Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. In: Thèse, Université de Paris XI (Orsay), 305 p.
- MARSILY, G. de. - 1981 - Hydrogéologie quantitative. Masson, Paris, 215 p.
- MEDIO, A. et G. GALLO - 1992 - Chaotic dynamics. Theory and applications to economics. Cambridge University Press, Cambridge, 344 p.

Figures 1 – 2 - 3

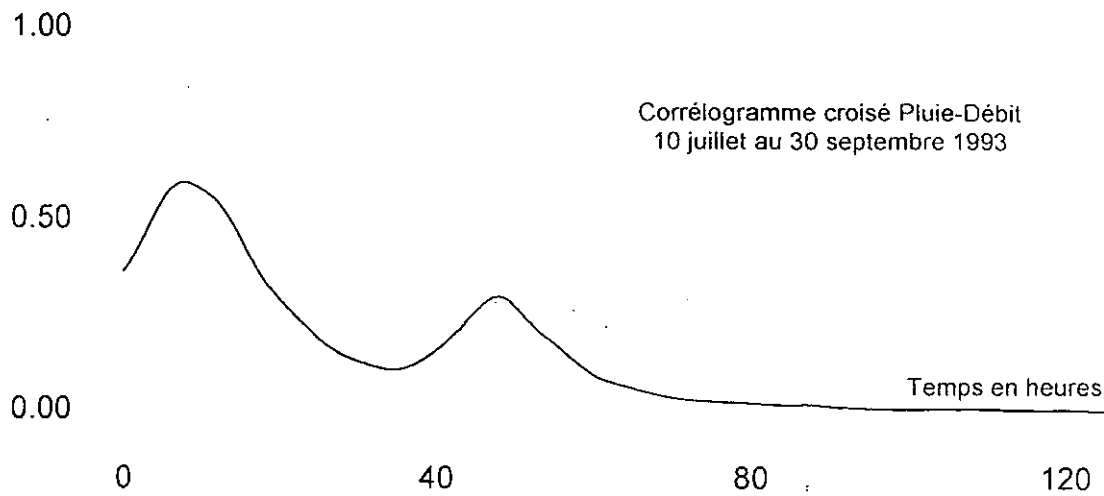


figure 1

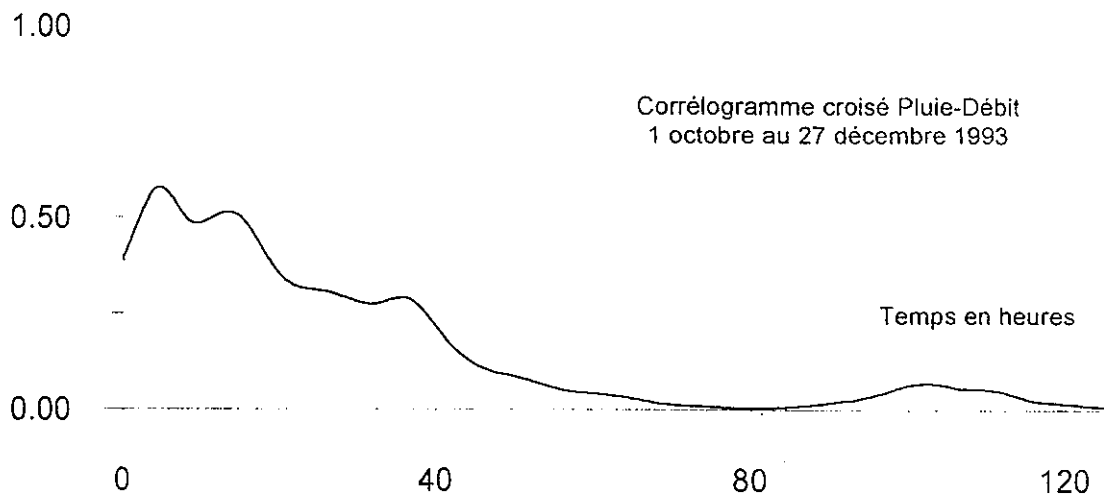


figure 2

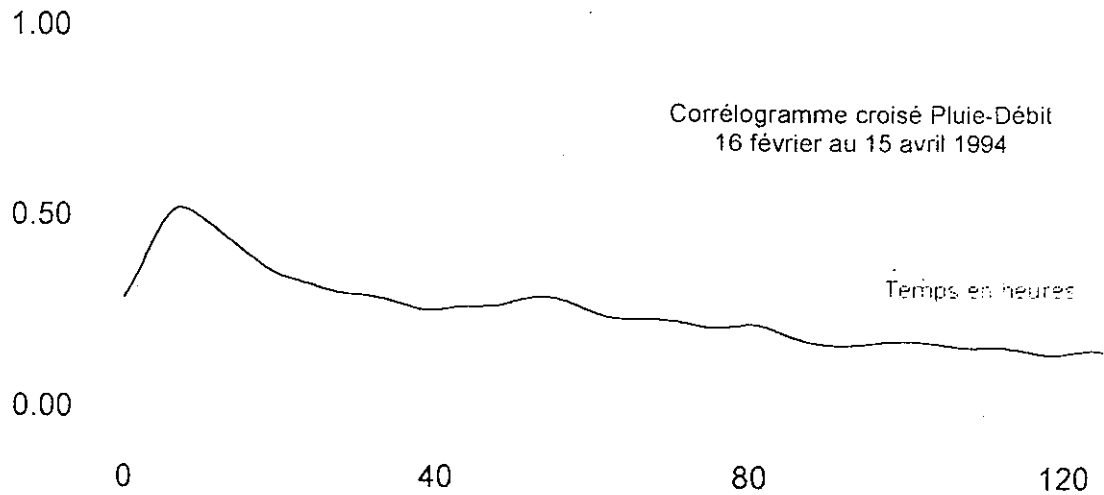


figure 3

Figures 4 – 5 - 6

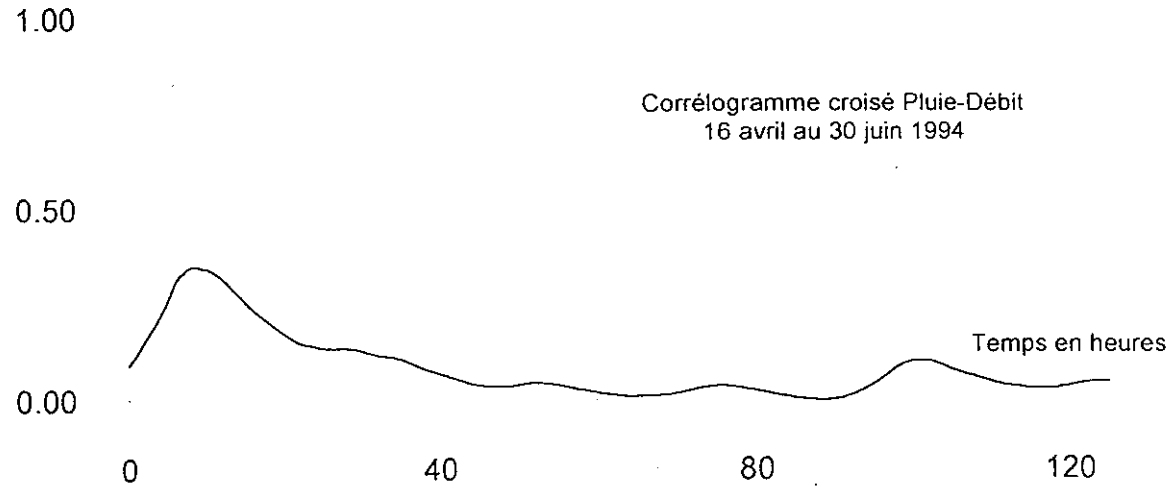


figure 4

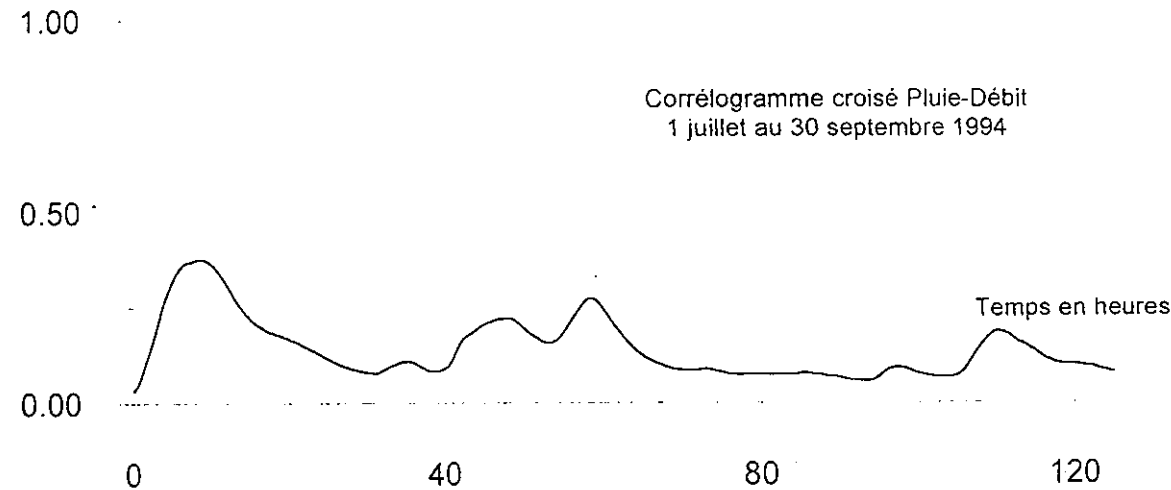


figure 5

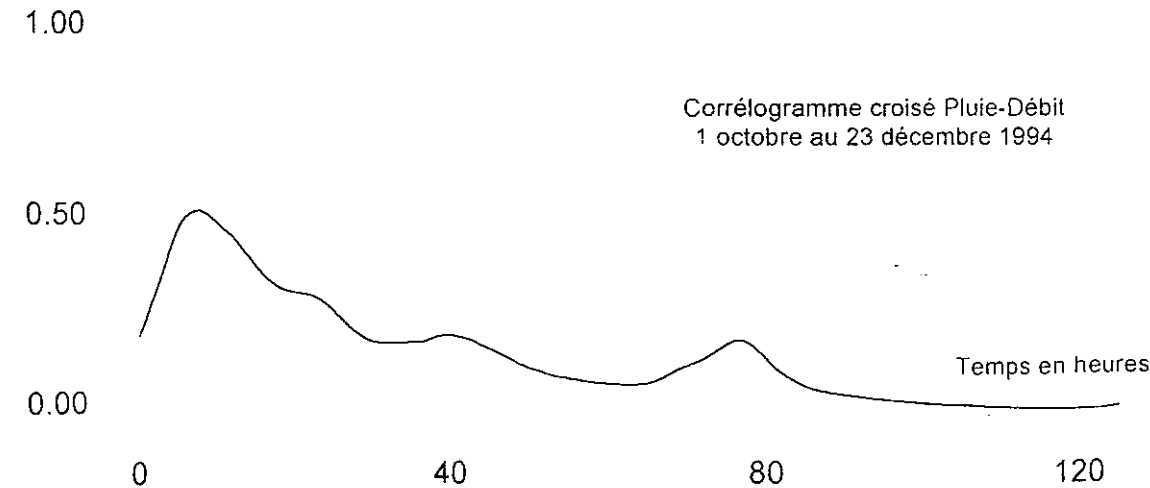


figure 6

Figures 7 – 8 - 9

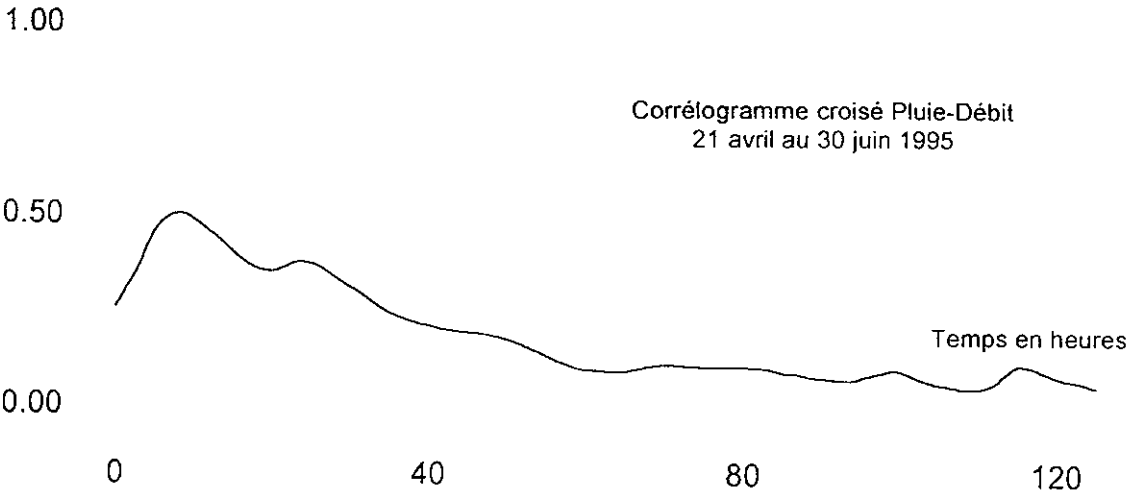


figure 7

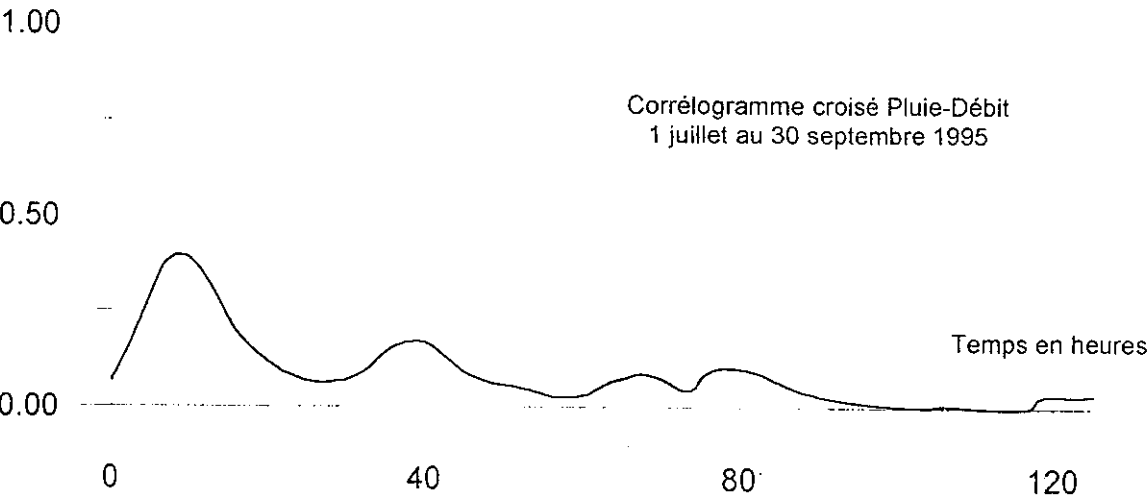


figure 8

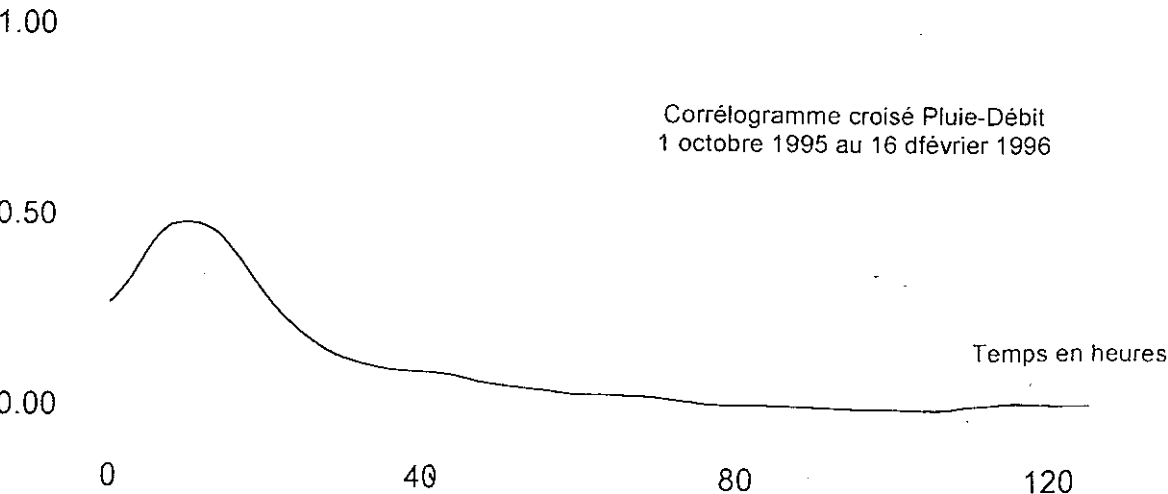
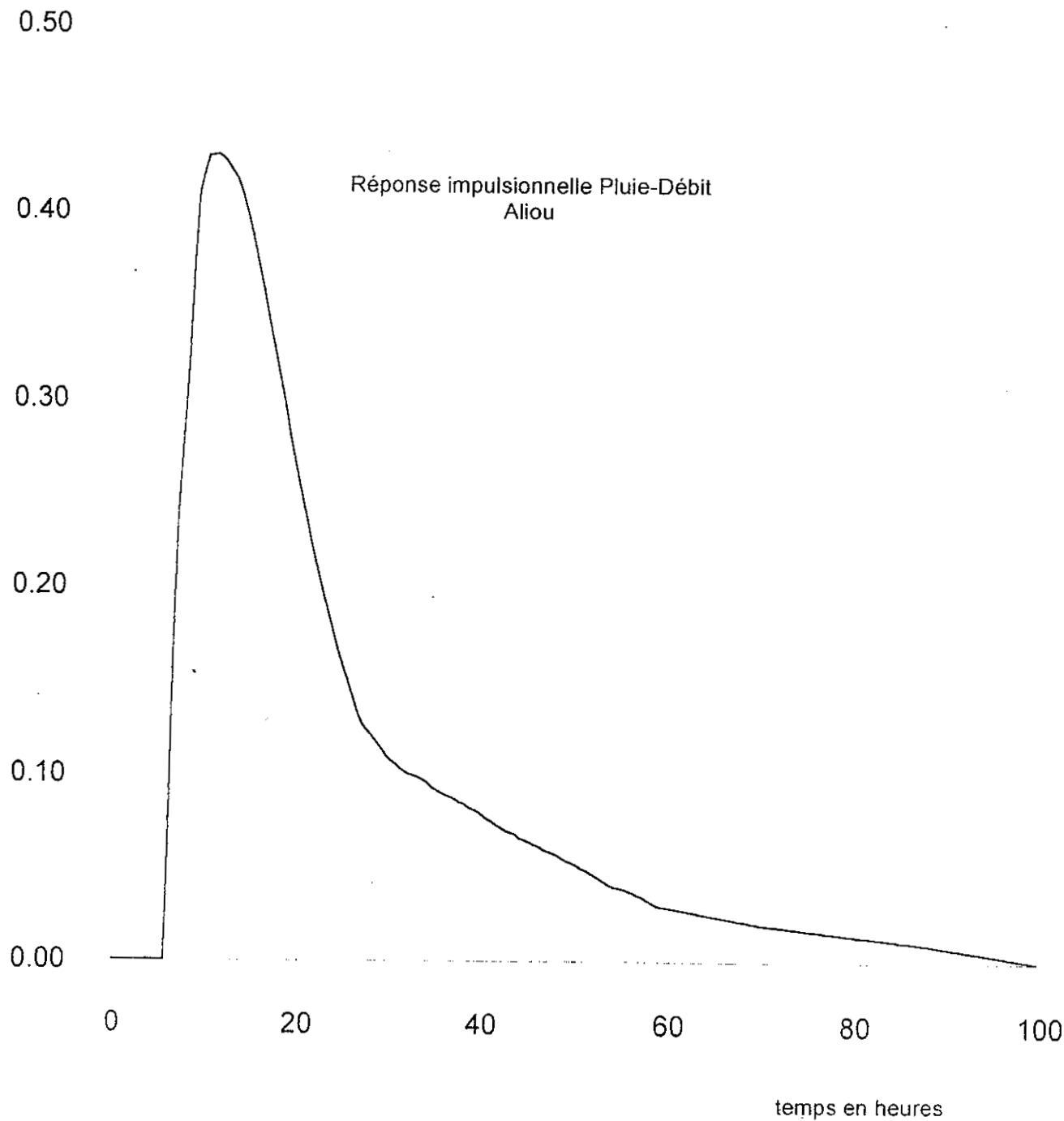


figure 9

Figure 10



Figures 11 - 12

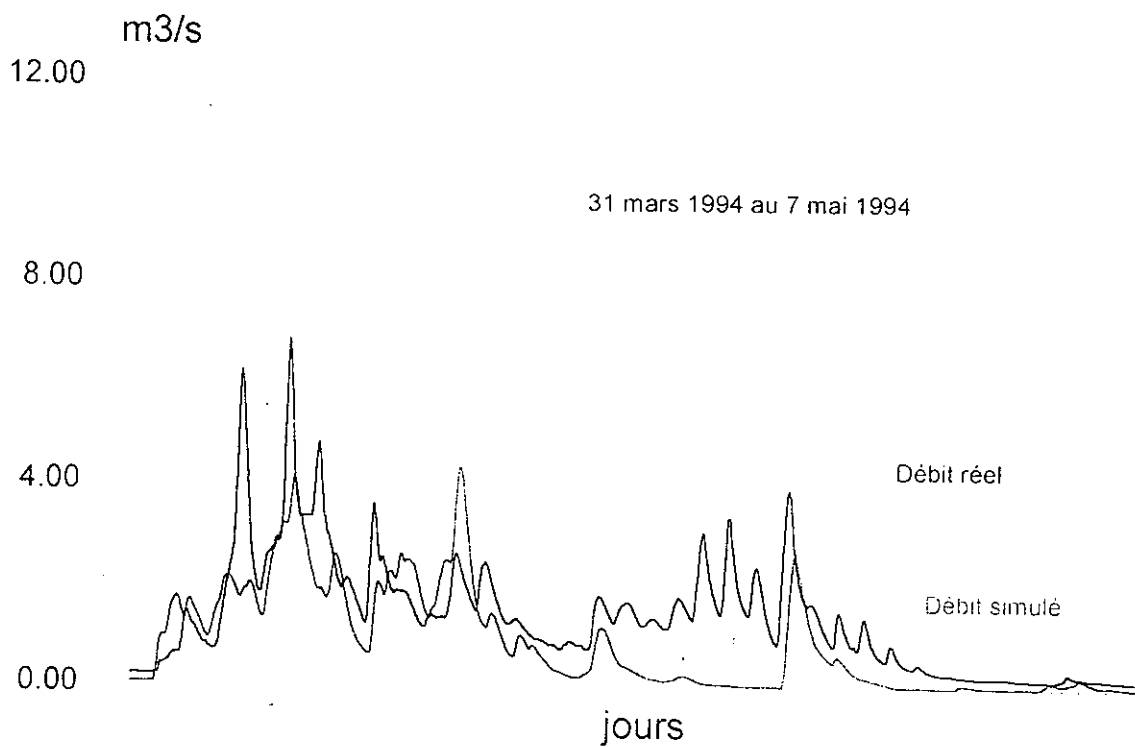


figure 11

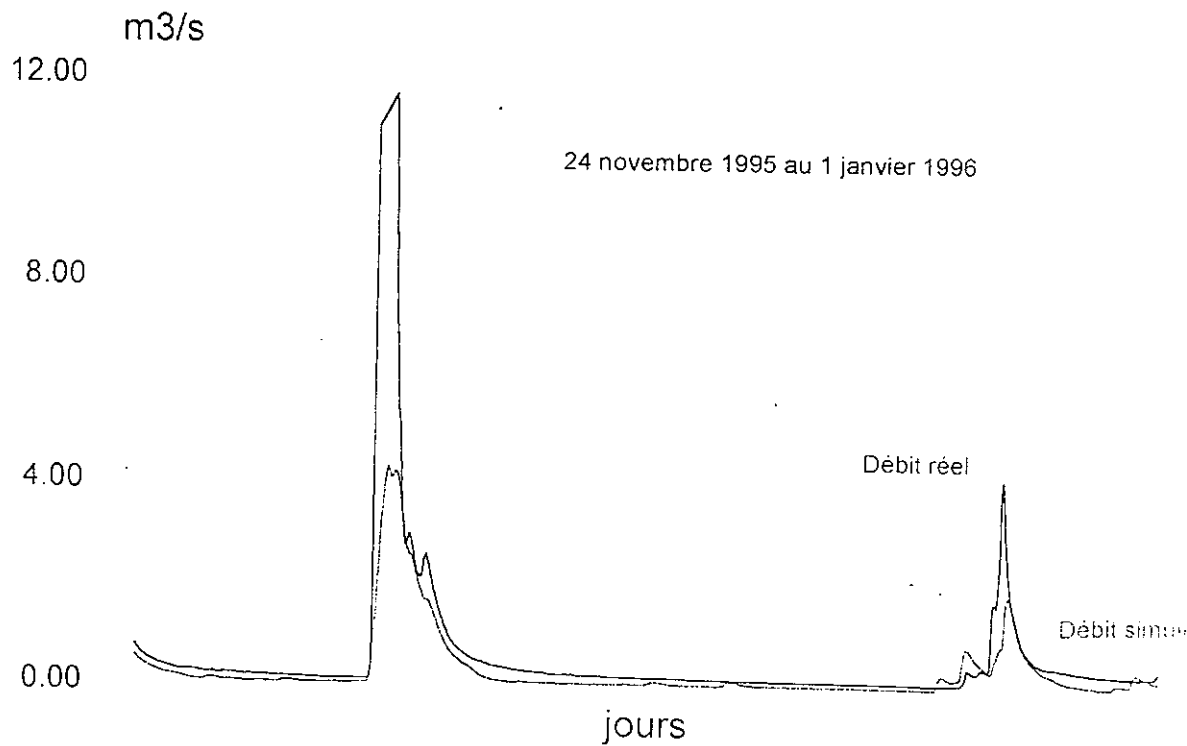


figure 12

Figures 13 - 14

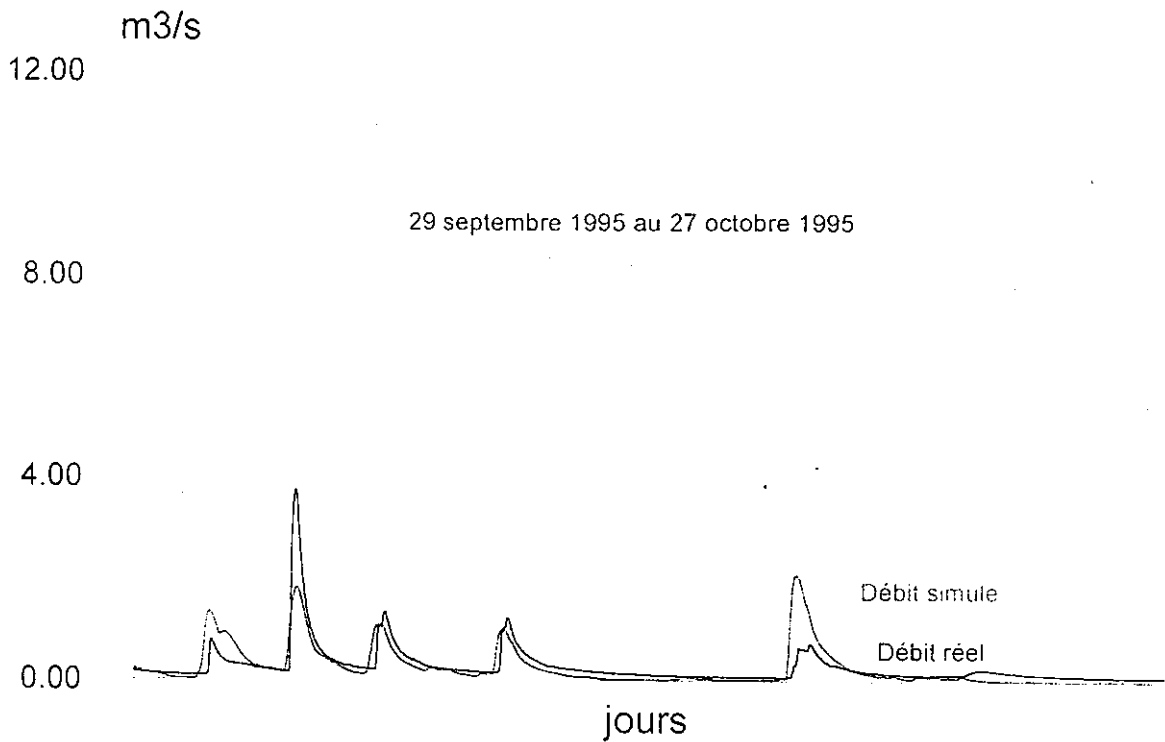


figure 13

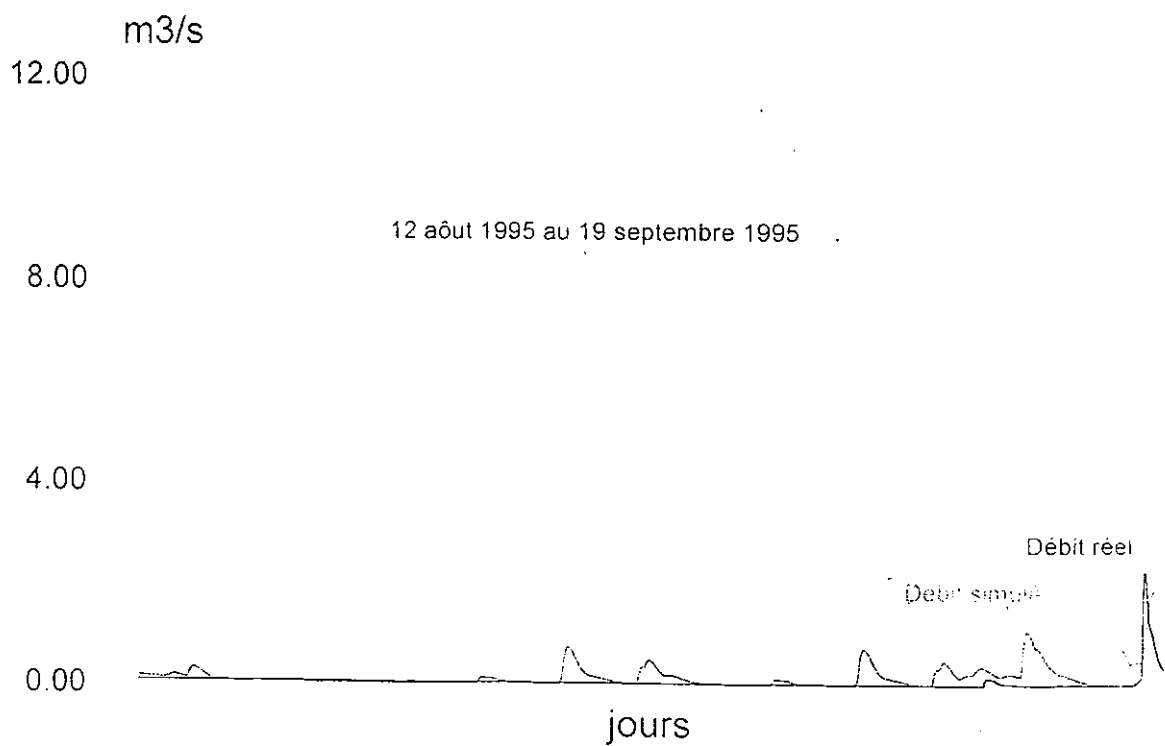


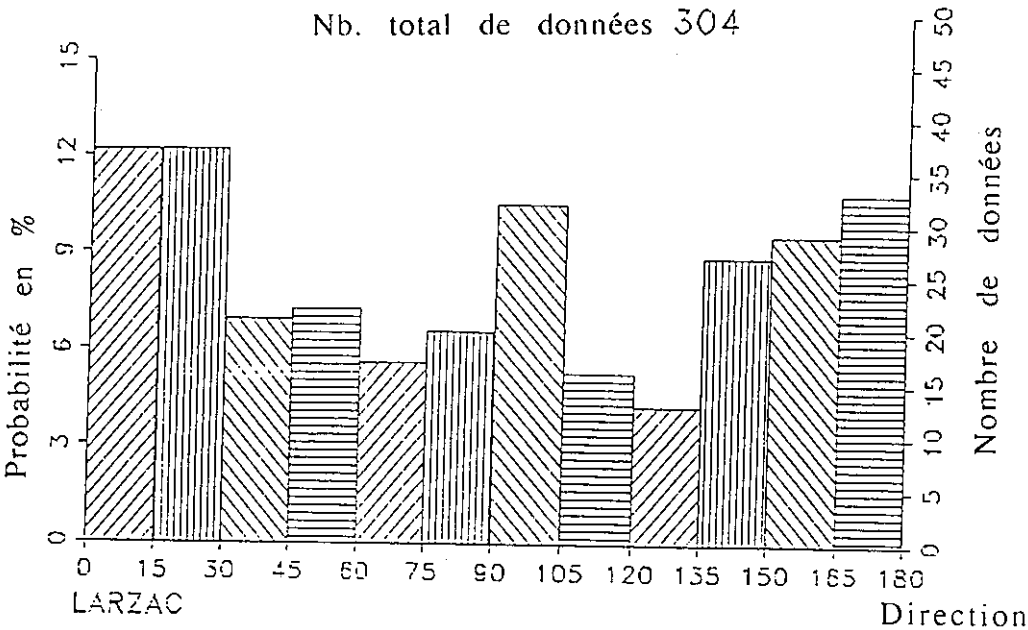
figure 14

Figure 15

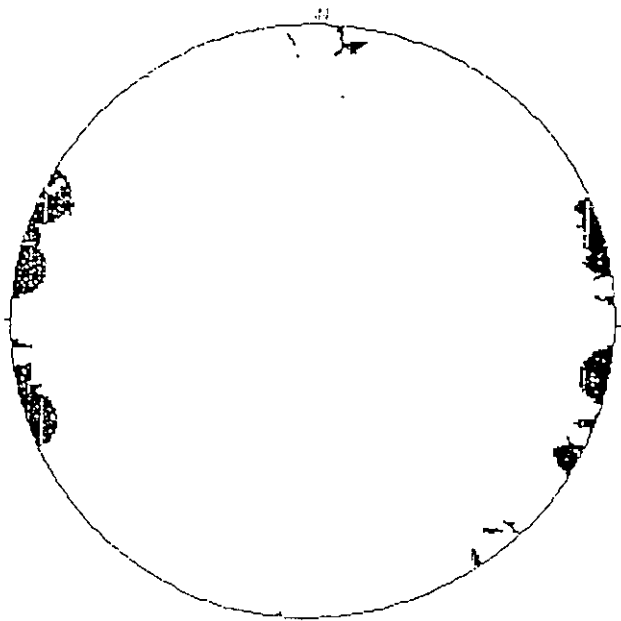
TYPES	EFFET MEMOIRE (RK = 0.2)	FREQUENCE DE COUPURE	TEMPS DE REGULATION	REPONSE IMPULSIONNELLE
<i>ALIOU</i>	Réduit (5 jours)	Très haute (0,30)	10 à 15 jours	
<i>BAGET</i>	Petit (10 à 15 jours)	Haute (0.20)	20 à 30 jours	
<i>FONTSTORBES</i>	Grand (50 à 60 jours)	Basse (0.10)	50 jours	
<i>TORCAL</i>	Considérable (70 jours)	Très basse (0.05)	70 jours	

Classification hydrologique des systèmes karstiques
figure 15

Figure 16



Fréquence de répartition des plans de drainage

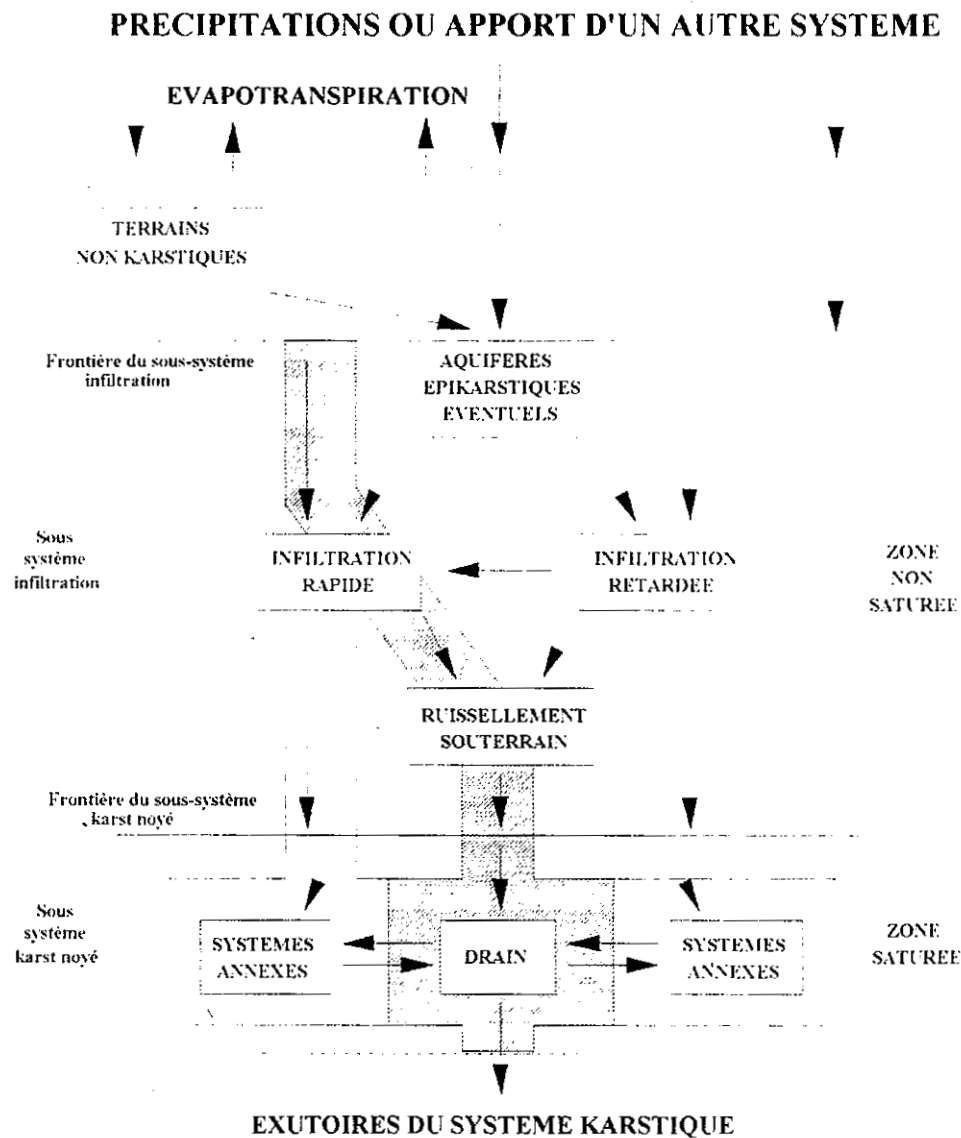


Nb. de pôles 304 LARZAC

Diagramme de Schmidt de la répartition des plans de drainage

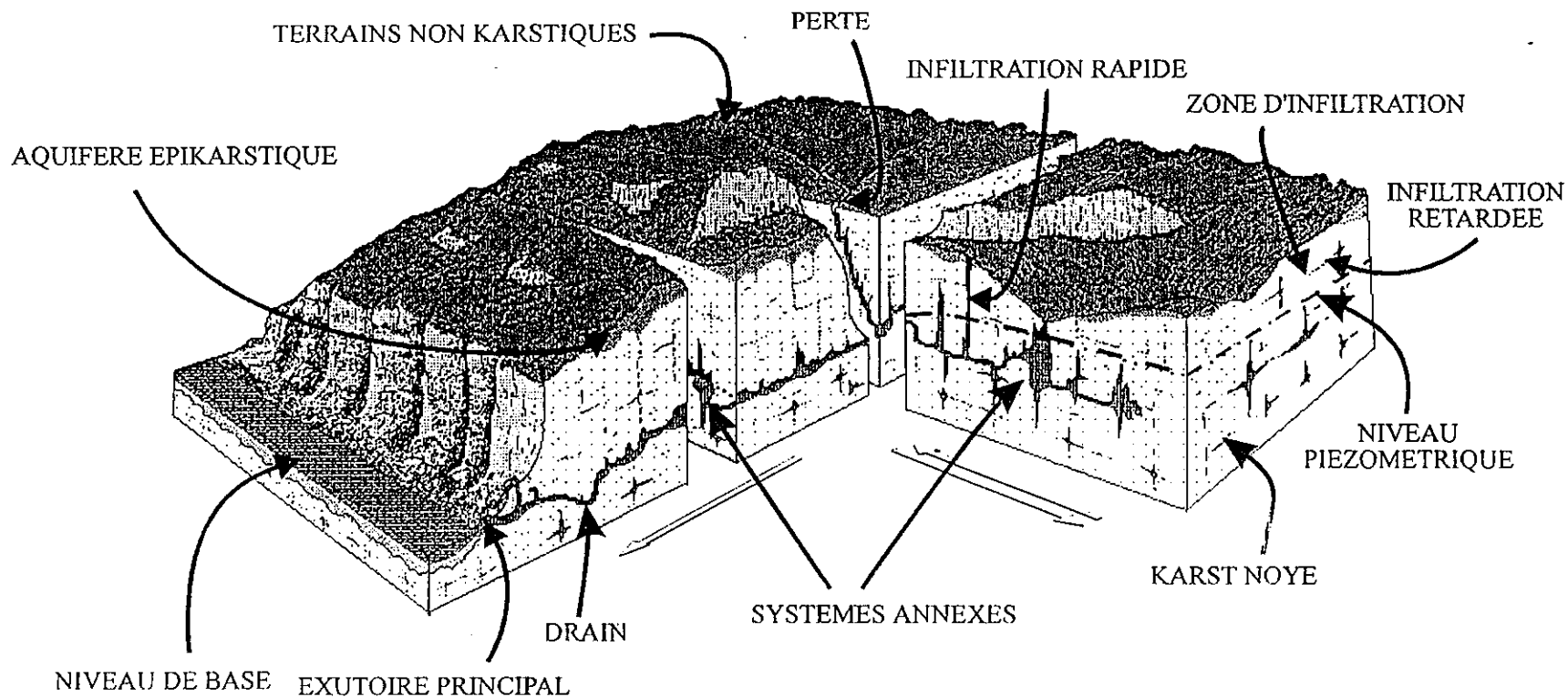
figure 16

Figure 17



Organisation schématique d'un système karstique
figure 17

Figure 18



Représentation conceptuelle d'un système karstique

figure 18

CONFÉRENCE :

A. MANGIN

Structure et fonctionnement des aquifères karstiques.

Intervenant

P. BEAUDEAU

Laboratoire du Havre

Question ou intervention

Les transformées en ondelettes sont-elles utilisées comme alternative aux méthodes temporelles ou bien fréquentielles (corrélogrammes, spectrogrammes) ?

Réponse

Les méthodes nouvelles évoquées pour mieux définir la dynamique des systèmes sont précisément l'analyse par ondelettes, l'utilisation du formalisme multifractale, la méthode des attractions de Tabens-Rudle.

Comme les résultats demandent une certaine initiation pour les lire et les exploiter, je ne les ai pas présentés.

Intervenant

J. MUDRY

Université de Franche-Comté

Question ou intervention

Il importe que les utilisateurs des méthodes d'identification des réponses impulsionnelles (corrélogrammes croisés) soient conscients du fait que la réponse de l'exutoire est la somme de la réponse du milieu karstique et celle de l'environnement. Par exemple sur la source de la Torcal où 50 % du débit de l'émergence provient du ruissellement superficiel.

Dans l'analyse structurale, il importe d'analyser l'état actuel des contraintes responsables de l'ouverture/fermeture des fractures. L'équipe de Besançon, qui a instrumenté les sites de Coaraze (Alpes) et de Vouglans (Jura) observe un comportement mécanique très différent pour des fissures ou joints de stratification d'orientation différente.

Réponse

Il existe des méthodes performantes pour connaître le fonctionnement des aquifères, il faut bien sûr faire attention à leur usage. Il est certain que si l'on s'intéresse uniquement aux données observées à l'exutoire, ce n'est pas forcément suffisant.

Approches conceptuelles de l'aquifère karstique. Problèmes méthodologiques et d'exploitation.

Ph. CROCHET (1) - B. MARSAUD (2)

(1) ANTEA Groupe BRGM - Directeur Languedoc Roussillon
Parc Club du Millénaire Bât. 19 - 1025, rue Henri Becquerel - 34036 Montpellier Cedex 1

(2) ANTEA Groupe BRGM - Agence Haute-Normandie
Parc de la Vatine - 10, rue Sakharov - 76130 Mont Daint-Aignan

Résumé

La structure et le fonctionnement des aquifères karstiques sont fondamentalement différents de ceux des milieux poreux et fissurés. Plusieurs spécificités et contraintes doivent obligatoirement être prises en compte dans leur étude :

- hétérogénéité du milieu,
- hiérarchisation des vides et de l'écoulement,
- dissociation des fonctions capacitatives et transmissives (systèmes annexes au drainage et drains),
- caractéristiques particulières des écoulements (pertes de charge singulières).

Par ailleurs, à cette spécificité, s'ajoute la grande diversité des types d'aquifère que l'on peut rencontrer selon leur degré *d'évolution* (structure faiblement ou fortement organisée) et leur *fonctionnalité* (adéquation entre l'organisation des vides et les écoulements). En conséquence, l'exploitation et la protection de ces aquifères nécessitent de disposer préalablement d'informations sur le fonctionnement et la structure de ces aquifères pour les identifier.

Compte tenu de la complexité du milieu, il est proposé une approche par étapes :

- la première étape (*phase d'identification*) a pour but d'identifier le type de système et de mettre en évidence la présence de réserves. Elle s'appuie sur diverses méthodes, tant conventionnelles (géologie structurale, stratigraphie, etc.) que spécifiques au milieu karstique (débits classés, analyse des courbes de récession, analyses corrélatoires et spectrales) ;
- la seconde *phase de caractérisation* doit permettre de préciser les caractéristiques de la zone noyée à partir de l'étude des transferts de masse par traçages et hydrogéochimie ;
- lorsque la présence de réserves est mise en évidence, une troisième étape (*phase de démonstration*) est mise en oeuvre pour tester leur mobilité. Elle repose principalement sur la réalisation de pompages d'essai. Les informations obtenues permettent de déterminer l'aménagement (pompages à l'exutoire, sur un regard ou en forage, barrage souterrain du drain) et le mode d'exploitation les mieux adaptés à la structure du système étudié. C'est

notamment le cas pour la position du drain par rapport aux réserves qui est le principal facteur conditionnant le type d'exploitation à adopter ;

- enfin, la *phase d'évaluation* doit permettre d'appréhender le fonctionnement de l'ensemble du système en condition d'exploitation.

L'ensemble de cette stratégie est présentée dans cette note, depuis les concepts théoriques sur lesquels elle repose jusqu'à la description des outils qui en découlent. Elle permet aujourd'hui d'envisager une exploitation et une protection rationnelles de ces aquifères, basées sur une reconnaissance de leur spécificité.

1. Intérêt hydrogéologique des aquifères karstiques

L'homme a toujours porté au karst un intérêt particulier lié aux propriétés de ce milieu favorisant l'exploitation de débits importants sur des sources. La source du Lez, exploitée par la ville de Montpellier, en est un exemple représentatif : le débit d'exploitation, initialement de 25 l/s en 1854, n'a cessé de croître (50 l/s en 1879, 250 l/s en 1900, 400 l/s en 1931, 800 l/s en 1965) pour atteindre la valeur actuelle de 1,2 m³/s. Citons aussi les sources de la Vanne qui contribuent à l'alimentation de la ville de Paris en eau potable depuis 1870.

Toutefois, ces exemples représentent des cas particulièrement favorables qui ne reflètent pas la situation véritable de l'exploitation des aquifères karstiques. Si en France, environ la moitié des approvisionnements en eau potable sont assurés par les eaux souterraines, les aquifères karstiques n'y participent que relativement peu, bien qu'ils représentent sensiblement le tiers des aquifères à surface libre du territoire national. Cette proportion est encore plus élevée dans certaines régions, comme la bordure méditerranéenne ou la région Midi-Pyrénées où elle atteint 55 %.

Trois raisons principales expliquent que les aquifères associés au milieu karstique sont souvent délaissés par les hydrogéologues et les aménageurs :

- la méconnaissance de leur structure et de leur fonctionnement (disposition des vides et localisation des réserves qui entraînent un taux d'échec important lors des tentatives d'exploitation par forage) ;
- les difficultés rencontrées pour gérer leurs ressources qui présentent de grandes variations, aussi bien en stock qu'en flux, à l'échelle du cycle hydrologique ;
- dans certains cas, une forte vulnérabilité à la pollution due à la rapidité des écoulements.

Aussi les exploitations les plus courantes se contentent souvent de capter le débit naturel des sources sans solliciter les réserves contenues dans le réservoir.

Il n'en demeure pas moins que les karsts possèdent de fortes potentialités et qu'à ce titre ils représentent un objectif de choix pour l'hydrogéologue. Ainsi, la spécificité de ces aquifères peut devenir un avantage pour la gestion de leur ressource car les volumes d'eau, contenus dans des vides de grande taille, sont généralement importants. Il est donc possible d'exploiter

ces aquifères selon un mode particulier où l'on ne cherche plus, comme dans les milieux poreux ou fissurés, un débit constant sur une longue période, mais plutôt un fort débit sur une courte durée pour faire face à des demandes saisonnières.

2. Spécificité du karst

2.1. Le processus de karstification

La karstification est un phénomène d'érosion physico-chimique lié à la capacité des minéraux composant les roches carbonatées (calcite, dolomite, aragonite) d'être solubles dans des eaux contenant du gaz carbonique (CO_2). Toutefois, ce processus ne se limite pas à un simple phénomène de dissolution qui limiterait l'aquifère karstique à un agencement de conduits reliant des pertes de rivières de surface à une résurgence, comme le représente la vision initialement et intuitivement imposée par l'exploration spéléologique (Martel, 1894) ou à un ensemble régulier de fractures élargies drainant des eaux stockées dans des blocs constituant une matrice assimilable à un milieu poreux (Droge, 1974).

Ces deux conceptualisations, qui peuvent toutefois correspondre ponctuellement à des cas particuliers, ne prennent pas en compte la caractéristique principale du karst qui est d'évoluer vers une structure organisée à l'échelle d'un massif, avec une hiérarchisation des écoulements souterrains analogue à celle des réseaux hydrographiques de surface. L'unité de référence est alors le système karstique, défini comme une unité de drainage (Mangin, 1975).

Cette évolution entraîne une très forte hétérogénéité du milieu à toutes les échelles, qui interdit l'usage des propriétés d'homogénéité. La principale conséquence est l'impossibilité d'identifier dans les aquifères karstiques un volume élémentaire représentatif (VER) de l'ensemble, comme c'est le cas pour les aquifères poreux ou fissurés.

Il en résulte que les modèles classiquement employés en hydrogéologie ne peuvent pas être utilisés pour reconnaître et décrire la structure du milieu karstique car leurs paramètres n'ont plus de signification physique compte tenu de l'impossibilité de décrire la structure du milieu sur l'ensemble du système. Ces modèles peuvent tout au plus être utilisés, dans certains cas, comme modèles de comportement, les paramètres ne devant alors être considérés que comme de simples paramètres de calage pour une simulation.

A l'inverse, il a été montré que le développement des réseaux karstiques est un processus dynamique en perpétuelle évolution au cours du temps. Il est principalement conditionné par les deux facteurs suivants (Mangin, 1982):

- *l'énergie* : elle représente le potentiel de karstification et intègre différents aspects tels que les paramètres climatiques (quantité d'eau et de CO_2 disponible) et la géométrie externe du massif (différence de potentiel hydraulique entre les points hauts et le niveau de base, présence d'écoulements de surface concentrant l'énergie en un point donné, couverture plus ou moins perméable, etc.) ;

- l'état représenté par la structure interne du massif (importance de la fracturation, porosité, lithologie, teneurs en insolubles, etc.) et son degré d'évolution.

L'énergie disponible et l'état à un moment donné régissent les *flux* d'eau (débit d'eau s'écoulant aux exutoires) et de gaz carbonique qui peuvent transiter par le système karstique, conditionnant ainsi l'intensité de la karstification. Il s'établit ainsi une interaction entre l'écoulement et la structure des vides. C'est cet échange de matière et d'énergie avec l'extérieur qui est à l'origine de l'organisation des écoulements, concrétisée par le développement d'une *structure de drainage*. Celle-ci évolue jusqu'à ce que s'établisse un équilibre avec la morphologie externe. La modification du niveau de base (par approfondissement d'un cours d'eau par exemple) provoque la création de nouvelles structures de drainage et éventuellement l'abandon de celles existantes (soit par incorporation dans la zone d'infiltration, soit par ennoyage et colmatage) ou la création d'une nouvelle structure.

2.2. Structure de l'aquifère karstique

Le système karstique peut se être décomposé en plusieurs sous-systèmes (cf. figures 1 et 2) (Mangin, 1975).

- *L'impluvium non karstique*, drainé en totalité par l'aquifère karstique sans faire partie de celui-ci.
- *La zone d'infiltration* qui représente la partie non saturée de l'aquifère assurant l'écoulement des eaux d'infiltration au travers du massif karstique, avec souvent une composante horizontale importante (zone de ruissellement souterrain). Dans sa partie la plus proche de la surface, où les phénomènes d'altération sont très importants, les eaux d'infiltration peuvent être retenues momentanément dans un aquifère temporaire : l'*aquifère épikarstique*.
- *La zone noyée* : elle se développe principalement à l'aval, sans nécessairement s'étendre à l'ensemble carbonaté, ni se superposer parfaitement à la zone non saturée comme c'est le cas des aquifères traditionnels. On y distingue deux types de structure :
 - l'axe de drainage ou *drain*, constitué d'un ensemble de conduits, est l'ossature autour de laquelle s'organise la zone noyée. Il peut se développer dans la partie supérieure de la zone noyée (karst de type jurassien) ou au contraire être situé en profondeur (karst de type vaclusien). L'écoulement y est très rapide, voire turbulent. En étiage, il assure le drainage des réserves alors qu'il les alimente en période de crue. Au travers de son développement, de sa géométrie et de sa position, le drain apparaît comme un facteur déterminant de la dynamique du système karstique.
 - les *systèmes annexes au drainage* (SAD) sont constitués par des vides de grande taille, anastomosés, situés de part et d'autre du drain, et organisés en ensembles indépendants bien individualisés. L'écoulement y est très lent et le temps de séjour long. Les vides qui les composent peuvent être disposés sous le niveau de l'exutoire et sous le niveau du drain. La relation avec l'axe de drainage peut s'effectuer par l'intermédiaire de conduits de taille variable disposés plus ou moins en profondeur.

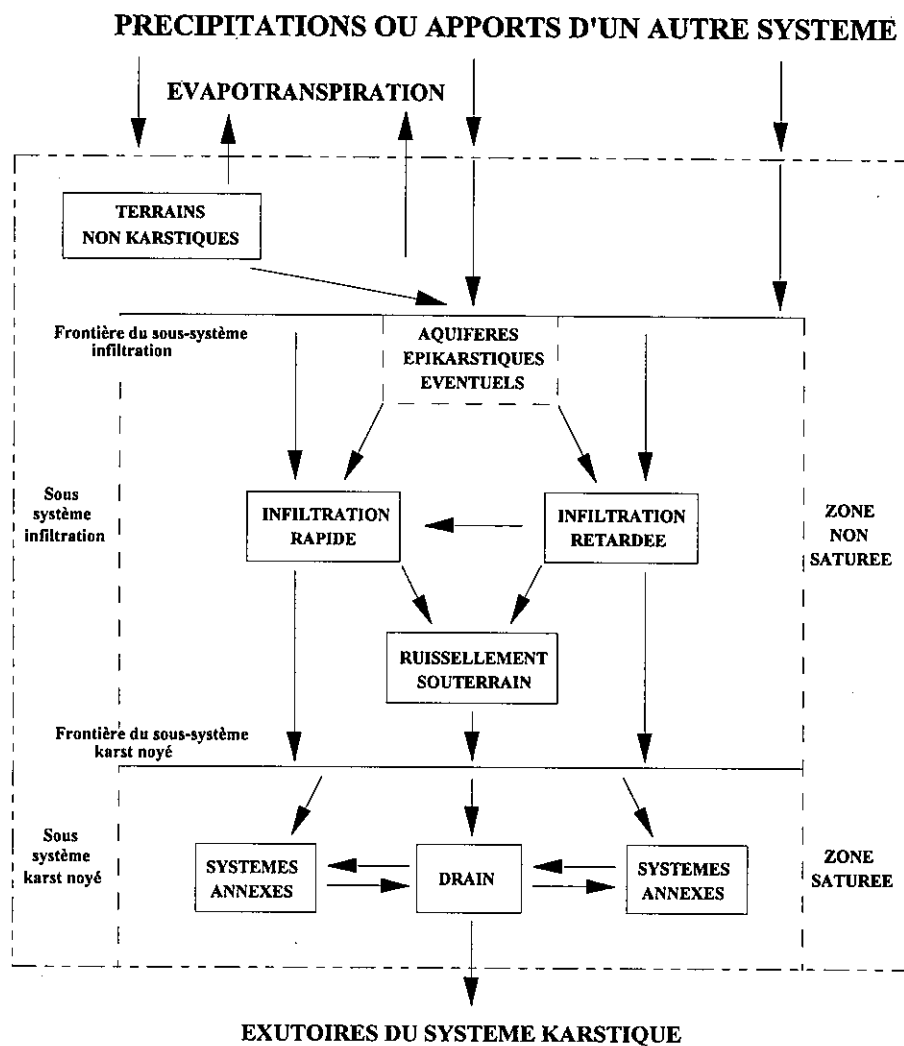


Figure 1 - Schématisation de l'aquifère karstique (Mangin, 1975)

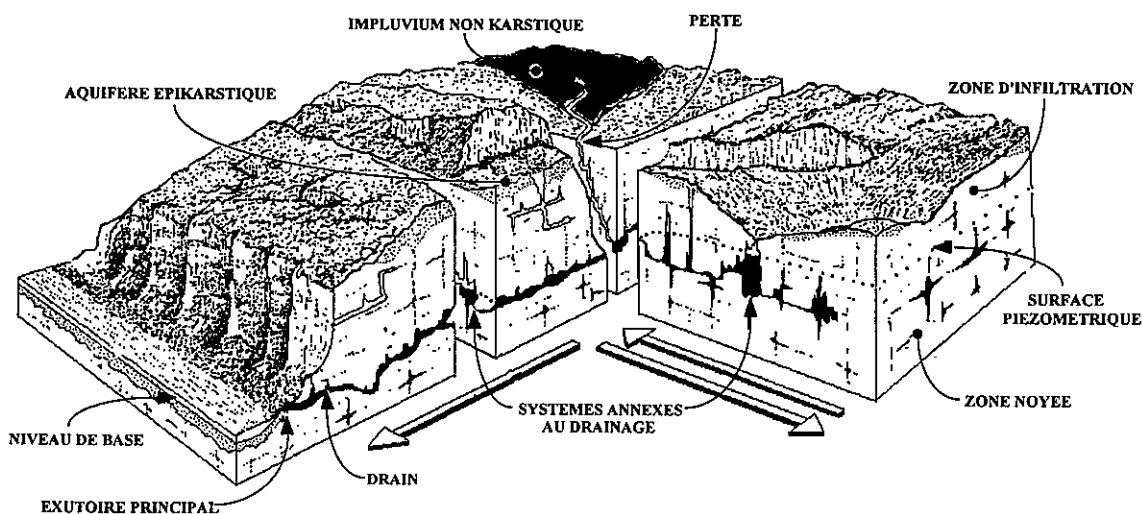


Figure 2 - Représentation conceptuelle de l'aquifère karstique (Mangin, 1975)

Un tel schéma explique la différence fondamentale existant entre la zone saturée des karsts et celle des aquifères poreux ou fissurés. Dans ces milieux, chaque pore ou fissure assure à la fois la fonction transmissive (écoulement) et la fonction capacitive (stockage) de l'aquifère. Dans le cas de la zone noyée des karsts, ces deux fonctions sont séparées : le drain assure la **fonction transmissive** et les systèmes annexes **la fonction capacitive**.

L'ensemble de ces rappels conduit à souligner certains points :

- tous les aquifères karstiques ne possèdent pas des réserves importantes dans la zone noyée : celles-ci sont liées à la présence de systèmes annexes ;
- les réserves, lorsqu'elles existent, occupent des réservoirs discontinus et hétérogènes, constitués d'ensembles indépendants les uns des autres (SAD), mais qui sont tous en relation avec le drain. Ces réservoirs, souvent constitués par des cavités de grandes dimensions, ne doivent pas être assimilés à des réseaux de fentes et de fissures ;
- les réserves peuvent être situées sous le niveau de la source et atteindre des profondeurs supérieures à 100 m (systèmes du Lez, de la fontaine de Vaucluse, des Chartreux). De ce fait, les relations entre les SAD et le drain, peuvent s'établir à la faveur de circuits hydrauliques complexes et relativement profonds.

2.3. Diversité et fonctionnalité des aquifères karstiques

Comme nous l'avons vu dans les paragraphes précédents, la principale caractéristique d'un aquifère karstique est sa nature évolutive liée au processus de karstification. C'est ainsi le seul milieu pour lequel l'interaction entre l'eau et l'encaissant débouche sur une profonde modification des propriétés aquifères initiales (évolution des vides à partir d'une porosité originelle jusqu'à la mise en place d'une unité de drainage). Il en résulte une grande diversité de structure et de fonctionnement selon :

- le degré d'évolution du système,
- son degré d'organisation (hiérarchisation plus ou moins importante des écoulements),
- la position de l'axe de drainage par rapport à l'exutoire.

A ces différents critères, s'ajoute la notion de *fonctionnalité* qui traduit l'adéquation entre l'existence d'une structure karstique (vides organisés de grande taille) et les écoulements (grandes vitesses liées à un fort potentiel hydraulique).

Le karst est *fonctionnel* lorsque ces deux conditions sont vérifiées de façon simultanée, c'est à dire que **les vides et les écoulements sont organisés** (Mangin, 1982).

Le tableau 1 propose une classification basée sur la structure et le fonctionnement d'un système karstique (Marsaud, 1996).

		fonctionnement karstique	
		non	oui
structure	non	aquifères carbonatés fissurés (type 1)	<i>pas de fonctionnement karstique possible en l'absence de structure karstique</i>
karstique	oui	systèmes karstiques non fonctionnels (type 3)	systèmes karstiques au sens strict (type 2)

Tableau 1 - Classification des aquifères karstiques basée sur leur structure et leur fonctionnement

type 1 : aquifères carbonatés en cours de karstification pour lesquels il n'existe pas encore de structure organisée de drainage. Leur comportement hydraulique est assimilable à celui des milieux fissurés, la karstification n'intervenant que sur l'ordre de grandeur des perméabilités. Les pertes de charges dans l'aquifère sont linéaires, ce qui permet d'utiliser les schémas hydrauliques reposant sur la loi de Darcy. Il s'agit de systèmes pour lesquels **ni les vides ni les écoulements ne sont organisés**. Ce type comprend aussi les aquifères fissurés à karstification locale comme la craie.

type 2 : aquifères karstiques fonctionnels dans lesquels **les vides et les écoulements sont organisés** et en adéquation. Leurs principales caractéristiques sont récapitulées ci-dessous :

- vides de grandes tailles,
- dissociation des fonctions transmissive (assurée par les drains) et capacitive (SAD),
- hétérogénéité et compartimentage de la zone noyée,
- existence de forts contrastes de vitesse,
- pertes de charge singulières entraînant des phénomènes d'inertie,
- comportement hydraulique conditionné par l'état du système.

type 3 : aquifères ayant une structure karstique qui n'est pas utilisée en raison d'un potentiel hydraulique trop faible. Ils sont appelés "*aquifères karstiques contrôlés aux limites*" (Marsaud, 1996) ou "*aquifères karstiques non fonctionnels*". L'écoulement n'est alors plus imposé par la structure du magasin mais par les conditions aux limites. C'est le cas par exemple de réseaux qui se sont trouvés ennoyés suite à la remontée du niveau de base ou de karsts fossiles sous couverture devenus captifs. Bien qu'ils présentent des vides de grandes dimensions, leur comportement hydraulique est analogue à celui des milieux poreux en raison de vitesses d'écoulement faibles. Ils peuvent toutefois redevenir fonctionnels si les structures de drainage sont réactivées, ce qui est le cas lors de pompages à fort débit entraînant des rabattements importants. **Les vides sont organisés mais cette organisation n'est pas utilisée par les écoulements.**

Il apparaît que des systèmes karstiques peuvent avoir le même comportement hydraulique non fonctionnel alors que leur structure est fondamentalement différente (types 1 et 3).

2.4. Conclusion

Il n'existe pas un seul type de karst mais une infinité en fonction de leur degré d'évolution, de leur structure et de leur fonctionnalité.

C'est souvent à la méconnaissance de cette spécificité que doivent être attribués les nombreux échecs rencontrés lors de tentatives d'exploitation, ainsi que les difficultés en matière de protection des ressources en eau des karsts. De même, certains résultats positifs, en particulier par forages, ne peuvent souvent pas être reliés à une réelle connaissance du système. Ils sont alors attribués à la "chance" d'avoir recoupé un conduit dans un milieu très hétérogène.

De même, cette diversité explique en partie certaines divergences sur la nature de la structure du karst entre "écoles", chacune essayant de proposer une structure universelle et exclusive correspondant à un ou plusieurs cas observés. Une telle vision restrictive est en contradiction avec la notion même d'évolution du magasin par le processus de karstification.

Il en résulte que l'aquifère karstique doit faire l'objet d'une approche particulière permettant de choisir, en fonction de ses caractéristiques, les méthodes les plus appropriées à sa description et le mode d'exploitation le mieux adapté à sa structure.

3. Méthodologie d'étude des aquifères karstiques

3.1. Approche fonctionnelle et structurelle

Il existe deux approches couramment utilisées en hydrogéologie pour appréhender les caractéristiques d'un aquifère et les conditions d'écoulement :

⇒ **Approche déterministe ou structurelle**

Cette approche fait partie des sciences prédictives. Elle consiste à réaliser des mesures de terrain, afin d'introduire celles-ci dans un modèle présentant les caractéristiques supposées du système hydrogéologique étudié. Ce modèle est d'abord paramétré pour reproduire les données observées (phase de calage) avant d'être utilisé à des fins de simulation pour prévoir le comportement de l'aquifère face à des événements non observés. La validation de tels modèles suppose de façon explicite la représentativité physique des paramètres introduits. Le modèle est sensé être une représentation acceptable de la réalité dont il devient le moyen privilégié d'identification.

⇒ **Approche systémique ou fonctionnelle**

Cette deuxième démarche, qui se réfère aux sciences descriptives, repose sur une connaissance approfondie de la structure et du fonctionnement du système. A partir des informations déduites de cette description, l'interprétation est synthétisée par un modèle conceptuel (ou physique) permettant d'expliquer les observations de terrain. Les paramètres du modèle ont pour vocation de constituer des "repères" permettant une description du milieu. Les modèles utilisés sont généralement statistiques.

L'approche *déterministe* suppose une connaissance précise de la structure du milieu, celui-ci devant pouvoir être discrétisé spatialement en ensembles homogènes. Elle est la base des méthodes de l'hydrogéologie actuelle et son utilisation pour les milieux poreux et fissurés est parfaitement adaptée et justifiée. Elle débouche sur la détermination de paramètres physiques (perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement) qui sont caractéristiques de la structure du milieu et permettent de quantifier les écoulements par l'intermédiaire d'équations analytiques.

L'approche *fonctionnelle* caractérise le fonctionnement global de l'aquifère à partir d'informations principalement recueillies aux exutoires (débits, chimie, traçages) : le fonctionnement des systèmes est décrit à partir des variations de paramètres dans le temps. Le référentiel n'est donc plus le même que pour l'approche *structurelle* qui porte sur des données spatiales. L'information concernant l'intégralité du système est recueillie en un seul point. Dans ces conditions, il convient de disposer de chroniques fiables, continues et suffisamment longues pour être représentatives des variations naturelles du milieu, le minimum étant bien entendu un cycle hydrologique complet. Cette approche peut ainsi nécessiter l'acquisition spécifique de données à un pas et une précision adaptée.

L'approche adoptée est différente selon le type de système karstique :

⇒ **aquifères carbonatés dont la structure n'est pas karstique (type 1)**

Compte tenu de l'absence d'unité de drainage des écoulements, l'approche *structurelle* est applicable en tant que modèle descriptif. Ces systèmes peuvent donc être étudiés, aussi bien globalement que localement, par des méthodes issues du milieu fissuré.

⇒ **aquifères karstiques fonctionnels (type 2)**

Ces aquifères ne peuvent être étudiés qu'à partir de l'approche *fonctionnelle*. En effet, l'approche *structurelle*, représentée par les modèles classiquement employés en hydrogéologie, n'est pas adaptée pour plusieurs raisons :

- les lois et paramètres utilisés n'ont plus de signification physique,
- l'hétérogénéité du milieu, liée à la hiérarchisation des vides et des écoulements, interdit l'usage de propriétés d'homogénéité,
- la définition de paramètres équivalents conduit à faire abstraction de phénomènes essentiels comme les discontinuités hydrauliques locales.

⇒ **aquifères à structure karstique non fonctionnelle (type 3)**

L'approche *structurelle* est valide dans la mesure où celle-ci constitue un modèle équivalent n'ayant pas forcément de réalité physique. Toutefois, il faut veiller à ce que l'évolution des conditions aux limites ou l'exploitation par pompage ne réactive pas sa *fonctionnalité*.

L'identification du type d'aquifère ne peut pas être effectuée à partir d'une simple connaissance de la structure du réservoir fournie par la géologie (analyses litho stratigraphique et structurale). Elle nécessite d'avoir recours à l'approche fonctionnelle qui s'applique dans tous les cas et présente l'avantage de ne faire aucune hypothèse préalable sur la structure du milieu.

3.2. Proposition d'une méthodologie par étapes

L'approche adoptée repose sur le concept de base que la structure du milieu ne peut pas être déterminée a priori. En conséquence, elle s'oriente d'abord vers une compréhension du fonctionnement du système reposant sur des méthodes globales (approche *fonctionnelle*).

Les résultats sont ensuite interprétés en terme de structure à partir de la géométrie du milieu, celle-ci étant définie à l'aide de méthodes traditionnelles mises en oeuvre parallèlement (approche *structurelle*).

La méthodologie repose sur une stratégie d'étude par étapes comprenant quatre phases (cf. figure 3) :

⇒ Phase 1 : identification du système

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

- calcul du bilan hydrologique (cohérence entre les flux d'entrée et de sortie du système),
- analyse des débits classés (description du régime d'écoulement de l'exutoire),
- analyse des courbes de récession (classification du système et évaluation du volume dynamique),
- analyse spectrale et corrélatoire afin de déterminer l'importance des fonctions transmissives (drainage) et capacitives (réserves) au travers de l'inertie du système.

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

Il faut noter que l'approche fonctionnelle s'applique difficilement au cas des aquifères carbonatés profonds sous couverture ne possédant pas d'exutoires. La caractérisation de tels systèmes ne peut être effectuée qu'après réalisation de forages (sur les données piézométriques ou les tests de pompage).

⇒ Phase 2 : caractérisation du système

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

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

⇒ **Phase 3 : démonstration de la ressource**

Cette phase a pour objectif d'étudier le comportement de la zone noyée sous l'influence d'une sollicitation artificielle (pompage) afin d'évaluer la ressource exploitable et sa disponibilité. Elle fait appel aux techniques des pompages d'essai qui, dans le cas du karst, peuvent être réalisés en différents points : exutoires, regards naturels (gouffres) ou forages.

⇒ **Phase 4 : évaluation de l'exploitation**

Cette phase permet d'appréhender le fonctionnement de l'ensemble du système en condition d'exploitation afin d'optimiser la gestion de la ressource. Elle s'appuie sur un suivi de longue durée pouvant déboucher sur la mise en oeuvre de simulateurs hydrodynamiques des écoulements (modèle mathématique). Elle permet de définir en fonction des contraintes locales (exploitations déjà présentes, environnement industriel et agricole) et des besoins (AEP, irrigation, soutien d'étiage), le mode d'exploitation optimal (exploitation ou surexploitation temporaire) tout en précisant la vulnérabilité de l'aquifère et les mesures de protection à prendre. Cette approche débouche sur l'adéquation d'une ressource "particulière" à des besoins "spécifiques".

Le tableau 2 récapitule les moyens mis en oeuvre pour chaque phase et les résultats obtenus.

La démarche adoptée est justifiée par l'originalité de la structure et du fonctionnement des karsts. Elle présente l'intérêt de faire appel de façon progressive aux différentes méthodes d'étude de manière à répartir et optimiser les moyens à mettre en oeuvre pour exploiter ce type d'aquifères. Chaque étape constitue en quelque sorte une étude de faisabilité qui conditionne l'exécution de la phase suivante.

3.3. Exploitation des aquifères karstiques

Ce paragraphe porte sur l'exploitation des systèmes karstiques *sensu stricto* (type 2).

En ce qui concerne les deux autres types, les modes d'exploitation pourront être définis à partir des modèles spécifiques au milieu fissuré, en caractérisant éventuellement un milieu équivalent pour le cas des systèmes karstiques non fonctionnels (type 3).

Les connaissances de base indispensables pour la mise en exploitation d'un karst sont :

- l'existence ou non d'une organisation karstique des écoulements souterrains (degré de karstification),
- la présence de réserves dans la zone noyée (fonction capacitive),
- la fonctionnalité du système (ce dernier critère pouvant évoluer au cours de l'exploitation dans le cas des aquifères de type 3),
- la position de l'axe de drainage par rapport à l'exutoire et aux réserves.

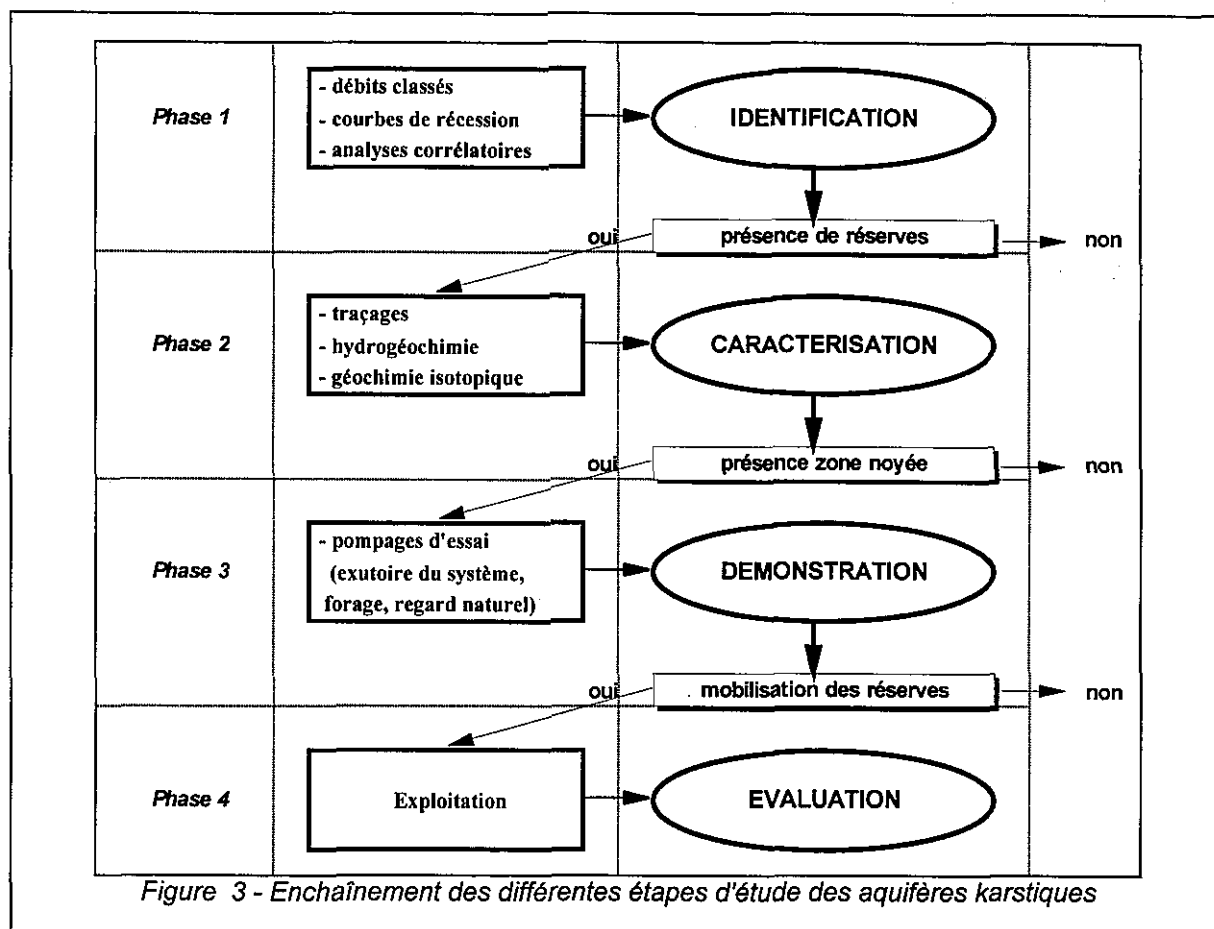


Figure 3 - Enchaînement des différentes étapes d'étude des aquifères karstiques

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

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

La position de l'axe de drainage par rapport aux réserves est déterminante vis-à-vis du type d'aménagement et du mode d'exploitation car tous les échanges au sein de la zone noyée s'effectuent par l'intermédiaire du drain qui joue un rôle de "collecteur" des systèmes annexes au drainage. La quantité d'eau mobilisable à partir du drain est d'autant plus importante que celui-ci sera en position basse par rapport aux réserves.

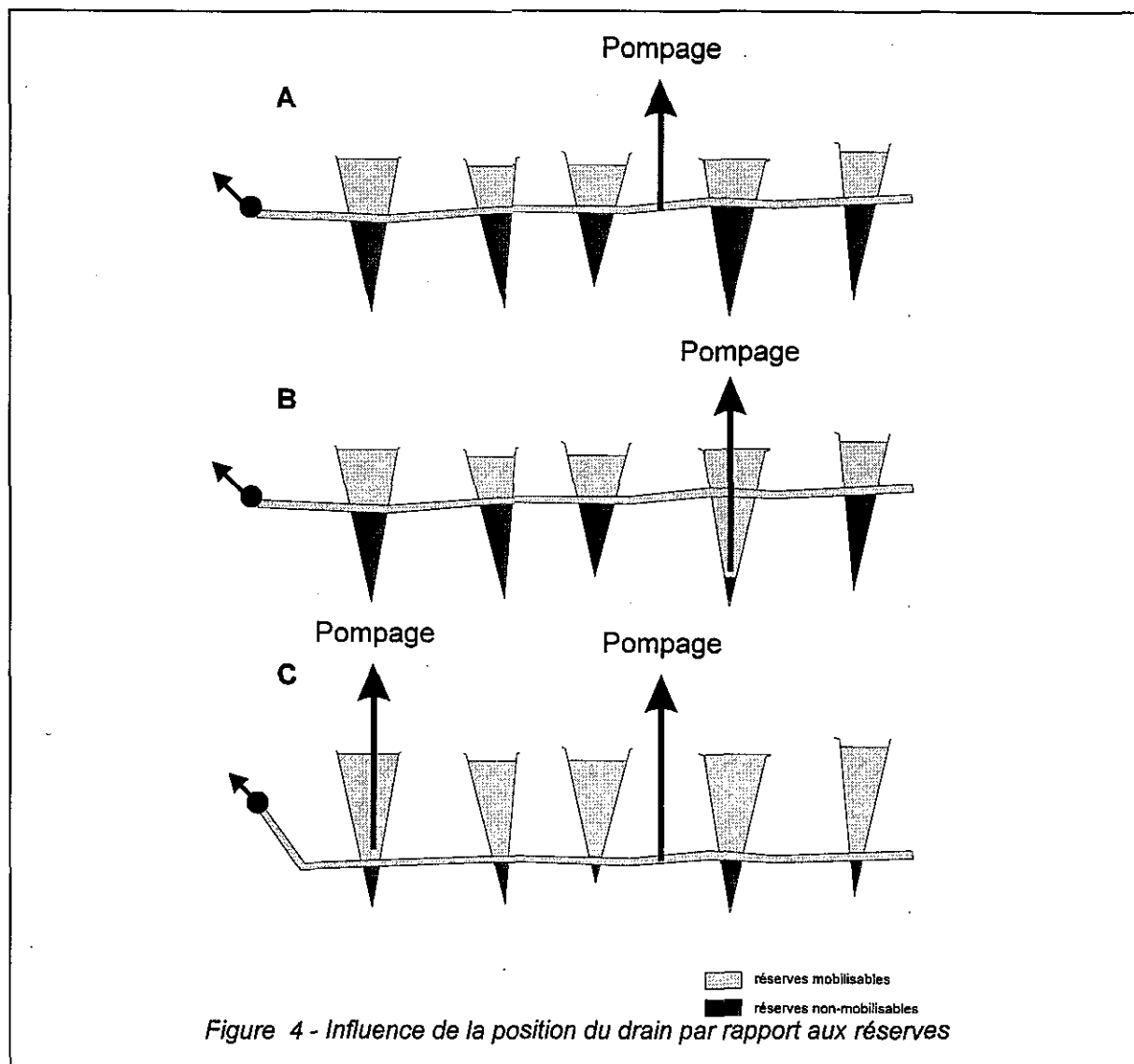
Deux cas peuvent être distingués (cf. figure 4) :

⇒ **systèmes jurassiens** (le drain est en position haute par rapport aux réserves)

Dans ce cas, un pompage sur le drain (que ce soit par forage ou à l'exutoire) ne permet pas de mobiliser les réserves situées plus en profondeur (schéma A). La solution consiste donc à exploiter un ou plusieurs systèmes annexes à partir de forages et/ou de regards naturels (schéma B). Les volumes mobilisables dépendent uniquement de la géométrie de ces systèmes annexes (extension latérale et en profondeur) ainsi que de la position des pompes. Une exploitation sous le niveau du drain peut entraîner un détournement total de son flux dans le système annexe sollicité. Un tel type d'exploitation permet d'obtenir des débits instantanés importants (le système annexe jouant alors un rôle de capacité de grande dimension) mais la réalimentation en période d'étiage ne peut pas être supérieure au débit du drain.

⇒ **systèmes vaclusiens** (le drain est en dessous des réserves)

Un pompage sur l'axe de drainage permet de mobiliser l'ensemble des réserves contenues dans les systèmes annexes (schéma C). La position du drain n'est plus un facteur limitant et la pérennité de l'exploitation est liée à l'extension de la zone noyée.

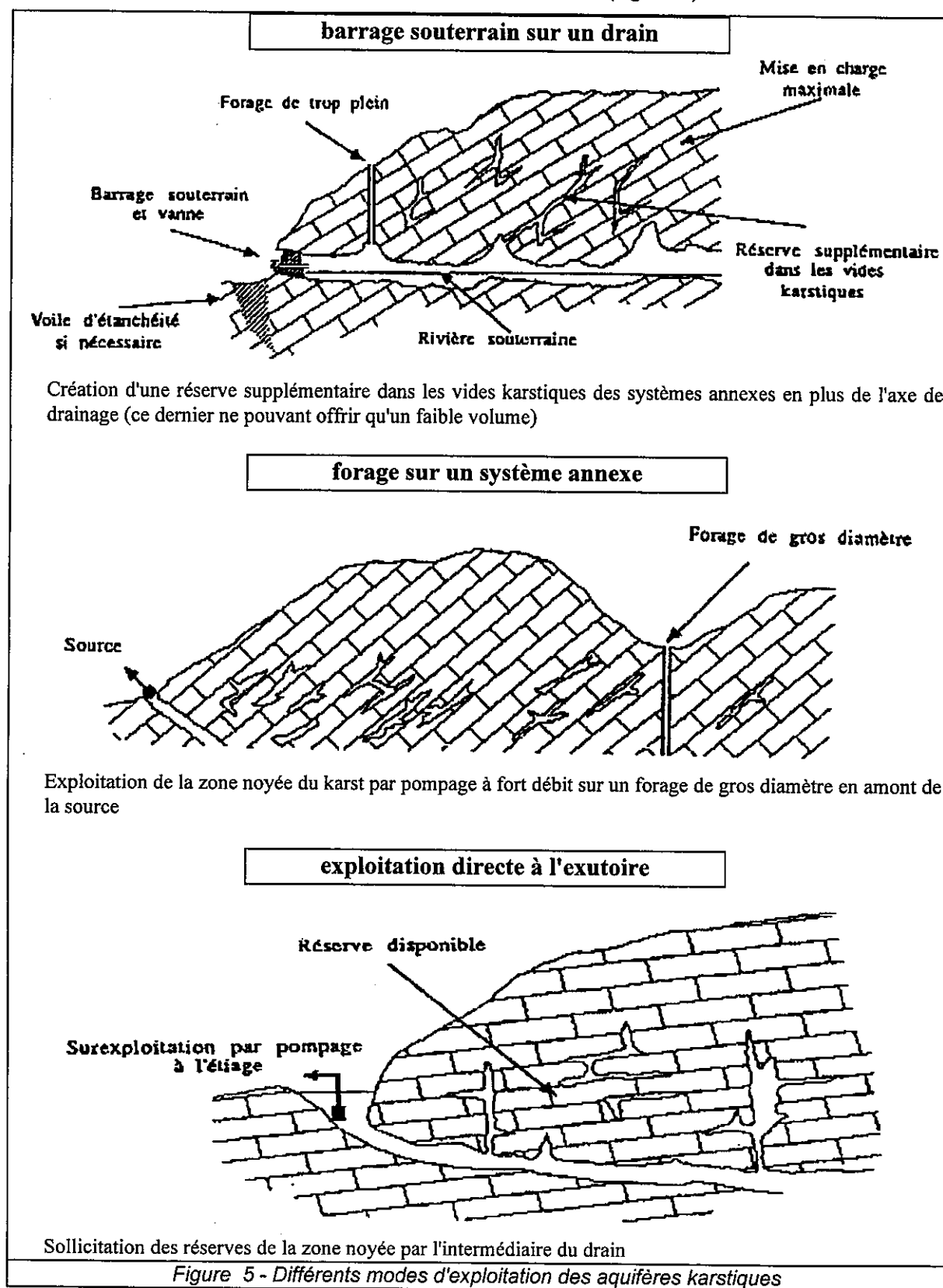


Les modes d'exploitation envisageables en fonction de la position du drain par rapport aux réserves et à l'exutoire sont récapitulés de façon schématique au tableau 3.

		position du drain par rapport à l'exutoire	
		au dessus de l'exutoire	sous l'exutoire
position du drain par rapport aux réserves	dessus	barrage souterrain ou exploitation système(s) annexe(s)	-
	dessous	forage sur le drain	pompage à l'exutoire

Tableau 3 - Types d'exploitation des aquifères karstiques en fonction de la position du drain

Ces différents cas sont illustrés par les schémas ci-dessous (figure 5).



4. Les méthodes de l'approche fonctionnelle

4.1. Analyse des débits classés

Ce type d'analyse est couramment utilisé dans le domaine de l'hydrologie de surface à des fins de prévision des régimes des cours d'eau. Elle repose sur un classement et une représentation des débits journaliers sous la forme d'une courbe de distribution des fréquences : celle-ci fournit les valeurs de débits Q atteintes ou dépassées pour un nombre de jours (ou pourcentage du temps total d'observation). Divers paramètres sont ensuite calculés à partir de cette représentation.

Dans le cas de l'étude des aquifères karstiques, l'approche est de type descriptive : le but du classement est de comprendre le comportement du système et non de faire des prévisions basées sur des lois probabilistes. Les principaux points recherchés sont les suivants :

- mise en évidence d'un impluvium fluctuant au travers des fuites ou apports éventuels pouvant se produire entre différents systèmes karstiques ;
- conditions de mise en fonctionnement de trop-pleins ;
- accessoirement, vérification de la qualité de la station de jaugeage de l'exutoire.

L'ajustement des débits peut se faire selon deux types de relation : arithmétique ou logarithmique. La première traduit une infiltration lente du système, alors que la seconde est caractéristique d'une infiltration rapide (Mangin, 1971).

Les éventuelles ruptures de pente de la droite des débits classés traduisent des variations dans les vitesses de croissance et de décroissance des débits. La figure 6 récapitule les cinq cas les plus fréquents.

4.2. Analyse des courbes de récession

Ce type d'analyse consiste à étudier la partie décroissante de l'hydrogramme de crue d'une source, appelée *récession*, à partir d'un modèle de type "boîte grise" qui assimile l'aquifère à un réservoir se vidangeant au travers d'un bouchon poreux. Dans le cas d'aquifères karstiques, ce modèle a été amélioré par pour prendre en compte l'écoulement lié à l'infiltration dans la zone non saturée (Mangin, 1970).

Le modèle utilisé possède donc deux réservoirs : l'un représente la zone d'infiltration et se vidange avec un débit q_i , l'autre, de type Maillet correspond à la zone noyée et se vidange avec un débit Q (cf. figure 7).

Deux parties sont distinguées dans les courbes de récession (cf. figure 8) :

- la *décru*, durant laquelle l'infiltration (q_i) influence la vidange du réservoir ;
- le *tariissement*, qui débute à l'instant où le débit d'infiltration (q_i) devient nul, la vidange du réservoir principal obéissant alors uniquement à la loi de Maillet.

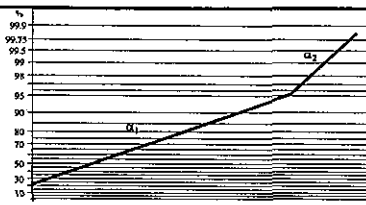
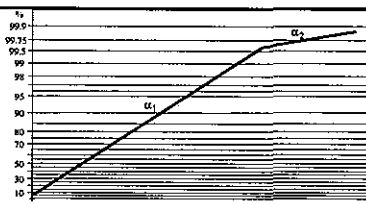
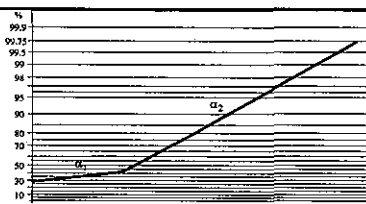
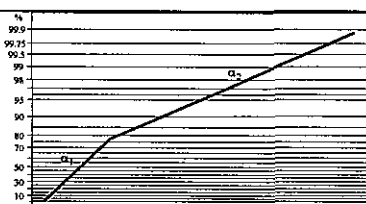
Position de la rupture	Pentes des droites	Interprétation
Forts pourcentages		$\alpha_2 > \alpha_1$ • mise en fonctionnement de trop-plein • fuites vers un autre système • stockage momentané • fuites ou débordement de la station de jaugeage en hautes eaux
		$\alpha_2 < \alpha_1$ • apports en provenance d'un autre système • jaugeage d'écoulements n'appartenant pas au système
Faibles pourcentages		$\alpha_2 > \alpha_1$ • constitution d'une réserve
		$\alpha_2 < \alpha_1$ • apports d'une réserve issue d'un cycle antérieur
Double rupture		$\alpha_2 > \alpha_1$ et $\alpha_3 < \alpha_2$ • piégeage d'une réserve lors de la décrue et restitution au cours du tarissement

Figure 6 - Différents cas de rupture de pente de la droite représentative des débits classés

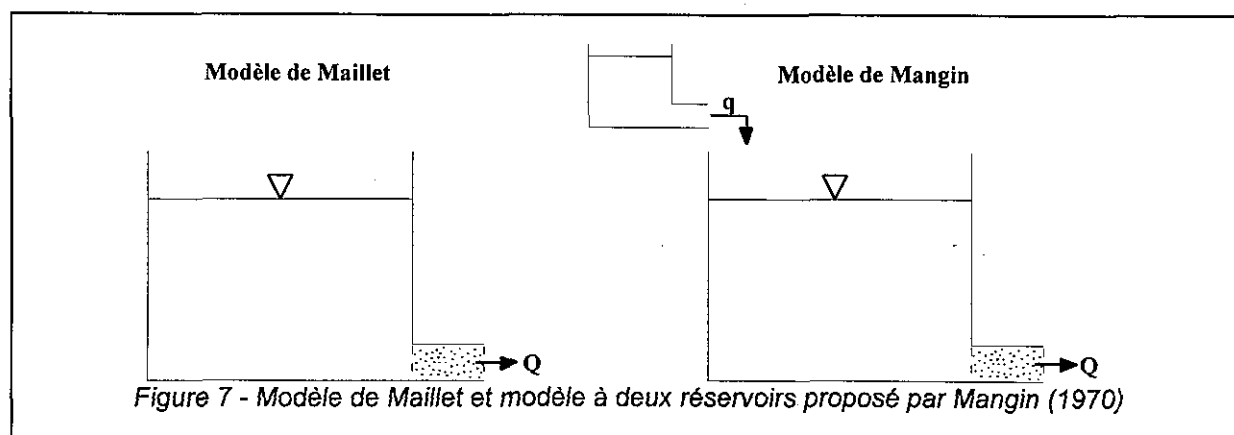


Figure 7 - Modèle de Maillet et modèle à deux réservoirs proposé par Mangin (1970)

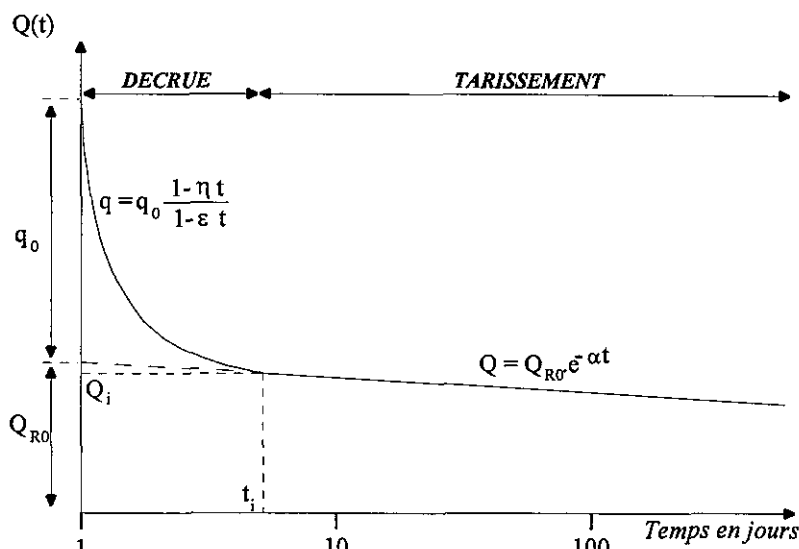


Figure 8 - Décomposition de la récession selon la méthode (Mangin, 1970)

L'expression utilisée pour la description analytique du modèle est de la forme :

$$Q(t) = \varphi(t) + \psi(t) \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} \varphi(t) \text{ décrivant la vidange de la zone noyée} \\ \psi(t) \text{ se rapportant au fonctionnement de la zone} \\ \text{d'infiltration} \end{array}$$

- Le modèle choisi pour décrire la vidange de la zone noyée est le modèle de Maillet :

$$\varphi(t) = Q_{R0} \cdot e^{-\alpha t} \quad \text{avec } \alpha = \text{coefficient de tarissement}$$

- Le modèle utilisé pour décrire la fonction d'infiltration est une fonction homographique définie empiriquement (Mangin, 1970) :

$$\psi(t) = q_0 \frac{1 - \eta t}{1 + \varepsilon t} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} q_0 : \text{débit d'infiltration à l'instant } t_0 \text{ marquant la pointe de} \\ \text{crue} \\ \varepsilon : \text{coefficient d'hétérogénéité d'écoulement} \\ \eta : \text{coefficient de vitesse d'infiltration} \end{array}$$

Le coefficient η est égal à $1/t_i$ avec t_i correspondant à l'instant où l'infiltration cesse. Il peut donc être assimilé à la *vitesse moyenne d'infiltration*. Il varie entre 0 et 1, cette borne supérieure traduisant une infiltration rapide.

Le coefficient ε (*coefficient d'hétérogénéité d'écoulement*) décrit la concavité de la courbe. Des valeurs faibles (0.01 à 0.001) caractérisent une infiltration lente alors que des valeurs élevées (1 à 10) traduisent une décrue très rapide se ralentissant ensuite considérablement.

Par ailleurs, le coefficient α permet le calcul du *volume dynamique* correspondant au volume d'eau en mouvement au moment du tarissement, aussi bien au dessus qu'en dessous de l'exutoire (Mangin, 1970). Ce paramètre, qui constitue une évaluation par défaut des réserves, est donné par l'équation :

$$V_{DYN} = \int_0^{\infty} Q_i \cdot e^{-\alpha t} = \frac{Q_i}{\alpha} \cdot c \text{ avec } Q_i = \text{débit au moment où le tarissement devient effectif.}$$

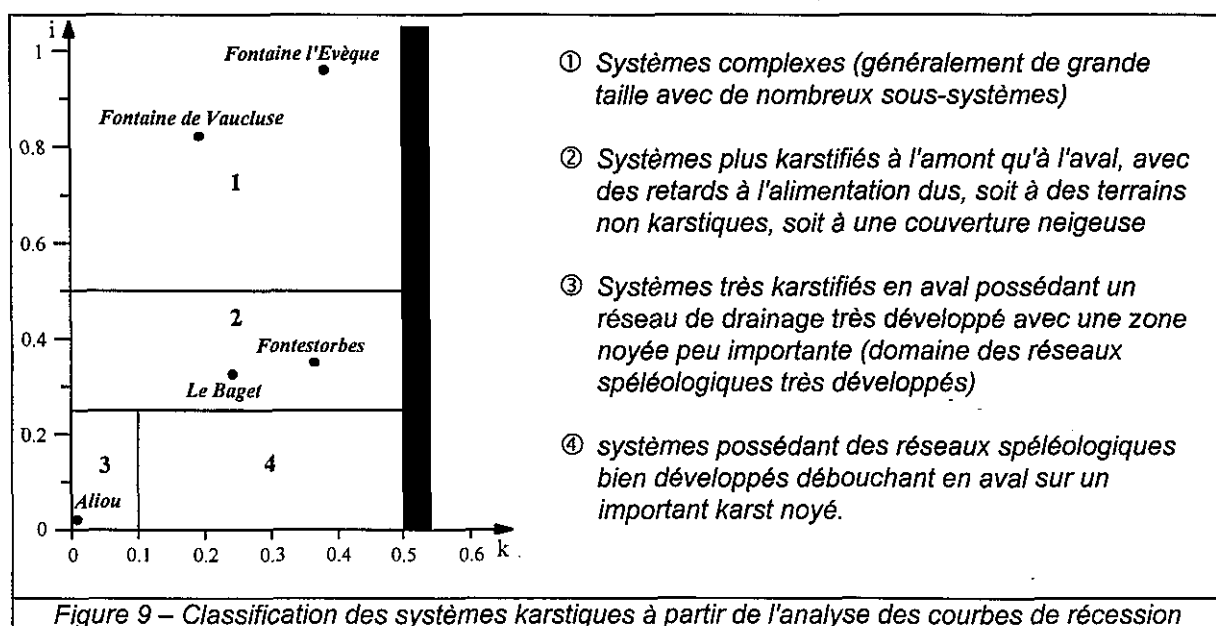
Cette notion de volume dynamique a récemment fait l'objet d'une expérimentation afin de préciser sa signification et sa validité (Marsaud, 1996). Son calcul repose sur le principe que le mouvement des masses d'eau situées au-dessus de l'exutoire entraîne par inertie une partie des eaux situées sous l'exutoire. Il en résulte une augmentation des pertes de charge totales de l'aquifère entraînant une modification de la loi de vidange. Le volume dynamique ainsi calculé est supérieur au volume des réserves contenues au-dessus de l'exutoire.

L'ensemble de ces paramètres permet de caractériser d'une part le fonctionnement de la zone d'infiltration (ε et η'), d'autre part l'écoulement dans la zone noyée (α).

Une classification a été établie à partir des résultats de l'analyse des courbes de récession afin de comparer les systèmes karstiques. Elle repose sur le calcul de deux coefficients :

- k** : ce paramètre est égal au rapport entre le volume dynamique maximum obtenu sur une grande période et le volume de transit inter-annuel sur la même période. Il traduit l'aptitude de la zone noyée du karst à stocker les précipitations et les restituer progressivement dans le temps, c'est à dire son *pouvoir régulateur*. Dans le cas des aquifères karstiques, k est en général inférieur à 0,5. Une valeur proche de 0 indique un pouvoir régulateur peu important
- i** : ce coefficient, compris entre 0 et 1, caractérise les retards à l'infiltration. Il est égal à la valeur de la fonction homographique deux jours après la pointe de crue. Une forte valeur traduit une infiltration lente ou complexe contribuant à une meilleure régulation de l'écoulement, alors qu'à l'inverse une faible valeur est le signe d'un transit rapide des eaux vers la zone noyée.

Le report des valeurs de k et i sur un diagramme permet d'établir une comparaison avec des systèmes de référence (cf. figure 9).



4.3. Analyse corrélatoire et spectrale

Les analyses corrélatoires et spectrales s'inscrivent dans le cadre de l'approche systémique du karst. L'aquifère karstique est assimilé à un système de type boîte noire dont la pluie et le débit à l'exutoire représentent respectivement l'entrée et la sortie. Les variations de pluie et de débit sont représentées sous forme de séries chronologiques (à un pas régulier, généralement journalier). Ces analyses ont été adaptées à l'étude des aquifères karstiques par le Laboratoire Souterrain du CNRS (Mangin, 1981).

Cette approche repose sur le fait qu'un système possède un comportement de *filtre*, se traduisant par une mémoire plus ou moins importante des événements antérieurs. Dans le cas des systèmes karstiques, ce comportement *inertiel* est directement lié à l'organisation de la structure de drainage et à l'importance des réserves.

Deux types d'analyse sont employés pour quantifier cet effet au travers de divers paramètres :

- ***L'analyse simple*** permet d'identifier les composantes d'une chronique à partir de deux "outils" :
 - le *corrélogramme* qui traduit la dépendance dans le temps des événements affectant la chronique, selon des intervalles de temps de plus en plus grands. L'*effet mémoire* (cf. figure 10) est un paramètre directement calculé à partir du corrélogramme simple (il est égal au nombre de jours correspondant à la valeur $r_k = 0,2$ du corrélogramme). Ce paramètre, qui traduit l'inertie de l'aquifère est lié à la présence de réserves et au degré de karstification.
 - le *spectre de densité de variance* qui permet l'identification des événements périodiques par la détermination de leur fréquence. Dans le cas d'une chronique de débit, il fournit deux paramètres renseignant sur le fonctionnement du système :
 - la *fréquence de coupure* (cf. figure 11) est égale à la valeur de fréquence pour laquelle la densité de variance devient nulle ou négligeable. Elle quantifie la régulation introduite par le système (durée minimale que doit avoir une pluie pour influencer sur le système) ;
 - le *temps de régulation* (égal à l'ordonnée maximale du spectre divisée par 2) qui représente la longueur de la réponse impulsionnelle du système, c'est-à-dire la durée de l'influence d'événements pluvieux sur le système ;
- ***L'analyse croisée*** permet l'étude de la relation pluie-débit et fournit une bonne image de la *réponse impulsionnelle* du système par le corrélogramme croisé. Celui-ci est précisé par quatre fonctions dans le domaine fréquentiel :
 - la *fonction d'amplitude croisée* fournit la plage de fréquence pour laquelle la relation pluie-débit s'établit ;
 - la *fonction de phase* indique le déphasage entre l'entrée et la sortie du système ;
 - la *fonction de gain* montre si le système atténue ou amplifie l'information contenue dans la chronique des pluies ;

- la *fonction de cohérence* traduit la linéarité et la stationnarité du système.

Le pic du corrélogramme croisé est d'autant plus marqué que le drainage est important (cf. exemples de la figure 12). A l'inverse, la réponse impulsionnelle présente l'allure d'un bossage étalé pour les systèmes mal drainés en raison d'une structure non évoluée (type 1) ou non fonctionnelle (type 3).

Les paramètres calculés à partir des analyses corrélatrice et spectrale (effet mémoire, temps de régulation, fréquence de coupure et réponse impulsionnelle) permettent de caractériser le fonctionnement des systèmes et contribuer ainsi à la connaissance de leur structure.

Une classification a été établie par Mangin (1984) afin de comparer les karsts étudiés à des systèmes de références dont la structure est connue. Ceux-ci se développent entre deux extrêmes (tableau 2) :

- type **Torcal** (massif du Torcal de Antequera en Espagne) représentant les aquifères à degré de karstification faible. L'effet mémoire est considérable (fortes réserves), la fréquence de coupure basse (filtrage important) et le temps de régulation très long (réponse impulsionnelle longue) ;
- type **Aliou** (rivière souterraine de l'Ariège) représentant les systèmes à degré de karstification très élevé. La réponse de ce type de système s'apparente à l'hydrogramme unitaire d'un bassin de surface avec un effet mémoire réduit (peu de réserves), une fréquence de coupure très haute (peu de filtrage) et un temps de régulation court (réponse impulsionnelle très brève).

Entre ces deux pôles, tous les cas de figures sont envisageables. Deux autres exemples pyrénéens représentant des intermédiaires complètent cette classification (Baget et Fontestorbes).

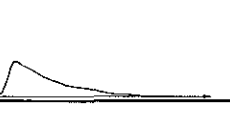
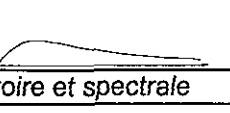
TYPES	EFFET MEMOIRE	FREQUENCE DE COUPURE	TEMPS DE REGULATION	REPONSE IMPULSIONNELLE
<i>ALIOU</i>	Réduit (5 jours)	Très haute (0,30)	10 à 15 jours	
<i>BAGET</i>	Petit (10 à 15 jours)	Haute (0.20)	20 à 30 jours	
<i>FONTESTORBES</i>	Grand (50 à 60 jours)	Basse (0.10)	50 jours	
<i>TORCAL</i>	Considérable (70 jours)	Très basse (0.05)	70 jours	

Tableau 2 - Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse corrélatrice et spectrale

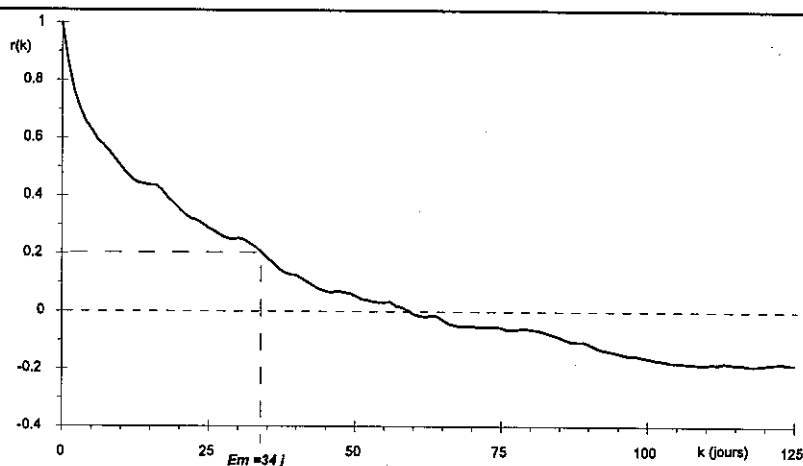


Figure 10 - Exemple de corrélogramme simple (système karstique d'Archiane)

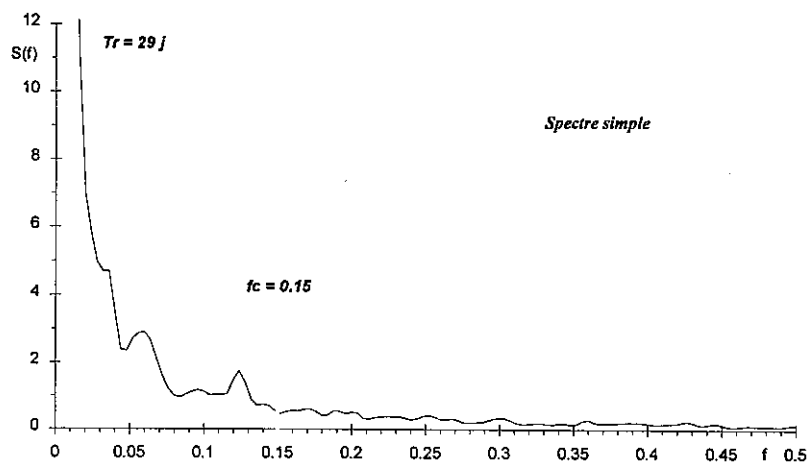


Figure 11 - Exemple de spectre simple (système karstique d'Archiane)

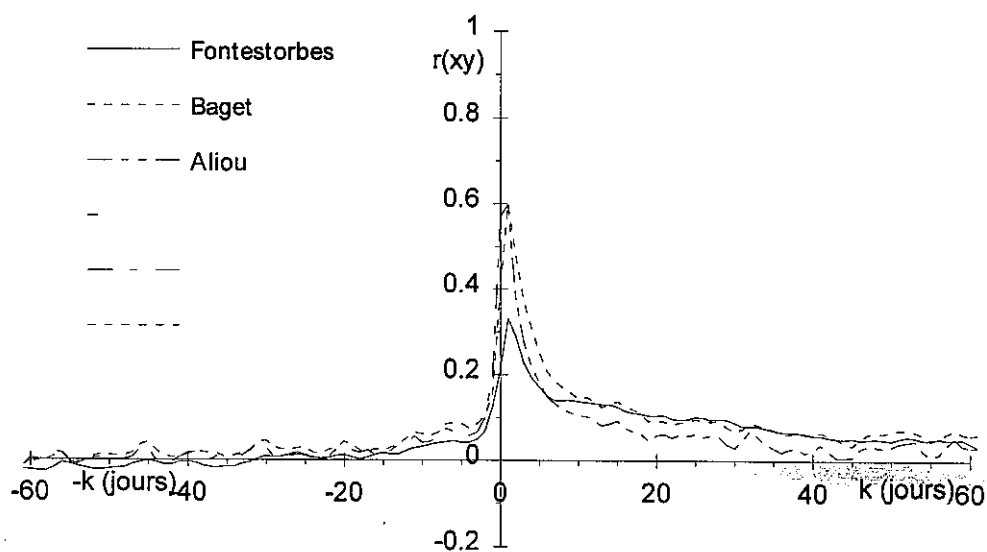


Figure 12 - Exemples de corrélogrammes croisés

4.4. Hydrogéochimie

L'hydrogéochimie est une discipline basée sur le principe que l'eau, en tant que *vecteur* d'information, renseigne sur les modalités de son parcours au sein d'un aquifère. Dans le cas de réservoirs carbonatés, elle fournit une information supplémentaire car elle agit également comme *créateur* d'information compte tenu de sa participation au processus de karstification (Bakalowicz, 1980). En conséquence, l'information apportée contribue à la connaissance du fonctionnement de la zone noyée.

L'hydrogéochimie karstique porte principalement sur la chimie des carbonates, et plus précisément sur le *système calco-carbonique* qui met en présence des éléments sous forme liquide (H_2O), solide (carbonates) et gazeuse (CO_2). La dissolution de la roche calcaire par l'eau associée au gaz carbonique est un phénomène chimique complexe faisant intervenir de nombreux paramètres physico-chimiques dans un ensemble de réactions qui peut être simplifié ainsi :



avec $MeCO_3$: phase solide (carbonate de calcium ou de magnésium)

HCO_3^- : ion bicarbonate

Me^{2+} : cation divalent (Ca^{2+} ou Mg^{2+})

Les solutions carbonatées sont rarement à l'équilibre, compte tenu principalement des vitesses de réaction et des changements de la composition de la phase gazeuse. Le système est donc le plus souvent en évolution entre un état initial et un état final. C'est la connaissance de l'état de la solution vis-à-vis de l'équilibre qui va permettre de déterminer si la solution est susceptible de dissoudre ou dégazer du CO_2 , d'attaquer ou de précipiter des carbonates (Bakalowicz, 1979). Plusieurs paramètres sont utilisés à cet effet :

- indices de saturation de chaque espèce dissoute (écart de la solution par rapport à l'équilibre),
- dpH (écart entre le pH de la solution et le pH d'équilibre théorique) permettant d'évaluer la position du système calco-carbonique par rapport à l'équilibre,
- la pCO_2 équilibrante.

Les informations fournies par l'étude de ce système sont les suivantes :

- temps de séjour ou temps de transit des eaux au sein de l'aquifère,
- degré de karstification du système,
- conditions d'écoulement (libre ou en zone saturée, diphasique ou monophasique),
- fonctionnement de la zone d'infiltration dans le cas de temps de séjour courts.

Outre les éléments du système calco-carbonique (calcium, magnésium, carbonates), d'autres substances sont présentes en teneurs variables dans les eaux karstiques :

- les chlorures (de sodium ou de potassium) : ils sont caractéristiques de la zone d'infiltration, et plus particulièrement du rôle de l'aquifère épikarstique (ils sont en effet concentrés par la végétation dans les eaux soumises à l'évapotranspiration). Dans certains cas, ces chlorures peuvent révéler certaines pollutions (salage des routes) ;
- les sulfates, représentés par l'anion SO_4^{2-} , peuvent provenir de la dissolution du gypse ou de l'anhydrite, mais aussi de l'oxydation de sulfures comme la pyrite qui est très fréquente au sein des roches carbonatées. Ils peuvent donc constituer un indicateur spatial de l'origine des eaux dans le cas d'une répartition hétérogène dans le réservoir ;
- les ions sodium et potassium interviennent dans les mécanismes d'échange de cations caractérisant l'évolution des minéraux argileux. L'étude du rapport entre ces substances peut fournir des informations sur ces mécanismes ;
- enfin, la silice et le fer, peu solubles, peuvent renseigner sur les remplissages et colmatages argileux.

La conductivité électrique est un indicateur de la minéralisation totale de la solution. Bien que difficilement interprétable compte tenu de ce caractère global, elle est cependant utilisée dans certains cas, quand par exemple il n'est pas possible de disposer des concentrations de chaque substance.

Deux types de suivi hydrogéochimique sont classiquement réalisés :

- le suivi d'un cycle hydrologique permet d'étudier les variations saisonnières du chimisme des eaux. En relation directe avec les événements hydrologiques (pluie, neige), les variations du chimisme des eaux traduisent l'hétérogénéité du fonctionnement de l'aquifère, d'un point de vue spatial (zone noyée et zone d'infiltration) et d'un point de vue temporel (étiage, hautes eaux).
- le suivi d'une crue fournit une information comparable, à l'exception des variations saisonnières. Réalisé de manière concomitante sur tous les points d'eau du système, il permet d'appréhender les variations spatiales du chimisme. Il doit être réalisé de préférence lors d'une crue de début de cycle car le renouvellement des réserves atténue de façon notable les variations de faciès chimique des différentes familles d'eaux (zone noyée, zone d'infiltration).

Des méthodes d'étude particulières ont été adaptées ou développées pour le traitement des données géochimiques (Bakalowicz, 1979) :

- l'étude de la distribution des fréquences de conductivité qui met en évidence l'hétérogénéité des écoulements et caractérise le degré de karstification des systèmes karstiques,
- les analyses multidimensionnelles (analyse en composante principale et analyse factorielle discriminante) qui sont nécessaires compte tenu de l'importance des données à traiter (traitement conjoint de données temporelles ou spatiales).

De la même manière, les informations thermiques et biologiques sont utilisées en tant que descripteurs caractéristiques hydrogéologiques (température et microcrustacés sont des marqueurs naturels des écoulements souterrains).

4.5. Traçages

La technique du traçage consiste à étudier la propagation à l'intérieur d'un système karstique de substances marquant les eaux. L'interprétation selon l'approche fonctionnelle nécessite de disposer de mesures fiables et précises. L'approche adoptée est donc quantitative et porte sur l'analyse des variations de concentration du traceur aux exutoires. Il convient donc de réaliser à cet effet des échantillonnages (de manière manuelle ou automatique) à un pas de temps adapté au système.

Les simples colorations de type "tout ou rien", qui consistent à vérifier le passage d'un traceur (soit visuellement, soit à l'aide de fluo-capteurs), apportent seulement une information partielle sur la structure du milieu (mise en évidence une relation hydraulique entre deux point du système (perte et source par exemple). Par ailleurs, ce procédé est peu fiable et très critiqué.

Il existe plusieurs types de traceurs :

- *colorants fluorescents* : ils possèdent un seuil de détection très bas, une faible toxicité et un coût modéré. Le plus employé est l'uranine, plus communément appelée fluorescéine ;
- *traceurs isotopiques* : ils sont pénalisés par un coût élevé et par les risques de contamination qu'ils peuvent entraîner dans les aquifères ;
- *traceurs bactériens* (bactériophages) : ils sont rarement utilisés pour les eaux souterraines car ils demandent des méthodes d'analyse particulières (laboratoire biologique) ;
- *traceurs particuliers* (spores de lycopodium teintés) : comportement peu représentatif de l'eau.

Ce sont les traceurs fluorescents qui sont généralement utilisés. Les échantillons sont analysés en laboratoire par spectrofluorimétrie en comparant leur fluorescence à celle de solutions étalon précédemment établies.

La conceptualisation systémique de l'aquifère karstique (Mangin, 1975) a permis d'utiliser les concepts développés en Génie Chimique et de les adapter pour fournir une approche quantitative des traçages (Guizerix & al, 1970). L'étude des résultats de traçages utilise la notion de *système-traçage* qui est la partie du système karstique intéressée par le traçage (Lepiller et Mondain, 1986). Ses limites sont définies par les points d'injection et de restitution, et son espace correspond au volume d'eau parcouru par le traceur.

L'interprétation des résultats d'un traçage repose sur la détermination de la distribution de temps de séjours (DTS) du traceur (Danckwertz, 1953). L'hypothèse de base est que le transit du traceur est identique au transit de l'eau marquée. Dès lors, si l'injection est réalisée de manière instantanée, la DTS peut être assimilée à la **réponse impulsionnelle** de la partie du système intéressée, appelée système-traçage.

L'information est différente selon la position du point d'injection par rapport au système karstique :

- si l'injection est réalisée sur une perte à l'amont de la zone noyée, le traçage renseigne sur la zone de ruissellement souterrain et sur la zone noyée (relation entre réserve et drainage) ;
- si l'injection a lieu directement sur l'axe de drainage ou la partie du système représentant la fonction capacitive, le traçage renseigne sur les pertes de charge existant entre le lieu d'injection et l'exutoire ;
- si l'injection est faite dans une cavité sèche en relation avec la zone noyée, le traçage renseigne sur le mode d'infiltration rapide et l'écoulement dans la zone noyée.

Les données nécessaires pour l'interprétation des résultats par la méthode quantitative sont :

- la courbe de restitution du traceur,
- la courbe des débits en fonction du temps au(x) point(s) de restitution,
- la distance linéaire la plus probable entre les points d'injection et de restitution.

Il faut souligner que les résultats obtenus lors d'un traçage ne sont représentatifs que du fonctionnement du système durant la réalisation de l'expérience.

L'ensemble de ces méthodes, qui sont complémentaires les unes des autres, permet de caractériser les karsts en fonction de leur comportement et aboutissent à une classification basée sur l'étude de l'hydrogramme unitaire. Selon les caractéristiques de cette réponse, il est possible de d'évaluer d'une part le degré de karstification et d'autre part l'importance des réserves de l'aquifère.

4.6. Pompages d'essai

Le pompage d'essai est une méthode classique en hydrogéologie pour évaluer les propriétés hydrauliques d'une formation. Le principe consiste à imposer à l'aquifère une sollicitation parfaitement maîtrisée, sous la forme d'un pompage, afin d'étudier les rabattements de la nappe en résultant. L'interprétation, réalisée à partir de schémas interprétatifs, consiste à déterminer les paramètres caractéristiques de l'aquifère (transmissivité, emmagasinement) et de l'ouvrage de captage (pertes de charge). La connaissance de ces paramètres est primordiale pour appréhender le comportement de l'aquifère et, éventuellement, fixer un débit d'exploitation approprié.

Il n'existe pas de schémas interprétatifs adaptés aux aquifères karstiques car la disposition et l'organisation de ces vides sont spécifiques à chaque système. Deux types d'interprétation sont donc généralement proposés en fonction du type de karst :

- **interprétation analytique** (approche *structurelle*) à l'aide des schémas d'interprétation propres aux milieux poreux ou fissurés. Dans ce cas, les paramètres hydrodynamiques déterminés ont un caractère fictif qui ramène le comportement du système à un *schéma hydraulique équivalent*. Ils peuvent être utilisés pour des prévisions d'exploitation, avec

tous les risques que peut présenter leur extrapolation, mais ils ne possèdent généralement pas de réalité physique.

- **interprétation descriptive** (approche *fonctionnelle*) qui consiste à étudier la réponse obtenue au forage et à l'exutoire. Dans cette approche, l'information recherchée n'est plus relative à la structure de l'aquifère mais à son fonctionnement. Le principe est d'appréhender la structure de l'aquifère à partir de l'impact du pompage sur la zone sollicitée et sur la source. On s'intéresse alors à la provenance des ressources mobilisées. A partir de la comparaison des réponses obtenues au point de pompage et à la source, il est possible d'évaluer la capacité du drain à mobiliser les réserves latérales (disponibilité de la ressource).

5. CONCLUSIONS

Les karsts constituent des aquifères spécifiques qui doivent être différenciés des milieux poreux et fissurés. En effet, ce processus de karstification modifie profondément la structure initiale du magasin par l'interaction qui s'établit entre l'écoulement et la structure des vides. Ces derniers évoluent depuis une porosité originelle (primaire ou secondaire) jusqu'à une structure de drainage.

Cette nature évolutive conduit à l'établissement d'une infinité de karsts qui ne peuvent être décrits uniquement à l'aide de propriétés déterministes compte tenu de la complexité et de l'hétérogénéité du milieu. Leur comportement hydraulique est conditionnée par plusieurs points :

- le degré d'évolution du système,
- son degré d'organisation (hiérarchisation plus ou moins importante des écoulements),
- l'adéquation des écoulements vis-à-vis des vides (fonctionnalité du système),
- la position de l'axe de drainage par rapport à l'exutoire.

Afin de définir le type d'aménagement et le mode d'exploitation adapté à un karst, il convient avant tout de le caractériser. Pour cela, on utilise des méthodes basées sur l'approche fonctionnelle. Cette étape est en effet primordiale car elle permet d'optimiser dès le début d'une étude les moyens à mettre en oeuvre.

Le karst apparaît donc comme un objet hydrogéologique complexe, devant faire l'objet d'une approche très structurée. De même qu'il n'est plus envisageable actuellement de fixer le débit d'exploitation d'un champ captant en nappe alluviale sans avoir préalablement défini la géométrie du milieu et les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère (ce qui revient à une caractérisation déterministe), il ne peut être envisagé d'étudier un aquifère karstique sans étude préalable.

A l'inverse des milieux poreux et fissurés, l'approche ne porte pas uniquement sur la structure du milieu mais principalement sur le fonctionnement de l'aquifère. Les données spatiales sont ainsi déplacées dans le domaine temporel.

Il faut toutefois noter que cette approche *fonctionnelle* nécessite de disposer de chroniques de données aux exutoires (débits, chimie, etc.) à la fois fiables et suffisamment longues pour être représentatives du fonctionnement du système. L'acquisition de ces données doit faire l'objet d'une programmation en vue d'une connaissance patrimoniale de ces aquifères. En effet, si en milieu poreux, les données concernant la structure sont suffisantes et peuvent être acquises par des reconnaissances appropriées en moins d'une année, l'étude des aquifères karstiques doit être précédée d'un suivi des exutoires. L'importance de ce suivi ne doit pas être négligée car la qualité des informations recueillies conditionne la validité des interprétations.

Un tel investissement est justifié compte tenu des fortes potentialités qu'offrent les karsts. C'est en effet les seuls aquifères pouvant fournir des débits très importants durant les périodes d'étiage par surexploitation temporaire de leurs réserves, celles-ci pouvant être reconstituées en période de hautes eaux avec une gestion adaptée.

Références bibliographiques

BAKALOWICZ M., 1979 : *Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification.*, Thèse de Doctorat de Science Naturelles, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, , 269 p.

BAKALOWICZ M. , 1980 : *Un précieux informateur hydrogéologique : le système chimique CO₂-H₂O-carbonate.*, Colloque de la Société Géologique de France, , pp. 11-23.

BAKALOWICZ M., CROCHET Ph., D'HULST D., MANGIN A., MARSAUD B., RICARD J. & ROUCH R., 1994 : *Expérience de pompage à fort débit dans un gouffre. Résultats fondamentaux et appliqués.*, Action Cost 65, Réunion de Millau, Mai 1994, à paraître, 16 p.

CROCHET Ph., MARSAUD B., & RAZIN Ph., 1992 : *Approche de la structure et du fonctionnement d'un système karstique dans le cadre d'une étude préliminaire. Application au système de Glandasse (Drôme, France).*, 5^o Colloque d'Hydrologie en pays Calcaire, Neuchâtel, T 1, 8 p.

DANCKWERTS P.V., 1953 : *Continuous flow systems.*, Chemical Engineering Science, Vol 2, 1, pp 1-13.

DROGUE C., 1969 : *Contribution à l'étude quantitative des systèmes hydrologiques karstiques d'après l'exemple de quelques karst périméditerranéens.*, Thèse de Doctorat en Sciences Naturelles, Montpellier, , 482 p.

DROGUE C., 1974 : *Structure de certains aquifères karstiques d'après les résultats de travaux de forage.*, Compte Rendus à l'Académie des Sciences, Série III, Paris, 278, pp. 2621 - 2624.

GUIZERIX J., MARGRITA R., MOLINARI J., GAILLARD B., CALMELS P. & COROMPT P., 1970 : *Contribution à la mesure des débits en régime variable par une méthode de dilution de traceurs radioactifs.*, International Atomic Energy Agency, Vienne, pp. 441-459.

LEPILLER M. & MONDAIN P.H. , 1986 : *Les traçages artificiels en hydrogéologie karstique.*, Hydrogéologie, BRGM, 1, 1986.

MANGIN A., 1970 : *Contribution à l'étude d'aquifères karstiques à partir de l'analyse de courbes de décrue et de tarissement.*, Annales de Spéléologie, t 25, 3, pp. 581-609.

MANGIN A., 1971 : *Etude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique.*, Annales de Spéléologie, t 26, 2, pp. 283-329.

MANGIN A., 1975 : *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques.*, Thèse de Docteur ès Sciences, Université de Dijon, (Ann. Spéleol. ,1974, 29 , 3, pp. 283-332 : 1974, 29, 4, pp 495 - 601 : 1975, 30, 1, pp. 21 - 124).

MANGIN A., 1981a : *Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques.*, Compte Rendus à l'Académie des Sciences, Série III, Paris, t 293, pp. 401-404.

MANGIN A., 1981 : *Apports des analyses corrélatoire et spectrale dans la connaissance des systèmes hydrologiques.*, Compte Rendus à l'Académie des Sciences, Série III, Paris, t 293, pp. 1011-1014.

MANGIN A., 1982 : *L'approche systémique du karst, conséquences conceptuelles et méthodologiques.*, Reunion Monografica sobre el Karst, Larra, pp. 141-157.

MANGIN A., 1984 : *Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrales**, Journal of Hydrology, 67, pp. 25-43.

MARSAUD B., 1996 : *Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux.*, Thèse BRGM-Univ Paris Sud-CNRS, Sous presse.

MARTEL E.A., 1894 : *Les abîmes.*, Delagrave, Paris, , 581 p.

Annexe 1

Cas	Position de la rupture	Pentes des droites	Interprétation
A	Forts Pourcentages	$\alpha_2 > \alpha_1$	• mise en fonctionnement de trop-plein • fuites vers un autre système • stockage momentané • fuites ou débordement de la station de jaugeage en hautes eaux
B		$\alpha_2 < \alpha_1$	• apports en provenance d'un autre système • jaugeage d'écoulements n'appartenant pas au système
C	Faibles Pourcentages	$\alpha_2 < \alpha_1$	• apports d'une réserve issue d'un cycle antérieur
D		$\alpha_2 > \alpha_1$	• constitution d'une réserve
E	Double rupture	$\alpha_2 > \alpha_1$ $\alpha_3 < \alpha_2$	• piégeage d'une réserve lors de la décrue et restitution au cours du tarissement
Tableau 0- Interprétation des ruptures de pente de la droite représentative des débits classés			

Les pompages en aquifère karstique. Une démarche d'interprétation des essais adaptée au karst

B. MARSAUD

(ANTEA Haute Normandie, 76130 Mont Saint Aignan)

Résumé

Les pompages d'essai sont couramment employés dans les études hydrogéologiques. Ils permettent de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques d'un aquifère, qui sont indispensables pour en fixer les modalités d'exploitation et de gestion. L'interprétation des essais repose sur l'utilisation de modèles représentant soit un milieu poreux (Theis), soit un milieu fissuré (Gringarten, Warren & Root).

Dans le cas des aquifères karstiques, l'utilisation de ces modèles est parfois possible, mais demeure inefficace dans de nombreux cas. Ceci tient au fait que l'aquifère karstique est issu d'un processus évolutif et qu'il existe, selon le degré d'évolution atteint, plusieurs types d'aquifères karstiques. Ainsi, pour les systèmes peu évolués, les modèles existants sont utilisables car la structure originelle du milieu n'est que peu modifiée. De même, pour les systèmes qui sont évolués, mais qui ne présentent pas un comportement karstique (karsts non-fonctionnels), les modèles des milieux poreux ou fissurés peuvent, sous certaines conditions, en représenter le fonctionnement.

En revanche, dans le cas des systèmes karstiques évolués et fonctionnels, la structure et le fonctionnement particuliers de la zone noyée en empêchent l'utilisation. En effet, la zone noyée des aquifères karstiques est caractérisée par une hiérarchisation des vides et des écoulements de l'amont vers l'aval. Cette organisation aboutit à une dissociation des fonctions transmissives et capacitives, qui sont respectivement représentées par un *axe de drainage* et par les *systèmes annexes au drainage (SAD)*. Compte tenu de cette structure particulière, les paramètres hydrodynamiques et les lois d'écoulement classiquement utilisés pour caractériser un milieu aquifère et simuler son comportement ne sont plus adaptés. Les modèles d'interprétation de pompage qui en découlent ne sont plus utilisables.

Aussi, dans ce type de milieu l'interprétation des pompages d'essai doit faire appel à une démarche spécifique qui est présentée dans cet article. Le but n'est plus de déterminer les caractéristiques de la structure du milieu, mais de décrire les réponses obtenues au point de pompage et, éventuellement, à l'exutoire pour caractériser le fonctionnement de la zone noyée. Ces éléments permettent d'évaluer le rôle des facteurs déterminants pour une éventuelle exploitation : position du point de pompage dans le système (forage, source, SAD) et de l'axe de drainage par rapport aux réserves. L'expérience montre que ces éléments sont indispensables pour proposer un type d'aménagement et un mode d'exploitation adaptés à chaque aquifère.

1. Introduction

Si l'on se place dans un contexte d'exploitation, l'étude hydrogéologique d'un aquifère doit répondre aux principales questions suivantes :

- existe-t-il un réservoir souterrain, c'est-à-dire la formation géologique étudiée contient-elle de l'eau ?
- quelle est la géométrie de ce réservoir ?
- quelle est sa nature géologique ?
- quelles sont ses caractéristiques hydrauliques ?
- quelles sont les quantités d'eau disponibles et exploitables (ressource) ?
- comment l'exploiter ?

Pour répondre aux trois premières questions, la mise en oeuvre de méthodes indirectes (géologie, analyse structurale, géophysique, etc.) est suffisante. En revanche, pour répondre aux trois suivantes, il est nécessaire de tester en vraie grandeur l'aquifère : c'est l'objet des pompages d'essai. Cette technique consiste à prélever par pompage l'eau d'une nappe et à observer la variation du niveau d'eau correspondant à ce prélèvement, soit au point où la sollicitation est émise (forage), soit en un point d'observation quelconque (piézomètre).

On distingue deux types d'essai (Castany & Margat, 1977) :

- ***l'essai de puits*** qui permet de mesurer certaines caractéristiques inhérentes à l'écoulement dans le puits de pompage (pertes de charge quadratiques, effets pariétaux). Dans cet article, nous ne nous intéresserons pas à ce type d'essai, les phénomènes intervenant étant indépendants de la nature de l'aquifère ;
- ***l'essai de nappe*** dont l'objectif est la mesure des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. La connaissance de ces paramètres est indispensable pour fixer un débit d'exploitation optimum en fonction des différentes contraintes imposées à l'exploitation.

L'interprétation de l'essai de nappe s'effectue à l'aide de modèle ou schémas interprétatifs. Le principe est d'ajuster sur la variation réelle des niveaux une courbe produite par un modèle analytique représentant la structure et le fonctionnement de l'aquifère. Lorsque l'ajustement est jugé satisfaisant, on considère que les paramètres du modèle sont représentatifs de ceux de l'aquifère.

Le problème posé ici est de savoir si les modèles classiquement utilisés en hydrogéologie des milieux poreux et fissurés, sont utilisables dans le cas des aquifères karstiques, et :

- si oui, dans quelles limites et moyennant quelles approximations ou modifications ?
- si non, que faut-il utiliser ?

Pour ce faire, il est nécessaire de présenter tout d'abord les principaux modèles d'interprétation existants. Par la suite, nous analyserons leurs limites d'utilisation en fonctions des

caractéristiques particulières des aquifères karstiques. Enfin nous présenterons les éléments pour une méthode d'interprétation spécifique au cas des aquifères karstiques au sens strict.

2. Principaux modèles existants

De nombreux modèles ont été proposés pour l'interprétation des essais dans les milieux poreux et fissurés. Nous ne reprendrons ici que les grandes caractéristiques de ceux qui sont le plus utilisés. De plus amples détails sur les schémas et les méthodes sont présentés dans différents ouvrages généraux et récapitulatifs (notamment Da Prat, 1990 ; Kruseman *et al.*, 1991 ; Marsily de G., 1981 ; Leblanc, 1987).

2.1. Milieu poreux

Ce schéma correspond à la solution de l'équation de diffusivité en régime transitoire donnée par Theis en 1935 pour un milieu poreux homogène et isotrope (même valeur des paramètres dans toutes les directions de l'espace). La formulation proposée est aujourd'hui classique. Elle utilise une exponentielle intégrale (fonction tabulée) :

$$D = \frac{Q}{4pT} \cdot \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} \cdot du \text{ avec } u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

Ce schéma permet de déterminer la valeur de la transmissivité T et du coefficient d'emménagement S de l'aquifère.

Une approximation de la solution de Theis a été fournie par Jacob, mais elle est aujourd'hui peu utilisée en raison du développement des logiciels d'interprétation qui facilitent les traitements et permettent de prendre en compte des variations de débit au cours de l'essai.

Diverses variantes de ce schéma ont été établies pour répondre à certains cas particuliers (Marsily de G., 1981):

- effet de drainance (Boulton, 1954) ;
- prise en compte de l'effet de capacité (Papadopoulos et Cooper, 1967) ;
- puits artésien (Jacob et Lohman, 1972) ;
- nappe libre et puits incomplet (Neuman, 1974).

2.2. Milieu fissuré

L'interprétation des essais de pompage en milieu fissuré peut être abordée à partir de trois représentations différentes du milieu fissuré :

- milieu anisotrope affecté d'une fracture unique ;
- milieu poreux homogène et anisotrope ;
- milieu à double porosité.

2.2.1. Milieu homogène affecté d'une fracture unique, verticale ou horizontale

Dans ces schémas, le puits de pompage intercepte une fracture unique affectant un milieu homogène (schéma de Theis). Dans ces conditions, tout se passe comme si le puits était remplacé par un système "puits-fracture" (puits étendu) ayant la forme de la fracture.

La solution a été donnée par Gringarten *et al.* (1972). Qu'il s'agisse du cas de la fracture verticale ou de la fracture horizontale, la réponse correspond à celle du milieu homogène affectée en début d'essai d'un effet de capacité dû au volume d'eau contenu dans la fracture. La réponse du modèle converge vers celle du modèle de Theis d'autant plus rapidement que :

- la perturbation est faible (faibles dimensions de la fracture) ;
- le milieu homogène est capable d'effacer la perturbation, c'est-à-dire possède une transmissivité forte, ou plutôt un contraste de transmissivité faible vis-à-vis de la fracture.

Diverses variantes de ce type de schéma ont été proposées :

- fracture inclinée (Cinco *et al.*, 1975) ;
- fracture à conductivité variable (Cinco *et al.*, 1976).

Le schéma permet de calculer la transmissivité T et le produit du coefficient d'emménagement S par le carré d'un paramètre caractéristique de la fracture : longueur de la fracture pour une fracture verticale, rayon de la fracture pour une fracture horizontale.

2.2.2. Milieu poreux homogène anisotrope

Dans ce type de schéma, le milieu fissuré est considéré comme un milieu poreux homogène mais anisotrope, c'est-à-dire ne possédant pas les mêmes propriétés dans les 3 directions de l'espace. On distingue :

- le schéma d'anisotropie radiale qui est constitué de deux régions concentriques, homogènes et isotropes, mais de perméabilités différentes (Adams *et al.*, in Bertrand *et al.*, 1978). La région la plus éloignée du puits, à grande perméabilité, représente les fractures ;
- le schéma d'anisotropie bi-dimensionnelle dans lequel la perméabilité maximale représente la perméabilité de la direction principale de fracturation, et la perméabilité minimale, celle de la matrice.

2.2.3. Milieu à double porosité

La notion de milieu à double porosité, et les modèles qui en découlent, reposent sur la théorie développée par Barenblatt *et al.* en 1960. Les auteurs montrent qu'une roche poreuse affectée d'importantes fractures peut être représentée par la superposition de deux milieux poreux avec des pores de tailles différentes.

Le milieu est constitué de blocs de dimensions irrégulières séparés par des fissures. Ces deux éléments ont chacun une perméabilité et une porosité propre, mais la continuité du milieu est respectée. Lors d'un pompage, le comportement particulier se traduit par un rééquilibrage de

la pression différentielle entre les fissures et les blocs, ce qui induit un déplacement du fluide depuis les blocs vers les fissures.

Warren et Root ont proposé en 1963 un schéma d'interprétation des pompages d'essai basé sur ce concept. Diverses variantes ont été proposées par Kazemi (1969) (aquifère stratifié composé d'une couche de faible épaisseur, mais de forte conductivité, et d'une couche épaisse à faible conductivité et fort coefficient d'emmagasinement), Da Swaan (1976) (fissures horizontales), Boulton & Streltsova (1978) (écoulement libre ou captif), et Bourdet & Gringarten (1980) (prise en compte des effets de puits en début de pompage).

2.3. SCHEMAS SPECIFIQUES AU KARST

Dans la littérature, il existe peu de modèles d'interprétation spécifiques au milieu karstique. Deux schémas ont cependant été proposés.

2.3.1. Schéma de J. Thrailkill (1988)

La méthode d'interprétation repose sur le concept de " shallow conduit flow aquifer " des auteurs anglo-saxons. Le karst est assimilé à un ensemble de réservoirs de forme et de distribution quelconques, reliés par des conduits.

L'interprétation proposée (Drawdown Interval Analysis) est basée sur la technique de pompage par paliers non enchaînés et s'appuie sur un modèle conceptuel constitué d'un réservoir (ou plusieurs liés par seuils hydrauliques) connecté au puits.

L'interprétation consiste à mesurer le débit moyen de réalimentation au cours d'un palier de pompage en comparant les vitesses moyennes de descente et de remontée de chaque palier. Si un seul palier est réalisé, le pompage est divisé arbitrairement en périodes de temps successives, correspondant à autant de paliers enchaînés mais à même débit.

A partir de cette interprétation, l'auteur caractérise les dimensions des différents réservoirs connectés au puits.

2.3.2. Schéma de Thiery, Vandenbeush & Vaubourg (1983)

Ce modèle a été proposé par Thiery *et al.* en 1983. La représentation retenue par les auteurs considère un vide karstique de forme quelconque auquel est juxtaposé un milieu possédant une porosité de matrice.

Dans les vides karstiques sans pertes de charge, le rabattement est identique à celui observé dans le puits de pompage (diminué de celui des éventuels effets de puits). Dans la matrice, l'évolution de la pression est fonction :

- de la position du point d'observation par rapport à la cavité ;
- de la position du point d'observation par rapport au puits de pompage.

Le modèle donne les valeurs de la perméabilité et de la porosité de la matrice ainsi que l'extension de la surface de contact entre vide et matrice.

3. Utilisation en milieu karstique

3.1. Spécificité et diversité des systèmes karstiques

Avant de discuter de la validité des modèles qui viennent d'être présentés, il est nécessaire de rappeler les grandes caractéristiques de structure et de fonctionnement de l'aquifère karstique. L'originalité du karst provient de son processus de genèse : la karstification. De ce processus d'érosion physico-chimique il résulte deux propriétés fondamentales qui distinguent l'aquifère karstique des autres aquifères (Mangin 1982 ; Marsaud, 1996) :

- **le degré d'évolution de l'aquifère.** La karstification correspond à une *évolution*, au cours de laquelle certains vides du milieu fissuré originel s'élargissent alors que d'autres se colmatent, aboutissant à la création d'une structure de drainage organisée et isolée du milieu fissural originel.
- **la fonctionnalité de l'aquifère.** L'existence d'un comportement karstique des écoulements résulte de la conjonction d'une structure organisée et d'un fort potentiel hydraulique aux limites du système. Si l'un de ces éléments manque, comme cela peut être le cas lors d'une remontée du niveau de base, il n'y a plus de comportement karstique et le système n'est plus *fonctionnel*.

Ainsi, en fonction du degré d'évolution atteint par les systèmes karstiques, des différents événements intervenant au cours du processus de karstification et des différentes configurations possibles (présence ou non d'un impluvium non karstique, système jurassien ou vauchusien), il existe une multitude d'aquifères formant un continuum à partir de l'aquifère carbonaté originellement fissuré. Il est cependant possible de les regrouper en trois grands types de systèmes karstiques (Marsaud, 1996) :

1. **Les aquifères carbonatés fissurés et karstifiés.** Il s'agit des systèmes qui sont en cours d'évolution et dont l'organisation n'est pas encore perceptible et qui peuvent être assimilés à des aquifères fissurés. Dans ce type se place aussi le cas des aquifères où la karstification est localisée et ne produit pas d'isolement du réseau fissural originel (craie).
2. **Les systèmes karstiques au sens strict .** Ce sont les systèmes karstiques fonctionnels dans lesquels vides et écoulements sont organisés. Il en résulte nombre de caractéristiques qui les rendent spécifiques par rapport aux autres milieux (Mangin, 1975 et 1984; Bakalowicz, 1979):
 - existence de deux types de vides : les Systèmes Annexes au Drainage (SAD) et un axe de drainage ou drain ;
 - dissociation des fonctions capacitatives (stockage dans les SAD) et transmissives (relation au sein du karst noyé par le drain) ;
 - hétérogénéité et discontinuité de la zone noyée ;

- existence de forts contrastes de vitesse ;
- pertes de charge singulières entraînant des phénomènes d'inertie ;
- comportement conditionné par l'état du système et les caractéristiques de la fonction d'entrée, conférant au système un caractère non linéaire et non stationnaire.

3. **Les systèmes karstiques contrôlés aux limites.** Ce type regroupe les systèmes rendus non fonctionnels en raison d'une modification des conditions extérieures (remontée niveau de base par exemple), et qui présentent un comportement de milieu poreux à l'échelle globale car, bien que les vides soient organisés, les écoulements ne rendent pas compte de cette organisation.

C'est à partir de la connaissance de ces trois grandes familles de système karstique et de leurs caractéristiques propres qu'il faut évaluer l'adaptation des schémas interprétatifs des pompages d'essai.

3.2. CONSEQUENCES

Tout d'abord il est utile de préciser que la représentativité d'un modèle peut être évaluée par la relation qui le lie à l'objet qu'il modélise :

- relation isomorphique (bijection) : chaque propriété du modèle est représentative de celle de l'objet étudié et inversement. C'est le cas des modèles descriptifs, qui représentent la structure du milieu et utilisent des lois analytiques intégrant les caractéristiques de la structure pour simuler le fonctionnement.
- relation homomorphique (surjection) : certaines propriétés de l'objet sont représentatives du modèle, mais en aucun cas celles du modèle ne sont toutes représentatives de l'objet. C'est le cas des modèles équivalents qui, en hydrogéologie, sont généralement des modèles de comportement simulant le fonctionnement d'un milieu sans en représenter la structure exacte.

Ainsi, on peut rappeler à la suite de Mangin (1975) que, si l'interprétation d'essais à l'aide de certains schémas permet d'ajuster parfois les réponses obtenues, il ne s'agit pas là d'une preuve de leur capacité à représenter les caractéristiques de l'aquifère karstique. Cela signifie simplement que le milieu étudié et le schéma utilisé possèdent des propriétés communes, mais pas obligatoirement que le schéma est représentatif du milieu.

3.2.1. Aquifères carbonatés fissurés et karstifiés

Pour ce type de système, les schémas d'interprétation de pompages du milieu fissuré ainsi que le schéma de Theis -s'il est admissible au titre de schéma équivalent- sont utilisables car il n'y a pas d'organisation des écoulements. La karstification ne joue que sur l'ordre de grandeur des paramètres déterminés (transmissivité et coefficient d'emménagement).

Lorsque l'on est en présence d'une karstification locale au sein d'un ensemble fissuré, comme c'est le cas pour le réservoir crayeux de Haute-Normandie, les modèles du milieu fissuré sont utilisables lorsque le forage n'est pas directement implanté sur les vides karstiques. La structure karstique intervient alors comme une limite alimentée.

C'est d'ailleurs sur ce principe que sont réalisés les captages dits "forage latéral au karst" en Normandie. On cherche à implanter les forages à une ou plusieurs dizaines de mètres des vides karstiques, ce qui permet de profiter de l'effet de la limite alimentée pour exploiter la nappe avec un faible rabattement même dans des milieux peu transmissifs, et d'éviter de capter des eaux turbides circulant à grande vitesse dans les vides karstiques en période de pluie.

Un exemple d'interprétation de pompage d'essai selon cette démarche est donné à la figure 1. Il s'agit d'un "forage latéral au karst" réalisé pour remplacer un ancien captage implanté sur un axe karstique et présentant une forte turbidité en période pluvieuse (De la Quèrière *et al.*, 1993). Le schéma d'écoulement utilisé pour l'interprétation est un modèle de Theis ($T = 4.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et $S = 2 \cdot 10^{-2}$) avec une limite alimentée à 37 m représentant la forte transmissivité apparente du milieu karstique.

Dans ce type d'aquifère, les schémas interprétatifs des milieux poreux et fissurés sont utilisables et fournissent les éléments nécessaires et suffisants pour procéder à des simulations et prévisions d'exploitation.

3.2.2. Systèmes karstiques contrôlés aux limites

Pour ce type de système, et notamment dans le cas des systèmes captifs situés dans les bassins sédimentaires, il existe bien une structure karstique du milieu mais le comportement n'est pas karstique car l'écoulement est contrôlé aux limites par un faible potentiel hydraulique. Lors d'un pompage dans un tel milieu, il faut distinguer deux cas :

- le débit de pompage est important et le rabattement provoque la réapparition d'un comportement karstique au voisinage du forage. Ce cas revient à réaliser un pompage dans un *système karstique au sens strict* qui sera traité au paragraphe suivant.
- le débit de pompage et le rabattement introduit ne sont pas suffisamment importants pour induire un comportement karstique. Dès lors, il est possible d'utiliser les modèles d'interprétation des milieux poreux ou fissurés, mais uniquement au titre de modèle équivalent c'est-à-dire des modèles représentant le fonctionnement du milieu mais pas sa structure.

Un exemple d'application de ce dernier cas est donné à la figure 2. Il s'agit d'un aquifère karstique profond de la région montpelliéraine. L'interprétation est conduite avec un schéma de Theis comprenant 2 limites étanches. La valeur du coefficient d'emmagasinement est supérieure à 2000, en raison de la forte capacité de stockage des vides karstiques. Un ajustement avec des coefficients réalistes serait obtenu avec le modèle de Gringarten, mais cela n'est pas préférable. Obtenir un coefficient aberrant permet de garder à l'esprit que l'interprétation s'effectue avec des paramètres équivalents qui n'ont pas de véritable signification physique. En outre, il faut remarquer que les courbes obtenues présentent une grande similitude avec celles données par le modèle de Thiery *et al.* (1983) qui s'appuie sur une démarche identique : comportement de milieu poreux ou fissuré avec une forte capacité de stockage d'un vide karstique.

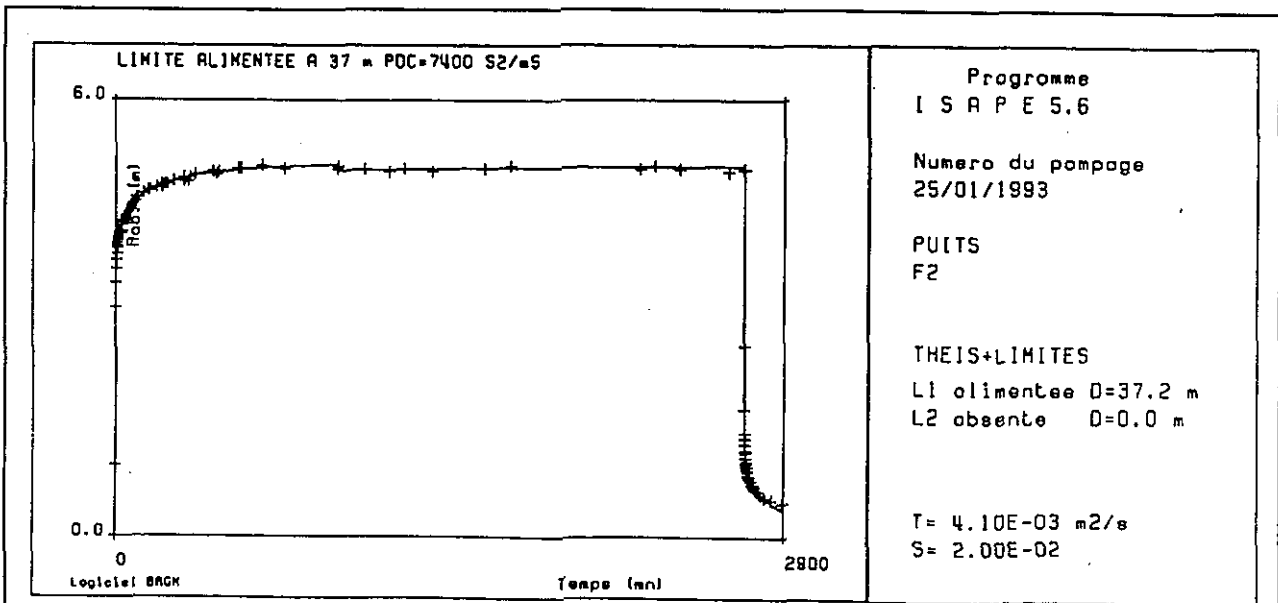


Figure 1 : Exemple d'interprétation dans un "forage latéral au karst" en aquifère crayeux

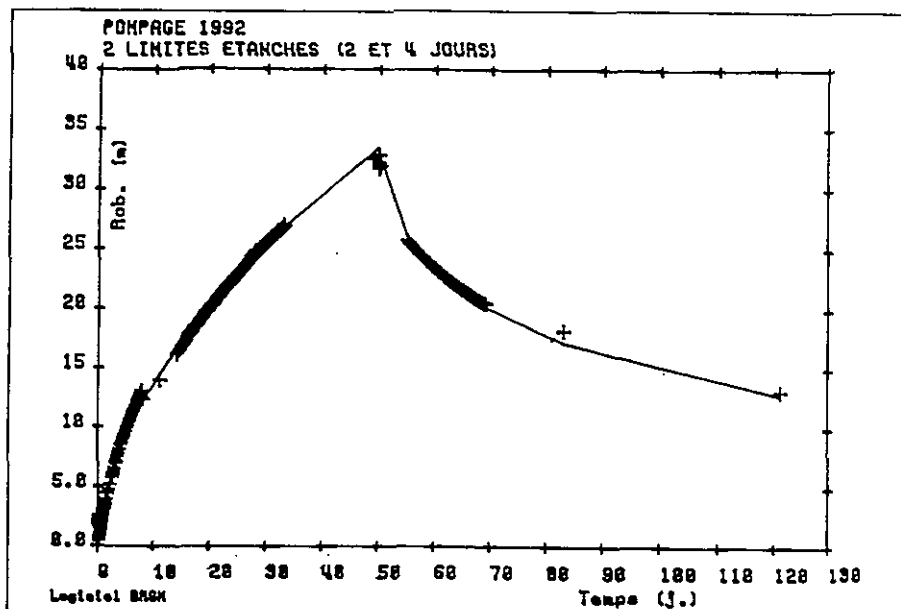


Figure 2 : Exemple d'interprétation par modèle équivalent dans un karst profond

Les paramètres déterminés étant des paramètres équivalents, ils ne permettent pas de caractériser la structure du milieu et l'information obtenue a peu d'intérêt pour la connaissance fondamentale du système. En revanche, **du point de vue appliqué**, ils sont suffisants. Pour permettre d'apprécier les conditions d'exploitation on retiendra donc cette approche à condition de prendre certaines précautions :

- réalisation de pompages de très longue durée pour s'affranchir de l'apparition de phénomènes non prévus par le modèle ;

- prise en compte de marges d'erreur plus élevées lors des simulations d'exploitation ; par exemple en introduisant un effet de limite étanche pour maximiser les rabattements ;
- mise en exploitation progressive et sous surveillance des ouvrages (pompage de validation).

3.2.3. Systèmes karstiques au sens strict

Pour ce type de système, il faut tenir compte de la position du forage par rapport à la structure du karst noyé. Lorsque les pompages sont réalisés sur des forages implantés hors de la structure de drainage, les modèles du milieu fissuré sont utilisables, la structure karstique intervenant alors comme une limite alimentée ou étanche selon le degré de colmatage du karst noyé. Ce cas ramène à celui des *aquifères carbonatés fissurés et karstifiés*.

Lorsque le point de pompage est positionné sur la structure karstique, l'utilisation du schéma de Theis n'est pas possible car il implique de nombreuses hypothèses (milieu homogène, épaisseur constante,...) qui ne correspondent pas à la réalité de l'aquifère karstique. Il en va de même pour le schéma proposé par Thrailkill (1988), qui bien que considérant des vides de grandes tailles, assimile l'aquifère karstique à un simple ensemble de réservoir et ne tient compte ni de l'organisation du milieu ni de la dynamique des écoulements.

Plus intéressants sont les schémas basés sur la notion de double porosité et le schéma de Thiery *et al.* (1983). Ils traduisent tous un double comportement dans la réponse de l'aquifère, qui est expliqué par la présence de deux milieux de capacité et transmissivité différentes. Il s'agit respectivement soit du couple fracture-milieu poreux, soit de deux milieux poreux de porosité différente, soit encore un vide et un milieu poreux. L'intérêt de ces modèles est de dissocier une fonction capacitive (la fracture, le milieu le plus poreux ou le vide) et une fonction transmissive (toujours représentée par un milieu poreux).

L'application de ce schéma est séduisante dans la mesure où l'on a longtemps considéré que le milieu karstique pouvait être représenté par un milieu fissuré alimenté par un réseau de fractures. Or si cette représentation est acceptable pour les *aquifères carbonatés fissurés et karstifiés*, elle ne l'est pas pour les *systèmes karstiques au sens strict* pour lesquels l'établissement d'une structure de drainage isole le réseau fissural par colmatage. Aussi, s'il existe bien une dissociation des fonctions capacitives et transmissive dans le karst noyé, elle est due à la présence de deux types de vide, les SAD et le drain, et non à la sollicitation d'un réseau fissural.

Dès lors, l'utilisation d'un milieu poreux et des lois analytiques attachées à sa définition pour décrire la fonction capacitive et son comportement n'est pas correcte. Cette représentation ne peut pas non plus être retenue comme un schéma équivalent, car elle ne peut rendre compte de certains comportements particuliers liés à cette dissociation (détournements locaux des écoulements, déconnexions des SAD). C'est ainsi que l'apparition d'un régime transitoire lors d'un pompage dans un SAD ne traduit pas obligatoirement la propagation d'une onde de pression dans une matrice poreuse, et on peut l'expliquer par le détournement progressif des écoulements du drain en fonction d'une condition de charge.

Aussi, pour les *systèmes karstiques au sens strict* pour lesquels le pompage affecte directement la structure karstique, aucun des schémas décrits auparavant n'est satisfaisant, ni au titre de modèle descriptif, ni au titre de modèle équivalent

On pourrait être tenté de chercher à établir un modèle d'interprétation analytique reprenant les caractéristiques particulières du karst. Mais la structure karstique ne présente pas les caractéristiques d'homogénéité des autres milieux ; pour établir ce modèle il faudrait donc connaître la géométrie exacte des vides karstiques, ce qui est illusoire.

En conséquence, il a été proposé d'utiliser une autre approche (Marsaud, 1996), dont les principaux éléments sont présentés ci-après.

4. Eléments pour une méthode d'interprétation des pompages d'essai dans le cas des systèmes karstiques au sens strict

Pour contourner le problème posé par l'inadaptation des modèles analytiques d'interprétation des essais de pompage dans les *systèmes karstiques au sens strict*, il a été proposé une démarche s'appuyant sur deux points :

- l'utilisation d'un modèle d'organisation et de fonctionnement, c'est-à-dire un *modèle simple* et général qui n'impose que le minimum de contraintes physiques sur la disposition des vides.
- le recours, lorsque l'on dispose des débits à l'exutoire du système, à une approche "système" basée sur une conceptualisation systémique des essais de pompage. Le but n'est plus de déterminer des paramètres analytiques, mais de décrire le fonctionnement d'un système karstique en réaction à un pompage pour identifier les paramètres qui limitent une exploitation.

4.1. Modèle simple du karst noyé

Ce modèle s'appuie sur les connaissances actuelles de l'organisation du karst noyé et les résultats de l'expérience de pompage du Baget (Collectif, 1992 ; Bakalowicz *et al.*, 1994). Il ne retient qu'une caractéristique du karst noyé : la dissociation des vides (SAD et drain) et de leurs fonctions (figure 3).

La forme de la réponse obtenue va dépendre de la relation drain-SAD. Supposons que le modèle soit uniquement constitué d'un conduit sans réservoir latéraux. Lors d'un pompage, le débit prélevé sur le drain (soit directement, soit par l'intermédiaire du SAD) devrait manquer intégralement à la source. La réponse sera égale à l'échelon d'entrée, éventuellement déphasée selon le type d'écoulement. En revanche, si la conduite est alimentée par des réservoirs en fonction de la différence de charge réservoir-conduite, le prélèvement entraîne une diminution de charge dans la conduite. Par voie de conséquence, il se produit une augmentation de la différence de charge entre réservoirs et conduite, et donc du débit de ces réservoirs.

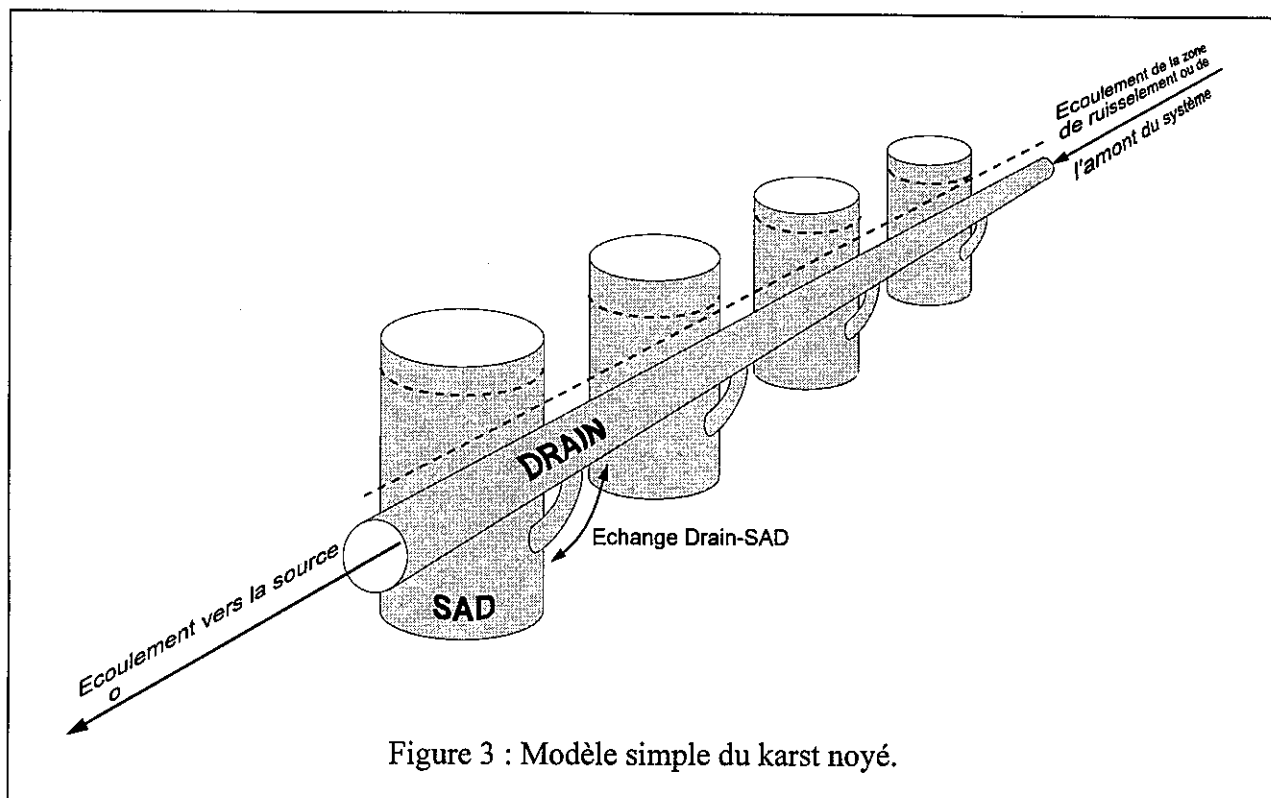


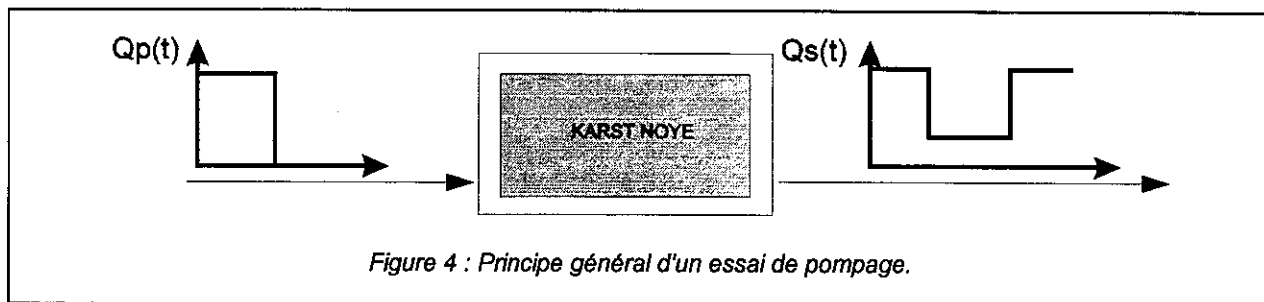
Figure 3 : Modèle simple du karst noyé.

ès lors, le prélèvement sur la conduite est en partie compensé par le surcroît de débit des réservoirs, et ceci d'autant plus que la différence de charge est accrue et que la relation drain-SAD est à faibles pertes de charge. Il va en résulter deux effets :

- une déformation de la réponse à la source correspondant au régime transitoire que va imposer la perte de charge entre les réservoirs et le drain.
- une atténuation en amplitude de la réponse à la source, représentative de la part du surcroît de débit fourni par les SAD.

4.2. Approche "système"

L'approche proposée tient compte du fait que pour les systèmes karstiques, la structure organisée de la zone noyée concentre les eaux vers un seul exutoire où il est généralement possible de contrôler l'écoulement. Le principe retenu ici est d'appliquer au karst noyé une fonction d'entrée ayant la forme d'un échelon de débit $Q_p(t)$, et l'on cherche à caractériser le système en déterminant sa réponse, portée par la fonction de sortie, les débits à l'exutoire (figure 4).

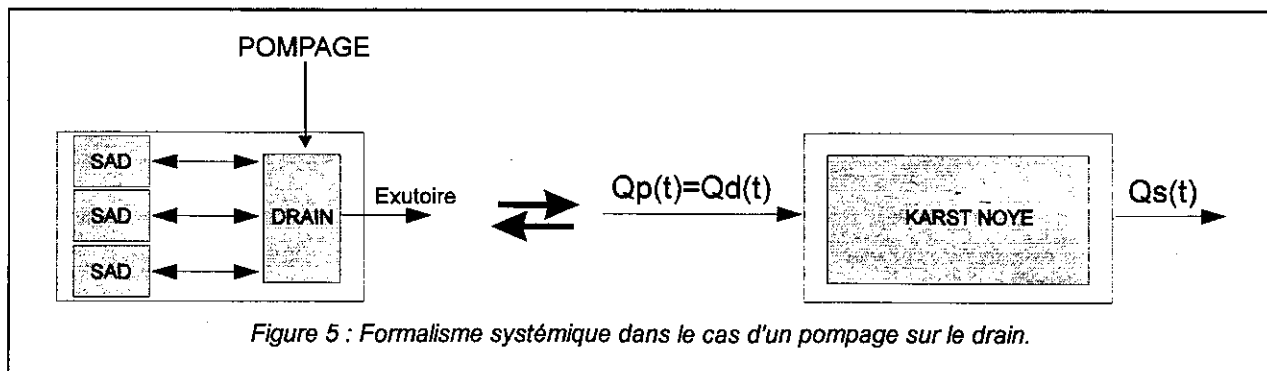


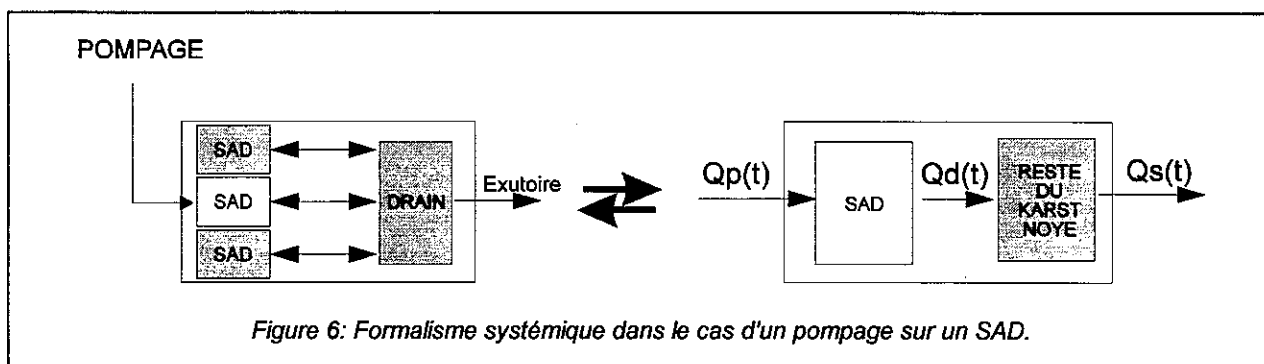
En raison de l'organisation de la zone noyée, il faut tenir compte de la dissociation des fonctions transmissive et capacitive de l'aquifère. Le drain constituant une discontinuité hydraulique au sein de l'aquifère, la mobilisation des réserves va se faire obligatoirement par son intermédiaire. C'est donc cette fonction transmissive qu'il faut solliciter, et par réaction, la fonction capacitive. Apprécier la capacité des eaux à être mobilisées revient donc à déterminer la capacité des eaux des SAD à être mobilisées **par l'intermédiaire du drain**.

Le véritable objectif de l'essai par pompage doit donc être de caractériser la réponse du système, via la fonction transmissive, et c'est la fonction d'entrée sur le drain $Q_d(t)$ que l'on va chercher à comparer à la fonction de sortie à l'exutoire $Q_s(t)$.

Selon la position du point de pompage il faut donc distinguer deux cas :

- si le pompage est réalisé directement sur le drain, la fonction d'entrée sur le drain $Q_d(t)$ est égale à la fonction d'entrée sur le système c'est-à-dire à l'échelon de pompage $Q_p(t)$. Dans ce cas, il sera possible de caractériser le système en comparant directement la fonction d'entrée et la fonction de sortie (figure 5).
- si le pompage est réalisé sur un SAD (figure 6), le pompage intéresse tout d'abord le SAD qui va influencer par réaction sur le drain. Cette influence va être fonction des propres caractéristiques du SAD considéré et de la qualité de la relation qui le lie au drain. Il n'est alors plus possible de comparer directement l'entrée et la sortie à l'exutoire et il faut considérer deux sous-systèmes : le SAD sollicité et le reste du karst noyé. La fonction d'entrée sur le drain $Q_d(t)$ est donc la fonction de sortie du SAD et c'est elle que l'on comparera à la fonction de sortie à l'exutoire. En pratique, $Q_d(t)$ est déterminé à partir de la variation des rabattements dans le SAD





4.3. Paramètres déterminés

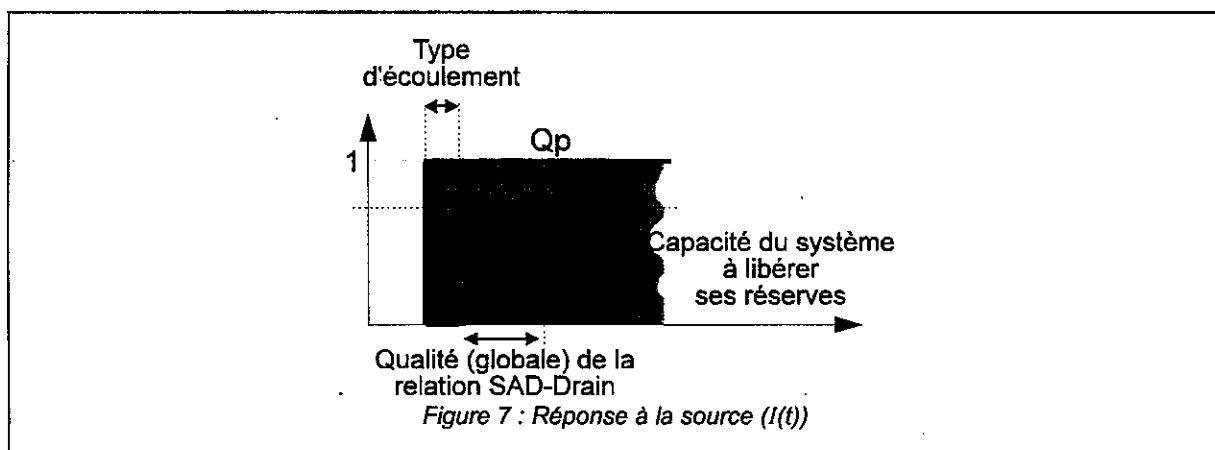
La description de la réponse obtenue à la source va permettre de caractériser (figure 7) :

- Le type d'écoulement dans le drain

L'identification du type d'écoulement (à surface libre ou en charge) s'effectue à partir du déphasage entrée-sortie, la réaction à la source étant quasi instantanée dans le cas d'un écoulement captif.

- La qualité globale de la relation SAD-drain

Elle est appréciée à partir de l'importance du régime transitoire que va imposer en début de pompage la perte de charge entre les réservoirs et le drain. La réponse sera une fonction sigmoïde d'autant plus étalée que les pertes de charge entre le drain et les SAD seront fortes.



- La capacité du système à libérer ses réserves

La capacité du système à libérer les réserves situées au-dessus du drain détermine l'amortissement du créneau de pompage. Pour tenter de quantifier cet effet, il est possible de calculer le rapport R_p :

$$R_p = \frac{Q_p - \Delta Q_s}{Q_p}$$

R_p traduit l'importance du débit manquant à l'exutoire (ΔQ_s) par rapport au débit prélevé et relativement à celui-ci. Si l'intégralité du débit prélevé manque à l'exutoire, R_p est nul et le système a un faible taux de libération de ses réserves en raison de fortes pertes de charge entre drain et SAD. Si, au contraire, le système compense complètement le débit prélevé, il n'y a pas de modification du régime de la source ($\Delta Q_s = 0$), est R_p vaut 1 ; le débit pompé est

pas de modification du régime de la source ($\Delta Q_s = 0$), est R_p vaut 1 ; le débit pompé est entièrement compensé par la libération des réserves (faibles pertes de charge). R_p permet donc de quantifier globalement l'importance de la part du débit pris à la réserve par rapport au débit de pompage. Il s'agit donc du **rendement de pompage** du système.

- L'importance des réserves mobilisables

Au cours du pompage, les SAD fournissant un surcroît de débit, les réserves vont s'amenuiser au cours du temps, ceci se traduisant par une diminution de la charge des SAD. Par conséquence, la différence de charge entre SAD et drain va diminuer et par là même le surcroît de débit issu de ces SAD. De cet épuisement des réserves va résulter, pour un débit donné, une diminution du rendement de pompage au cours du temps : c'est la notion de **pérennité d'exploitation**.

La pérennité d'exploitation est fonction de l'importance du volume des réserves mobilisables par l'intermédiaire du drain. Un volume étant défini comme le produit d'une surface par une hauteur, la décroissance des réserves va être fonction de :

- **l'extension du karst noyé** ; puisque le surcroît de débit est déterminé par la différence de charge entre drain et SAD, à volume d'eau libéré par les SAD et débit de pompages égaux, le rendement va décroître d'autant plus vite que la surface des vides constitutifs de SAD sera faible.
- **de la position du drain par rapport aux réserves** ; puisque tous les échanges au sein du karst noyé s'effectuent par l'intermédiaire du drain, c'est la position de ce dernier qui va déterminer la quantité de réserve mobilisable théoriquement. Plus le drain sera en position basse par rapport aux réserves, plus les quantités d'eau disponibles pour fournir un surcroît de débit seront importantes. En fonction de la configuration du système on peut distinguer deux cas principaux (figure 8) :
 - **système jurassien** (drain en position haute par rapport aux réserves) : si le point de pompage est placé sur le drain, les réserves mobilisables par son intermédiaire correspondent aux masses d'eau située au-dessus du niveau du drain (A). On pourra tenter d'augmenter la part des réserves mobilisables soit en plaçant le point de pompage sur un SAD (B) (la position des pompes définissant le gain de réserve mobilisable dans le SAD sollicité), soit en exploitant plusieurs SAD à la fois (forages multiples ou inclinés). Le gain obtenu sera bien entendu fonction des caractéristiques propres du ou des SAD sollicités ;
 - **système vauclusien** (drain en position basse par rapport aux réserves) : la position du drain ne sera plus un facteur limitant et celle du point de pompage importera peu (C). La pérennité de l'exploitation dépendra principalement de l'extension du karst noyé et de la profondeur des pompes sous le niveau de la source.

4.4. Exemple d'application : le système de Gervanne

Les études réalisées sur ce site étant présentée par ailleurs, nous rappellerons simplement qu'il s'agit d'un système possédant une zone noyée probablement captive et avec des réserves importantes. Le pompage est réalisé sur un forage atteignant le drain ou une digitation de celui-ci. Les essais ont été réalisés en deux phases en 1993 et après réalésage du forage en 1995 (Crochet *et al.*, 1993, Crochet & Marsaud, 1995). Deux types d'essai ont été mis en oeuvre : essai par paliers (figure 9) et essai de longue durée (48 et 252 h).

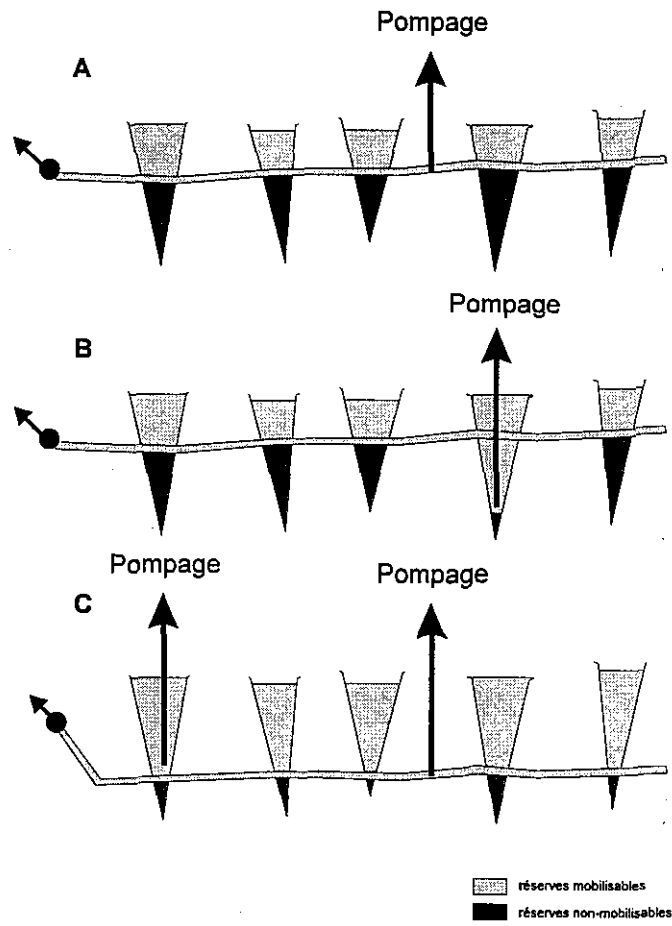


Figure 8 : Influence de la position du drain par rapport aux réserves

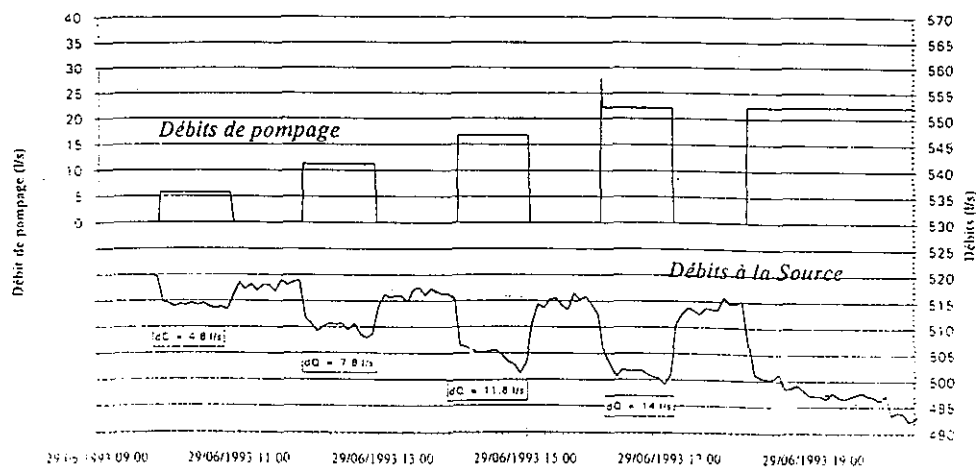


Figure 9 : Pompage de Gervanne, évolution des débits à la source et valeurs de ΔQ_s

Les valeurs du rendement de pompage calculé pour chaque palier sont reportées au tableau 1.

Date pompage	Débit de pompage (l/s)	Variation de débit à la source	Différence de débit (l/s)	Rendement Rp
1993	5.8	4.8	1	0.17
	11.2	7.8	3.4	0.3
	16.7	11.8	4.9	0.29
	22.2	14	8.2	0.37
1995	103	68	35	0.34
Tableau 1 : Pompage de Gervanne, rendements de pompage				

Le rendement de pompage maximum obtenu est de 0.37. Cette faible valeur est due aux pertes de charge dans le karst noyé (relation SAD-drain) qui conditionnent la libération des réserves. Pour évaluer la pérennité de l'exploitation, nous donnons au tableau 2 les valeurs de Rp calculées en début et en fin du pompage de septembre 1995 qui a été réalisé sur une durée de 10 jours.

	Débit de pompage (l/s)	Variation de débit à la source	Différence de débit (l/s)	Rendement Rp
Début	103	68	35	0.34
Fin	103	72	31	0.3
Tableau 2 : Pompage de Gervanne, pérennité de l'exploitation				

On remarque que la vitesse de décroissance du rendement de pompage V_{Rp} est très faible ($3.8 \cdot 10^{-3} \text{ j}^{-1}$) sur 10 jours.

Le système de Gervanne possède donc une mobilité des réserves assez faible (relativement à la position du point de pompage et au conditions de test), mais celles-ci sont suffisamment importantes pour permettre de procéder à une exploitation du système.

5. Conclusion

La compréhension du karst est indissociable de sa reconnaissance comme un aquifère, mais aussi et surtout de sa reconnaissance comme un aquifère spécifique. Ainsi, il n'existe pas un aquifère karstique mais une infinité. En isolant certaines de ses propriétés majeures il est possible de distinguer certaines grandes catégories. S'il peut paraître parfois arbitraire, cet aspect de classification est commun à toutes les disciplines qui étudient des phénomènes évolutifs (biologie, botanique, paléontologie). L'avantage de cette classification est de permettre un choix méthodologique notamment pour l'interprétation des pompages d'essai.

En revanche, pour les trois grandes catégories on peut établir les limites d'utilisation de chaque modèle :

- **Les aquifères carbonatés fissurés et karstifiés** : utilisation des modèles des milieux poreux et fissurés
- **Les systèmes karstiques au sens strict** : utilisation d'une approche spécifique
- **Les systèmes karstiques contrôlés aux limites** : utilisation d'une démarche spécifique ou des modèles des milieux fissurés au titre de modèle équivalent

Les premiers éléments d'une nouvelle approche spécifique pour les systèmes karstiques au sens strict ont été donnés. La méthode s'appuie sur deux axes. Tout d'abord, un modèle simple du karst noyé est établi à partir des résultats obtenus lors du pompage à gros débit du Baget. Il ne retient que les propriétés fondamentales de la structure et du fonctionnement du karst noyé, à savoir des vides de grandes tailles et une dissociation des fonctions capacitive et transmissive. Ensuite, il a été retenu une formulation systémique tenant compte du rôle prépondérant de l'axe de drainage dans la circulation des eaux. Il est alors possible de dégager deux paramètres caractéristiques de la réponse du système karstique : *le rendement de pompage* qui permet d'évaluer la capacité d'un système à libérer ses réserves sous l'action d'un pompage et la *pérennité d'exploitation* qui rend compte de l'importance des réserves mobilisables. Les résultats obtenus restent encore un peu qualitatifs, seule la multiplication des exemples et leur comparaison conduira à préciser le sens des paramètres et à les quantifier par l'établissement d'échelles de valeurs.

En conclusion, il faut remarquer que plus qu'un problème de méthode, l'interprétation des pompages d'essai pose un problème de démarche. Pour bien aborder une interprétation, il est préférable de savoir a priori à quel type aquifère on a affaire, tout comme on cherche à distinguer un milieu poreux d'un milieu fissuré avant de procéder à un pompage. Cependant, il est évident que dans un contexte d'exploitation, ce n'est pas toujours le cas. Si dans une certaine mesure l'interprétation permet d'identifier le type de système, il demeure que l'ensemble des intervenants (maître d'ouvrage, maître d'oeuvre et bureau d'étude) doit prendre conscience de la spécificité de l'aquifère karstique et accepter de mettre en oeuvre une démarche d'étude et des méthodes différentes de celles utilisées dans les autres milieux.

Bibliographie

BAKALOWICZ M., 1979 : *Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification.* Thèse de Doctorat de Science Naturelles, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 269 p.

BAKALOWICZ M., CROCHET Ph., D'HULST D., MANGIN A., MARSAUD B., RICARD J. & ROUCH R., 1994 : *Expérience de pompage à fort débit dans un gouffre. Résultats fondamentaux et appliqués.* Action Cost 65, Réunion de Millau, Mai 1994, à paraître, 16 p.

BARENBLATT G.E. ZHELTON I.P. & KOCHINA I.N. 1960 : *Basic concepts in the theory of homogeneous liquids in fissured rocks.* Journal of Applied Mathematical Mechanics, 24, 5, pp. 1286-1303.

BERTRAND C. & GRINGARTEN A.C., 1978 : *Détermination des caractéristiques hydrauliques des aquifères fissurés par pompage d'essai en régime transitoire.* Rapport BRGM, 78 SGN 669 GEG, 32 p.

BOULTON N.S., 1954 : *The drawdown of the water-table under non-steady conditions near a pumped well in an unconfined formation.* Institute Of Civil Engineers, Proc. T3, Part 3, 2, pp. 364-579.

BOULTON N.S. & STRELTSOVA T.D., 1978 : *Unsteady flow to a pumped well in an unconfined fissured aquifer.* Journal of Hydrology, 37, pp. 349-363.

BOURDET D.P. & GRINGARTEN A.C., 1980 : *Determination of fissured volume and block size in fractured reservoirs by type-curve-analysis.* Society of Petroleum Engineers, 55th Annual Conference and Exhibition, Dallas, Sept 21-24, 1980, paper 9293.

CASTANY G. & MARGAT J., 1977 : *Dictionnaire français d'hydrogéologie.* BRGM, 249 p.

CINCO L.H., RAMEY H.J Jr & MILERR F.G., 1975 : *Unsteady-state pressure distribution created by a well with an inclined fracture.* Society of Petroleum Engineers, 50th Annual Conference and Exhibition, Dallas, 1975, paper 5591.

CINCO L.H., SAMANIEGO V.F. & DOMINGUEZ A.N., 1976 : *Transient pressure behavior for a well with a finite conductivity vertical fracture,* Society of Petroleum Engineers, 51th Annual Conference and Exhibition, New-Orleans, 1976, paper 6014.

COLLECTIF , 1992 : *Test de pompage en aquifère karstique dans le gouffre de la Peyrère (09),* Rapport BRGM-CNRS, 35 924 MPY 4S 92, 46 p.

CROCHET Ph., MARSAUD B. & RAZIN Ph., 1993 : *Etude des systèmes karstiques de la moyenne vallée de la Drôme. Etude de reconnaissance du système karstique de Gervanne.* Rapport BRGM, N 0303 RHA 4S 93, 22 p.

CROCHET Ph. & MARSAUD B., 1995 : *Système karstique de la Gervanne. Test de mobilisation de la ressource par essai de pompage sur un forage.* Rapport ANTEA, A04105.

- DA PRAT G., 1990 :** *Well test analysis for fractured reservoir evaluation*. Elsevier, Amsterdam, Developpements in Petroleum Sciences, 209 p.
- DA SWANN O.A., 1976 :** *Analytic solutions for determining naturally fractured reservoir properties by well testing*, Society of Petroleum Engineers Journal, AIME June, pp. 112-122.
- DE LA QUERIERE & SOURIMANT J.C. 1993 :** *Ville de Bernay (27). Réalisation d'un second forage de substitution*, Rap BRGM R3671 HNO 4S 93, 31 p.
- GRINGARTEN A.C. & WITHERSPOON P.A. , 1972 :** *A method of analysing pumping test datas from fractured aquifers*. Comptes Rendus de la conférence "Percolation through fissured rocks", Société Internationale de Mécanique des Roches, Stuttgart, , 9 p.
- JACOB C.E. & LOHMAN S. W., 1952 :** *Non-steady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer*. Transactions, American Geophysical Union, 33, 4, pp. 559-569.
- KAZEMI H., 1969 :** *Pressure transient analysis of naturally fractured reservoirs with uniform fracture distribution*. Society of Petroleum Engineers Journal, AIME 246, pp 451-462.
- KRUSEMAN G.P., RIDDER N.A. de & WERWEIJ J.M., 1991 :** *Analysis and evaluation of pumping test data (second edition)*. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, , xx p.
- LEBLANC Ph, 1987 :** *Utilisation des données de pompage d'essai pour la connaissance de la structure et des propriétés hydrodynamiques des milieux fissurés. Elaboration d'un logiciel d'interprétation*. Thèse de l'Université de Bordeaux 3, 341 p.
- MANGIN A., 1975 :** *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. Thèse de Docteur ès Sciences, Université de Dijon, (Ann. Spéléol. ,1974, 29 , 3, pp 283-332: 1974, 29, 4, pp 495 - 601 : 1975, 30, 1, pp. 21 - 124), .
- MANGIN A., 1982 :** *L'approche systémique du karst, conséquences conceptuelles et méthodologiques*. Reunion Monografica sobre el Karst, Larra, , pp. 141-157.
- MANGIN A. , 1984 :** *Ecoulement en milieu karstique*. Annales des Mines, 5-6, pp 135-142.
- MARSAUD B., 1996 :** *Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux*. Thèse BRGM-Univ Paris Sud-CNRS, Sous presse.
- MARSILY G. de, 1981 :** *Hydrogéologie quantitative*. Masson, Paris, , 215 p.
- NEUMAN S.P., 1974 :** *Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, 10, 2, pp 303-312.
- PAPADOPOULOS I.S. & COOPER H.H., 1967 :** *Drawdown in a well of large diameter*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, 3, 1, pp. 241-244.
- THEIS C.V., 1935 :** *The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage*. Transactions, American Geophysical Union, , pp. 519-524.
- THIERY D., VANDENBEUSH M. & VAUBOURG P. 1983 :** *Interprétation des pompages d'essai en milieu fissuré aquifère.*, Documents du BRGM, 57, 53 p.

THRAILKILL J., 1988 : *Drawdown interval analysis : a method of determining the parameters of shallow conduit flow carbonates aquifers from pumping tests.* Water Resources Research, Vol 24, n°8, Aug. 1988, pp. 1423-1428.

WARREN J.E. & ROOT P.J., 1963 : *The behaviour of naturally fractured reservoirs.* Society of petroleum Engineers journal, 3, pp. 245-255.

CONFÉRENCE : 9h00

Ph. CROCHET

Les différentes approches conceptuelles possibles de l'aquifère karstique et les problèmes méthodologiques et d'exploitation associés.

CONFÉRENCE : 9h30

B. MARSAUD

Les pompages en aquifère karstique. Une méthode d'interprétation des essais adaptée au karst.

Intervenant

J.P. FAILLAT

ISAMOR - Technopôle Brest-Iroise
29280 Plouzané

Question ou intervention

A l'échelle très locale, le milieu fissuré peut être relativement organisé directionnellement pour "approcher" le comportement du karst (x10 m...), ou au moins comporter des "singularités hydrauliques".

Un cas assez fréquent d'organisation des aquifères karstiques consiste en une position des réserves sous le drain et l'exutoire actuel (karst polyphasé et limites ayant varié). Quel mode d'exploitation est envisagé dans ce cas ?

Réponse

On est dans le cas où le drain ne peut pas mobiliser les réserves contenues dans les systèmes annexes. Le mode d'exploitation le mieux adapté consisterait donc à pomper (par forage ou regard naturel) sur ces systèmes annexes.

Intervenant

P. LACHASSAGNE

BRGM / DR
1039 rue de Pinville - 34000 Montpellier

Question ou intervention

Le "développement" d'un système karstique est-il possible (par surpompage par exemple) ? pour éviter la problématique des MES (Matière En Suspension) et décolmatage ?

Réponse de B. Marsaud

- Pour qu'il y ait MES il faut une origine à ces matériaux d'où l'importance de la distinction des systèmes unaire et binaire, ces derniers possédant un impluvium non karstique fournissant ces matériaux.
- Dans la craie en Haute-Normandie, quasiment tous les "karsts" produisent des eaux turbides en période pluvieuse, en raison de l'infiltration d'eaux boueuses au niveau des plateaux.

Dans le cas d'un "forage latéral au karst", on cherche à éviter ces eaux en ne captant pas directement ces eaux, mais en se mettant latéralement.

Il peut exister lors de la foration des fissures comblées d'argile qui produisent une eau turbide. Un bon développement (pistonnage, balancement) permet de "nettoyer" ce milieu.

- Dans le cas des systèmes karstiques au sens strict, il est certain que la modification des écoulements en raison du pompage peut provoquer l'arrivée d'eaux turbides. Il s'agit d'un phénomène transitoire, qui se produit jusqu'à l'établissement d'un nouvel équilibre. Développer un système karstique comme on développe un forage n'est pas envisageable compte tenu des dimensions concernées. Mais la réalisation de pompage de validation avec des phases de descente et remontée doit permettre d'améliorer ce point en nettoyant progressivement les nouvelles zones d'écoulement.

Question ou intervention

Concernant la reconstitution des réserves sollicitées par exploitation pendant l'étiage, lors des crues qui suivent, est-elle aussi rapide lorsque l'exploitation se fait sur le drain ou sur les SAD (Système Annexe au Drain) ?

Réponse de Ph. Crochet

Deux types d'alimentation des systèmes annexes :

- par infiltration verticale (non modifiée par l'exploitation) ;
- par les drains : il faut voir dans quelle mesure l'exploitation aura modifié l'écoulement dans le drain (le flux d'alimentation drain + SAD étant conditionné par la différence de charge entre les deux).

Les exemples de pompages récents (Baget, Gervanne) ont mis en évidence un retour à l'équilibre du système très rapide.

Intervenant

F. BERTHIER

BRGM / Bureau de Haute-Savoie
97 bis avenue de Genève
74000 Annecy

Question ou intervention

Une des particularités du karst est la turbidité périodique. L'exposé propose un asservissement de l'exploitation aux variations de la turbidité.

Administrativement cela conduit à accepter l'exploitation d'une eau naturellement non conforme. Dans la mesure où le traitement de la turbidité est difficile, cela revient à proposer l'exploitation des ressources, donc un risque de non conformité périodique relativement important.

Qui est responsable de cet aléa de gestion, qui définit la marge acceptable ?

Réponse de B. Marsaud

En premier lieu il faut rappeler que l'AEP n'est pas le seul objectif de l'exploitation du karst. Les autres usages ne nécessitent pas des impératifs de qualité aussi forts que l'AEP (soutien d'étiage).

Compte tenu de ce fait, lorsque l'on cherche une exploitation pour l'AEP, il faut s'intéresser, lorsque possible, à des systèmes unaires beaucoup plus favorables.

La responsabilité de cet aléa doit relever des services administratifs (DDASS ?). Il paraît raisonnable de définir les marges acceptables par concertation préalable à l'autorisation d'exploiter (MISE, etc.).

Intervenant

P. BERARD

BRGM / SGR LRO

1039 rue de Pinville - 34000 Montpellier

Question ou intervention

Notion de barrage souterrain : non. Plus facile "aérien".

Réponses de Ph. Crochet

Les barrages dits "souterrains" sont bien entendu implantés de préférence à l'exutoire même.

Question ou intervention

Karst en situation captive : quid localisation des forages ? quid interprétation des essais de pompage ?

Réponses de Ph. Crochet

Il faut distinguer la notion de "captivité" liée à un coefficient d'emménagement faible (cas fréquent dans les milieux fissurés), des aquifères sous couverture imperméable. Les pompages effectués dans de tels systèmes montrent des comportements de type "non fonctionnel" liés à la faible vitesse des écoulements.

Intervenant

M. MOULIN

BRGM / SRG RHA 69 Villerbanne

Question ou intervention

A-t-on constaté des différences de qualité de l'eau en fonction des secteurs sollicités par un pompage ?

Réponse A. Mangin ?

Question ou intervention

Qu'en est-il de l'idée reçue concernant "la relativement grande sensibilité" de la qualité des eaux des karsts ?

Réponse Ph. Crochet

La mauvaise image de marque des aquifères karstiques est liée aux transferts rapides par le drain, mais les inconvénients du milieu peuvent constituer des avantages :

- la pollution passe très rapidement dans le cas d'un drain, et il n'y a donc pas de décontamination à mettre en oeuvre ;
- dans le cas de systèmes annexes, il y a compartimentage et donc possibilité de continuer à exploiter des zones non touchées par la pollution.

Intervenant

L. AQUILLINA

BRGM / DR

1039 rue de Pinville - 34000 Montpellier

Question ou intervention

Peut-on dans certains cas (milieux à fracturation polyphasée + altération hydrothermale), assimiler un milieu fissuré à un milieu karstique fonctionnel ?

Réponse de Ph. Crochet

L'une des caractéristiques des aquifères karstiques est une organisation et une hiérarchisation des écoulements (analogue à celle des réseaux de surface) tendant vers une structure de drainage avec un nombre limité d'exutoires. Les milieux à fracturation polyphasée sont hétérogènes, mais cette hétérogénéité peut être ramenée à une notion d'échelle (Volume Élémentaire Représentatif), ou à la prise en compte des accidents identifiés dans des modèles.



Session D :

*Les outils et les techniques de
reconnaissance des karsts*

Président : F. Zwahlen
Professeur à l'Université de Neuchâtel

La géophysique, outil de reconnaissance des karsts.

Y. BENDERITTER

CNRS Centre de Recherches Géophysiques (URA 1367) F-58150 Garchy

Résumé

La géophysique dispose de plusieurs outils (méthodes) qui sont appliqués de façon sélective à une cible donnée. Il convient donc en premier lieu de bien définir les cibles du milieu karstique. Le choix des méthodes à utiliser dépend, en dehors des questions de coût, du contraste de propriété physique entre la cible et son milieu environnant, le calcaire en l'occurrence, ainsi que de la géométrie et des dimensions de la cible, considérées par rapport à sa profondeur.

Une première approche sera faite en examinant l'anomalie théorique produite par différents types de structures possibles. On voit tout de suite que les anomalies sont en général faibles. L'eau (ou même l'air) dans un milieu environnant calcaire n'est pas susceptible, dans la majorité des cas, de produire des anomalies significatives. Le rôle de l'argile, souvent présente dans les zones fissurées et karstiques est très important, ainsi que la présence de zones décomprimées au dessus des vides. Il ne faudra donc pas s'étonner si les méthodes géophysiques reposant sur la résistivité électrique sont souvent employées, qu'il s'agisse de méthodes électrique proprement dites ou de méthodes électromagnétiques. La méthode gravimétrique est aussi utilisée, mais en second lieu car si elle bénéficie d'un bon contraste de densité entre le vide et le milieu rocheux, les anomalies ne sont cependant pas très importantes. Enfin il est fait appel à la sismique et quelquefois à la méthode magnétique mais surtout dans le cas de zones fracturées.

Plusieurs exemples seront présentés en vue de montrer les difficultés et les limitations de la géophysique dans ce domaine. Il sera fait allusion aussi à quelques possibilités relevant de la recherche.

Introduction

Le géophysicien utilise certains paramètres physiques du sous-sol afin d'en obtenir une image qu'il essaie ensuite de traduire en termes géologiques. Les quatre principaux paramètres sont la résistivité électrique, la densité, la vitesse de propagation des ondes élastiques et la susceptibilité magnétique. Ces paramètres permettent d'individualiser les quatre méthodes fondamentales de prospection : électrique, gravimétrique, sismique et magnétique. Le nombre de méthodes est donc restreint. Mais les techniques de mesures sont nombreuses (plusieurs dizaines). Chaque technique est généralement spécialisée et son application est réservée à une cible donnée.

Il convient donc, dans un premier temps, de bien définir les cibles que l'on peut trouver en milieu karstique. Ayant identifié différents types de structures, il est possible de tester la réponse des techniques géophysiques à ces structures, ce qui va permettre de définir leur efficacité et leurs limitations. Quelques exemples de prospection viendront souligner les techniques les plus couramment utilisées ainsi que les cibles étudiées. Deux techniques actuellement à l'essai seront enfin évoquées.

1. Quelles sont les cibles pour la géophysique en milieu karstique ?

Deux questions préliminaires peuvent être formulées :

- tout d'abord la cible est-elle le karst (selon le titre proposé pour cet exposé) où bien le milieu fissuré et karstique (suivant le titre initial du séminaire) ? On se limitera ici au premier cas mais en soulignant qu'il existe des points communs entre la reconnaissance géophysique des karsts et celle des zones fissurées ;
- ensuite quelle est l'échelle de la reconnaissance ? Cherche-t-on à identifier globalement une zone karstifiée d'une zone moins karstifiée (échelle hectométrique pour fixer un ordre de grandeur) ou bien un élément karstique, par exemple un conduit (échelle décamétrique à métrique). Le qualificatif d'étude de détail conviendrait d'ailleurs mieux dans ce dernier cas. C'est dans cette seconde direction que sera orienté le sujet, en particulier parce que la recherche d'un tel élément permet de mieux situer les possibilités et les limites de la géophysique.

A ces deux questions, il faut associer la remarque suivante. Le géophysicien effectuant ses mesures à partir de la surface, sauf cas particulier des diagraphies en forage, est condamné s'il veut accroître la profondeur d'investigation, à augmenter aussi le volume de terrain caractéristique de la mesure. On conçoit aisément qu'un drain de dimension réduite aura un effet de plus en plus négligeable par rapport à celui du volume environnant au fur et à mesure que celui-ci augmente, donc que la profondeur d'investigation s'accroît. D'autre part cet effet sera d'autant plus négligeable que le contraste de propriété physique entre le drain et le milieu environnant sera faible.

Suivent quelques types de cibles, donnés à titre d'exemple. Ils sont tirés d'articles publiés dans des revues géophysiques. Il s'agit parfois d'images transposées par les géophysiciens en fonction des moyens qui leur permettent justement d'atteindre la cible où en fonction des résultats géophysiques qui ont été obtenus et interprétés.

- Structure karstique avec extension vers le haut jusqu'à la surface

Ce type de structure, représentée (Fig.1) par cinq sections distantes les unes des autres de 50 mètres peut être schématisée sous la forme d'une structure verticale (hauteur décamétrique), mince (épaisseur métrique) et allongée (longueur plurihectométrique) avec un remplissage de matériau géologique différent du milieu environnant, argileux vers la surface et sableux, donc probablement aquifère vers le bas.

- Structure karstique avec extension vers le haut sous recouvrement superficiel

Il s'agit du même type de structure que précédemment mais masquée sous un recouvrement superficiel d'une dizaine de mètres de profondeur (Fig. 2), ce qui la classe dans la catégorie des véritables cibles géophysiques, puisque non apparentes en surface.

- Drain karstique

En fait les structures karstiques n'ont pas toutes une extension verticale importante et certaines se présentent sous la forme d'un conduit, au sens strict du terme. C'est le cas du conduit quasi-horizontal représenté ci-dessous (Fig. 3). Il s'agit d'un ruisseau souterrain exploré par des spéléologues. Sa section est quasi-circulaire et de diamètre inférieur à 2 mètres. Certaines parties du conduit sont entièrement sous l'eau et on note quelques accumulations d'argile à proximité des siphons. L'épaisseur des terrains sus-jacents est d'environ 10 mètres.

Il est certain que ce type de structure, à partir du moment où il est pénétrable n'entre plus dans le champ de la prospection géophysique mais il est intéressant pour effectuer des tests.

- Galerie de drainage

Le cas des galeries de drainage (Fig. 4) doit être évoqué. Il ne s'agit pas ici de karst ni même de milieu karstique, le calcaire étant absent. Mais cet exemple est présenté pour souligner la proximité d'autres cas offrant quelques ressemblances avec le sujet traité, en particulier en ce qui concerne les techniques géophysiques utilisées..

2. Quelle est la signature géophysique de ces cibles ?

Le choix des méthodes géophysiques de détection des différentes cibles karstiques va reposer, en dehors des questions de coût, sur la géométrie et les dimensions de la cible, ramenées à son enfouissement., ainsi que sur le contraste de propriété physique entre la cible et son milieu environnant, le calcaire en l'occurrence.

Du point de vue de la géométrie, on peut ramener les différentes structures karstiques précédentes à des parallélépipèdes et à des cylindres avec des extensions locales sphériques. D'une manière générale, si une dimension (allongement suivant une direction horizontale pour le parallélépipède ou le cylindre) est assez importante, les autres dimensions (hauteur ou épaisseur du parallélépipède, diamètre du cylindre ou de la sphère) sont faibles par rapport à la profondeur à la quelle ils sont situés. Autrement dit le volume de ces structures est la plupart du temps peu important, exception faite pour les cavernes. En ce qui concerne le remplissage de ces structures, il peut être constitué d'air, d'eau ou bien d'un matériau géologique rocheux en général différent du milieu environnant où encore d'un mélange des composantes précédentes.

Une autre remarque s'impose. L'amplitude des anomalies géophysiques est une fonction inverse de la distance r entre le point de mesure et la cause de l'anomalie (l'anomalie gravimétrique par exemple est en $1/r^3$ pour une sphère et en $1/r^2$ pour un cylindre). Ceci a pour conséquence qu'une source d'anomalie ne présentant aucun intérêt mais plus petite et plus proche de la surface que la cible recherchée peut avoir autant d'importance que cette

dernière et même la masquer. C'est un phénomène que le géophysicien qualifie de « bruit géologique ».

Ces considérations générales étayées de quelques chiffres permettent à l'aide de calculs de simulation de voir dans quelle mesure une cible karstique est détectable et quelle est la méthode où quelles sont les méthodes qui sont les plus appropriées à sa détection.

- Signature gravimétrique

Même si les gravimètres les plus modernes permettent des mesures relatives de l'ordre du millième de milligal (le gal étant l'unité de mesure de l'accélération due à la pesanteur dans le système CGS, correspondant à une accélération de 1 cm par seconde par seconde), les géophysiciens s'accordent à penser qu'il serait dangereux d'accorder pleine confiance à des indications inférieures à quelques centièmes de milligal, aussi bien à cause des corrections à apporter aux mesures brutes qu'au bruit géologique. Connaissant la plus petite mesure significative, il est alors possible de déterminer, à différentes profondeurs, les dimensions de la structure minimum décelable. A noter que ce calcul sera plus favorable pour les structures remplies d'air (différence de densité de 2,5) que pour les structures remplies d'eau (différence de densité de 1,5), l'anomalie étant proportionnelle à la différence de densité.

Les calculs montrent (Fig. 5) que les dimensions des structures doivent être relativement importantes pour que l'anomalie gravimétrique produite soit décelable. La valeur de l'anomalie est ici la valeur maximum à la verticale de la structure. Dans le cas d'une cavité sphérique remplie d'air, il est courant d'exprimer de façon approximative cette relation profondeur d'enfouissement/ rayon en disant que le rayon doit rester supérieur à cette profondeur. A noter que le cas du conduit cylindrique est plus favorable (à même rayon la profondeur peut être plus grande).

Si l'amplitude de l'anomalie est essentielle pour l'évaluation des possibilités de détection d'une structure, la largeur de l'anomalie produite est un paramètre important pour la prospection. La largeur de l'anomalie au dessus d'une sphère est plus petite qu'au dessus d'un demi-cylindre (Fig.6). On retrouve le fait que le cas du cylindre est plus favorable que celui de la sphère pour une même section. Mais on voit aussi que la largeur de l'anomalie, aussi bien dans un cas que dans l'autre, est très faible ce qui impose pour la prospection une maille de mesure d'ordre décimétrique ou moins.

- Signature électrique

En ce qui concerne les méthodes électriques et électromagnétiques, il faut souligner d'abord qu'il est plus facile de détecter une structure conductrice dans un milieu résistant que l'inverse, c'est-à-dire une structure avec remplissage qui a de fortes chances d'être argileux qu'une cavité remplie d'air ou d'eau. Bien que la gamme des résistivités soit très étendue (de quelques ohms-mètres pour une argile à quelques centaines d'ohms-mètres pour un calcaire), il faut compter au moins une variation de 10 % autour de la valeur ambiante pour avoir une anomalie significative.

Les premiers calculs présentés de simulation en résistivité (Fig. 7) ont été réalisés pour interpréter des mesures faites au dessus d'une structure décrite précédemment (Fig. 3). Une

première simulation électromagnétique (VLF), montre (partie supérieure de la Fig. 7) qu'il faut augmenter considérablement la largeur initiale du conduit si l'on veut commencer à distinguer une légère anomalie. Par contre si l'on prolonge la structure vers la surface (partie inférieure de la Fig. 7), il est possible d'obtenir une anomalie conséquente sans avoir à augmenter considérablement la largeur de cette structure. On se retrouve alors dans le cas des structures représentées au début de ce texte (en particulier Fig. 2). On notera de plus que la largeur de l'anomalie est du même ordre de grandeur que celle de la structure.

Les calculs suivants (Fig. 8) sont à rapprocher du cas de la galerie de drainage présenté précédemment (Fig. 4), galerie remplie d'air (résistivité infinie) dans un milieu conducteur (résistivité de 15 ohm-mètres). Malgré le contraste énorme, l'anomalie, calculée ici pour un certain dispositif de mesure électrique, dépasse à peine 10 %, illustrant le fait que l'on se trouve dans le cas défavorable mentionné ci-dessus. On constate de plus que l'anomalie a une forme complexe avec une partie plus résistante entourée de deux parties plus conductrices, ce qui impose une maille de mesure inférieure à 10 mètres si l'on veut bien identifier l'anomalie.

On peut conclure de ces simulations que les anomalies produites sont en général faibles et que seules les structures les plus importantes et les plus proches de la surface seront détectées. Retenons qu'en gravimétrie, ce sont les structures remplies d'air qui sont les plus faciles à détecter et en électrique et électromagnétisme les structures à remplissage argileux. Dans ce dernier cas il suffit seulement que le haut de la structure soit conducteur puisque c'est cette partie qui participe le plus à l'anomalie. Le remplissage d'argile peut produire quelquefois une anomalie magnétique lorsqu'il occupe des structures de dimensions importantes (cavités ou cavernes) et à condition que l'argile ait une susceptibilité magnétique importante (accumulation de particules ferromagnétiques) par rapport à celle du calcaire.

Il est possible que les résultats des simulations soient trop pessimistes. Certains géophysiciens soupçonnent un effet de « halo » autour des structures, effet qui a pour conséquence, en augmentant les dimensions de la structure, d'amplifier l'anomalie. Cet effet serait dû au phénomène de décompression des cavités à l'origine d'une zone dont la densité est inférieure à celle du milieu environnant. Cette zone pourrait être aussi plus sensible à l'altération et donc aussi plus conductrice.

3. Quelles techniques géophysiques choisir ?

En fait, au stade de la prospection, on ne connaît pas toujours bien les caractéristiques de la cible, ni même quelquefois le type de cible (cible karstique ou fissurée karstique ou fissurée) et l'on utilise les méthodes de prospection en fonction du savoir faire acquis ... et aussi du coût de la prospection.

Il existe en géophysique appliquée un code de bonne conduite avec un « guide d'adéquation des méthodes et techniques géophysiques aux applications concernant le sol et le sous-sol » dans lequel on trouve une rubrique « localisation de zones karstifiées ». Notons que la rubrique suivante est intitulée « discontinuité/fracturation » et qu'il existe aussi des rubriques « recherche de cavités », « risques de cavités » et « risques de cavités/karsts ». Sous chacune

de ces rubriques sont classées en cinq catégories, suivant leur degré d'adéquation, plus de 70 techniques de mesures. Les auteurs de ce guide précisent bien que ce classement « ne constitue pas une règle stricte ... ». A noter que cette classification ne fait pas intervenir les coûts.

Le tableau concernant la « localisation de zones karstifiées » (Fig. 9) fait ressortir une utilisation prioritaire des méthodes électriques et électromagnétiques. La « technique généralement considérée comme fournissant une excellente approche » est celle du panneau électrique au sol (voir ci-après). En seconde position apparaissent quatre autres techniques électriques et électromagnétiques qualifiées de « technique d'emploi adapté mais potentiellement incomplète ou à combiner avec d'autres techniques géophysiques ». Ce n'est qu'en troisième position sous l'intitulé de « technique d'emploi limité, utilité à justifier » que l'on trouve la gravimétrie, accompagnée de la sismique.

La technique de mesure par panneau électrique au sol (Fig. 10) repose sur la mesure de résistivité par la méthode électrique classique à l'aide d'un quadripôle d'électrodes. On injecte un courant par deux électrodes A et B et on mesure la différence de potentiel entre deux autres électrodes M et N (Fig. 10 - 1). Intensité du courant, différence de potentiel et distances entre électrodes permettent de calculer une résistivité.

Les systèmes actuels de mesure (systèmes multi-électrodes) reposent sur l'implantation préliminaire d'un grand nombre d'électrodes. Si l'on choisit successivement les quadripôles 1-2-3-4 puis 2-3-4-5 ... (Fig. 10 - 2), la géométrie du quadripôle étant constante, les lignes de courant se répartiront sur une tranche d'épaisseur (à peu près) constante et on pratique ainsi une exploration du terrain suivant une horizontale, c'est-à-dire à profondeur d'investigation constante. Par contre si l'on augmente la géométrie du quadripôle (Fig. 10 - 3), les courants vont pénétrer plus profondément dans le sol, ce qui conduira à une exploration verticale.

Une commutation automatique des électrodes permet d'avoir toutes les combinaisons possibles de quadripôles et d'obtenir des panneaux de résistivité (Fig. 10 - partie inférieure). La description totale du sous-sol (description 3D) peut être obtenue par une série de panneaux parallèles. A noter que les appareils de mesure peuvent être reliés à plus de 100 électrodes, ce qui donne des longueurs de panneaux de plusieurs centaines de mètres avec une maille de mesure de 5 mètres.

4. Quelques exemples de prospection en milieu karstique

Pour illustrer tout ce qui vient d'être dit, il restait à montrer quelques exemples, en essayant de faire ressortir les possibilités et les limitations de la géophysique dans ce domaine. On verra d'ailleurs que ces limitations ne résultent pas seulement de la sensibilité des méthodes mais quelquefois aussi de l'interprétation des résultats géophysiques

- Exemple de prospection gravimétrique.

Le premier exemple (Fig. 11) concerne la détection de cavités karstiques par gravimétrie. Les anomalies sont importantes puisque dépassant les deux dixièmes de milligal, soit plus de dix

fois la limite significative. Un forage placé au centre de l'anomalie visible dans la carte du haut a rencontré un vide d'une douzaine de mètres à 4 mètres de profondeur. Ce résultat avait conduit à interpréter de façon identique l'anomalie présente sur la carte du bas. Un forage de 25 mètres ne recoupa cependant aucune cavité. D'autres données géophysiques (électrique, sismique réfraction) et géologiques permirent d'établir que l'anomalie, dans ce cas, était due à la présence d'une zone « pourrie » donc de faible densité, qui fut interprétée ultérieurement comme formée d'un ensemble de cavités karstiques remblayées par des matériaux apportés par un torrent voisin.

L'auteur ne fait malheureusement aucun commentaire sur l'anomalie allongée présente dans la carte du haut. Sa forme, sa largeur et son amplitude pourrait correspondre à une galerie débouchant dans la cavité.

- Exemple de prospection électrique.

Cet exemple (Fig. 12) montre l'anomalie obtenue sur une galerie de mine remplie d'air et de boue de 2 mètres de haut et située à une profondeur de 2 mètres. Le dispositif de mesure est un dispositif dit « focalisant » c'est-à-dire destiné à concentrer les lignes de courant au niveau de la galerie de façon à obtenir une anomalie maximum. Une anomalie, dont la forme est due au dispositif utilisé, est bien visible à l'aplomb de la galerie mais son amplitude n'est pas très importante par rapport aux variations observées plus à droite sur le profil. Il est certain que la même galerie située un peu plus profondément ne pourrait pas produire une anomalie significative.

- Exemple de prospection électromagnétique (Slingram).

Cet nouvel exemple concerne une structure présentée précédemment (Fig. 2). Les mesures ont été obtenues par une technique électromagnétique dénommée « Slingram ». Le paramètre mesuré n'est pas une résistivité mais une valeur obtenue à partir de la comparaison d'un champ magnétique sinusoïdal émis et du champ magnétique reçu, modifié par la présence d'une hétérogénéité du sous-sol. L'anomalie observée au dessus de la structure karstique est très nette (Fig. 13). Le contraste de résistivité entre le calcaire et le remplissage de la structure a favorisé certainement la détection de celle-ci malgré une épaisseur de recouvrement assez importante, de l'ordre de 20 mètres. La présence de la structure karstique ainsi que celle de la faille située un peu plus à droite sur le profil, ont été vérifiées au cours de l'exploitation du site par carrière. Il est certain que l'anomalie permet de présumer de l'existence de la structure karstique. Mais il est difficile d'en tirer un ordre de grandeur pour sa largeur et encore moins une idée de son extension vers le bas, l'anomalie étant surtout sensible aux caractéristiques de la partie supérieure de la structure.

- Exemple de prospection couplée électrique et électromagnétique (VLF).

Il s'agit d'un test (Fig. 14) effectué sur le drain karstique présenté précédemment (Fig. 3). La méthode électromagnétique a été utilisée pour obtenir une cartographie à une profondeur donnée, précisée par des mesures faisant appel à la méthode électrique classique. Malgré les efforts de traitement des données et de modélisation, il n'a pas été possible de trouver une relation directe entre les anomalies mesurées et la présence de ce drain dont, il faut le rappeler, les dimensions (1 à 2 mètres de diamètre) sont faibles par rapport à son enfouissement (10 mètres). Le meilleur modèle de sous-sol obtenu après calcul, montre que le drain est situé

dans une zone très résistante. Mais ce n'est pas apparemment le fait qu'il est rempli d'air qui produit une forte résistivité à cet endroit. Cette observation liée au fait que le tracé du drain, vu en superposition sur une carte de résistivité, semble éviter les zones de faible résistivité plus argileuse en suivant un tracé qui semble dicté par la direction du gradient hydraulique, constitue cependant une piste, bien que très indirecte, pour l'exploitation des données en vue de l'objectif recherché.

- Exemple de prospection couplée électrique et électromagnétique en milieu crayeux.

Ce dernier cas (Fig. 15) a été choisi car il permet de souligner quelques éléments importants. Tout d'abord il rappelle que des structures de type karstique peuvent se développer dans la craie. Il montre, une fois de plus, que la détection de ces structures est très difficile. En effet si la présence d'anomalie très localisées, en particulier sur la carte située dans la partie supérieure de la figure, carte qui représente la répartition des résistivités mesurées suivant une coupe verticale, conduit à associer ces anomalies avec des structures karstiques, cette association ne peut être que très indirecte. Plusieurs forages ont mis en évidence des fissures et même un vide karstique à plus de 10 mètres de profondeur. Or les anomalies précédentes correspondent à des profondeurs plus faibles. Se pose alors la question de savoir s'il existe une relation entre la cause de l'anomalie observée et la structure recherchée et quelle est cette relation ? La carte située dans la partie inférieure de la figure, qui donne une représentation de la résistivité suivant un plan horizontal, montre que l'origine des anomalies est géométriquement allongée, ce qui n'est pas contradictoire avec la forme des structures recherchées. Insistons au passage sur l'association de plusieurs techniques de mesure (électrique, électromagnétique - la sismique réfraction a aussi été utilisée), ce qui est pratiqué de façon courante en géophysique.

Cet exemple est l'occasion de souligner le fait que les forages effectués après une prospection dans un but de contrôle, peuvent servir aussi à mettre en oeuvre d'autres techniques géophysiques qualifiées de diagraphies qui permettent d'explorer le sous-sol à proximité du forage ou entre deux forages avec l'avantage de se rapprocher d'une éventuelle cible

5. Quelles perspectives ?

Cet exposé ne serait pas complet si l'on ne parlait pas des perspectives. Deux voies sont explorées actuellement : la résonance magnétique nucléaire (ou protonique) et la sismique réflexion très haute résolution.

La première, dite RMN (ou RMP), repose sur un concept séduisant pour les hydrogéologues. Les protons contenus dans l'eau peuvent dans certaines conditions d'excitation provoquée, émettre un signal mesurable par le géophysicien. Ce signal étant une fonction de la teneur en eau offre un moyen de détection direct de cet eau. Des essais de validation sont en cours ou vont être effectués d'ici peu. Il est probable que les premiers essais seront effectués sur des cas faciles comme celui de nappes aquifères présentant une répartition relativement homogène de l'eau dans des volumes importants. La question primordiale ici concerne la présence de l'eau. Dans le cas de structures karstiques, le problème est de savoir si l'on pourra faire la différence entre l'eau contenue dans un drain de géométrie restreinte et l'eau contenue dans le

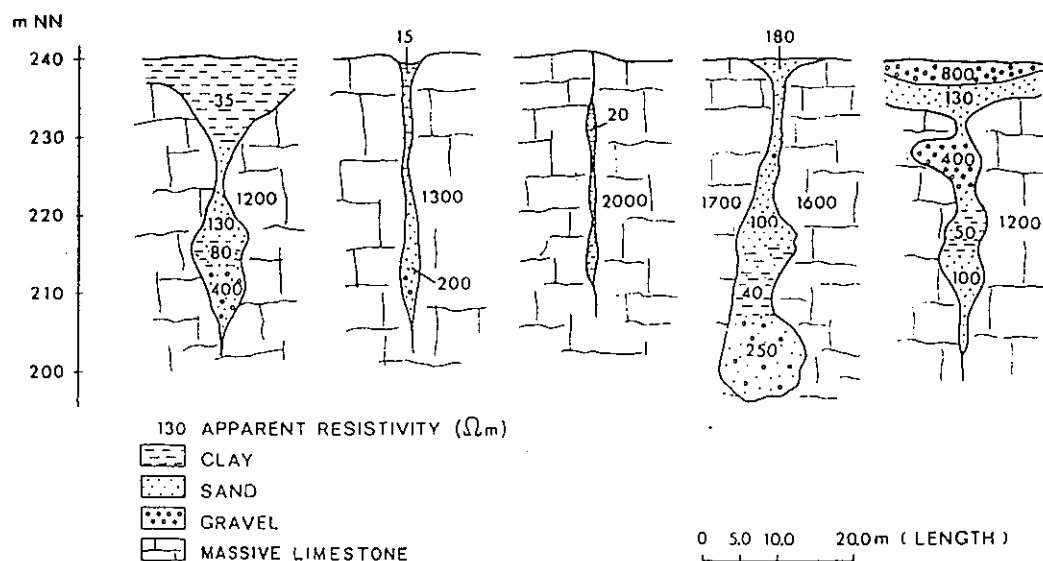


Fig. 1 - Structure karstique avec extension vers le haut jusqu'à la surface.
(d'après Vogelsang, 1987)

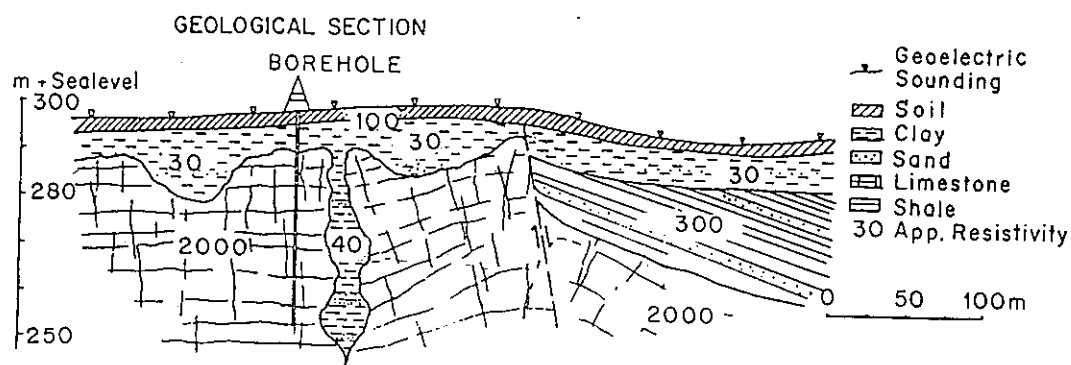


Fig. 2 - Structure karstique avec extension vers le haut sous recouvrement superficiel.
(d'après Vogelsang, 1987)

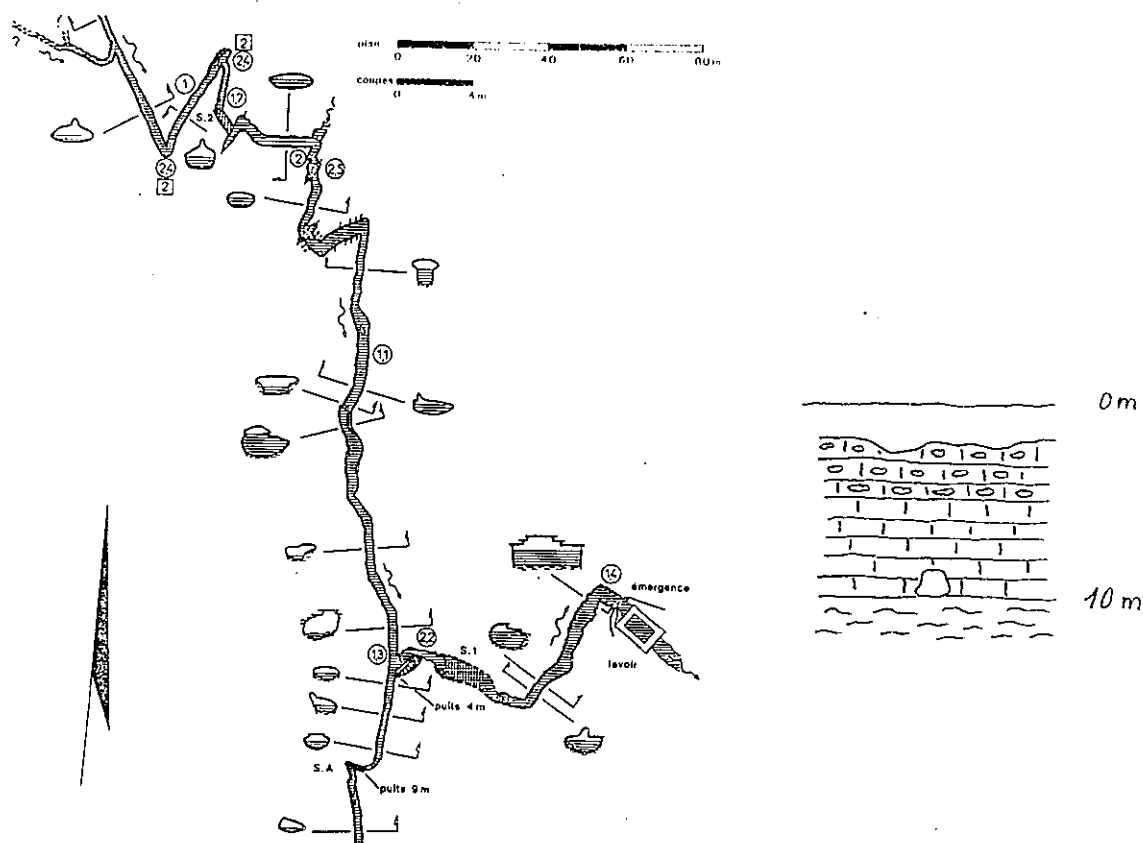


Fig. 3 - Drain karstique.
(d'après Chabert et Couturaud, 1983)

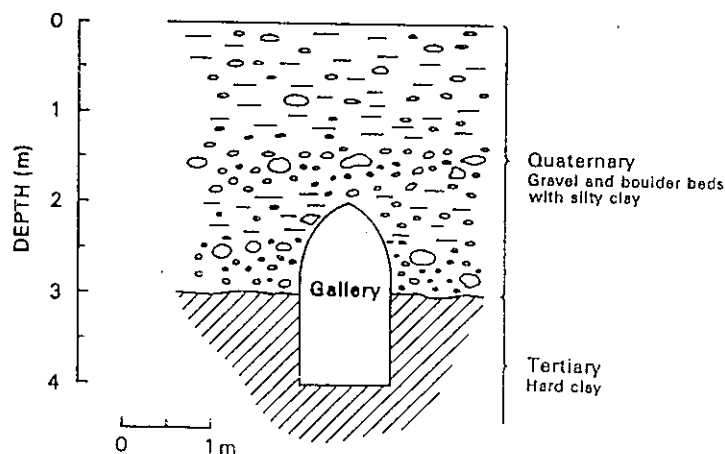


Fig. 4 - Galerie de drainage.
(d'après Ogilvy et Lee, 1991)

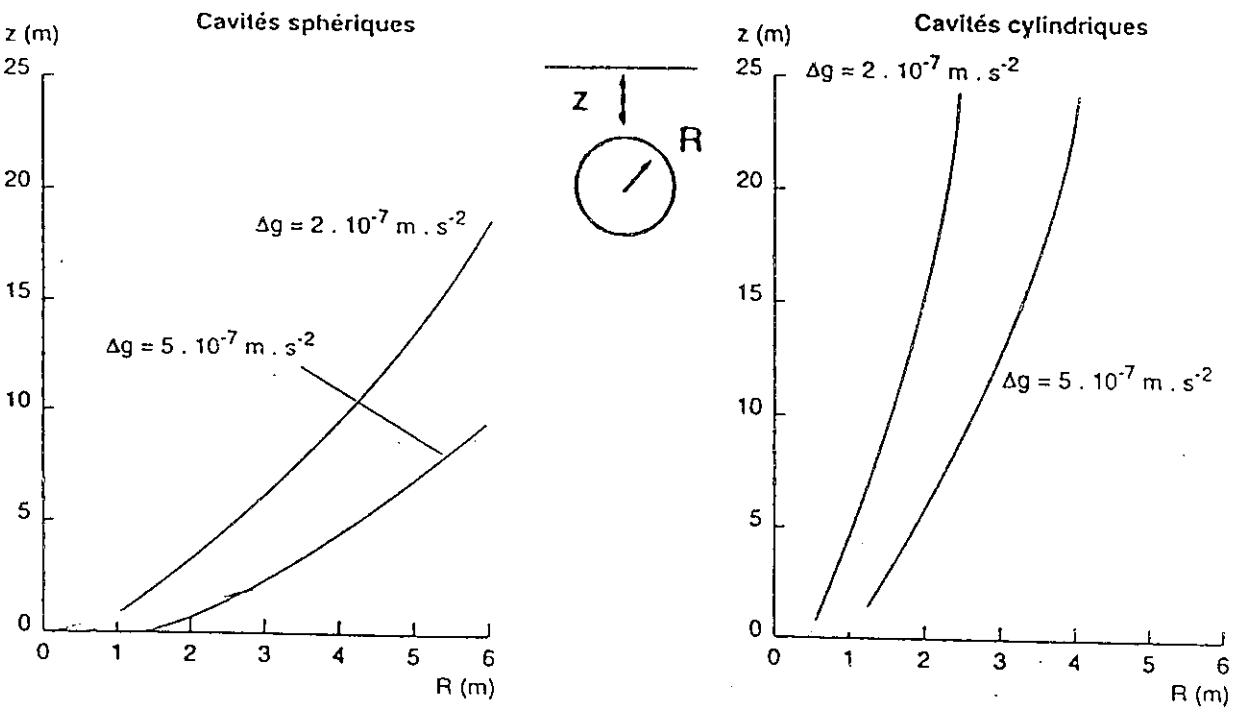


Fig. 5 - Relation entre la profondeur et les dimensions de la plus petite structure cylindrique ou sphérique décelable par gravimétrie.
(d'après Lagabrielle, 1994)

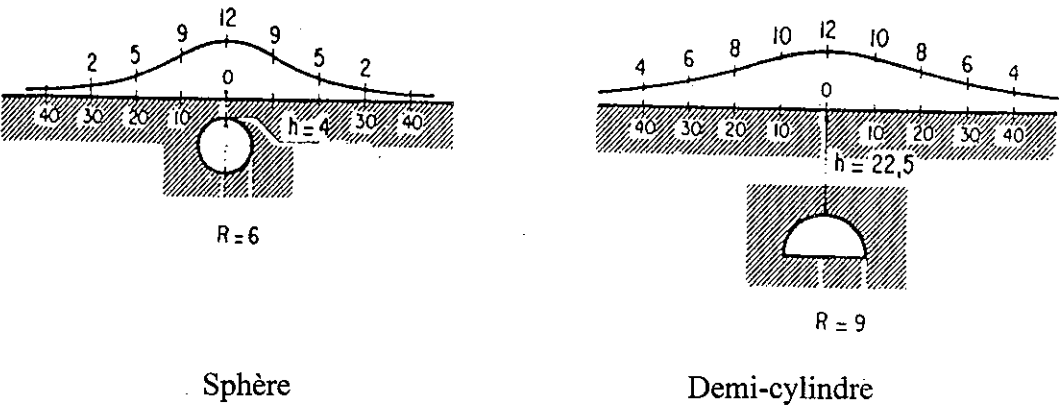
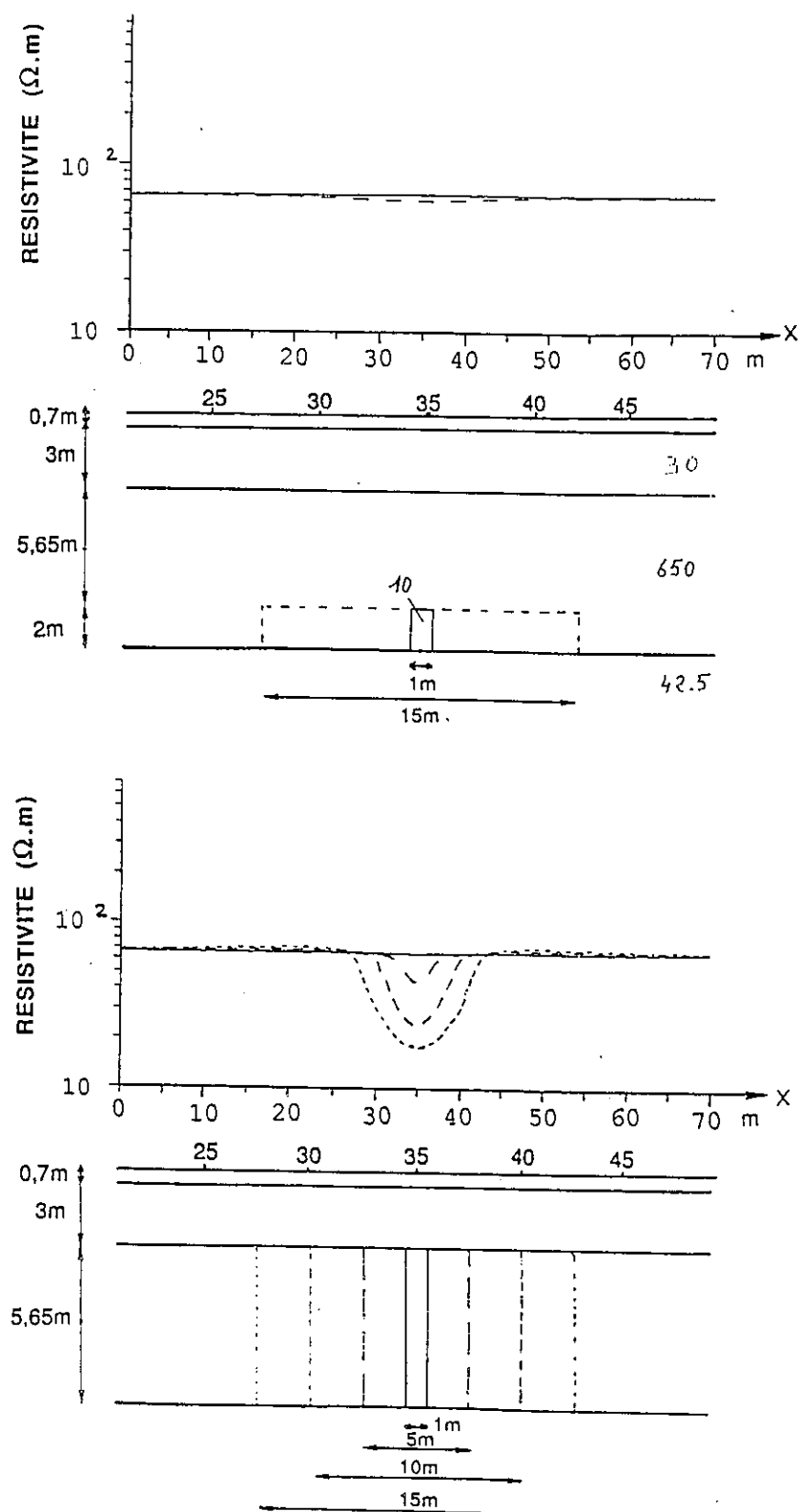
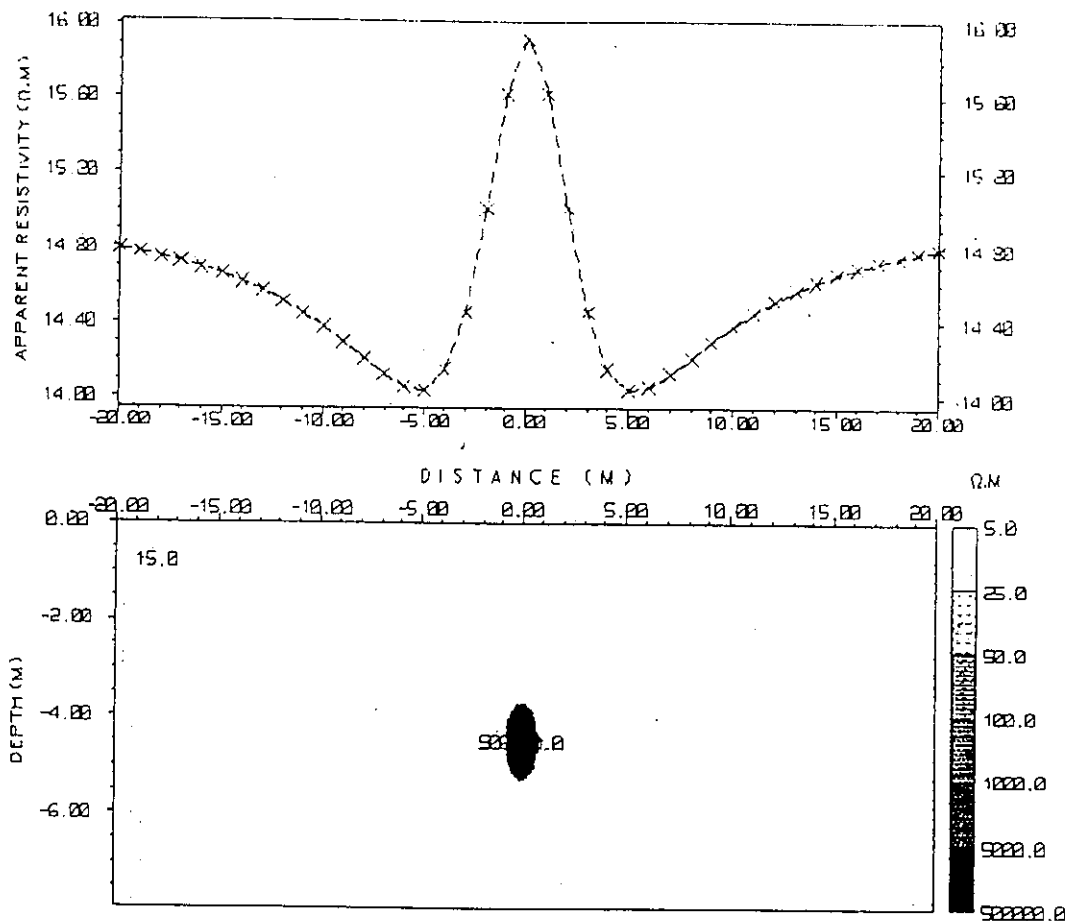


Fig. 6 - Largeur de l'anomalie gravimétrique.
(d'après Neumann, 1965)



**Fig. 7 - Anomalie de résistivité (méthode électromagnétique)
produite par une structure conductrice.
(d'après Guérin, 1992)**



**Fig. 8 - Anomalie de résistivité (méthode électrique)
produite par une galerie remplie d'air.
(d'après Ogilvy et al, 1991)**

Dia. PS	
Dia. gamma-ray sélectif	
Dia. gamma-ray naturel	
Dia. neutron-gamma	
Dia. neutron-neutron	
Dia. gamma-gamma	
Thermographie Infra-rouge aér.	
Thermographie Infra-rouge sol	
Magnétisme en mer	
Magnétisme en forage	
Magnétisme aéroporté	
Magnétisme au sol	
Radar de forage	
Radar Géologique	
EM aéroportée	
EM hélicoptée	
EM forage à émetteur mobile	
EM sol à émetteur mobile	
EM forage à émetteur fixe	
EM sol à émetteur fixe	
VLF aéroporté	
VLF sol	
Radiomagnétotellurique (RMT)	
Audiomagnétotellurique (AMT)	
Magnétotellurique (MT)	
Panneau électrique entre forages	
Panneau électrique au sol	
Polarisation Spontanée (PS)	
Trainé PP	
Sondage électrique PP	
Géoelectrique aquatique	
Trainé électrique	
Sondage électrique long	
Sondage électrique	
Spectrométrie aéroportée	
Spectrométrie au sol	
Paramètres d'ébranlement	
Sismique ondes de tube	
Sismique parallèle	
Cross-hole	
Downhole/"Up-hole"	
Tomographie sismique	
Sismique en couches	
Profil sismique vertical (PSV)	
Sonar latéral	
Sismique réflexion aquatique	
Sismique très haute résolution	
Sismique haute résolution	
Sismique réfraction aquatique	
Sismique ondes de cisaillement	
Sondage sismique	
Base sismique	
Gravimétrie en mer	
Gravimétrie en forage	
Gravimétrie au sol	
Microgravimétrie	

Technique considérée comme non applicable.

Technique d'emploi mal adapté sauf exception.

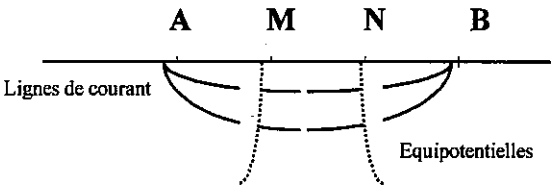
Technique d'emploi limité, utilisé à justifier.

Technique d'emploi adapté mais potentiellement incomplète ou à combiner avec d'autres techniques géophysiques.

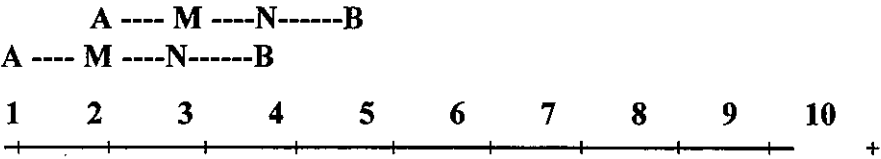
Technique généralement considérée comme fournissant une excellente approche.

Fig. 9 - Techniques géophysiques utilisées pour la « localisation des zones karstiques ».
(d'après « Géophysique appliquée : Code de bonne conduite » Union Française des Géologues, 1992)

1)



2)



3)

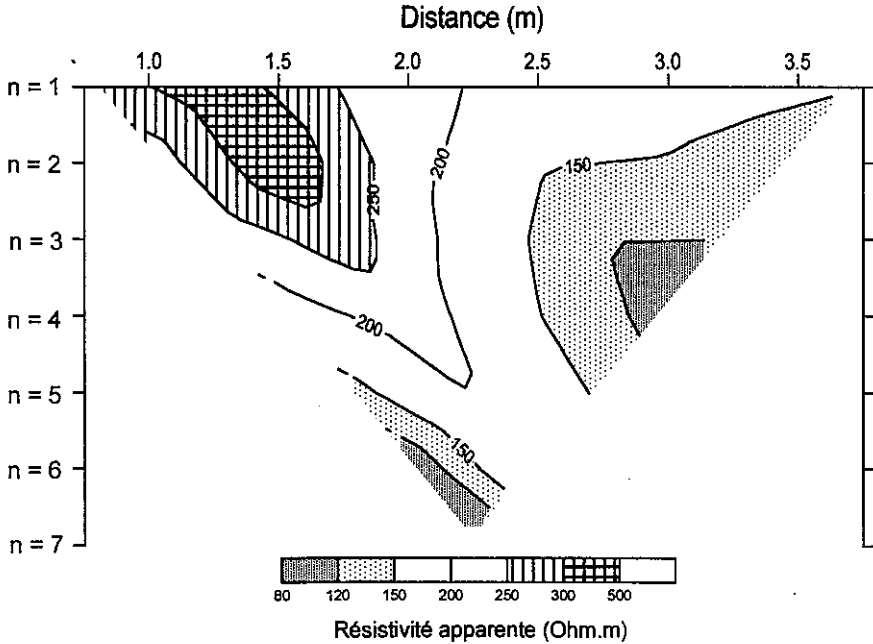
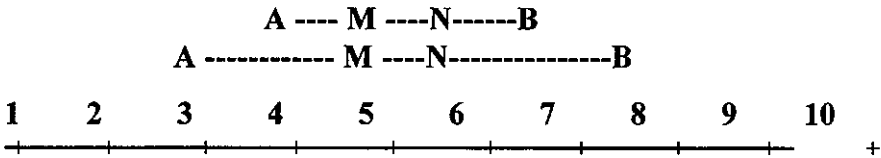
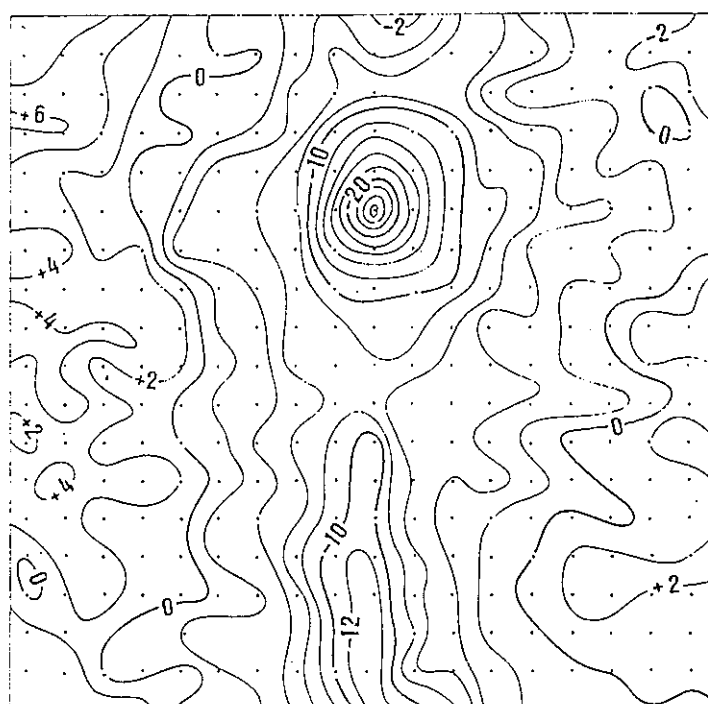


Fig. 10 - Technique de mesure par panneau électrique au sol.



Echelle 10m.

Equidistance des courbes 0,02mgal

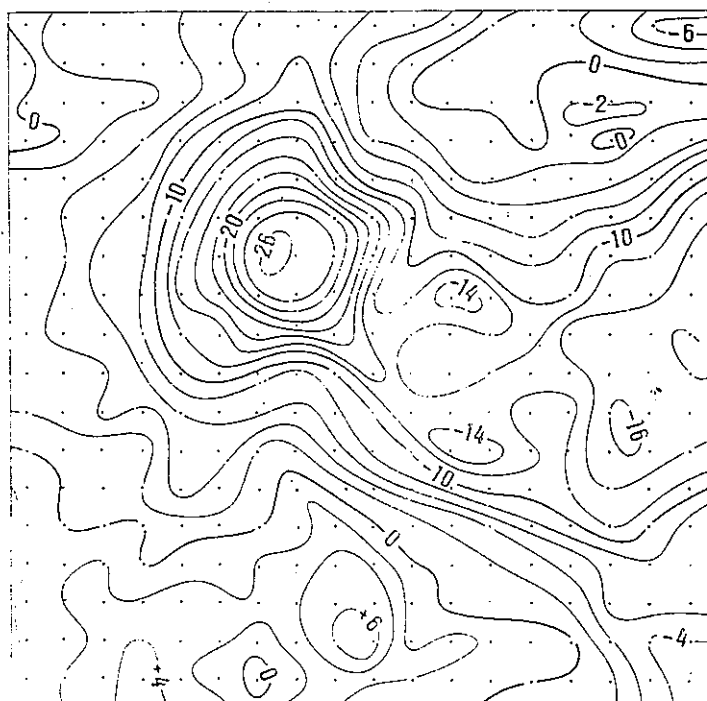


Fig. 11 - Exemple de détection de cavités karstiques par prospection gravimétrique.
(d'après Neumann ?)

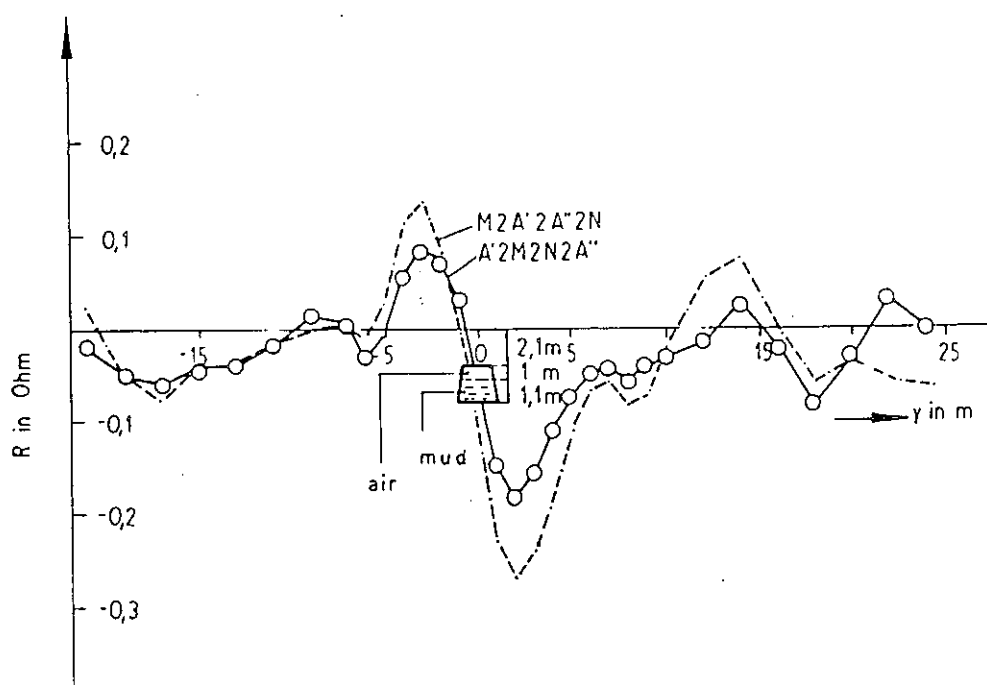


Fig. 12 - Exemple de détection de galerie par prospection électrique.
(d'après Militzer *et al*, 1979)

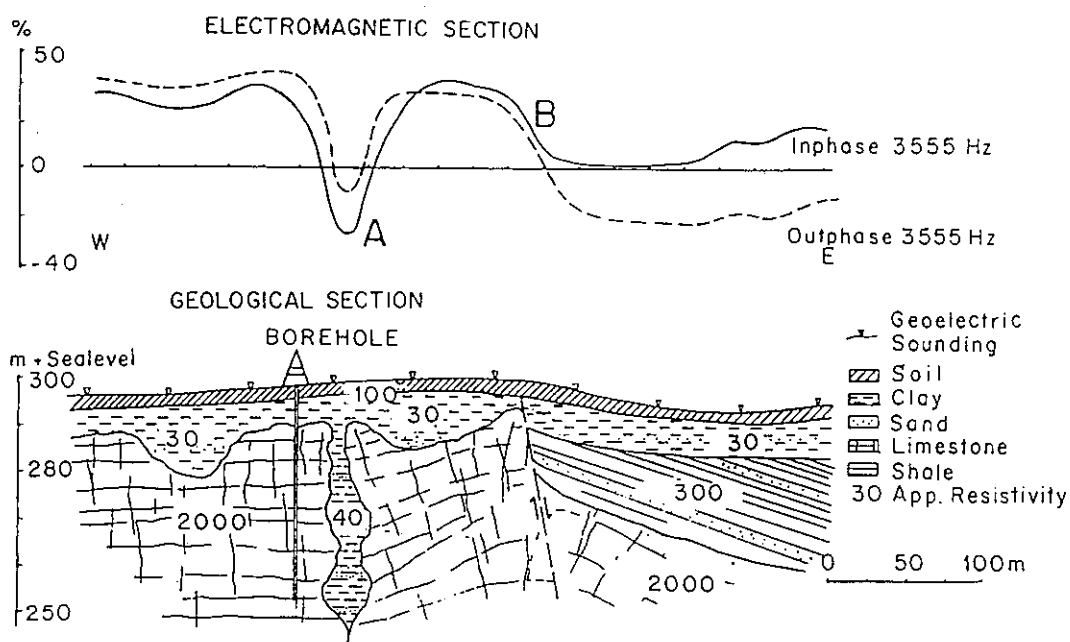


Fig. 13 - Exemple de détection de structure karstique par méthode électromagnétique.
(d'après Vogelsang, 1987)

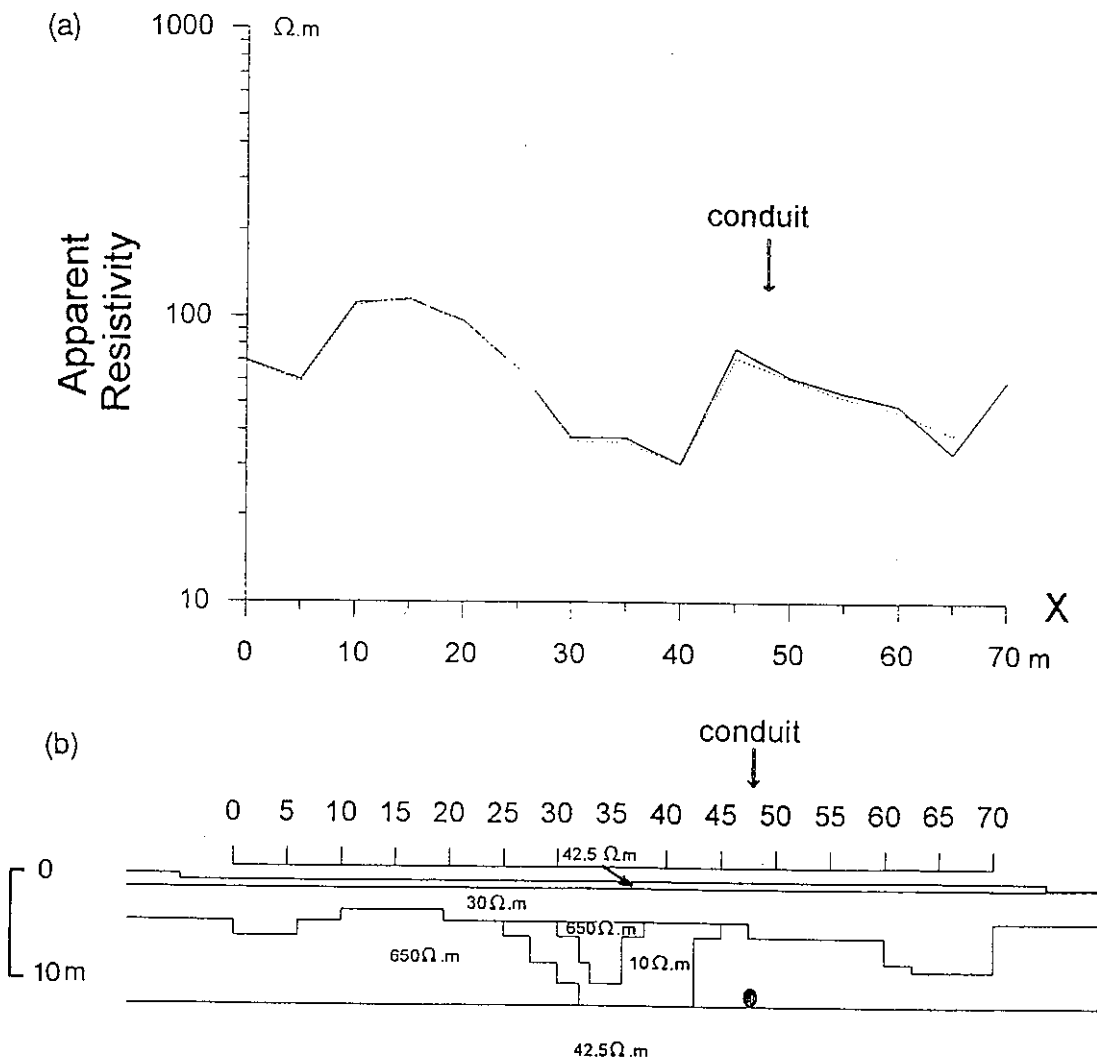


Fig. 14 - Essai de détection de drain karstique par méthode électromagnétique.
(d'après Guerin et Benderitter, 1995)

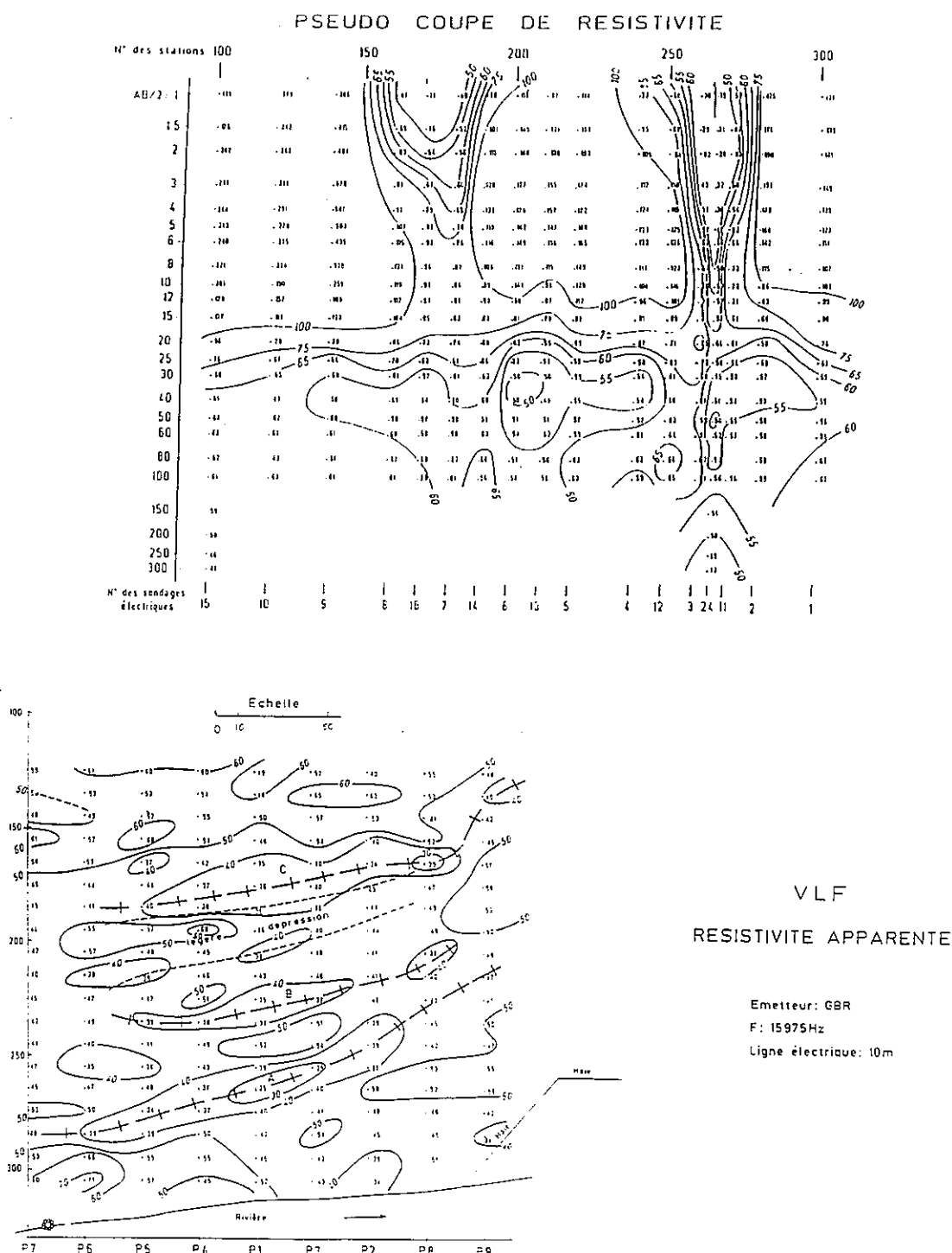


Fig. 15 - Reconnaissance géophysique d'un milieu karstique et poreux en pays crayeux.
(d'après De La Querièrre et Mathieu, 1993)

Références

- Chabert C. & Couturaud A. (1983). - Les Annales des Pays Nivernais. Camosine, Nevers, **38**, 12-13.
- De la Queriére Ph. & Mathieu F. (1993). - Reconnaissance des milieux karstiques et poreux en pays crayeux pour l'implantation des forages d'alimentation en eau potable. Rapport BRGM R37653, 53 p.
- Différents auteurs (1992). - Géophysique appliquée. Code de bonne conduite. Partie 1 : systèmes qualité. Union Française des Géologues (UFG). Recommandations pour l'assurance de la qualité des prestations de service en géophysique, 22 p., 4 annexes. Partie 2 : guide d'adéquation des méthodes et techniques géophysiques aux applications concernant le sol et le sous-sol, 8 p., 5 tab.
- Guerin R. (1992). - Du traitement spatial des données électromagnétiques dans un champ primaire quasi-uniforme. Application à la méthode magnéto-tellurique, à la MT-VLF et au courant continu. Thèse de Doctorat d'Université. Université Pierre et Marie Curie, 239 p.
- Guerin R. & Benderitter Y. (1995). - Shallow karst exploration using MT-VLF and DC resistivity methods. *Geophysical Prospecting*, **43**, 635-653.
- Lagabrielle R. (1994). - La détection des cavités souterraines. *Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées*, 191, 91-92.
- Militzer H., Rosler R. & Losch W. (1979). - Theoretical and experimental investigations for cavity research with geoelectrical resistivity methods. *Geophysical Prospecting*, **27**, 3, 604-617.
- Neumann R. (1965). - La gravimétrie de haute précision. Application aux recherches de cavités. *Geophysical Prospecting*, **15**, 1, 116-134.
- Ogilvy R.D., Cuadra A., Jackson P.D. & Cuellar V. (1991). - Delineation of a resistive drainage channel by EM conductivity survey. - *Geoexploration*, **28**, 139-152.
- Ogilvy R.D. & Lee A.C. (1991). - Interpretation of VLF -EM in-phase data using current density pseudosections. *Geophysical Prospecting*, **39**, 567-580.
- Vogelsang D. (1987). - Examples of electromagnetic prospecting for karst and fault systems. *Geophysical Prospecting*, **35**, 604-617.

CONFÉRENCE :

Y. BENDERITTER

La géophysique, outils de reconnaissance des karsts.

Intervenant

P. BERARD

BRGM / DR

1039 rue de Pinville - 34000 Montpellier

Question ou intervention

RMP : résonance magnétique nucléaire ou protonique ?

Référence : revue "Hydrogéologie", n° 1, 1996, pp. 71 à 77 (A. BEAUCE *et al.*).

Réponse

Les premiers résultats obtenus sont positifs. Il faut signaler qu'ils ont été obtenus dans un milieu de nappe. Je crois que l'application de cette méthode sera plus difficile en milieu karstique dans le cas de structures de faibles dimensions telles que les drains. En effet il me semble difficile d'exciter les protons de l'eau contenus dans un drain sans exciter ceux qui sont contenus dans le calcaire environnant. L'interprétation des mesures me semble alors difficile pour distinguer l'origine de l'anomalie mesurée.

Intervenant

M. BAKALOWICZ

BRGM / DR

1039 rue de Pinville - 34000 Montpellier

Question ou intervention

A propos du "marquage" magnétique actif du milieu karstique, différentes expériences ont été réalisées, notamment dans l'Hérault, en relation avec le Conseil général. Elles ont eu pour but de localiser depuis la surface une cavité karstique noyée ou non, dans laquelle un dispositif magnétique est introduit par l'homme.

Réponse

G. Bel du CMG a essayé avec succès ce type d'expérience. Je crois qu'il s'agissait de situer l'extrémité d'un forage horizontal (génie civil) qui avait dévié, et je crois qu'il avait opté non pas pour un aimant mais pour un champ créé par une bobine.

Question ou intervention

Un "traçage" magnétique par billes est à l'étude ; des expériences doivent être prochainement réalisées pour tester cette méthode de localisation depuis la surface des axes de drainage.

Voir réponse à G. Vasseur.

Intervenant

G. VASSEUR

GBE - Université de Montpellier 2
34000 Montpellier

Question ou intervention

Pour mettre en évidence des anomalies géophysiques associées aux écoulements, on doit imaginer des méthodes actives qui modifient certaines propriétés physiques du milieu : résistivité électrique, propriétés magnétiques... Les méthodes géophysiques permettent alors de cartographier les anomalies associées.

Réponse

Le principe devait être testé par une équipe japonaise dans le cadre des recherches *Hot Dry Rocks*. Je ne sais pas s'il y a eu des résultats. Mais il me semble que le traçage devait être obtenu non pas au moyen de billes (voir remarque de M. Bakalowicz), mais à partir d'un liquide. Il serait intéressant de retrouver les traces de ces expériences.

Dans le même ordre d'idée, il avait été envisagé par Armidelovic (je crois) un traçage sismique en envoyant dans un drain des petites billes explosives.

Intervenant

B. SOURRISSEAU

BRGM / SGR/AQI
33000 Bordeaux

Question ou intervention

Méthodes géophysiques : mise à la masse des exutoires pour identifier les directions des drains et des systèmes annexes pour positionner les forages d'exploitation des réserves karstiques.

Réponse

Ma réponse écrite sera plus "réfléchie" que ma réponse orale. La mise à la masse est effectivement une technique géophysique d'autant plus efficace que l'on se branche sur un corps conducteur. Cela explique les résultats obtenus dans le domaine minier. Cela serait certainement plus difficile dans le cas d'un drain, puisque la résistivité de l'eau est beaucoup plus importante, à moins de rendre l'eau plus conductrice (sel).

Intervenant

B. MARSAUD

ANTEA / HNO
76130 Mont-Saint-Aignan

Question ou intervention

Il n'est pas envisageable de rechercher un "vide" mais une zone de vide plus représentative de la réalité du milieu.

Réponse

L'interprétation finale des résultats géophysiques aurait été beaucoup plus satisfaisante si les géophysiciens avaient travaillé à partir des hypothèses géologiques que vous mentionnez. Je ne suis pas sûr qu'ils avaient ces hypothèses au départ de leur étude.

Question ou intervention

Il est indispensable de croiser les résultats de la géophysique avec des sondages de contrôle.

Réponse

Entièrement d'accord sur votre remarque. Je pense que dans le cas présent cela a été fait. Mais il ne faut pas oublier qu'un forage donne une information ponctuelle (et qu'il y a peut-être une cavité encore plus importante à côté).

Les traçages artificiels, outils de reconnaissance et d'étude des aquifères karstiques

P. MEUS

Laboratoire Souterrain, C.N.R.S., Moulis

Résumé

Cet exposé mettra en relief deux des aspects fondamentaux, par ailleurs liés l'un à l'autre, de l'utilisation des traçages artificiels dans le karst. En premier sera développé l'aspect interprétatif, ou plus exactement le problème de la représentativité des traçages, ainsi que la manière dont ils peuvent être utilisés pour la gestion de l'aquifère. L'utilisation en tant qu'outil prévisionnel sera particulièrement discutée. Différentes applications et différents exemples seront traités, en fonction du type de système-traçage envisagé. En second sera développé l'aspect méthodologique. Un point sera fait sur les différents traceurs utilisables, sur leurs méthodes de détection ainsi que sur leur utilisation en zone captée pour l'AEP. L'exposé se terminera par diverses recommandations destinées, soit aux hydrogéologues, soit aux gestionnaires de l'eau.

Introduction

L'outil traçage artificiel a depuis longtemps été utilisé pour mettre en évidence, de manière parfois très démonstrative, les relations entre les pertes et les sources des bassins karstiques (Mangin, Molinari, Paloc, 1976). Cette caractéristique a d'ailleurs permis, dans certains cas, d'identifier comme karstique des aquifères dont le statut n'était pas encore bien défini, notamment parce que les éléments géomorphologiques et hydrogéologiques permettant de le définir comme tel faisaient défaut (p. ex. aquifère profond sans exokarst évident ou possédant des exutoires diffus ou, tout simplement, non reconnus).

Tout naturellement, les hydrogéologues se sont de plus en plus intéressés à ces liaisons pertes-résurgences lorsque les problèmes de vulnérabilité et de pollution ont pris de l'importance, d'autant plus que les besoins en eau croissant ont amené à exploiter de plus en plus les ressources du karst.

Certains d'entre eux -une minorité faut-il le dire- restaient cependant parfaitement conscients du rôle capacitif joué par le reste de l'aquifère entourant les quelques chenaux karstiques les plus transmissifs reconnus par traçage. Dans certains aquifères, le stockage de l'eau semble principalement avoir lieu dans des vides karstiques de grandes dimensions appelés systèmes annexes (Bakalowicz, Crochet, D'Hulst, Mangin, Marsaud, Ricard, Rouch, 1994) alors que, dans d'autres, les micro fissures et la matrice poreuse de la roche interviennent de manière prépondérante (Zuber, Motyka, 1994). Or, la nature de ce stockage joue bien entendu un rôle essentiel dans la manière dont la rétention de divers polluants peut s'effectuer.

En l'absence de forage, on ne pouvait compter que sur les traceurs naturels -intéressant une part beaucoup plus importante, voire la totalité du système (Molinari, 1976)- pour étudier ce problème. Les moyens aidant, et surtout vus le nombre croissant de pollutions diffuses (décharges) ainsi que la nécessité de délimiter les zones de protection des captages, l'utilisation des forages comme points d'injection des traceurs artificiels s'est de plus en plus répandue (Meus, Käss, Mangin, 1996).

La tentation est maintenant devenue grande de verser dans un excès contraire et de privilégier les informations apportées par ce nouveau type de traçage. Ainsi, actuellement il n'est pas rare de constater que des zones de protections sont déterminées sur la base de l'extrapolation d'un nombre trop restreint de traçages à partir de forages. Ce dernier -contrairement à une perte- peut en effet être implanté à n'importe quel niveau de la structure de drainage du système. Par conséquent, il ne peut pas rendre compte seul du fonctionnement global de l'aquifère.

La méthodologie d'établissement des zones de protection utilisée à l'heure actuelle (Lallemand-Barrès, Roux, 1989, Hötzl, Adams, Aldwell, Daly, Herlicska, Humer, De Ketelaere, Silva, Sindler, Tripet, 1995) s'avère insuffisante face à la complexité du milieu karstique. Le présent article tente d'apporter quelques éléments à prendre en compte pour améliorer cette méthodologie. Il met surtout en garde les utilisateurs de l'eau contre les conclusions un peu hâtives qui peuvent être tirées, quant à la vulnérabilité des systèmes karstiques, à partir d'essais trop peu nombreux ou insuffisamment documentés.

Principes du traçage et particularités liées au karst

Mécanismes de transport

Mise à part la détermination des liaisons entre les points d'injection et les points de sortie, la principale information recueillie lors d'un traçage est la courbe de restitution du traceur, c'est à dire l'évolution de sa concentration en fonction du temps.

On utilise cependant beaucoup plus souvent la distribution des temps de séjour ou DTS (Danckwerts, 1953) car elle reflète beaucoup mieux les mécanismes de transport qui affectent le traceur (figure 1). Cette dernière peut être définie comme la fonction de densité de probabilité qu'a le traceur de séjourner un temps t à l'intérieur de l'aquifère. On se réfère aussi habituellement au temps moyen de séjour -ainsi qu'à la vitesse moyenne- correspondant à l'abscisse du centre de gravité de la DTS.

Si le traceur est affecté par les seuls mécanismes de la convection (mouvement d'ensemble du traceur) et de la dispersion cinématique (due à la dispersion des vitesses de l'eau), il y identité entre la réponse en eau et en traceur. On parle dans ce cas de traceur idéal. D'autres mécanismes vont cependant modifier l'allure de la DTS :

- la diffusion qui peut avoir lieu non seulement sur le trajet de la convection mais également vers les zones d'eau "immobile" contenues dans les systèmes annexes, dans les microfissures, voire même dans la matrice poreuse ;

- l'adsorption sur les particules solides ou à la surface des grains de la roche.

Tant que ces phénomènes sont réversibles, ils ont pour seul effet d'introduire un retard, allongeant ainsi le temps moyen de séjour. Si le phénomène n'est pas réversible, une partie du traceur reste irrémédiablement piégée et ce dernier est dit non conservatif.

D'autres mécanismes tels que les réactions chimiques ou les décroissances radioactives peuvent également être responsables d'une non réapparition du traceur.

Dans le karst, la forme des DTS semble surtout déterminée par les conditions d'écoulements particulières (vitesses élevées, turbulences, multiplicité des trajets, existence de systèmes annexes) qui règlent principalement la dispersion cinématique et la diffusion vers les zones d'eau immobile. Or la dispersion cinématique et la diffusion moléculaire constituent ensemble la dispersion hydrodynamique, laquelle peut être quantifiée par la valeur de dispersivité (en m). Cette dispersivité fournit par conséquent des indications précieuses quant à la structure de l'aquifère. Sur la figure 2, on a reporté, en échelles bilogarithmiques, les valeurs de dispersivité en fonction de la vitesse effective pour une série de tests réalisés dans les calcaires du Carbonifère et dans les craies du Crétacé. Ces valeurs ont été obtenues grâce à plusieurs modèles analytiques. La distinction entre la structure de drainage des calcaires fortement karstifiés et celle des craies peu ou pas karstifiées apparaît nettement au vu des dispersivités. Il est tout aussi intéressant de noter que, dans les mêmes calcaires, seules les vitesses effectives différencient les traçages à partir de forages des traçages à partir des pertes tandis que les dispersivités sont similaires.

Approche systémique

Cette approche analytique qui consiste à déterminer les dispersivités a cependant ses limites. Elle repose souvent sur un nombre trop grand d'hypothèses ou d'approximations qui donnent du système une image trop éloignée de la réalité. Cela a pour conséquence de compromettre toute prévision fiable. Gelhar, Welty et Rehfeldt (1992) ont fait une critique assez exhaustive de différentes dispersivités publiées montrant une très faible proportion de ces valeurs réellement utilisables.

Une approche déterministe s'avère souvent encore plus délicate, vu l'impossibilité de déterminer les paramètres de transport en tout point de l'aquifère.

Pour cette raison, on préfère utiliser l'analyse systémique (figure 3). Dans cette dernière (Guizerix, Margrita, Gaillard, Corompt, Alquier, 1974), on considère la transformation globale du signal d'entrée (concentration en traceur) en un signal de sortie (la DTS), sans se préoccuper des lois qui régissent le mouvement du traceur à l'intérieur de l'aquifère (approche dite "boîte noire").

Deux caractéristiques essentielles, par ailleurs liées l'une à l'autre, sont à prendre en considération lors des traçages artificiels dans les systèmes karstiques. D'une part, le comportement propre du traceur, ainsi que ses interactions avec le reste de l'aquifère, font qu'il

n'y a en général pas superposition du traceur à l'écoulement. Le traceur peut par exemple être amené à diffuser vers les systèmes annexes et y rester piégé suite à un changement dans les modalités de drainage. D'autre part, le traçage n'intéresse pas la totalité du système karstique, mais seulement une petite partie qui dépend de la nature de la connexion entre le point d'injection et le point de sortie, ainsi que, comme nous venons de le voir, du comportement du traceur. Pour être plus précis, on parle dans ce cas d'un système-traçage (Guizerix, Margrita, 1976, Guizerix, 1990). Il varie aussi dans le temps selon l'état du système.

Les différents types de systèmes-traçage

Pour illustrer le paragraphe précédent, penchons-nous sur quelques situations qu'il est possible de rencontrer dans le karst (figure 4).

Si le traçage a lieu le long d'un drain, que ce soit à partir d'une perte (A), à partir d'un forage (A') ou en direction d'un forage (A''), le volume d'aquifère intéressé est en général limité au drain. Ce volume peut éventuellement s'étendre si une zone noyée importante existe en aval ou si les conditions hydrodynamiques sont telles que le drain recharge les systèmes annexes.

Si le traçage a lieu depuis un système annexe, qu'il s'agisse d'un forage (B) ou d'un regard naturel sur la nappe (B'), ou en direction d'un système annexe (B'') soumis à un pompage (Meus, Käss, 1992), l'information à obtenir est déjà beaucoup plus intéressante. La connexion entre systèmes annexes ainsi qu'entre les systèmes annexes et le drain peuvent de la sorte être précisés.

Enfin, si le traçage a lieu entre plusieurs forages (C), le résultat dépendra surtout du niveau de la structure de drainage dans lequel les forages sont implantés. Si le gradient est forcé par un pompage, il ne faut jamais oublier non plus que l'on crée ainsi un état artificiel du système. On devine ainsi très bien le danger d'extrapoler les résultats de traçages à partir de forages pour délimiter les zones de protection autour des captages.

Toujours à propos des forages, il convient aussi de remarquer que ces dispositifs constituent par eux-mêmes des systèmes qui introduisent une déformation parfois très importante du signal d'entrée (figure 5).

Rôle de la zone d'infiltration

Un des obstacles à l'interprétation des traçages dans le karst vient aussi de la déformation du signal introduite par le passage au travers de la zone d'infiltration (figure 5). Le signal qui parvient au drain ou à la zone noyée peut en effet avoir subi un étalement considérable. La déconvolution du signal de sortie par le signal d'entrée n'est dès lors plus possible et l'on peut s'attendre à des écarts très significatifs entre les résultats de traçages réalisés sous des conditions d'infiltration différentes (crue, étiage, fonte des neiges...). On contourne généralement cette difficulté en injectant directement dans la zone noyée mais c'est oublier que la plupart des pollutions sont initiées depuis la surface ou à faible profondeur dans la zone d'infiltration.

Approche phénoménologique et problème de la prévision

Par analogie avec l'hydrogramme unitaire pour les eaux de surface, l'aquifère karstique peut être caractérisé par sa réponse impulsionnelle, c'est à dire la réponse à une impulsion de Dirac. La répétition de plusieurs traçages dans un même système montre que cette réponse impulsionnelle varie suivant les conditions hydrologiques (Stanton & Smart, 1981). De plus, il n'est pas rare que les courbes de restitution soient plurimodales, et cela pas nécessairement à cause des phénomènes de diffuence.

Pour ces raisons, plusieurs auteurs (Niemi, 1977, Zuber, 1986, Dzikowski, 1995) ont tenté de tenir compte de la variation de la réponse impulsionnelle avec le débit, de manière à pouvoir continuer à appliquer une intégrale de convolution dans les systèmes à débit variable (ce qui est le cas de la majorité des systèmes karstiques).

Malheureusement, l'expérience montre que la réponse impulsionnelle ne varie pas de manière aussi simple, que, pour les mêmes débits, on peut avoir différentes réponses impulsionnelles et que de surcroît ces dernières ne varient pas de manière continue.

En fait, si la réponse impulsionnelle varie de la sorte, c'est principalement à cause du caractère profondément non linéaire du karst (cf. article de Mangin dans les présents comptes-rendus). Il devient dès lors nécessaire de faire appel aux méthodes plus complexes de la dynamique des systèmes non linéaires. Pour cela, il est d'abord préférable de passer dans le domaine fréquentiel (Duffy & Gelhar, 1986). Ensuite on tâche, par des observations à un pas adapté d'un certain nombre de paramètres du système, de définir le nombre de ses degrés de liberté. Il s'agit là d'une approche phénoménologique qui requiert avant tout des données de très grande qualité. Une fois le système identifié, il devient possible de connaître son degré de prédictibilité.

Méthodologie des traçages

Quel traceur choisir?

Il serait trop long de faire ici le point sur tous les traceurs pouvant être utilisés dans le karst, d'autant plus que les synthèses ne manquent pas à ce sujet (Smart, Laidlaw, 1977, Atkinson, Smart, 1979, Davis, Thompson, Bentley, Stiles, 1980, Parriaux, Liskay, Müller, Della Valle, 1988, Käss, 1992).

Si l'on excepte cependant certaines catégories de traceurs très rarement employées, soit en raison de leur toxicité (traceurs radioactifs), soit en raison de la difficulté de leur mise en oeuvre (traceurs radioactivables, bactériophages), la plupart des applications de traçage en milieu karstique font appel à trois grandes familles de produits (Meus, 1995) : les traceurs ioniques, les traceurs fluorescents et les traceurs particuliers (tableau 1).

Il faut malheureusement avouer qu'en pratique, dans la plupart des cas, le choix du traceur est limité, soit par les moyens d'analyse, soit tout simplement par les produits disponibles. Cela mis à part, d'autres considérations viendront normalement guider le choix du traceur, à savoir :

- le seuil de détection du traceur et la quantité à utiliser ;
- la présence d'un bruit de fond (principalement pour les ioniques et les fluorescents) ;
- la toxicité du traceur en zone de captage ;
- les interactions possibles avec l'aquifère (adsorption, piégeages...) ;
- le nombre de traceurs différents à injecter dans le même système (méthode du multitraçage) ;
- les moyens d'échantillonnage (échantillonnage manuel, avec un échantillonneur automatique ou mesure en continu).

En ce qui concerne la quantité à utiliser, le critère le plus important à prendre en compte est certainement le type de système-traçage envisagé (traçage depuis une perte, à partir d'un système annexe, à partir de ou entre forages...). Ainsi, c'est souvent la connaissance du système lui-même et de son hétérogénéité qui permet de choisir (Worthington, Ford, Smart, 1996). Lorsque d'autres essais de traçages ont déjà été réalisés sur le même site, ils peuvent être une indication mais il faut tenir compte que la dilution peut varier très fort suivant les conditions hydrologiques.

Le bruit de fond est important car c'est lui (et pas seulement l'appareil de mesure) qui va définir la limite de détection. Il peut être naturel ou du à la persistance de traceurs injectés précédemment (Parriaux, Dubois, Mandia, 1990).

Les interactions du type adsorption (Sabatini, Austin, 1991), bien que très intéressantes du point de vue de la caractérisation de l'aquifère, sont souvent responsables d'une perte importante de traceur pouvant aller jusqu'à ne plus le détecter. Sur la figure 6 sont représentées les adsorptions relatives de la plupart des traceurs fluorescents. L'adsorption du tinopal est prise arbitrairement égale à 100 %. Les intensités relatives de fluorescence sont également indiquées, la fluorescence de l'uranine étant prise égale à 100 %. Ce style de comparaison permet d'effectuer un choix plus judicieux du traceur à utiliser.

Le problème de la toxicité des traceurs

Le problème de la toxicité du traceur est souvent posé lors des traçages destinés à délimiter les zones de protection des captages, surtout lorsque ces derniers ne peuvent absolument pas être mis hors service durant la période de l'essai.

Aucune loi ne régit actuellement l'utilisation des traceurs en zone captée car, d'une part cet usage était jusqu'à présent exceptionnel et, d'autre part -et c'est une conséquence- les effets des traceurs sur la santé sont toujours assez méconnus.

Tout au plus peut-on s'en tenir à des recommandations. Le Ministère allemand de l'Environnement (Umweltbundesamtes, 1996) est sans doute le seul jusqu'à présent à avoir fait un effort dans ce sens en réunissant des scientifiques pour étudier la toxicité des traceurs les plus communément employés. Selon les conclusions de ces chercheurs, l'uranine, l'éosine, la sulforhodamine B, l'amidorhodamine G, la pyranine, le naphthionate, le strontium, le lithium (à condition de ne pas dépasser 500 ppb, c'est à dire la dose thérapeutique) et le bromure (avec certaines restrictions quant aux réactions possibles avec les produits de désinfection des captages) peuvent être utilisés sans précaution particulière dans les eaux souterraines.

Par contre, les traceurs suivants ont une toxicité reconnue et il est fortement déconseillé de les employer : la rhodamine WT, la rhodamine B, la rhodamine 6G, le tinopal CBS-X, le tinopal ABP. D'autres traceurs, tels les microsphères (Käss, Hötzl, 1988) ou les spores de Lycopode teintées avec l'acridinorange devraient encore faire l'objet d'études détaillées.

Il va de soi que la précaution la plus sage est toujours d'utiliser les quantités les plus faibles possibles grâce à des moyens de détection les plus performants possibles (Charrière, 1974).

Conclusions et perspectives

La preuve est ainsi faite qu'avec le karst le traçage artificiel doit être envisagé avec d'énormes précautions, quant à la mise en oeuvre des essais d'une part, et quant à leur interprétation d'autre part. Chaque traçage doit idéalement être replacé dans son contexte hydrologique et hydrogéologique.

Du point de vue méthodologique, ce sont toute une série de petits perfectionnements (prise en compte du bruit de fond, enregistrement en continu des débits...) qui, mis ensemble, permettront d'obtenir les informations voulues sur le système.

La structure du karst est responsable d'un fonctionnement très particulier et la plus grande précision sur les observations est indispensable en vue d'identifier le système et ainsi pouvoir réaliser des prévisions suffisamment justes. Les courbes de restitution sont encore trop souvent incomplètes ou pas assez précises pour pouvoir être exploitées correctement mais surtout, le nombre de traçages sur un même système est encore trop souvent insuffisant pour pouvoir être utilisé à des fins prévisionnelles. Les traçages ne doivent pas seulement être répétés dans le temps (variation de la réponse impulsionnelle), ils doivent aussi intéresser un maximum de points d'injection (ou de systèmes-traçages) différents. Des outils sont en train d'être développés (p. ex. des dispositifs de mesure en continu des traceurs fluorescents) ou améliorés (p. ex. les forages) pour atteindre ce but.

En ce qui concerne l'établissement des zones de protection, de gros efforts doivent encore être fournis, d'une part pour adapter les lois au cas particulier du transport des polluants dans le karst, d'autre part pour trouver la méthodologie la mieux adaptée pour pouvoir extrapoler les résultats des essais et les inclure dans l'évaluation de la vulnérabilité (Doerfliger, Zwahlen, 1996). Ainsi, l'extrapolation pure et simple des résultats de quelques traçages à partir de forages est souvent insuffisante et peut entraîner de sévères erreurs sur les prévisions.

Références

- Atkinson T. C., Smart P. L., 1979, Traceurs artificiels en hydrogéologie, Bull. du B.R.G.M., 2ème série, section III, n°3, 1979, pp 365-380.
- Bakalowicz M., Crochet P., D'Hulst D., Mangin A., Marsaud B., Ricard J., Rouch R., 1994, High discharge pumping in a vertical cave, fundamental and applied results, in: Basic and applied hydrogeological research in french karstic areas, Cost 65 Action, Montpellier-Millau Workshop, European Commission, Crampon & Bakalowicz ed., pp 93-110.
- Charrière R., 1974, Perfectionnements à la mesure de traceurs fluorescents, applications à l'hydrogéologie, Thèse de 3ème cycle, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1974, 197 p.
- Danckwerts P. V., 1953, Continuous flow systems - Distribution of residence time, Chemical Engineering Science (Génie Chimique), vol. 2, february 1953, n°1, pp 1-13.
- Davis S. N., Thompson G. M., Bentley H. W., Stiles G., 1980, Ground-water tracers - a short review, Ground Water, vol. 18, n°1, January-February 1980, pp 14-23.
- Doerfliger N., Zwahlen F., 1996 EPIK: a new method for the delineation of protection areas in karstic environment, Proceedings of the International Symposium on Karst Waters and Environmental Impacts, Antalya, (sous presse).
- Duffy C. J., Gelhar L. W., 1986, A frequency domain analysis of groundwater quality fluctuations: interpretation of field data, Water Resources Research, vol. 22, n°7, July 1986, pp 1115-1128.
- Dzikowski M., 1995, Convolution in time-dependent system from artificial tracer tests responses in porous or karst systems; theory and modeling, Journal of Hydrology, 164 (1995), pp 287-303.
- Gelhar L.W., Welty C., Rehfeldt K.R., 1992, A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, Water Resources Research, vol.28, n°7, pp 1955-1974.
- Guizerix J., 1990, Tracer and systems analysis, in: Guidebook on radioisotope tracers in industry, Technical reports series n°316, I.A.E.A, Vienna (1990), pp 39-60.
- Guizerix J., Margrita R., 1976, Méthodologie d'étude par traceur des transferts de masses, La Houille Blanche, n°3/4 (1976), Techn. des traceurs en hydrologie et en hydraulique, pp 187-196.
- Guizerix J., Margrita R., Gaillard B., Corompt P., Alquier M., 1974, Analyses des informations fournies par les traceurs naturels ou artificiels dans l'étude des systèmes aquifères en hydrogéologie, Isotopes Techniques in Groundwater Hydrology, Proc. Symp. Vienna (1974), vol.2, IAEA, Vienna, pp 377-381.

Hötzl H., Adams B., Aldwell R., Daly D., Herlicska H., Humer G., De Ketelaere D., Silva M. L., Sindler M., Tripet J.-P., 1995, Regulations, in: Final report of the Cost 65 Action, Karst groundwater protection, European Commission EUR 16547, pp 403-434.

Käss W., Hötzl H., 1988, Fluorescent spores for karstwater tracing - Fluorescent microspheres as a further drifting tracer. Poster presentation, IAH 21st Congress, Guilin-China, October 1988.

Käss W., 1992, Geohydrologische Markierungstechnik, Lehrbuch der Hydrogeologie Band 9., Gebrüder Borntraeger-Berlin-Stuttgart, 519 p.

Lallemand-Barrès A., Roux J.-C., 1989, Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine, Manuels et Méthodes n°19, Editions du B.R.G.M.

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 (1976), pp 261-266.

Meus P., 1995, Quelques aspects de la mise en oeuvre et de l'interprétation des traçages artificiels utilisés pour la protection des eaux souterraines karstiques, in: Atlas du Karst Wallon, Commission Wallonne d'Etude et de Protection des Sites Souterrains.

Meus P., Käss W., 1992, Tracer tests in small karst systems of the Carboniferous limestones in Belgium, Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th international symposium on water tracing, Karlsruhe (1992), Hötzl & Werner ed., pp 271-275.

Meus P., Käss W., Mangin A., 1996, Tracer tests involving boreholes in karst aquifers: representativity and applications to groundwater protection. International Conference on Karst-fractured aquifers, Vulnerability and Sustainability, Katowice-Ustron, Poland, June 10-13 1996, pp 128-140.

Molinari J., 1976, Perspectives offertes par l'utilisation rationnelle des traceurs naturels et artificiels en hydrologie karstique. Commentaires de nombreux exemples récents de multitraçages, Deuxième Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire, Ann Sc de l'Université de Besançon, Géologie, fasc 25, 3ème série, 1976, pp 275-306.

Niemi A.J., 1977, Residence time distributions of variable flow processes, International Journal of Applied Radiation and Isotopes, vol.28, pp 855-860.

Parriaux A., Dubois J.-D., Mandia Y., 1990, Persistance des traceurs fluorescents dans les nappes d'eaux souterraines, Hydrogéologie, n°3, 1990, pp 183-194.

Parriaux A., Liskay M., Müller I., Della Valle G., 1988, Guide pratique pour l'usage des traceurs artificiels en hydrogéologie, Société Géologique Suisse, Groupe Suisse des Hydrogéologues, 51 p.

Sabatini D. S., Austin T. A., 1991, Characteristics of rhodamine WT and fluorescein as adsorbing ground-water tracers, *Ground Water*, vol. 29, n°3, May-June 1991, pp 341-349.

Smart P. L., Laidlaw I. M. S., 1977, An evaluation of some fluorescent dyes for water tracing, *Water Resources Research*, vol. 13, n°1, February 1977, pp 15-33.

Smart P., 1995, The utility of aquifer and tracer tests for characterisation of carbonate aquifers, National Report for United Kingdom, in: Cost Action 65, Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas, Final report, EUR 16547, European Commission, Brussels, pp 331-340.

Stanton W. I., Smart P. L., 1981, Repeated dye traces of underground streams in the Mendip Hills, Somerset, *Proc. Univ., Bristol Spelaeol. Soc.*, 1981, 16 (1), pp 47-58.

Umweltbundesamtes (Deutschland), 1996, Markierungsversuche in Gewässern ungefährlich? Presse-Information, Berlin.

Worthington S.R.H., Ford D.C., Smart C.C., 1996, Guidelines for the quantity of dye needed for quantitative tracing to springs in carbonate rocks, *Proceedings of the International Symposium on Karst Waters and Environmental Impacts, Antalya*, (sous presse).

Zuber A., 1986, On the interpretation of tracer data in variable flow systems, *Journal of Hydrology*, 86 (1986), pp 45-57.

Zuber A., Motyka J., 1994, Matrix porosity as the most important parameter of fissured rocks for solute transport at large scales, *Journal of Hydrology*, 158, pp 19-46.

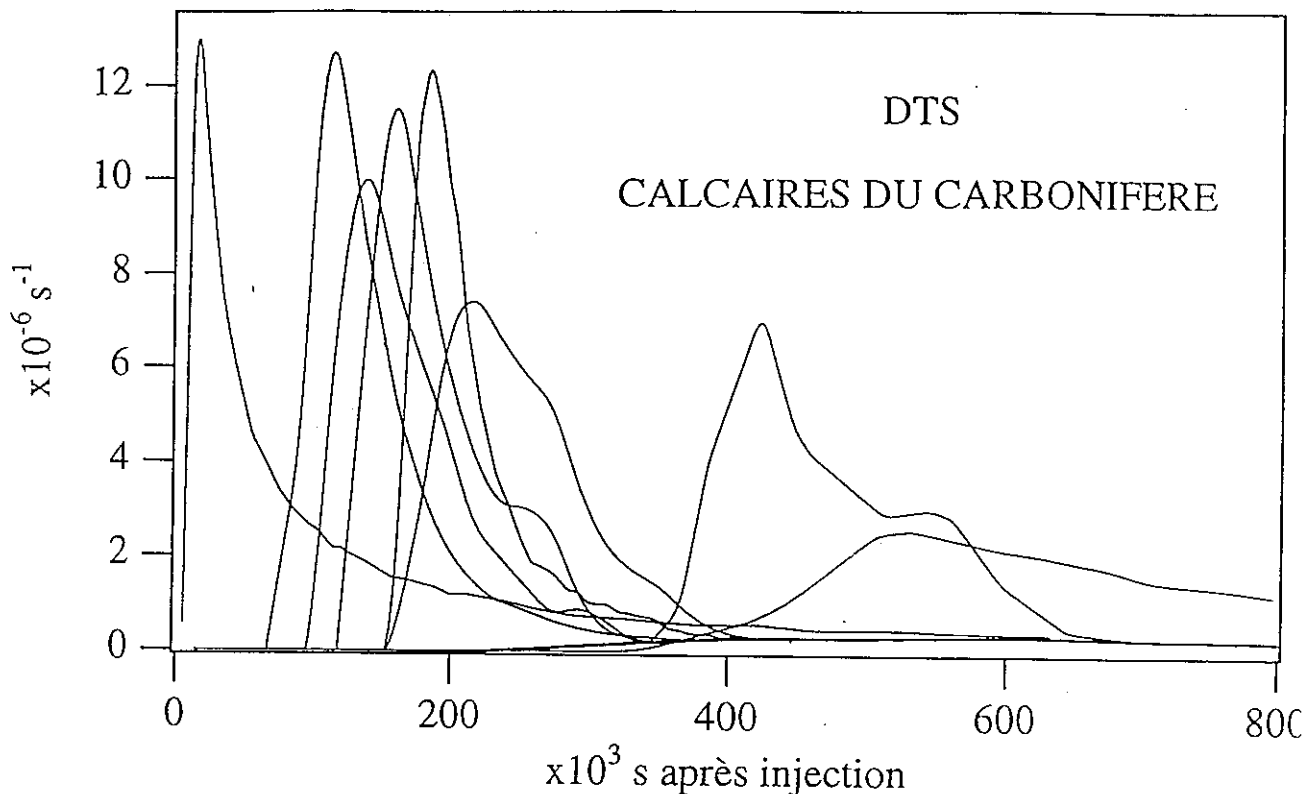


Figure 1. Exemples de DTS obtenues lors de traçages dans les calcaires du Carbonifère.

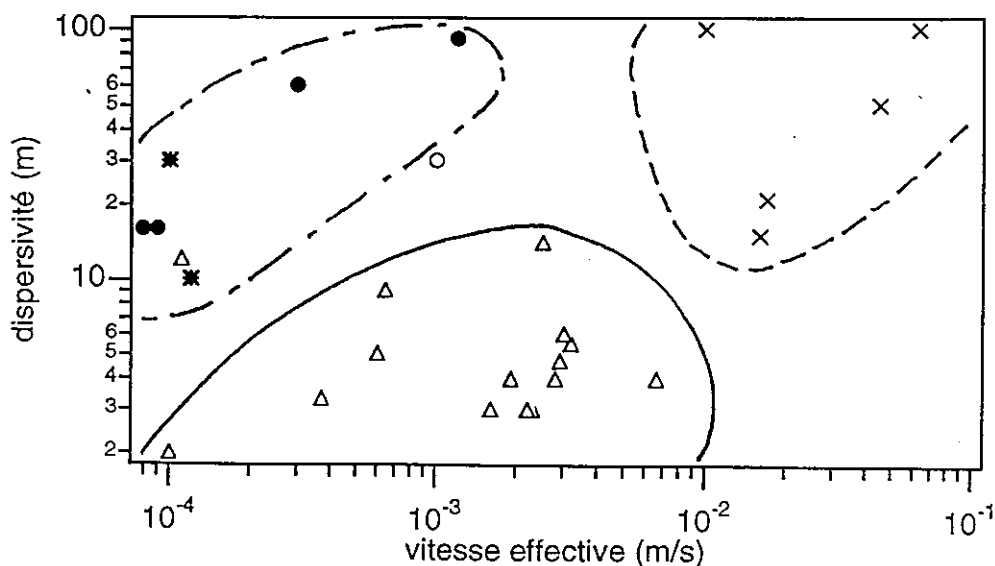


Figure 2. Dispersivité en fonction de la vitesse effective pour les tests réalisés dans deux milieux différemment karstifiés, les calcaires du Carbonifère et les craies du Crétacé.
croix = injections dans les calcaires à partir de pertes, cercles pleins = injections dans les calcaires avec pompage entre forages, étoiles = injections dans les calcaires à partir de forages, en écoulement naturel, triangles = injections dans les craies avec pompage entre forages, cercles vides = injection dans les craies à partir d'un forage, en écoulement naturel.

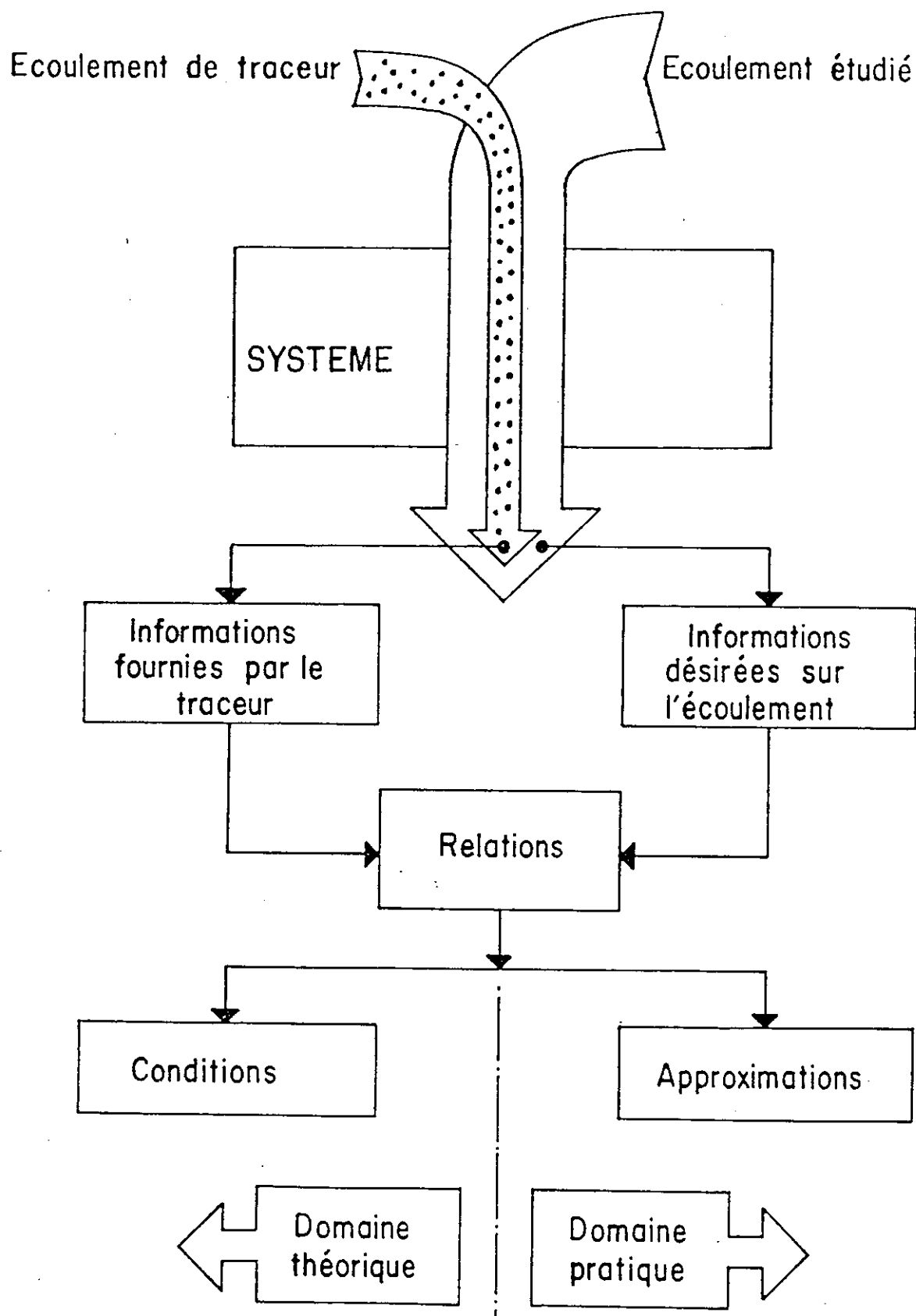


Figure 3. Illustration de l'approche systémique utilisée pour les traçages en milieu karstique
(d'après Guizerix, Margrita, Gaillard, Corompt, Alquier, 1974).

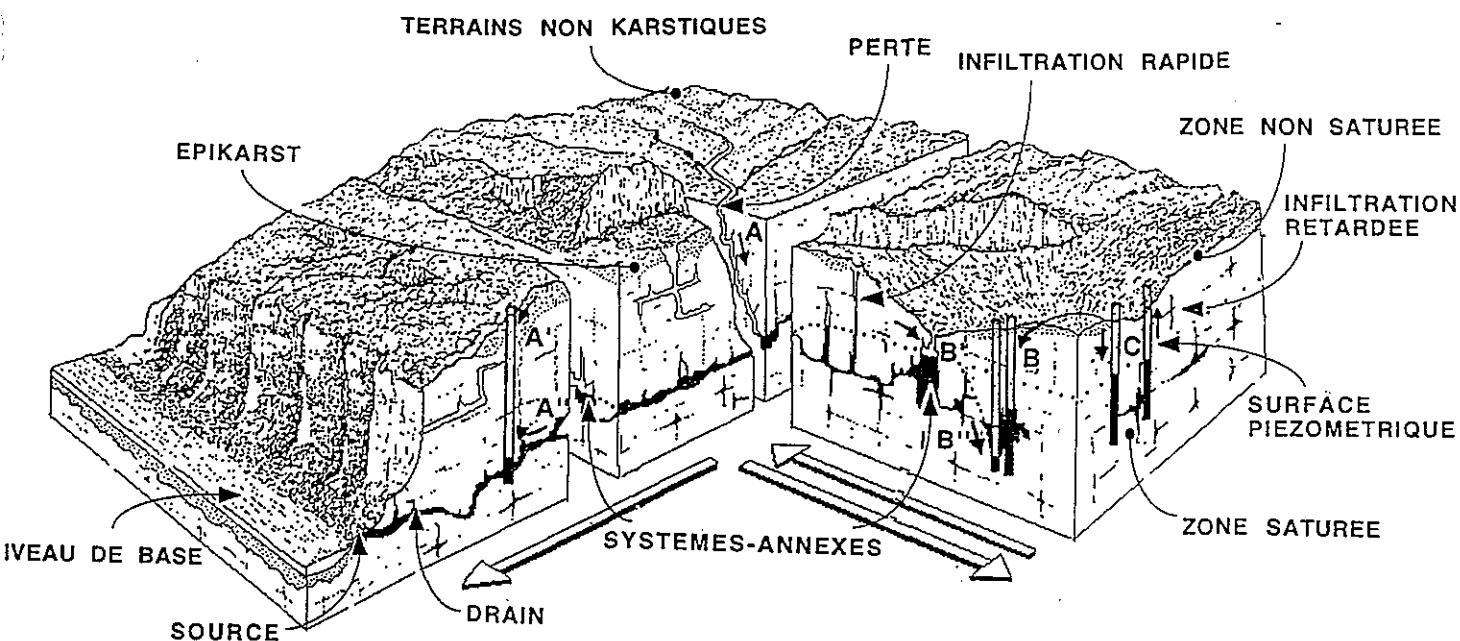


Figure 4. Représentation du système karstique avec ses différentes configurations de systèmes-traçage (modifié d'après Mangin, 1975).

A = injection depuis une perte, A' = injection vers le drain depuis un forage, A'' = injection à partir d'une perte ou d'un autre forage en direction d'un forage recoupant le drain, B = injection à partir d'un forage recoupant un système annexe, B' = injection dans un regard naturel donnant accès à un système annexe, B'' = injection à partir du drain en direction d'un système annexe en pompage, C = injections entre forages, avec gradient naturel ou forcé.

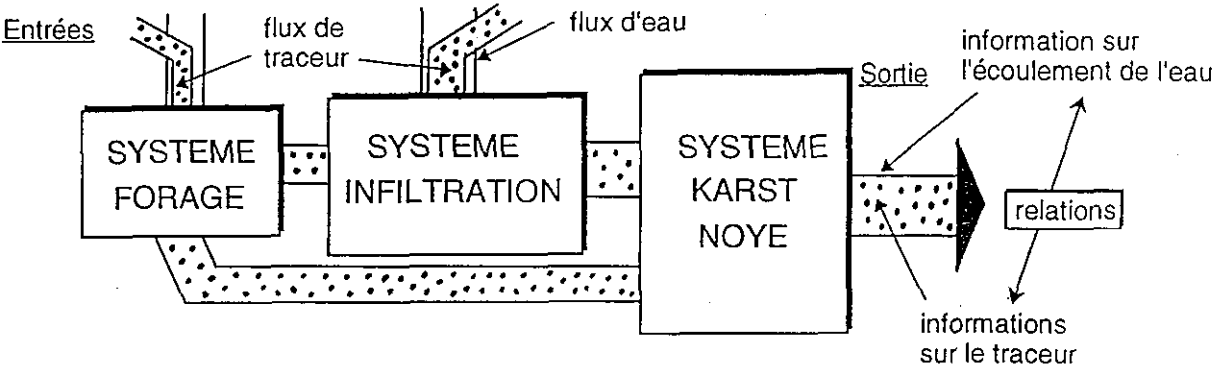


Figure 5. Illustration du rôle joué par le forage et par la zone d'infiltration en tant que système déformant la réponse impulsionnelle avant l'arrivée du traceur dans la zone noyée.

traceurs fluorescents	traceurs xanthéniques:	uranine, éosine, rhodamine B, sulforhodamine B, amidorhodamine G, rhodamine WT, rhodamine 6G, érythrosine, rose bengale
	autres fluorescents:	pyranine, naphthionate, amino G, lanaperl, lissamine, tinopal CBS-X, leucophore, photine CU, azurant optique 28, amidoflavine
traceurs ioniques	cations:	Na+, Li+, K+, Sr2+, Cs+
	anions:	I-, Br-
traceurs particuliers		spores de Lycopodes (+colorants) microsphères fluorescentes

Tableau 1. Principaux traceurs utilisés en hydrogéologie.

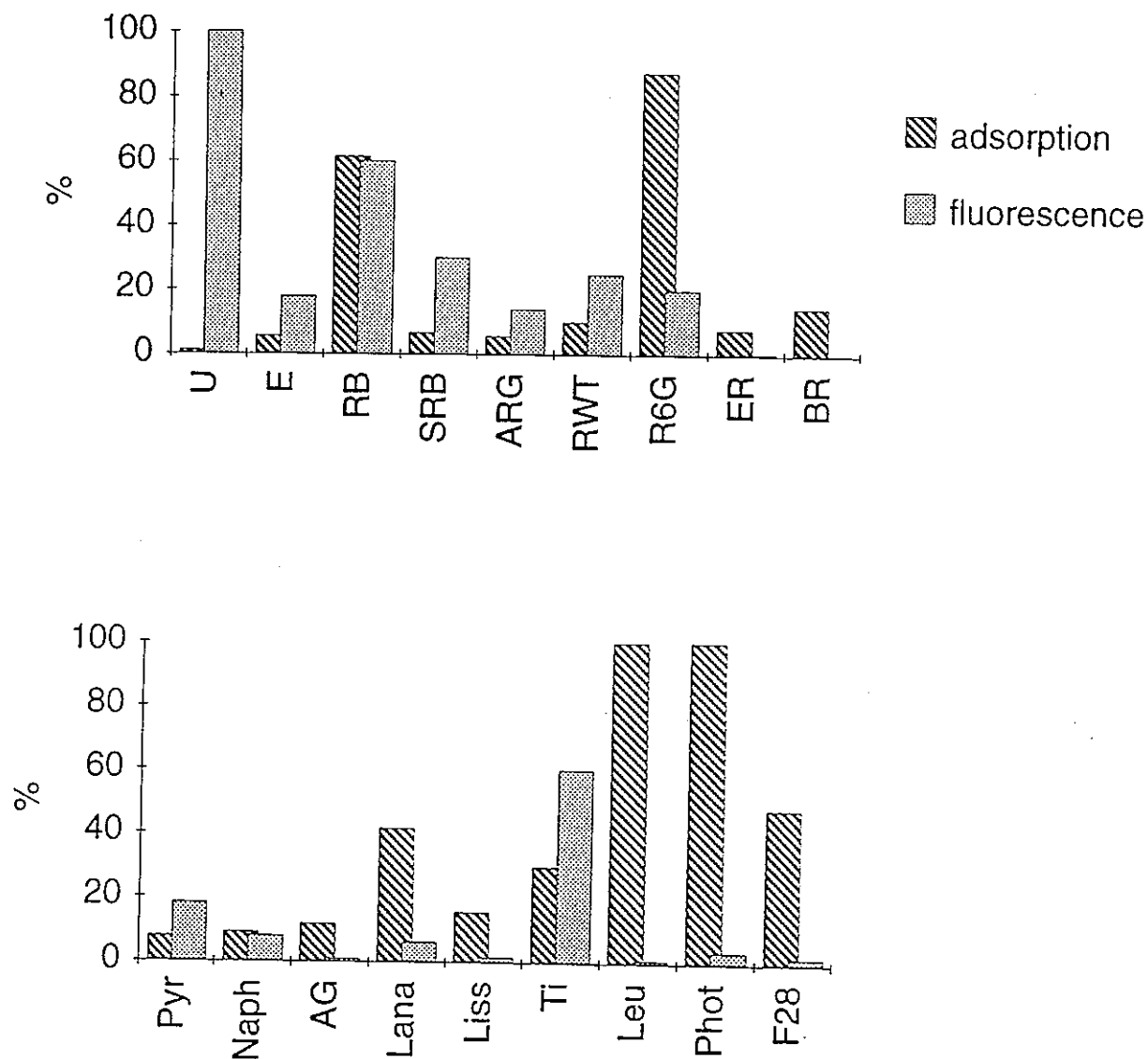


Figure 6. Comparaison des propriétés d'adsorption et de fluorescence des traceurs fluorescents utilisés en hydrogéologie. Graphique supérieur: traceurs xanthéniques. Graphique inférieur : autres traceurs fluorescents. L'adsorption du Tinopal et la fluorescence de l'uranine sont prises arbitrairement égales à 100% (modifié d'après Käss, 1992).

U = uranine, E = éosine, RB = rhodamine B, SRB = sulforhodamine B, ARG = amidorhodamine G, RWT = rhodamine WT, R6G = rhodamine 6G, ER = érythrosine, BR = rose Bengal, Pyr = pyranine, Naph = naphthionate, AG = amino G, Lana = lanaperl, Liss = lissamine, Leu = leucophore PBS, Phot = photine CU, F28 = azurant optique 28.

CONFÉRENCE :

Ph. MEUS

Les traçages artificiels, outils de reconnaissance et d'étude des aquifères karstiques.

Intervenant

M. BAKALOWICZ

BRGM / DR

1039 rue de Pinville - 34000 Montpellier

Question ou intervention

L'intérêt est de présenter le rapport qualité-prix et non seulement le coût. Qualité en terme de ce que l'on peut faire du traceur, des problèmes que l'on peut rencontrer.

Approbation de *F. Zwahlen*.

Intervenant

N. CRAMPON

Laboratoire Hydrogéologie SN5

USTL - 59655 Villeneuve d'Ascq Cédex

Question ou intervention : insiste sur les remarques de *F. Zwahlen* et *M. Bakalowicz* sur le coût des traçages et la relation qualité-prix.

Ce n'est pas tant le coût du traceur (sauf cas des traceurs activables) qui compte, mais tout ce qui est à l'aval : méthode de prélèvement et d'échantillonnage, puis de mesure (ou de mesure en continu), et appareillages mis en place, durée de l'opération sur le terrain, etc., bref tout ce qui fera la qualité et l'interprétabilité du traçage.

Réponse

C'est aussi ce qui est à l'amont, comme la réalisation de forages pour réaliser le traçage.

Question ou intervention

En ce qui concerne le schéma (fig. 6 de *Ph. Meus*) : sorption-fluorescence : ne pas oublier que des traçages fort différents (et non karstique c'est vrai, mais avec présence d'argiles) ont donné des résultats quasiment opposés : cf. Bonnaud (Jura) avec BRGM-CENG où l'Uranine montrait un bien moins bon comportement que les Iodures, et Bethune (craie captive) qui a montré l'inverse. De plus, en laboratoire, des essais de sorption montrent que la nature minéralogique de l'argile joue aussi un rôle dans la sorption.

Réponse

En effet, le graphique que j'ai montré est théorique mais la pratique montre qu'on peut utiliser de façon valable des traceurs dont les comportements physico-chimiques ne sont pas, *a priori*, favorables. C'est le cas du lithium qui donne d'excellents résultats en milieu carbonaté malgré une sorptivité réputée élevée.

Intervenant

M. ALBINET

Agence de l'Eau RMC
69000 Lyon

Question ou intervention

Peut-on obtenir un barème des coûts en fonction des diverses méthodes de traçage. Peut-on publier un document sur la question ?

Réponse

Le coût d'une opération de traçage peut être évalué d'après diverses expertises réalisées par des bureaux d'étude. Des programmes plus élaborés, tels que des instituts de recherche peuvent en réaliser, sont plus difficiles à chiffrer. Comme dit *M. Bakalowicz*, tout dépend du rapport qualité-prix recherché.

Si on considère des traçages à partir de forages, il faudrait implanter des forages en fonction des traçages dont on a besoin. Or souvent, c'est l'inverse, c'est-à-dire qu'on utilise les forages à disposition pour réaliser les traçages.

Intervenant

R. LAURENT

Fédération Française de Spéléologie
130 rue Saint Maur - 75011 Paris

Question ou intervention

Précisions concernant "le problème de la toxicité des traceurs" abordé dans cette communication.

Des études concernant la toxicité des colorants ont été réalisées notamment par *J. Molinari* (CEA, Grenoble), *J. Rochat* (UER Sciences pharmaceutiques, Univ. Grenoble), *P.L. Smart* (Univ. de Bristol, Angleterre), *R. Lichacz* (Australien), ... (cf. *bibliographie ci-dessous*). Ces travaux sont déjà anciens, je n'ai pas particulièrement suivi ce sujet mais il a été déjà abordé sérieusement ailleurs qu'en Allemagne. Il est vrai qu'en France, il n'y a pas eu un programme national sur le sujet. Par ailleurs, le *CEMAGREF* a effectué des recherches sur les animaux aquatiques superficiels.

Pour information : le laboratoire d'hydrobiologie et écologie souterraines, ESA 5023 du CNRS (Lyon) : responsable *Mme J. Gibert*, travaille depuis plusieurs années sur la toxicité des métaux lourds, des hydrocarbures et les lixiviats de décharge vis-à-vis des crustacés amphipodes et d'autres invertébrés souterrains.

Proposition : ce laboratoire, par exemple, pourrait dans un premier temps envisager une recherche bibliographique internationale, puis présenter un programme de recherche concernant les seuils de sensibilité des organismes souterrains en rapport avec les colorants couramment utilisés en hydrologie. *

Par contre pour mener à terme ce genre d'étude il faudrait y associer des chimistes, voire des microbiologistes, des sédimentologues, d'Association pour l'étude des Traceurs en Hydrologie (ATH) ... aussi, un tel programme ne peut être envisagé qu'à un échelon

national avec comme tutelle financière, le Ministère de l'environnement et/ou celui de la recherche ?

Orientation bibliographique succincte :

- BENOIT-GUYOD J.L, ROCHAT J., ALARY J., ANDRE C., TAILLANDIER G. (1979) *Corrélations entre propriétés physico-chimiques et écotoxicité de traceurs fluorescents xanthéniques. Toxicological european research, vol. II, n° 5, 6 p..*
- LICHACZ R. (1985) - *The toxicology of fluorescein dye. - ASF Newsletter, n° 106, p. 9-10 - éd. Australian caver, Broadway.*
- LICHACZ R. (1987) - *The toxicology of fluorescein dye. - Australian caver, n° 113, p. 13-15 - éd. Australian caver, Broadway.*
- MOLINARI J., ROCHAT J. (1978) - *Synthèse bibliographique sur la toxicité des substances fluorescentes utilisées en hydrologie. - Int. journal speleol., p. 269-277 - Directeur publication A. Bini, Italy.*
- ROCHAT J., DEMENGE P., RERAT J.C. (1978) - *Contribution à l'étude toxicologique d'un traceur fluorescent : la Rhodamine B. - Tox. Eur. Res. Vol I, n° 1, p. 23/26.*
- SMART P.L. (1984) - *A review of the toxicity of twelve fluorescent dyes used for water tracing. - NSS bull. vol. 46, n° 2, pp. 21-33 (Water tracing special issue) - éd. Nat. speleol soc., Alabama, USA.*

Réponse

Il serait utile que ces informations soient diffusées ou publiées auprès des hydrogéologues mais aussi auprès des gestionnaires de l'eau (administrations, agences...) et des spéléologues (qui sont surtout utilisateurs de traceurs fluorescents).

J'ignore si le Ministère de l'environnement allemand a connaissance de ces études de J. Rochat, sinon il faudrait les avertir.

Intervenant

P. BERARD

BRGM / DR

1039 rue de Pinville - 34000 Montpellier

Question ou intervention

Connaissance, recensement des traçages réalisés par les spéléologues ?

Réponse de R. LAURENT au nom de la Fédération française de spéléologie

Cette demande soulève deux aspects :

- recensement à l'échelon national des traçages antérieurs qu'ils soient positifs ou négatifs avec toutes les réserves à accorder aux résultats selon les opérateurs. S'il y a une volonté des pouvoirs publics "Cellule Eau" du Ministère de l'environnement par exemple, ou des instances nationales ayant en charge les eaux souterraines (Agences, DIREN,...), voire des collectivités territoriales (Région, département, ...), la Fédération française de spéléologie (FFS - commission documentation) peut réaliser ce travail à l'exemple de celui effectué sur le bassin RMC comme le soulignait M. ALBINET dans son exposé. Le

Comité de bassin RMC a fait réaliser en 1986 le catalogue de tous les traçages réalisés sur le bassin, mise à jour en 1995. Les intervenants ont pu ainsi avoir accès aux données des Services publics (DIREN, DDASS, DDAF, Université, CNRS, BRGM,...) et bénéficier de la collaboration spontanée de quelques bureaux d'étude.

- recensement annuel des opérations de traçage effectuées par les spéléologues affiliés à la FFS. La commission documentation de la fédération peut regrouper facilement ces informations dans le cadre des analyses bibliographiques françaises qu'elle réalise pour le Bulletin bibliographique spéléologique (Speleological abstract) édité par l'Union internationale de spéléologie. Ces données pourraient être présentées sous la forme d'un tableau synthétique édité dans une de nos revues fédérales (Spelunca et/ou Karstologia). Ce tableau pourrait ensuite faire l'objet annuellement d'un reprint publié dans la revue Hydrogéologie éditée par le BRGM, par exemple.

Pour conclure sur les traçages réalisés par les spéléologues, même s'ils sont parfois "empiriques" au niveau des résultats, je tiens à souligner que ceux-ci orientent les travaux hydrospéléologiques, et les résultats servent bien souvent d'approche pour des recherches hydrogéologiques. Ces opérations de traçage contribuent également à mieux connaître les interactions au niveau des agressions que subit le milieu karstique. Le spéléologue, la FFS n'ont jamais eu la prétention de se substituer à un bureau d'étude.

Pour information et bibliographie éventuelle :

- aut. varia. (1989) - *Protection des cavernes et du milieu karstique*. - Spelunca n° 35, 100 p., éd. FFS Paris (n° thématique voir p. 80 à 87).
- LAURENT R. (1991) - *Travaux et réponses que peuvent apporter les spéléologues aux collectivités territoriales*. - Spelunca Mémoires n° 19. *Les eaux souterraines en milieu calcaire, actes du XIX^e cong. nat. spéléol., Montpellier 1991, p. 153-160, éd. FFS-CDS Hérault.*

Intervenant

Cl. VIALA

Fédération Française de Spéléologie
3, Impasse du Square - 34820 TEYRAN

Question ou intervention

Historiquement, les spéléologues effectuent des traçages depuis très longtemps. Ils sont à l'origine de la connaissance que l'on peut avoir sur la plupart des systèmes. Cette méthode est nécessaire à leurs investigations et ils souhaitent la poursuivre. Néanmoins conscients des problèmes de rémanence de certains secteurs suite aux actions de divers intervenants, il y a lieu de définir une méthodologie adaptée, satisfaisante à tous.

Les spéléologues détiennent des inventaires des traçages qu'ils effectuent. Il faut en faire la demande, soit auprès de leurs auteurs, soit auprès des CDP (Comités Départementaux de Spéléologie). Inventaire RMC réalisé en collaboration avec les FFS.

Un projet de collaboration efficace reste à définir et à mettre en place avec la FFSpéléologie.

Le traçage naturel des aquifères karstiques. Les apports de la chimie des eaux et des isotopes du milieu.

M. BAKALOWICZ (1)

(1) chargé des programmes de recherches CNRS-BRGM en hydrogéologie karstique,
CNRS, GBE, Université de Montpellier 2, Case 057, F-34095 Montpellier CEDEX 5
BRGM, Direction de la Recherche, 1039 rue de Pinville, F-34000 Montpellier

Résumé

Les écoulements dans un système karstique, comme dans tout hydrosystème, peuvent être analysés par l'étude du transport de matière soit artificiel (expériences de traçage), soit naturel (hydrochimie, isotope du milieu, hydrobiologie). Il existe un assortiment varié de marqueurs naturels, chimiques et isotopiques, permettant de suivre l'eau dans son parcours souterrain, pour en reconstituer l'histoire : l'origine des eaux, les conditions d'écoulement (écoulement en zone non saturée, en charge ou à surface libre) et le temps de séjour dans l'aquifère. L'hydrogéochimie permet d'analyser le fonctionnement des systèmes karstiques au travers des processus de transport de matière.

La complexité de la structure des systèmes karstiques, déterminée par leur degré d'évolution et par leur histoire géologique et géomorphologique souvent longue, se traduit dans leur fonctionnement. C'est pourquoi il est nécessaire d'étayer réciproquement les conclusions de l'approche géochimique notamment sur celles de l'approche hydrodynamique, qui analyse le fonctionnement au travers des processus de transfert d'énergie.

En outre, le suivi de teneurs en ions minéraux majeurs et mineurs suffit souvent à caractériser les principales sources de pollution et à quantifier leur importance.

Quelques exemples illustrent cette approche et montrent les conséquences en matière de choix de site d'exploitation et de définition de la vulnérabilité de l'aquifère.

Dans le karst, l'altération de la roche et la transformation des paysages de surface et souterrains qui en résulte sont, pour l'essentiel, la conséquence de processus de dissolution et de transport. De ce fait, l'eau joue deux rôles complémentaires : celui d'un *agent chimique*, dissolvant les minéraux et les matières organiques ; celui d'un *agent de transport* de matière et d'énergie. Ces deux rôles se combinent en une seule information globale : l'information hydrogéochimique. Par conséquent, cette information apportée par l'eau est double : une information chimique, relative aux lois de la chimie des solutions, et **une information hydrogéologique**, fixée par la nature et le fonctionnement du système étudié. Ainsi, sur la base des connaissances de la chimie des solutions, en particulier tout ce qui concerne la mise en solution des carbonates et leur précipitation éventuelle, il est possible de remonter à l'information hydrogéologique proprement dite.

L'hydrogéochimie offre un ensemble d'outils qui permettent d'identifier les systèmes karstiques, de définir leur fonctionnement et d'en déduire la structure de leurs écoulements et des vides qu'ils ont créés. Or, les systèmes karstiques présentent le plus souvent une structure complexe, déterminée par leur degré d'évolution et par leur histoire géologique et géomorphologique souvent longue. Cette complexité s'exprime dans leur fonctionnement. Aussi, en général, aucune approche ne suffit en elle-même pour analyser le fonctionnement du système et l'interpréter pour en déduire la structure. C'est pourquoi il est nécessaire d'étayer réciproquement les conclusions de l'approche géochimique en les confrontant avec celles de l'approche hydrodynamique, qui analyse le fonctionnement au travers des processus de transfert d'énergie.

Les marqueurs naturels : informateurs du fonctionnement et/ou de la structure

Du fait de l'existence d'axes de drainage rapide dans la zone d'infiltration et d'une structure drainante dans la zone noyée, des eaux possédant des histoires très différentes s'écoulent côte à côte et se succèdent aux sources en se mélangeant peu ou mal. C'est ainsi que les caractéristiques chimiques et isotopiques des eaux d'aquifères karstiques peuvent tour à tour informer sur le fonctionnement (temps de séjour, conditions d'écoulement) et sur la structure (origine spatiale de l'eau, marquage d'activités humaines) du système karstique.

Ne seront abordés ici que les substances minérales majeures et mineures, accessibles par des méthodes simples et classiques, ainsi que les isotopes de l'eau et de certains éléments en solution.

Les marqueurs de temps de séjour

Les temps de séjour dans les aquifères karstiques sont globalement très courts en comparaison de ceux observés dans tous les autres aquifères. Les traçages artificiels donnent une idée de ces temps : de quelques heures à quelques semaines. Le karst se distingue en outre clairement des autres aquifères par le fait que des eaux à temps de séjour notablement différents peuvent se succéder aux sources sans relation ou sans logique apparente.

Le système calco-carbonique (pH, alcalinité, calcium et magnésium, CO₂ dissous) permet de révéler des *eaux à temps de séjour court* dans la partie carbonatée du système karstique. A partir des mesures du pH, de l'alcalinité, de la dureté totale et, si possible, de la composition chimique en éléments majeurs et mineurs, il est possible de caractériser, par le calcul, l'état de la solution par rapport à l'équilibre des réactions du système calco-carbonique. L'indice de saturation de la calcite, ou dpH (écart entre le pH mesuré et le pH d'équilibre de la solution pour la calcite), définit cet état : des valeurs négatives indiquent un temps de contact inférieur à 2 ou 3 semaines de l'eau avec la roche calcaire, alors que des valeurs nulles caractérisent des eaux à temps de séjour plus long, supérieur à 2 à 3 semaines (Bakalowicz, 1979, 1980).

Le magnésium, la silice et le sodium peuvent caractériser des *eaux à temps de séjour plus long*, de quelques semaines à plusieurs mois. Cependant, ces ions sont aussi liés aux formations géologiques (dolomies, sédiments détritiques argileux ou sableux). C'est plus l'évolution temporelle de leur teneur au cours du temps que la valeur absolue elle-même qui

fournit un indice de la longueur du temps de séjour. L'échange de cations entre le calcium et le magnésium dissous et le sodium et le potassium de sédiments argileux, constituant fréquemment des colmatages karstiques, est un marqueur de temps de séjour long ; il est intéressant de se référer à l'**indice d'échange de cations** (iec), défini par Schoeller (1962) comme étant le déséquilibre entre les teneurs en chlorures, apportés par les précipitations et éventuellement les eaux usées, et celles en sodium et en potassium, fournis à la fois par les précipitations et les eaux usées et par les échanges de cations sur les argiles.

Le tritium, l'un des isotopes du milieu classique en hydrogéologie, est *un marqueur de temps très longs* pour ce qui concerne la plupart des circulations souterraines en milieu karstique. En effet, compte tenu de sa période (12,26 ans) et des importantes variations dans les pluies depuis les explosions nucléaires atmosphériques du début des années soixante, les teneurs en tritium permettent de distinguer des eaux ayant résidé plusieurs années et même quelques dizaines d'années. C'est ainsi que des aquifères karstiques de grandes dimensions et à réserves importantes laissent parfois s'écouler en cours d'été des eaux marquées soit par des teneurs très faibles (Bakalowicz et Olive, 1969), soit par des teneurs plus fortes (Blavoux *et al.*, 1980), selon les années d'observation.

Les marqueurs des conditions d'écoulement

Le système calco-carbonique permet de révéler des eaux ayant subi *un échange gazeux dans l'aquifère karstique*. En effet, l'état de la solution par rapport à l'équilibre des réactions du système calco-carbonique peut informer sur un éventuel départ du CO_2 de la solution, par l'indice de saturation de la calcite, ou dpH , et par la pression partielle équilibrante en CO_2 , ou pCO_2 . Des valeurs positives du dpH indiquent un dégazage, non ou seulement partiellement compensé par une précipitation de calcite ; la valeur de la pCO_2 permet d'évaluer cette perte. *Les écoulements dans la zone non saturée* des karsts, observables dans les grottes, sont souvent caractérisés par un fort dpH et une pCO_2 modérée. C'est la raison pour laquelle se développent les concrétionnements souterrains. Ce dégazage intervient non seulement dans les cavités, mais aussi à l'intérieur même de la roche, où il caractérise l'écoulement diphasique (Fleyfel et Bakalowicz, 1980 ; Bakalowicz, 1996).

Dans la zone noyée, les écoulements à surface libre peuvent aussi être soumis à un dégazage notable. Lorsque le parcours souterrain en écoulement à surface libre est long, il arrive même que l'eau ait perdu l'essentiel de son CO_2 et de sa charge en carbonates dissous, comme c'est le cas par exemple de la source de l'Agly (Kuhfuss, 1981). Ce caractère est important à connaître lorsqu'il s'agit d'envisager l'exploitation de l'aquifère par pompage dans une source ou dans le drain en amont. En effet, si l'écoulement est à surface libre, les chances sont fortes pour que le pompage fasse apparaître un seuil hydraulique avec un rabattement faible, pour un débit proche du débit naturel. En revanche, si l'écoulement est en charge, dans un drain qui descend assez profondément sous le niveau de la source, le pompage peut autoriser un rabattement notable, permettant une exploitation à un débit supérieur au débit naturel (surexploitation temporaire). Précisément, l'état d'équilibre des carbonates en solution, étudié pour des conditions hydrologiques variées, indique si l'écoulement s'effectue à surface libre ou en charge.

Les marqueurs de l'origine

L'origine spatiale de l'eau à l'intérieur du système karstique peut être marquée soit par des processus typiques du site, soit par des sources localisées produisant ces marqueurs. **Les marqueurs de processus localisés à la zone proche de la surface** (sols et zone épikarstique) sont *l'ion chlorure*, typique d'une reconcentration par l'évapotranspiration, *l'ion potassium*, qui au contraire subit un appauvrissement considérable dans les sols, *du CO₂*, produit par l'activité biologique, et dans certains cas, un appauvrissement de l'eau en *ion sulfate*, mis en évidence parallèlement à la production du CO₂ (Bakalowicz, 1979, 1980).

Certains marqueurs sont caractéristiques **de processus liés à un contact prolongé de l'eau avec des sédiments colmatant le karst** : *la silice, le sodium et le potassium par échanges de cations*. Ces colmatages peuvent exister aussi bien dans la zone d'infiltration, à proximité de la surface, que dans la zone noyée, en profondeur.

Les systèmes karstiques possèdent fréquemment une modalité particulière d'alimentation de leur aquifère : des écoulements de surface allogènes sur des terrains non carbonatés constituent à partir de pertes une infiltration concentrée, initiant souvent une partie des axes de drainage de la zone noyée. **Les marqueurs de ces eaux d'infiltration concentrée** sont les ions typiques des formations géologiques favorisant le ruissellement (*sulfate, silice, sodium et potassium*) et la rareté de ceux provenant des carbonates (*calcium et magnésium*). Récemment, les isotopes du strontium, par *le rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr*, sont apparus comme un marqueur intéressant susceptible de faire la part entre les eaux ayant circulé sur ou dans des formations de socle et celles liées aux formations sédimentaires (Faillat *et al.*, 1994 ; Plagnes *et al.*, 1996) ; le recours à cette méthode devrait cependant être limité soit aux mélanges binaires les plus simples, soit au cas où aucun des pôles ne présente une très forte abondance en strontium. Dans le cas des eaux ayant lessivé des évaporites, comme les formations du Trias, les apports en strontium sont considérables pour l'un des pôles, ce qui ne permet pas d'appliquer pleinement la méthode.

Enfin, *les isotopes du milieu (¹⁸O, ²H)* sont des marqueurs de processus localisés : l'évaporation en surface provoque un fractionnement différent pour l'oxygène-18 et pour le deutérium ; la température, liée à l'altitude de l'infiltration, est responsable d'une discrimination qui permet de définir *l'altitude moyenne de recharge d'un système karstique* (Bakalowicz *et al.*, 1974 ; Blavoux, 1978 ; Blavoux *et al.*, 1980).

Par ailleurs, **les marqueurs d'activités anthropiques** permettent aussi d'identifier l'origine spatiale de l'eau, ainsi que parfois les modalités d'introduction dans l'aquifère. Les activités agricoles fournissent classiquement *nitrates, potassium et sulfates*, par les engrais, ainsi que *chlorures et bactéries*, par les élevages. De même, les rejets d'eaux usées enrichissent les eaux en *chlorures, sodium, nitrates, nitrites et ammonium, bactéries et bore*, le salage des routes, *chlorures et sodium*. Lors de l'étude des ressources en eau du karst du Larzac, il a pu être établi un bilan des apports liés à chacune de ces activités, de même qu'ont pu être expliquées les différences observées dans les variations temporelles en chlorures et en nitrates, par des conditions différentes d'introduction (Bakalowicz *et al.*, 1996). Les isotopes de l'azote

permettent enfin de distinguer l'origine de l'azote et les processus subis par l'azote minéral, comme dans tout aquifère (Mariotti, 1994).

Il est évident que bien d'autres substances dissoutes sont susceptibles de marquer l'origine des eaux d'un système karstique et de fournir des informations complémentaires précieuses. Les exemples cités brièvement s'appuient sur des substances minérales classiques (majeures et mineures), faciles à doser.

Signification des variations temporelles du chimisme aux sources karstiques

Au cours et à la suite des crues, les sources karstiques présentent des variations plus ou moins complexes et d'amplitude variable de leur composition chimique. Ces variations sont l'expression à la fois de l'hétérogénéité spatiale de l'aquifère, c'est-à-dire de sa structure, et de processus particuliers. Elles traduisent le fait qu'il existe dans l'aquifère des eaux possédant des histoires différentes (temps de séjour, conditions d'écoulement, stockage près de la surface ou dans la zone noyée, etc.) et que ces eaux sont plus ou moins bien mélangées. Les variations du chimisme d'une source au cours des crues répondent à un même schéma, *le chimiogramme*, qui se répète d'une crue à l'autre.

Un chimiogramme, présentant une forte diminution de la minéralisation lors du maximum de crue ou au cours de la décrue, est typique de l'existence d'écoulements rapides à très rapides dans la zone noyée, donc de l'existence d'un drainage bien développé. Cependant, il semble qu'une telle réponse, semblable à celles observées dans les rivières de surface, ne soit pas caractéristique uniquement des systèmes karstiques binaires, alimentés par des écoulements de surface.

Plusieurs types de réponses sont actuellement connus, sans qu'il soit pour le moment possible d'associer le type de chimiogramme à la présence d'un stockage important ou à l'existence d'un drainage bien développé entre des pertes éventuelles et la source. Construit à partir des ions majeurs, bicarbonates, calcium et magnésium, mineurs, chlorures et nitrates, et des données relatives à l'équilibre calco-carbonique (dpH et pCO₂), *le chimiogramme permet de caractériser le degré de fonctionnalité du drainage karstique dans l'aquifère*. Les travaux en cours (Plagnes, 1996) devraient répondre à ces questions et fournir une méthode d'analyse supplémentaire.

L'existence d'un drainage karstique ne permet plus le mélange des eaux circulant dans l'aquifère, comme cela se produit dans les aquifères poreux ou fissurés. Ainsi, il a été démontré (Bakalowicz, 1976) que *la distribution de fréquence des valeurs de conductivité de l'eau d'échantillons prélevés chaque semaine pendant un cycle hydrologique est un descripteur du fonctionnement du système karstique*. Les sources des aquifères carbonatés poreux ou fissurés présentent une distribution unimodale et peu dispersée. Dès qu'une structure de drainage commence à se manifester dans le fonctionnement de l'aquifère, certaines eaux tendent à s'individualiser et à ne pas se mélanger aux autres ; il apparaît alors

différentes familles d'eau plus ou moins distinctes selon le degré de développement du réseau de drainage (fig. 1).

Cette méthode peut être aisément mise en oeuvre soit à partir de mesures ponctuelles de la conductivité, de préférence bien réparties au cours du cycle, soit sur la base d'enregistrements de conductivité, comme cela est réalisé maintenant. Il s'agit là d'une *méthode de caractérisation de l'aquifère*, au même titre que les méthodes hydrodynamiques.

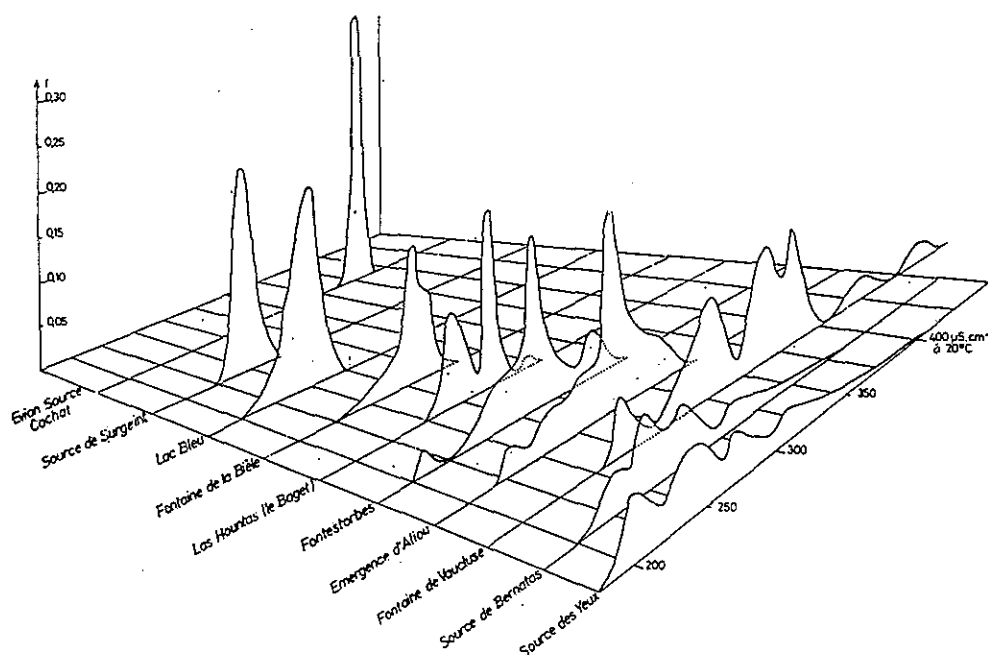


Figure 1. Distribution de fréquence de la conductivité des eaux de sources d'aquifères carbonatés poreux (Evian Cachat), fissurés (Surgeint et Lac Bleu) et à drainage karstique plus ou moins fonctionnel.

Quelques exemples

Evolution du chimisme au cours d'un pompage

Une expérience de pompage a été réalisée dans un gouffre (la Peyrère) du système karstique expérimental du Baget (Pyrénées centrales) ; ce gouffre correspond à un système annexe au drainage (SAD), proche du drain. L'expérience a consisté en trois pompages successifs à un débit de l'ordre de 250 l/s, pour un débit naturel à la source de 150 l/s (BRGM, CNRS, 1992).

L'évolution du chimisme des eaux pompées au cours de chaque expérience suit une évolution qui se répète d'un pompage au suivant. Cette évolution traduit la participation, au cours de chaque pompage, d'eau plus minéralisée, caractéristique d'une partie moins bien drainée de la zone noyée, au contact entre les calcaires et les formations imperméables. Le chimisme de ces eaux est typique de celui des SAD de rive droite du drain, et se distingue bien de celles du drain, qui présentent un temps de séjour plus long dans l'aquifère.

La contribution de ces eaux croît d'un pompage au suivant. Les pompages successifs sollicitent donc de plus en plus des eaux qui, jusque-là, participaient peu à l'écoulement vers la source. Ce fait montre aussi que la réserve est soumise à une hétérogénéité géochimique, comme l'avait entre autres montré l'étude des crues à la source. Les eaux moins minéralisées extraites au début du second pompage témoignent de l'alimentation du SAD pompé par le drain qui, à ce moment-là, reçoit surtout des eaux à temps de séjour court, moins minéralisées, probablement du fait d'une petite crue qui avait précédé l'expérience.

Il faut noter que le retour rapide, après l'arrêt du pompage, à des conditions normales d'écoulement à la source n'est pas du tout associé à un retour aux conditions géochimiques initiales, aussi bien à la source que dans le gouffre. C'est en particulier évident entre le second et le troisième pompages, pourtant séparés par plus de 24 heures. Ce fait traduit une modification durable des écoulements au sein de la zone noyée.

Pour ce qui est de la source du Baget, lors du premier pompage, son chimisme évolue d'abord conformément à l'évolution pendant la décrue. Mais, avec le tarissement de la source, l'eau qui émerge, alors à faible débit (5 l/s), présente un chimisme notablement différent : il est marqué par des teneurs plus fortes en chlorures, avec une alcalinité et un dpH plus élevés, une pCO_2 et un rapport Mg/Ca plus faibles. Ce sont les caractéristiques du chimisme des SAD de rive gauche du drain, tel qu'il ressort de l'étude en crue des écoulements des trop pleins, où l'alcalinité, plus forte, est associée, en fonctionnement normal, à une pCO_2 plus forte. Mais, ici, la pCO_2 est plus faible et associée à un dpH nettement positif ; c'est la preuve d'un fort dégazage dans le drain. Par conséquent, les écoulements alimentant la source en fin de pompage s'effectuent très probablement dans un drain largement dénoyé. Ce fait prouve que le drain, au moins dans sa partie proche de la source, est situé à faible profondeur.

Lors du second pompage, l'eau qui émerge à la source, dès le début, présente les mêmes caractères chimiques que l'eau s'écoulant à la fin du premier pompage, bien que la source ait repris son fonctionnement normal. Ce fait prouve que les écoulements dans la zone noyée, au moins en aval du SAD pompé, ont été perturbés de façon durable, au moins jusqu'à la fin du second pompage. Enfin, lors du troisième pompage, l'eau qui émerge à la source est nettement marquée par des faibles teneurs en sulfate, sodium, silice et magnésium, ce qui caractérise bien les SAD de rive gauche du drain.

Par conséquent, au cours de l'expérience, l'évolution du chimisme des eaux de la source traduit une progression d'eaux d'origines différentes :

- des eaux identiques à celles qui s'écoulent dans le drain, pendant la décrue, et dont les caractères sont proches de ceux des SAD de rive droite (type Peyrère) ;

- des eaux à caractères mixtes, plus minéralisées en bicarbonates et chlorures (caractérisant les SAD de rive gauche), mais à teneurs voisines en sulfates, sodium, silice et magnésium (caractérisant les SAD de rive droite) ;
- des eaux à caractères très proches de ceux des SAD de rive gauche, à faibles teneurs en sulfates, sodium, silice et magnésium.

Cette progression peut être interprétée de la façon suivante. Lors de la crue qui a précédé le pompage, certains des SAD de rive gauche, proches de la source, ont été alimentés, en partie, par l'eau du drain, provenant de la partie la plus capacitive du karst noyé (SAD de rive droite, type Peyrère). Lors du pompage, cette eau s'est écoulée, sans être mélangée à celle habituellement fournie par les SAD de rive droite, situés un peu plus en amont ; puis, elle a été suivie par l'eau caractéristique de ce secteur, stockée dans une partie plus lointaine ou moins transmissive et émergeant lors du dernier pompage.

L'évolution du chimisme des eaux pompées dans le gouffre de la Peyrère et de celles émergeant à la source pendant l'expérience montre clairement, ou confirme, que :

- la zone noyée est constituée, au moins dans la partie proche de l'exutoire, de réserves distinctes les unes des autres, les SAD, présentant des caractéristiques chimiques propres,
- l'axe de drainage est situé à proximité de la surface et est dénoyé lors du pompage, au moins à l'amont immédiat de la source,
- la partie capacitive de la zone noyée est bien développée, au moins pour l'aval, en rive droite du drain, dans le secteur de la Peyrère,
- les pompages successifs conduisent à solliciter des eaux de la réserve à temps de séjour de plus en plus long,
- les pompages modifient de façon durable les relations initiales entre les différents SAD et le drainage.

Le fonctionnement des systèmes karstiques du Larzac

Les systèmes karstiques du Larzac septentrional ont été étudiés dans le but de définir les conditions de la protection et de la gestion de leurs ressources en eaux souterraines. Celles-ci sont en effet soumises directement ou indirectement à des conflits d'usages qui menacent leur qualité et leur pérennité.

L'étude détaillée du fonctionnement de ces aquifères, dans leur cadre régional, a fait apparaître des caractères apparemment contradictoires. Ce sont :

- 1) d'après les résultats de l'étude hydrodynamique, une zone noyée au stockage considérable et au drainage karstique généralement assez peu fonctionnel, mais parfois effectif ;
- 2) d'après les données fournies par l'hydrogéochimie et les traçages artificiels, des possibilités d'écoulement rapide depuis la surface, associées à des temps de séjour assez longs, parfois liés à un stockage proche de la surface, dans une zone épikarstique mal drainée par le karst ;

3) d'après le cadre géomorphologique et géologique rendant compte de l'évolution récente, un ensemble karstique soumis à une longue évolution, et marqué par la présence de sédiments de couverture et de colmatage.

Aussi, la question se pose de savoir si le fonctionnement actuel particulier de tous ces aquifères, qui présentent tous les mêmes caractères, ne paraît pas vraiment karstique du fait :

- de conditions particulières de développement (par exemple, une « vitesse de karstification » en profondeur réduite),
- d'une évolution très récente, liée à des mouvements de surrection, du niveau de base, auquel le drainage n'a pas encore pu s'adapter,
- d'un colmatage généralisé du drainage karstique par des sables dolomitiques, abondants en surface, et/ou par des argiles résiduelles, les argiles à chailles.

Les données géochimiques fournies par toutes les sources, en particulier celles concernant le magnésium, le sodium, le potassium et la silice, montrent clairement que les caractères géochimiques de chacun des systèmes karstiques sont déterminés uniquement par le cadre géologique du système et par les apports anthropiques, auxquels il est soumis. En revanche, il n'existe aucun caractère géochimique traduisant les effets d'un colmatage sédimentaire généralisé (augmentation des teneurs en magnésium, sodium, potassium et silice).

Dans ces conditions, le fait que la fonctionnalité du drainage karstique de tous ces systèmes soit limitée doit être recherché dans leur degré d'évolution, défini à une échelle régionale. La conséquence essentielle en matière de gestion de l'espace et de protection des ressources en eaux souterraines réside dans *l'absence de protection qu'auraient assurés un recouvrement et un colmatage généralisés.*

Le marquage des eaux par les activités humaines sur le causse du Larzac

Le bilan des nuisances sur le bassin de l'Espérelle peut être examiné au travers du bilan de deux marqueurs classiques, les ions chlorures et nitrates. Les chlorures sont apportés naturellement uniquement par les précipitations ; c'est un ion conservatif, c'est-à-dire qu'il n'est jamais impliqué dans aucune réaction physico-chimique ou biochimique et qu'il est très soluble. L'ion NO_3 n'est pas conservatif, puisqu'il subit une dénitrification ; mais il est caractéristique de pollutions domestiques et agro-pastorales.

Les apports de chlorure sont dus à trois sources de pollution bien identifiées :

- le salage de la RN 9 (120 t de NaCl, soit 73 t de Cl, épandus entre Millau et L'Hospitalet pendant l'hiver 1992-1993 dont une partie seulement concerne l'Espérelle),
- la station d'épuration de la Cavalerie (eau rejetée à 100 mg/l, soit approximativement 5 t par an, dont la totalité va à l'Espérelle),
- les troupeaux d'ovins et de bovins et l'habitat dispersé sur le causse.

L'excédent de Cl à la source de l'Espérelle peut être estimé pour 1993 à 32 t environ, par rapport à la source d'un aquifère témoin exempt de pollutions (soit 1,0 mg/l pour un débit de 1000 l/s environ). Sur ces 32 t, 5 t proviennent de La Cavalerie. Le salage de la RN 9 fournit environ 20 t de Cl, en supposant qu'il y a répartition homogène du sel le long des 25 km de la route et que 7 km de la RN 9 appartiennent au bassin d'alimentation de l'Espérelle, d'après les limites proposées. Les troupeaux et l'habitat dispersé fourniraient donc environ 7 t (32t - 25t) de Cl par an à l'Espérelle, c'est-à-dire un apport supérieur à celui de la station de La Cavalerie (1000 éq.hab.), mais nettement moindre que celui lié au salage de la RN 9.

Un bilan des nitrates apportés par l'eau à la source peut être effectué de la même façon. L'apport naturel est supposé être égal à 3 mg/l (par référence à un aquifère voisin non perturbé) ; pour un débit de l'ordre de 1000 l/s, l'apport annuel naturel est 95 t de NO₃. L'apport total réel est de 250 t (teneur moyenne : 7,9 mg/l). Les rejets annuels de la station d'épuration de La Cavalerie sont au maximum de 2 t, à condition que tout l'azote contenu dans l'eau produise des nitrates. Par conséquent, l'essentiel des apports en NO₃ à l'Espérelle (155 t) provient de l'activité agro-pastorale sur le causse.

Ces apports de nitrates correspondent, selon les données de l'Agence de l'Eau, à 6900 éq.hab. Le bassin d'alimentation de l'Espérelle possède, pour les apports azotés, environ 11600 éq.hab., en incluant tous les troupeaux. La différence entre les deux valeurs pourrait être attribuée à l'effet de la dénitrification dans l'aquifère au cours du transit des eaux souterraines ; cet effet serait de (11600 - 6900)/11600, soit 41 %.

Pour les sources de l'Homède et de Boundoulaou, les bilans sont les suivants :

- en Cl, un excédent respectivement de 11 t/an et de 3,3 t/an,
- en NO₃, 77 t/an et 40 t/an.

L'excédent en Cl à l'Homède est beaucoup plus fort qu'à Boundoulaou ; ceci paraît être dû au fait que ce dernier système n'intercepte qu'une portion réduite de la D 999 soumise au salage hivernal, au contraire de l'Homède.

Ces deux marqueurs de pollution (Cl et NO₃) sont pour le moment loin d'atteindre des teneurs qui feraient considérer les eaux de certaines des sources karstiques du Larzac comme impropres à la consommation. Ils permettent toutefois de quantifier l'importance des apports polluants, de définir leur origine et, donc, de proposer des solutions propres à protéger efficacement la ressource en eau du causse du Larzac.

Enfin, il faut insister sur le fait que, si l'ion Cl n'est pas un polluant, mais seulement un marqueur de pollution, sa présence dans les eaux naturelles n'est pas anodine. En effet, les saumures, résultant de la fusion de la glace et de la neige au contact du sel, présentent des caractéristiques chimiques particulières, comme une force ionique élevée, qui peuvent favoriser la mobilisation de certaines substances, comme des métaux. Or, la surface des routes lessivée par ces saumures peut receler des substances, présentant certains risques, à des teneurs élevées. En général, les écoulements en milieu karstique s'effectuent dans des

conditions d'aération telles que la plupart des métaux ne sont pas, ou peu, mobilisables du fait de l'abondance d'oxygène. Cependant, il faut insister sur le fait que le lessivage se produit de toute façon et qu'il existe certainement des lieux d'accumulation de ces substances. On doit craindre que dans un délai impossible à évaluer dans l'état actuel de nos connaissances une partie de ces substances accumulées deviennent mobilisables et soient entraînées jusqu'à la source, soit de façon brutale et inattendue, comme c'est le cas souvent dans le karst, soit de façon plus diffuse.

Le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et l'origine des eaux

Cette méthode isotopique est classique dans l'étude géochimique des roches ; elle permet de distinguer une origine profonde d'une origine sédimentaire. En effet, le rubidium présent uniquement dans les roches de socle accroit, par suite de sa désintégration radioactive, la teneur en ^{87}Sr . Cette méthode a été récemment introduite en géochimie des eaux afin de faire la part d'écoulements liés à des formations de socle et d'écoulements souterrains purement karstiques (Faillat *et al.*, 1994; Plagnes *et al.*, 1996).

La méthode repose sur l'établissement d'une « droite de mélange », liant le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ à l'inverse de la teneur en Sr ($1/\text{Sr}$). Cette méthode permet d'identifier les deux pôles et de définir les proportions de mélange aux différents sites étudiés. Faillat *et al.* (1994) ont appliqué, les premiers, cette méthode à des écoulements souterrains en région karstique dans le causse de Séverac. Ce karst des calcaires du Lias est en partie alimenté par des écoulements sur le socle cristallin. Le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est donc défini par la proportion des écoulements au contact des deux formations géologiques ; cette connaissance devrait permettre de définir les conditions de protection vis-à-vis des écoulements de surface sur le socle, avant leur entrée dans le karst. En réalité, la situation est compliquée par le fait que les eaux souterraines lessivent en partie aussi des formations triasiques qui fournissent du strontium en quantité importante.

Plagnes *et al.* (1996) ont appliqué la méthode aux eaux du champ captant de Comps, qui alimente en eau potable la ville de Nîmes. Ce champ, en nappe alluviale, est alimenté par le Gardon et par le Rhône. La méthode du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ a révélé l'existence d'apports karstiques importants et localisés ; ces apports, qui ont pu être quantifiés, n'étaient jusque-là que soupçonnés.

Conclusions

Ces quelques exemples montrent comment les marqueurs naturels permettent de caractériser les systèmes karstiques, leur fonctionnement et l'organisation de leurs écoulements souterrains. Ce sont les bases mêmes des connaissances nécessaires à la définition de leur vulnérabilité et à leur gestion. L'approche hydrogéochimique permet aussi d'évaluer les impacts des activités humaines. Du fait de la sensibilité élevée des aquifères karstiques, les effets en matière d'aménagement de l'espace, de modifications des pratiques (cultures, assainissement et traitement des effluents) peuvent être facilement suivis par des prélèvements et des analyses relativement simples.

Références

- Bakalowicz, M. (1977). Etude du degré d'organisation des écoulements souterrains dans les aquifères carbonatés par une méthode hydrogéochimique nouvelle. *C. R. Acad. Sci., Paris*, D, 284, p.2463-2466.
- Bakalowicz, M. (1979). Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse Doctorat ès Sciences naturelles, Univ. P. et M. Curie, Paris 6, Géologie dynamique et Laboratoire Souterrain CNRS. 269 p.
- Bakalowicz, M. (1980). Un précieux informateur hydrogéologique : le système chimique CO₂-H₂O-carbonate. Coll. Cristallisation, Déformation, Dissolution des carbonates, Bordeaux, nov.1980, p.11-23.
- Bakalowicz, M. (1986). De l'hydrogéochimie en karstologie. *Karst Euskadi* 86, 2, p.105-129.
- Bakalowicz, M. (1994). Water geochemistry : water quality and dynamics, p. 97-127. Gibert, J., Danielopol, D.L. and Stanford, J.A. ed., *Groundwater Ecology*. Academic Press, San Diego.
- Bakalowicz, M. (1996). La zone d'infiltration des aquifères karstiques. Méthodes d'étude. Structure et fonctionnement. *Hydrogéologie*, 4 (1995), p.3-21.
- Bakalowicz, M., Olive, P. (1970). Teneurs en tritium des eaux du Taurus occidental et de Pisidie (Turquie). *Schweiz. Zeits. Hydrol.*, 32(2), 475-480.
- Bakalowicz, M., Blavoux, B., Mangin, A. (1974). Apports du traçage isotopique naturel à la connaissance du fonctionnement d'un système karstique. *J.Hydrol.*, 23, p.141-158.
- Bakalowicz, M., Plagnes, V., Ricard, J. (1996). Land management and sustainable development of karst groundwater. The Larzac plateau (France) as an example. International Conference on karst-fractured aquifers, vulnerability and sustainability, Ustron, Sosnowiec, Poland, June, 1996.
- Blavoux, B. (1978). Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène-18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. Thèse de Doctorat de Sciences naturelles, Université P. et M. Curie, Paris. 333 p.
- Blavoux, B., Burger, A., Chauve, P., Mudry, J. (1979). Utilisation des isotopes du milieu à la prospection hydrogéologique de la chaîne karstique du Jura. *Revue Géol. dyn. Géog. phys.*, 21, p.295-306.
- BRGM, CNRS (1992). Test de pompage en aquifère karstique dans le gouffre de la Peyrère (09). Rapport BRGM R 35 924 MPY 4S 92, 42 p. + annexes.
- Fleyfel, M., Bakalowicz, M. (1980). Etude géochimique et isotopique du carbone minéral dans un aquifère karstique. Coll. Cristallisation, déformation, dissolution des carbonates, Bordeaux, Proceedings, 231-245.
- Kuhfuss, A. (1981). Géologie et hydrogéologie des Corbières méridionales : région de Bugarach, Rouffiac-des- Corbières. Thèse Doctorat 3ème cycle, Univ. P. Sabatier, Toulouse. 307 p.

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

Plagnes, V., Ben Othman, D., Joseph, C., Luck, J.M. (1996). Caractérisation des apports karstiques par les isotopes du Sr. Application au champ captant de Comps (Gard). *C. R. Acad. Sci., Paris*, sous presse.

Plagnes, V. Caractérisation du fonctionnement et de la structure des aquifères karstiques par la géochimie des eaux. Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier 2, en cours.

Schoeller, H. (1962). Les eaux souterraines. Masson, Paris. 642 p.

Viéville, J. (1983). Etude hydrogéologique du massif de l'Etang de Lers (Pyrénées ariégeoises). Thèse Doctorat 3ème cycle, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Laboratoire souterrain CNRS Moulis. 437 p.

CONFÉRENCE :

M. BAKALOWICZ

Le traçage naturel des aquifères karstiques. Les apports de la chimie des eaux et des isotopes du milieu.

Intervenant

M. BEAUDEAU

Laboratoire du Havre

Question ou intervention

Le département de géologie de l'université de Rouen en association avec le laboratoire d'analyses de la ville du Havre se sont spécialisés dans le domaine des traceurs à valeur sanitaire (bactériologie liée à la turbidité).

Remarque : en Haute-Normandie les crues sont marquées par un déficit dans les concentrations en nitrates et non l'inverse. Rapport avec le système agricole (élevage *versus* grandes cultures).

Réponse

L'évolution des teneurs en nitrates au cours des crues est très variable, non seulement d'une source à l'autre en fonction des caractéristiques du système karstique, mais aussi, pour une même source, au cours du cycle hydrologique en fonction de l'état de la réserve et du fonctionnement de l'infiltration.

Intervenant

pas de nom !

Question ou intervention

Existe-t-il des traceurs biologiques ?

Réponse

Des expériences de traçages artificiels ont été réalisées au moyen de bactériophages. Certains résultats obtenus par les collègues suisses ont été récemment publiés au Bulletin du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel.

Intervenant

J.P. FAILLAT

ISAMOR - Technopôle Brest-Iroise
29280 Plouzané

Question ou intervention

Toute méthode, même nouvelle, a des limites et un domaine d'intervention optimale. Pour des éléments proches du Strontium, ce domaine correspond à des sources à faible contraste de concentration, mais fort contraste de composition isotopique, qu'elles soient superficielles ou profondes. Un croisement des éléments et des méthodes accroît les possibilités de cette approche, notamment l'emploi des gaz dissous (CO₂, Oxygène dissous, etc.).

Réponse

En réalité, il est nécessaire de croiser *toutes* les informations entre elles, qu'elles concernent les traceurs naturels dissous et isotopiques, les traçages artificiels et l'hydrodynamisme.

Session E :

Président : Jean-Pierre Comte
Responsable du Centre Thématique Eau

Cartographie de la vulnérabilité des bassins d'alimentation des sources karstiques par une méthode multicritère

François ZWAHLEN, Nathalie DOERFLIGER

Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, Rue E-Argand 11, CH 2007 Neuchâtel, Suisse
Tél. 41 32 / 723. 26.00 (secrétariat), 41 32 / 723.26.89 (direct), fax 41 32 / 723 26 01
e-mail : François.Zwahlen@chyn.unine.ch

*Article présenté aux journées techniques italo-franco-suisse à Mulhouse,
8 au 10 mai 1995 - mise à jour octobre 1996.*

Résumé

La méthode multicritère E P I K a été établie pour cartographier de manière générale la vulnérabilité des aquifères karstiques et plus spécifiquement celle des bassins d'alimentation des sources ou captages en milieu karstique. A partir des cartes obtenues, des zones de protection peuvent être délimitées de manière relativement objective.

Basée sur l'organisation spécifique des écoulements dans les aquifères karstiques, cette méthode prend en compte 4 critères : 1) développement de l'épikarst, 2) importance de la couverture protectrice, 3) conditions d'infiltration et 4) développement du réseau karstique. Chacun de ces quatre critères est subdivisé en classes et ces dernières sont cartographiées sur l'ensemble du bassin considéré.

A l'aide d'un système d'information géographique, ces cartes sont ensuite pondérées et combinées dans le but d'obtenir une carte finale de vulnérabilité.

Cette méthode a fait l'objet de tests sur plusieurs sites en Suisse, où des problèmes de contamination des sources due à l'agriculture se posent régulièrement. Ces tests ont abouti à l'établissement de nouvelles zones de protection.

Mots-Clefs : Eaux souterraines, vulnérabilité, protection des captages, aquifère karstique, test site.

Introduction

Les aquifères karstiques sont généralement considérés comme plus vulnérables aux contaminations que les aquifères poreux. Cette caractéristique s'explique notamment par leur structure fortement hétérogène avec d'une part des perméabilités très élevées dans les conduits souterrains entourés de blocs peu perméables et d'autre part des alimentations de surface soit diffuses, soit concentrées. Cette double dualité se manifeste par un comportement hydrodynamique tout à fait caractéristique : les crues, dues à d'importantes infiltrations concentrées dans des zones très perméables sont rapides et violentes et les processus de filtration ou d'auto-épuration des polluants n'ont pas le temps de se développer comme ils se développent dans les aquifères à porosité d'interstices.

Du fait de leur fonctionnement spécifique, les aquifères karstiques requièrent une protection toute particulière. Il n'existe que peu de sources karstiques tout à fait à l'abri de pollutions. Les pollutions peuvent être d'origines diverses : naturelles (turbidité et matière organique) ou anthropogènes (bactéries fécales, pollutions industrielles ou ménagères). Elles sont le plus souvent variables au cours du temps et d'importance maximale lors de crues.

Situation actuelle

La législation suisse en matière de protection des eaux -loi fédérale de 1993- (1) exige la délimitation de zones de protection S pour tous captages importants (source ou puits) utilisés pour l'alimentation en eau potable. Ces zones appelées SI, SII et SIII sont accompagnées d'un règlement relatif à l'occupation et à l'utilisation du territoire.

Les zones de protection doivent permettre de garantir les objectifs suivants :

- Zone SI : Aucune substance polluante ne doit parvenir au captage à partir de cette zone.
- Zone SII : Cette zone a pour rôle de tenir à l'écart du captage le plus possible de germes et virus. Les substances difficilement dégradables ne doivent pas parvenir dans les eaux souterraines et en cas d'accidents dans cette zone (danger grave), un laps de temps suffisant doit être à disposition pour procéder à un assainissement.
- Zone SIII : Il s'agit d'une zone-tampon entre la zone II et le secteur de protection des eaux contigu. Les restrictions les plus importantes dans cette zone sont la limitation ou l'interdiction des constructions industrielles et de l'extraction des matériaux.

Les critères de délimitation des zones de protection en milieu karstique et fissuré diffèrent de ceux appliqués en milieu à porosité d'interstices (2) :

En milieu karstique, les trois zones de protection sont délimitées principalement à partir de l'observation de phénomènes géomorphologiques caractéristiques ; elles ne sont pas toujours contiguës. De manière générale, on peut résumer comme suit les signatures physiques de ces zones de protection :

- Zone SI : Elle comprend la zone de captage proprement dite et tous les points de pénétration préférentielle des eaux d'infiltration (dolines, zones de fissuration, etc.).
- Zone II : Elle correspond à toutes les parties du bassin-versant à partir desquelles l'eau de surface s'infiltre rapidement et gagne le captage après un court laps de temps (quelques jours). Les eaux de ruissellement à infiltration directe sont également incluses dans la zone II.
- Zone III : Elle peut être délimitée selon les mêmes critères que la zone II ; dans bien des cas, elle comprend la totalité du bassin d'alimentation.

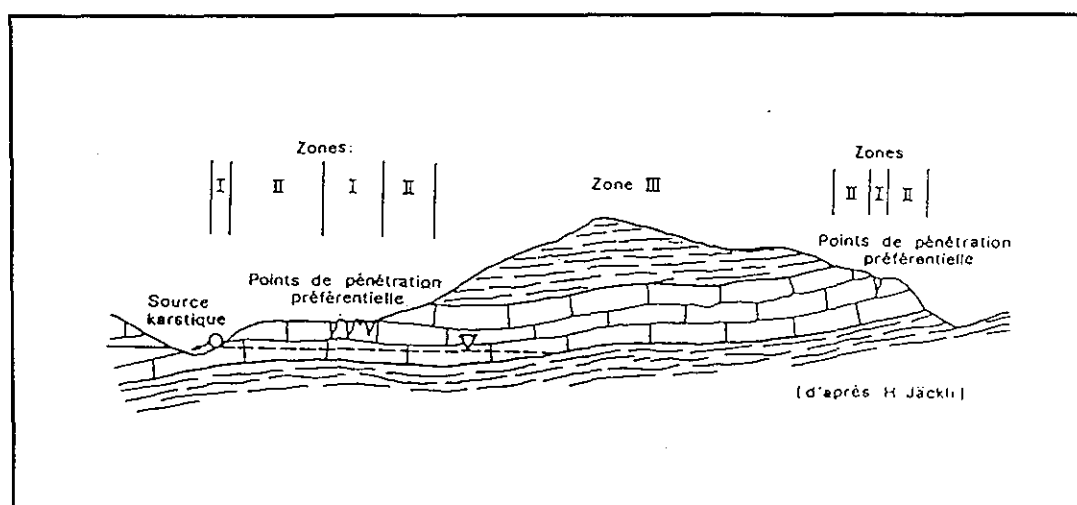


Figure 1 : Succession irrégulière des zones I, II et III pour une source karstique
(d'après H. Jäckli, (2)).

La réalisation des zones de protection de tous les captages de Suisse est pratiquement terminée aujourd'hui. On constate malheureusement que malgré ce gros effort la protection des captages en zone karstique n'est encore souvent qu'imparfaite.

Les zones de protection ne sont très souvent que partiellement efficaces. Les zones I et II sont généralement insuffisamment étendues et les zones III sont par contre de trop grande extension (quasi totalité du bassin d'alimentation). Des problèmes de qualité d'eau surviennent fréquemment (pollutions d'origine agricole ou industrielle).

Les critères prépondérants pris en compte pour la délimitation des zones S, à savoir presque uniquement des caractéristiques géomorphologiques et quelques vitesses de transit établies par des essais de traçage, souvent peu représentatifs, ne sont donc pas satisfaisants.

Vulnérabilité des sources ou captages karstiques

Définition

La vulnérabilité est une propriété intrinsèque des aquifères qui dépend de la sensibilité de ces derniers aux impacts naturels et anthropogènes (3).

C'est une propriété générale non mesurable utilisée pour caractériser, à l'aide d'informations d'origine géologique et hydrogéologique, la sensibilité des systèmes aquifères souterrains aux contaminations anthropogènes que ce soit sous forme ponctuelle ou diffuse. Les sources de contaminants telles que les décharges, les citernes enterrées à huile de chauffage ou autres, les épandages potentiels d'huile résultants d'accidents de la route et les épandages d'engrais naturels ou artificiels sont ainsi globalement pris en considération.

La vulnérabilité des aquifères karstiques par rapport à la contamination varie cependant bien sûr selon la nature du contaminant, l'organisation des écoulements, l'organisation de l'infiltration des eaux et la mobilité propre des polluants transportés vers l'aquifère (4). Elle est fortement liée au fonctionnement hydrodynamique des aquifères karstiques.

Fonctionnement du karst

Les aquifères karstiques sont caractérisés par des particularités géomorphologiques et des phénomènes hydrauliques tels que l'existence d'importantes sources, de pertes, l'absence de réseau de drainage de surface, l'existence de réseaux karstiques résultants d'une dissolution, les hydrogrammes typiques des sources (crues rapides et violentes, rapide décrue, lent tarissement), des variations de niveau d'eau simultanément rapides et lentes dans les forages proches ou éloignés et bien sûr des variations du chimisme en fonction du débit.

A partir de ces caractéristiques générales, on propose l'image suivante d'un aquifère karstique (5) : **Il s'agit d'un réseau de conduits connexes (réseau karstique) aboutissant à des exutoires drainant ou alimentant un volume de roche fissurée et fracturée de faible perméabilité.**

Des études de bilan hydraulique à l'échelle d'un bassin du karst jurassien suisse montrent qu'en moyenne 50% des pluies efficaces alimentent les blocs peu perméables assurant le débit d'écoulement des sources en période de tarissement et que les 50 % restant alimentent les drains à circulation rapides. Comme les infiltrations rapides ne transitent pas par les blocs peu perméables, cela suppose l'existence d'une part de points d'infiltration concentrés tels que des pertes reliées directement au réseau karstique et d'autre part la présence d'un épikarst. On définit l'épikarst comme une zone d'absorption très fissurée qui correspond à la détente des terrains en surface (6). Cette zone supérieure des karsts n'est pas continue ; elle peut atteindre une épaisseur de quelques décimètres voir quelques mètres et peut contenir un aquifère suspendu, qui concentre rapidement l'eau d'infiltration vers le réseau karstique (7).

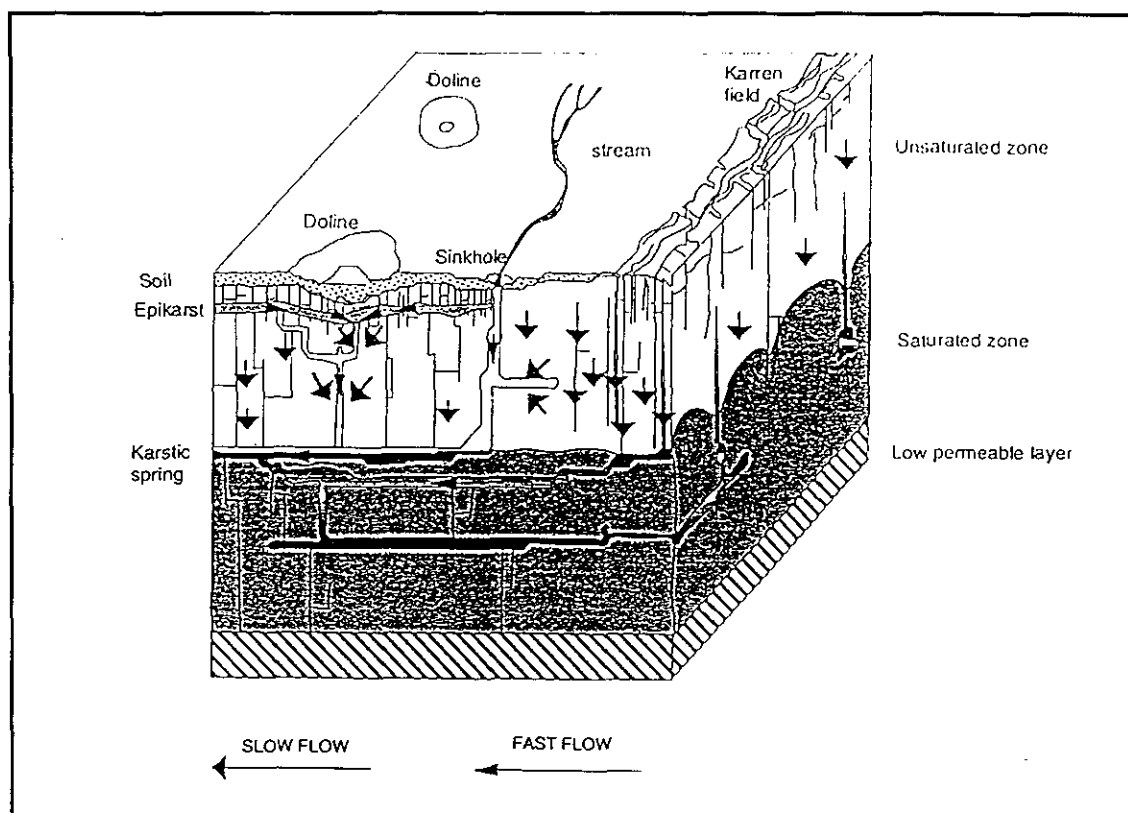


Figure 2 : représentation schématique du fonctionnement d'un aquifère karstique

Conséquences du fonctionnement du karst sur la vulnérabilité

La représentation conceptuelle de l'aquifère karstique présenté à la figure 2 permet d'élaborer un modèle cohérent du comportement hydrodynamique et des processus de transport. C'est à partir de cette représentation que l'on définit la vulnérabilité :

En étiage, l'eau des blocs peu perméables constitue l'essentiel du débit des sources. Cette eau a séjourné un temps relativement important dans l'aquifère et a transité en grande partie par des zones peu perméables. La vulnérabilité durant cette période est donc relativement faible.

En hautes eaux, plus de la moitié des eaux d'infiltration induites par un événement pluvieux traverse rapidement l'aquifère à travers d'importants conduits. Les processus de filtration sont donc faibles, mais la dilution est généralement élevée.

La vulnérabilité dépend donc des conditions d'infiltration de l'aquifère (conditions aux limites) et de la répartition spatiale de la conductivité hydraulique et du coefficient d'emménagement (champs des paramètres physiques) qui jouent un rôle primordial sur les processus d'écoulement et de transport.

Les conditions aux limites ont, selon les conditions d'infiltration, trois types de conséquences sur la vulnérabilité :

- (1) Infiltration des précipitations répartie sur l'ensemble du bassin d'alimentation :
La vulnérabilité dépendra essentiellement du temps de parcours que les eaux mettront pour atteindre le réseau karstique via l'épikarst ou les blocs peu perméables.
- (2) Infiltration concentrée des précipitations sous forme de pertes de cours d'eau :
L'infiltration concentrée des eaux de ruissellement représente un lieu à vulnérabilité très élevée, de même que tout le bassin versant de ces eaux (Figure 3 a).

(3) Infiltration à travers une couverture détritique (karst couvert) :

La vulnérabilité de ces zones dépend essentiellement de la perméabilité de la couverture et de son épaisseur. A remarquer que la perméabilité de la couverture varie en fonction de son état de saturation (Figure 3 b).

Pour prendre en compte les champs des paramètres physiques de l'aquifère, on distingue d'une part le réseau karstique et d'autre part l'épikarst :

L'aquifère sera très vulnérable s'il existe un réseau karstique et un épikarst bien développé qui lui est directement relié (Figure 3 c). L'aquifère sera moins vulnérable si l'épikarst n'est pas relié directement au réseau karstique ; enfin l'aquifère sera peu vulnérable, s'il ne contient pas de réseau karstique ni d'épikarst (il s'agit alors d'un aquifère fissuré).

Ainsi il est évident que la délimitation de zones de protection ne peut s'effectuer à partir d'un seul critère. Il est au contraire nécessaire d'utiliser une méthode multicritère tenant compte du fonctionnement spécifique du karst.

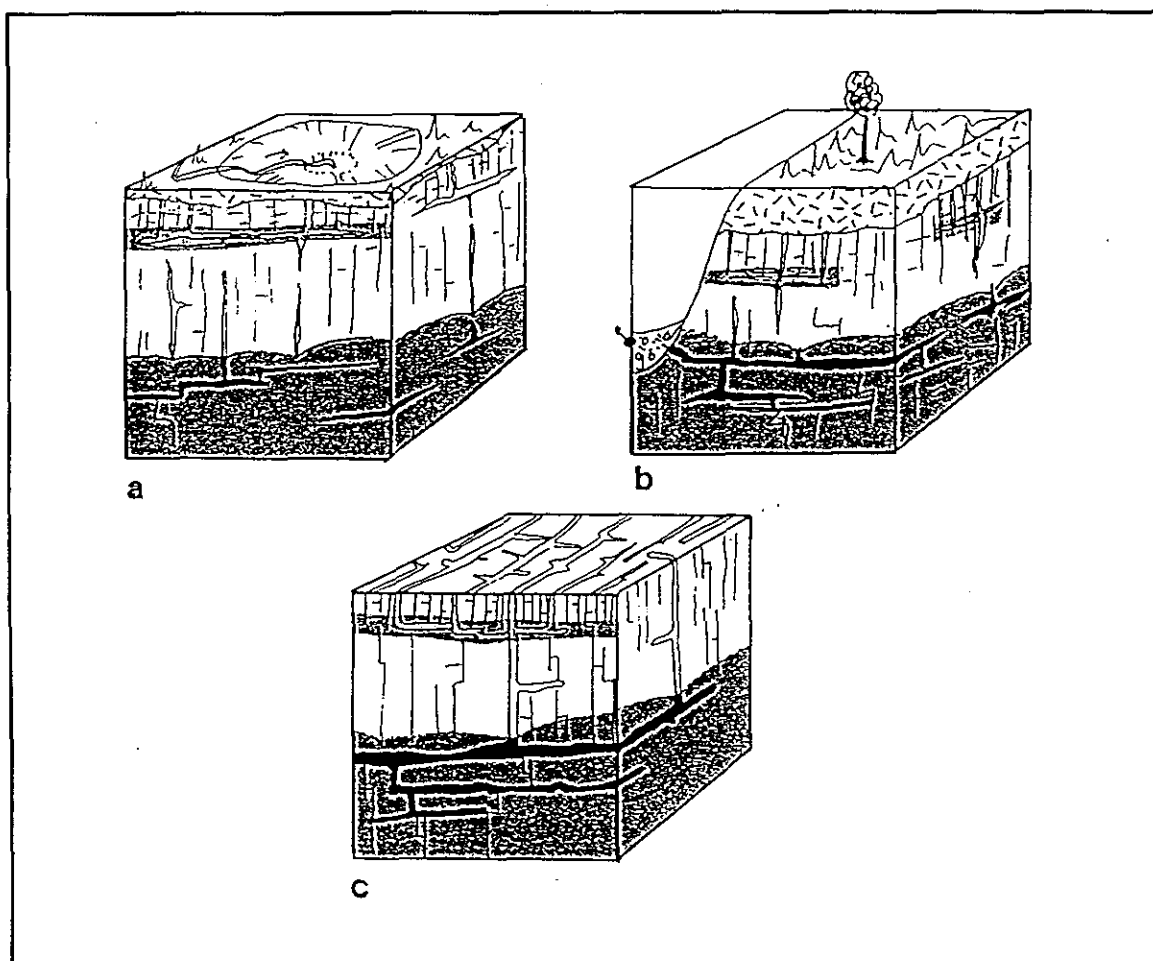


Figure 3 : quelques exemples des facteurs prépondérant pour la vulnérabilité des aquifères karstiques.

Méthode EPIK

La nouvelle méthode proposée ici pour évaluer la vulnérabilité des bassins d'alimentation des sources ou captages karstiques est une méthode multicritère à index, appelée EPIK, car elle prend en compte quatre critères : Epikarst, Protective cover, Infiltration conditions et Karstic network (8). Ces critères correspondent à quatre caractéristiques spécifiques de l'organisation d'un aquifère karstique telles que définies ci-dessus.

Cette méthode permet d'évaluer la sensibilité des eaux souterraines de régions karstiques de manière globale et relativement objective. La détermination des différentes classes de chacun des critères est effectuée à l'aide de multiples méthodes, directes ou indirectes, locales ou globales telles que essais de traçage, géophysique, étude géomorphologique, analyses des hydrogrammes, sondages à la tarière ou pelle rétro, interprétation de photos aériennes.

Après avoir déterminé les limites du bassin d'alimentation des sources considérées, on procède en quatre étapes : (1) cartographie de l'épikarst, (2) cartographie des conditions d'infiltration, (3) cartographie de la couverture protectrice, (4) caractérisation du développement du réseau karstique et attribution d'un facteur global au bassin d'alimentation.

Les différentes classes attribuées à chacun des critères E, P, I et K sont les suivantes :

Critère E : Epikarst (morphologie karstique)

- E1** - Gouffres et dépressions absorbants un cours d'eau
 - Dolines
 - Lapiez
 - Cuestas
 - Affleurements avec fracturation intense (bord de route/affleurement artificiel)
- E2** - Zones intermédiaires entre les alignements de dolines
 - Vallées sèches
- E3** - Le reste du bassin d'alimentation

Critère P: Couverture protectrice

A. Sol reposant directement sur les formations calcaires aquifères ou sur des formations détritiques grossières très perméables (Ex. éboulis, moraines latérales...)

- P1** - 0 - 20 cm de sol
- P2** - 20 - 100 cm de sol
- P3** - > 100 cm de sol

B. Formations géologiques peu perméables avec ou sans sol (Ex. limons lacustres, argiles...)

- P3** -> 100 cm au total de sol et formations géologiques peu perméables
- P4** -> sol avec d'épaisses [8mètres] formations géologiques de très faible perméabilité [limons-argileux-silteux] (à vérifier de manière ponctuelle, par exemple à l'aide de forages, sondages à la tarière manuelle ou à moteur...)

Critère I : Conditions d'infiltration

- I1** - Pertes pérennes et temporaires
- Lits et rivages des cours d'eau
- Cours d'eau pérennes et temporaires alimentant une perte ou une doline
- Cours d'eau infiltrants

A/ A l'intérieur du bassin versant des cours d'eau alimentant ou non des pertes

- I1** - Partie du bassin versant drainée artificiellement
I2 - Partie du bassin versant non drainée artificiellement et dont la pente est supérieure à 10 % pour les zones de culture, 25 % pour les prés et les champs
I3 - Partie du bassin versant non drainée artificiellement et dont la pente est inférieure à 10 % pour les zones de culture, 25 % pour les prés et les champs

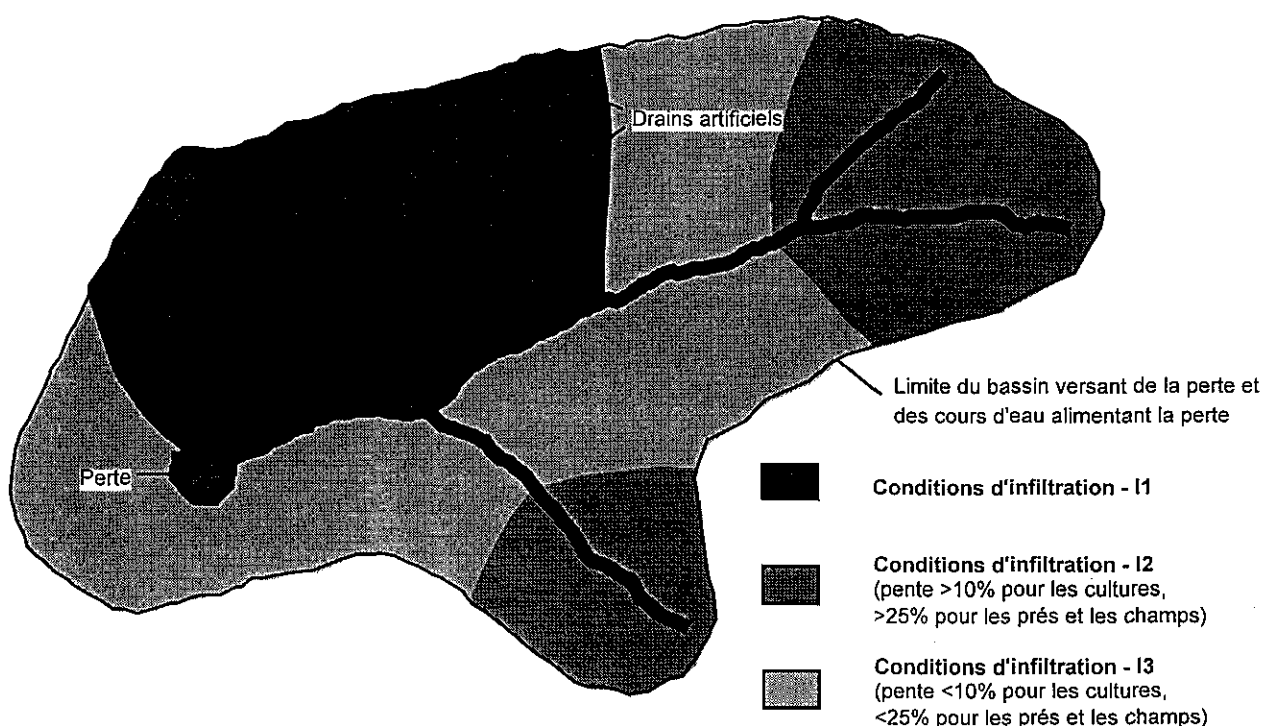


Figure 4 : Conditions d'infiltration dans le bassin versant d'une perte et des cours d'eau alimentant cette perte.

B/ Hors des bassins versants des cours d'eau alimentant ou non des pertes

- I3** - Surfaces au pied d'une pente jouant le rôle de collecteurs des eaux de ruissellement et pentes alimentant ces points bas (pentes supérieures à 10 % pour les zones de culture, 25 % pour les prés et les champs)
I4 - Le reste du bassin d'alimentation

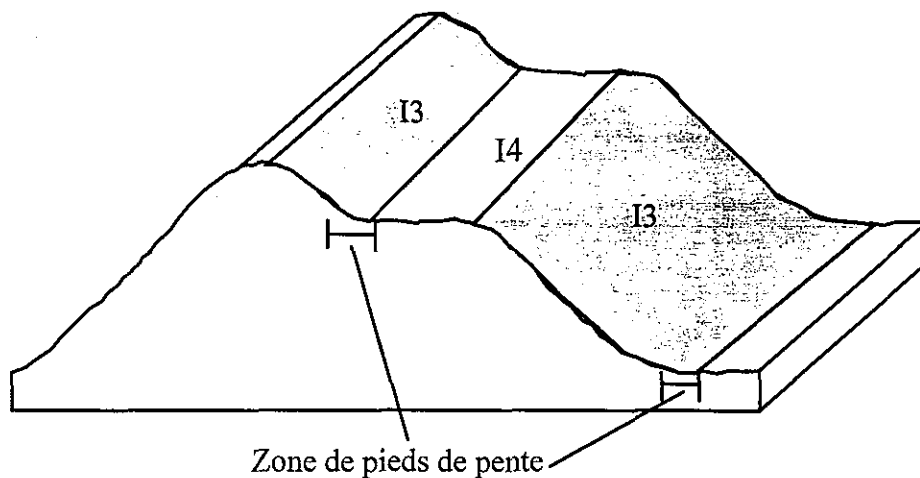


Figure 5 : Conditions d'infiltration des terrains à fort ruissellement et des zones de pieds de pente alimentées par ces terrains.

Critère K : Réseau karstique

- K1** -Réseau karstique bien développé, à conduits décimétriques à métriques très peu colmatés et bien connectés
- K2** -Réseau karstique mal développé, à drains ou conduits mal connectés ou colmatés, ou encore de dimension décimétrique et inférieure
- K3** -Exutoire en milieu poreux avec effet protecteur (à vérifier)
-Aquifère fissuré non karstifié

Pondération des différents critères

Pour chacun des critères EPIK, il est établi dans un premier temps une carte de la distribution spatiale des classes leur correspondant. Ces 4 cartes conduisent par digitalisation transformation en format image (raster) à l'attribution de valeurs de classe en tout point du bassin, et cela pour une grille de maille de 20 mètres. Dans un second temps, on combine de manière astucieuse les cartes, plus précisément les valeurs des classes digitalisées de celles-ci, afin d'obtenir une carte synthétique correspondant à une représentation affinée de la vulnérabilité des bassins de sources ou captages.

L'équation de pondération en chaque maille de la grille, prend la forme suivante :

$$F_p = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma I_k + \delta K_l$$

avec F_p : facteur de protection

E_i , P_j , I_k et K_l : valeurs des indices de chaque classe des critères

α , β , γ , δ : coefficient de pondération relative

Pour attribuer des valeurs aux coefficients de pondération, nous avons pris en compte notamment les considérations suivantes :

- Une doline recouverte d'un sol épais (E1-P3) est plus vulnérable qu'une dalle calcaire compacte surmontée d'une mince couverture pédologique (E3-P1)
- Un cours d'eau alimentant une perte (I1) est très vulnérable, indépendamment de la couverture protectrice
- Une vallée sèche (E2) est aussi vulnérable qu'un point topographiquement bas jouant le rôle de collecteur des eaux de ruissellement

En tenant compte de ces considérations et des différents essais de pondération effectués, les valeurs suivantes ont été retenues pour le calcul du facteur de protection :

1. Les indices des critères E, P, I et K sont pondérés ainsi :

E1	E2	E3	P1	P2	P3	P4	I1	I2	I3	I4	K1	K2	K3
1	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

Rappel : La valeur de pondération la plus basse correspond à la situation la plus vulnérable

Tableau 1 : Pondération des indices des critères E, P et I.

2. Les critères E et I jouant un rôle moins important sur la protection du karst que le critère P, nous leur avons attribué un poids relatif plus important (vulnérabilité plus grande). Le poids attribué au critère E par rapport au critère I est identique.

α	β	γ	δ
3	1	3	2

Tableau 2 : Poids relatifs attribués aux critères E, P et I.

3. Lors du calcul du facteur de protection F_p pour les différentes combinaisons possibles, on obtient alors les résultats suivants :

K1=1	I1=1			I2=2			I3=3			I4=4		
	E1=1	E2=3	E3=4	E1=1	E2=3	E3=4	E1=1	E2=3	E3=4	E1=1	E2=3	E3=4
P1=1	9	15	18	12	18	21	15	21	24	18	24	27
P2=2	10	16	19	13	19	22	16	22	25	19	25	28
P3=3		17	20	14	20	23	17	23	26	20	26	29
P4=4		18	21	15	21	24	18	24	27	21	27	30

K2=2	I1=1			I2=2			I3=3			I4=4		
	E1=1	E2=3	E3=4	E1=1	E2=3	E3=4	E1=1	E2=3	E3=4	E1=1	E2=3	E3=4
P1=1	11	17	20	14	20	23	17	23	26	20	26	29
P2=2	12	18	21	15	21	24	18	24	27	21	27	30
P3=3		19	22	16	22	25	19	25	28	22	28	31
P4=4		20	23	17	23	26	20	26	29	23	29	32

K3=3	I1=1			I2=2			I3=3			I4=4		
	E1=1	E2=3	E3=4	E1=1	E2=3	E3=4	E1=1	E2=3	E3=4	E1=1	E2=3	E3=4
P1=1	13	19	22	16	22	25	19	25	28	22	28	31
P2=2	14	20	23	17	23	26	20	26	29	23	29	32
P3=3		21	24	18	24	27	21	27	30	24	30	33
P4=4		22	25	19	25	28	22	28	31	25	31	34



combinaison incompatible

Tableau 3 : Valeurs possibles des facteurs de protection

Détermination des classes de vulnérabilité

La combinaison des différents facteurs de pondération propres à chaque critère selon l'équation ci-dessus permet d'attribuer en tous points du bassin d'alimentation l'une des trois classes de vulnérabilité V suivantes :

F inférieur ou égale à 19	classe V1
F entre 20 et 25	classe V2
F > 25	classe V3

Tableau 4: Détermination des classes de vulnérabilité.

La transcription des classes de vulnérabilité en zones de protection est une opération délicate que nous avons conduit à la demande de l'OFEFP, sur l'étude test de St-Imier. Cette transcription sera ainsi décrite plus bas.

Remarques

La notion de zones de vulnérabilité est une notion bidimensionnelle (2D plan) qui n'inclut pas explicitement la troisième dimension, bien que les écoulements s'organisent dans un environnement tridimensionnel.

Les quatre critères ne prennent pas spécifiquement en compte la profondeur à laquelle se situe la surface de la nappe ; ce critère paraît inapproprié pour les aquifères karstiques, du fait que la recharge rapide et directe par les eaux de ruissellement peut se faire localement par l'intermédiaire de pertes sans filtration (9).

Application sur un site test : exemple des sources d'alimentation en eau potable de St-Imier

L'exemple des sources alimentant la ville de *St-Imier* (Jura bernois, Suisse) est un exemple parmi d'autres qui illustre l'efficacité relative de la délimitation, selon les instructions pratiques actuelles (2), des zones de protection en milieu karstique.

Le bassin d'alimentation des sources de la Raisetsette, de la Grande Dou et du Torrent est situé dans l'Ouest de la Suisse, sur les cantons de Berne et de Neuchâtel. Sa superficie avoisine 140 km². Les sources sont captées pour différents réseaux publics dont celui de la Commune de St-Imier.

La région étudiée (figure 4) appartient du point de vue géologique au Jura plissé. Le niveau aquifère est situé dans les formations des calcaires du Séquanien au Portlandien (Malm) d'une épaisseur de 200 à 400 mètres. L'aquifère de type karstique est limité à sa base par la formation marneuse de l'Argovien. Le bassin d'alimentation des sources est constitué du point de vue structural du flanc Nord de l'anticlinal Gurnigel - Chasseral et du flanc Sud de l'anticlinal Montagne du Droit - Mont-Soleil - Mont-Crosin. Ces deux anticlinaux ont une direction générale SW-NE.

Dans les années 1980, les zones de protection n'ont été élaborées que sur l'une des parties du bassin d'alimentation, la partie Nord (10). Ces zones de protection ont été délimitées d'après les instructions pratiques éditées à cet effet par l'Office fédéral de l'environnement, du paysage et de la forêt (2). Une représentation de ces zones figurent dans l'encadré A de la figure 4. La zone III couvre quasi la totalité de la zone prise en considération.

Malgré l'établissement de ces zones de protection, des problèmes de pollution d'origine agricole -purin- persistent en moyenne 4 fois par année au moment des fontes des neiges ou de violents orages d'été.

La méthode EPIK a été appliquée à ce site, afin de tenter de remédier à cette situation insatisfaisante. Il s'agissait d'essayer de déterminer de manière claire et relativement objective, des zones de protection de dimension réaliste et compatible avec l'usage d'un règlement d'application.

La cartographie des différents critères a permis d'obtenir une carte de vulnérabilité basée sur trois classes de vulnérabilité.

K1=1	I1=1			I2=2			I3=3			I4=4		
	E1=1	E2=3	E3=4	E1=1	E2=3	E3=4	E1=1	E2=3	E3=4	E1=1	E2=3	E3=4
P1=1						21		21	24			27
P2=2						22		22	25			28
P3=3			20		20	23		23	26	20	26	29
P4=4			21		21	24		24	27	21	27	30

 Combinaison incompatible

 Classe de vulnérabilité V1
 Classe de vulnérabilité V2
 Classe de vulnérabilité V3

Tableau 5: Attribution en trois classes de vulnérabilité des valeurs du facteur de protection (exemple du bassin d'alimentation des sources de Cormoret, St-Imier).

A partir de l'établissement des classes de vulnérabilité, il est proposé une équivalence pour les zones de protection.

Classe V1 <=> Zone S1

Classe V2 <=> Zone S2

Classes V3 <=> Zone S3

L'encadré B de la figure 4 permet de visualiser les propositions de zones de protection I à III pour le bassin d'alimentation. La comparaison des encadrés A et B permet de constater que les zones de protection I et II obtenues à l'aide de la méthode EPIK sont nettement plus nombreuses à l'échelle du bassin. Elles devraient permettre de mettre en oeuvre des restrictions vis-à-vis de l'utilisation du territoire plus efficaces qu'auparavant.

Conclusions et perspectives

L'utilisation de critères tenant compte du fonctionnement du karst, tels que développement du réseau karstique, conditions d'infiltration, couverture protectrice et présence d'épikarst, permet d'obtenir de nouvelles cartes spécifiques de la vulnérabilité des sources karstiques. Ces cartes constituent une nouvelle base pour l'établissement des zones de protection en terrain karstique. Si à ce jour le concept d'établissement de ces nouvelles cartes est clair, il nous manque encore cependant du recul et des applications bien testées pour en apprécier la pertinence.

Actuellement, nous testons sur le terrain l'efficacité des nouvelles zones proposées (traçages et observation de l'impact des épandages réglementés de purin) sur la région de St-Imier.

L'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) pour l'exemple de St-Imier, nous a d'autre part permis de tester la sensibilité des différents facteurs de pondération et de simplifier l'obtention de la carte synthétique de vulnérabilité.

Parallèlement, la méthode EPIK est testée dans d'autres contextes karstiques (karst du jura tabulaire et karst préalpin).

Remerciements

Les auteurs de cet article remercient vivement l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage ainsi que le Service hydrologique et géologique national pour le soutien apporté lors du développement de cette méthode EPIK. Nos remerciements vont également au canton de Berne, Office de l'économie hydraulique et énergétique du canton de Berne et à la Commune de St-Imier pour nous avoir permis de tester notre méthode sur le site de St-Imier.

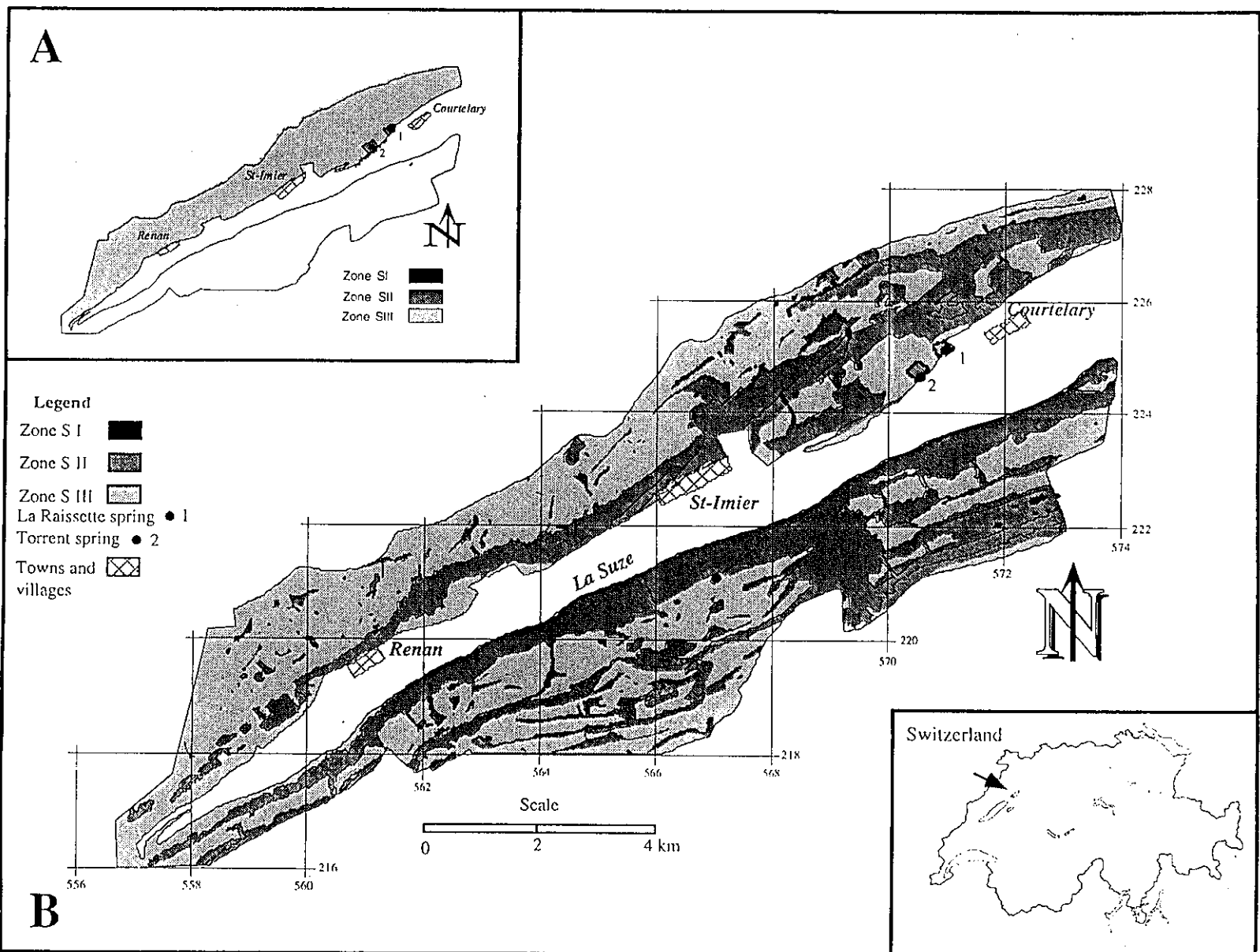


Figure 6 Représentation des zones de protection sans et avec la méthode EPK
En A: zones de protection "classiques"
En B: proposition de nouvelles zones

Références

- (1) Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux), 1993. Confédération suisse (814.20).
- (2) Instructions pratiques pour la délimitation des secteurs de protection des eaux, des zones et des périmètres de protection des eaux souterraines. OFEFP, 1977, révisée en 1982.
- (3) Gilbrich W.H., 1994 : In Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability, IAH, Vol. 16, 1994, Vrba J and Zaporozec A., editors.
- (4) Groundwater vulnerability assessment - Predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. National Research Council, National Academy Press, Washington D.C., 1993.
- (5) Doerfliger N., Jeannin P-Y. & Király L., 1993 : Développements possibles dans le domaine de la détermination des zones de protection. Concept de vulnérabilité des aquifères karstiques. Rapport de la première phase. Rapport non publié, CHYN - OFEFP.
- (6) Dodge M., 1983 : Structure, fonctionnement hydrodynamique et vulnérabilité des aquifères karstiques. in : Journée d'étude sur la protection des eaux karstiques, Bruxelles, 29 novembre 1982. - Soc. nationales des distributions d'eau et comm. de protection des sites spéléologiques, 42-46.
- (7) Mangin A., 1975 : Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Troisième partie - Constitution et fonctionnement des aquifères karstiques, Ann. de Spéleo., 30,1,p.21-124.
- (8) Doerfliger N., Jeannin P-Y. & Zwahlen F., 1994 : Vulnérabilité des eaux dans les régions karstiques et délimitation des zones de protection. Méthodologie EPIK. Rapport non publié, CHYN-OFEFP.
- (9) Ray J.A., O'dell P.W., 1993 : DIVERSITY : A new method for evaluating sensitivity of groundwater to contamination. Environmental Geology (1993) 22 : 345-352.
- (10) Schindler B., 1988 : Étude hydrogéologique de la zone S des captages sis à Cormoret et Villeret, 2ème partie. Rapport non publié.

CONFÉRENCE :

F. ZWAHLEN

Cartographie de la vulnérabilité des bassins d'alimentation des sources karstiques par une méthode multicritère.

Intervenant

Marc DZIKOWSKI

Université de Chambéry

Question ou intervention

Existe t-il une possibilité de diminuer les zones sensibles en incorporant une dimension temporelle à la notion de protection (arrêt de pompage avec prévision d'une réserve suffisante) ?

Réponse

Cela n'est pas prévu. En fait, il s'agit de proposer des zones de protection en accord avec la loi, soit correspondant au débit maximum soutiré par un puits.

Intervenant

Ph. CROCHET

ANTEA - Parc du Millénaire N°19
34000 Montpellier

Question ou intervention

Cette approche s'apparente à celle utilisée en environnement pour la hiérarchisation des sites contaminés. Ne devrait-elle pas se limiter à l'aspect hiérarchisation pour identifier les zones devant prioritairement faire l'objet d'une étude plus détaillée.

Réponse

Cette approche peut être utilisée pour plusieurs objectifs. Elle peut en effet être utile pour la hiérarchisation, mais nous considérons qu'elle va plus loin et permettra d'améliorer très sensiblement la protection des captages.

Intervenant

J. MUDRY

Université de Franche-Comté

Question ou intervention

Les pondérations des facteurs ont-elles une validité locale ou bien sont-elles transposables à toute situation ? Ceci dans l'optique de répondre à la demande de zonage des périmètres de protection.

Réponse

Les pondérations sont basées sur les expériences faites en Suisse. Elles devraient être adaptées en fonction du contexte, mais cela ne présente pas de problèmes majeurs.

Intervenant

B. MARSAUD

ANTEA / HNO
76130 Mont-Saint-Aignan

Question ou intervention

Est-il envisagé de croiser la carte "vulnérabilité" avec le plan parcellaire ?

Réponse

En effet, cela est envisagé comme par ailleurs il est envisagé de croiser celle-ci avec les cartes d'inventaires des sites à risque.

Intervenant

M. LANGUEPIN

Conseil Général de l'Hérault DST/SC
34000 Montpellier

Question ou intervention

Quelle est la taille de la maille d'observation utilisée dans l'analyse multicritère ?

Réponse

(80-100 mètres) La taille d'observation dépend de l'appréciation de l'hydrogéologue. Par contre, la digitalisation est faite selon une maille de 80 mètres. A l'avenir, nous prévoyons d'utiliser une maille à taille variable selon l'information concernée.

Intervenant

M. BAKALOWICZ

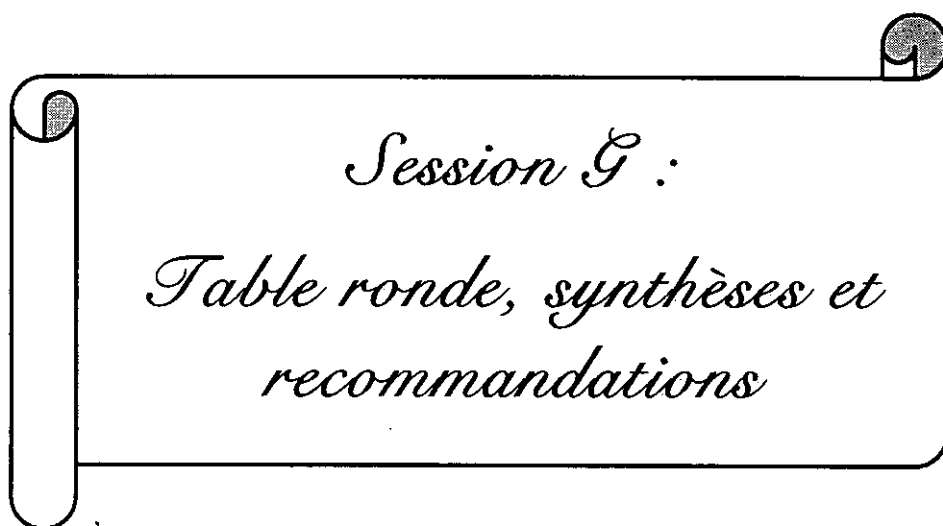
BRGM / DR
1039 rue de Pinville - 34000 Montpellier

Question ou intervention

La méthode EPIK considère différents critères, auxquels correspondent des variables évaluées indépendamment. Or, ces variables ne sont pas nécessairement indépendantes, et l'évaluation de ces critères peut conduire à une redondance déformant l'information réelle. Un exemple concerne la présence de colmatages occupant des dépressions : l'un peut être interprété comme introduisant une protection efficace ; le second est associé à une possibilité d'infiltration rapide, donc à une forte sensibilité de l'aquifère aux actions en surface. Selon le poids accordé à chaque critère, il est possible d'aboutir à une quantification erronée de la vulnérabilité du site et, par conséquent, de proposer un scénario de protection inadapté à la réalité.

Réponse

Il y a un peu de redondance que nous avons réduite au maximum. En ce qui concerne le colmatage d'une doline, celle-ci est vulnérable quel que soit l'importance du colmatage du fait de sa forme et non de la nature de son remplissage.



Gestion et protection des ressources en eau en région karstique

C. LEFROU

Directeur de la Mission de Service Publique du BRGM

Les sept exemples traités au cours de la séance que je présidais, bien que très différents les uns des autres, ont bien mis en évidence la nature particulière des aquifères karstiques dont l'étude ne peut être abordée avec les méthodes qui ont fait la preuve de leur efficacité pour les aquifères poreux et les aquifères fissurés.

Dans le cas du karst de la Gervanne, P. Crochet a montré l'intérêt de la méthodologie proposée par le Professeur Mangin pour déterminer l'exploitabilité d'un karst qui passe d'abord par l'analyse des données de débit à l'exutoire. Encore faut-il disposer de séries suffisamment longues de données.

Deux autres exemples ont mis en évidence le lien étroit entre eaux de surface et eaux souterraines :

- Dans le cas du karst de la Rochefoucauld, B. de Grissac, M. Laroque et M. Razack ont conçu un outil d'aide à la décision pour permettre de limiter par voie réglementaire les prélèvements agricoles dans l'aquifère afin de maintenir un débit minimal dans la rivière qui le draine. De longues séries de mesure des débits de la source et de niveaux piézométriques ont permis d'établir une bonne corrélation entre piézométrie et débit : il est ainsi possible de faire à la mi-Juin une prévision de débit à la mi-Septembre avec une fiabilité suffisante pour être acceptée par les usagers qui doivent accepter les mesures contraignantes qui découlent de cette prévision lorsqu'elle est défavorable.
- Si l'alimentation de la Loue par les pertes du Doubs à Pontarlier est bien connue depuis le début du siècle, ce n'est que grâce à une étude récente que le fonctionnement du système karstique a pu être appréhendé et qu'une évaluation quantitative de la part de l'alimentation de la Loue provenant des pertes permet de concevoir un aménagement contrôlant ces pertes pour laisser dans le Doubs à l'étiage un débit minimum de 500 litres par seconde.

Les problèmes de gestion de la qualité sont également difficiles. J. Grévellec a notamment montré les difficultés qu'il rencontre en tant qu'hydrogéologue départemental de l'Hérault pour la mise en oeuvre de la procédure des périmètres de protection des captages d'eau potable. M. Bakalovicz et J. Ricard ont toutefois montré qu'une étude mettant en oeuvre la géologie, des traçages, des bilans hydrologiques et des bilans de matières dissoutes apportait suffisamment de connaissances sur le fonctionnement des aquifères karstiques du Larzac pour fonder une politique d'exploitation et de protection de la qualité de cette ressource sur des bases scientifiques solides.

Le cas de la craie présenté par N. Crampon est particulier dans la mesure où suivant la dimension des fissures dans lesquelles l'eau circule cet aquifère peut être assimilé à un aquifère poreux ou bien se comporter comme un karst. Il est donc important pour définir ses modalités d'exploitation et de gestion d'identifier les zones karstifiées.

Un cas tout à fait particulier a été présenté par L. Cadilhac et P. Gamez : il s'agit des conséquences de la fin de l'exploitation minière du Bassin ferrifère lorrain. Cette exploitation dans une couche située en dessous d'un aquifère karstique a nécessité des exhaures importantes qui ont modifié considérablement les conditions d'écoulement des eaux souterraines et des eaux de surface. L'abandon de ces exhaures se traduit par une modification importante tant sur le plan de la quantité que sur le plan de la qualité de l'équilibre artificiel qui s'était établi. Le nouvel équilibre qui s'établira sera différent de l'équilibre naturel initial et est difficilement prévisible car les bassins versants hydrogéologiques et hydrologiques originels ont été profondément modifiés par la création de vides artificiels au sein de ce karst.

Tous ces exemples ont clairement mis en évidence la nécessité d'une approche spécifique aux aquifères karstiques adaptée au contexte géologique et hydrologique de chaque cas. Dans tous les cas l'approche est indirecte et est le plus souvent fondée sur des mesures de débit aux exutoires et sur des analyses de séries de données sur la qualité des eaux. Si comme l'ont bien montré MM. Mangin, Marsaud et Crochet, on est maintenant en mesure de proposer une méthodologie spécifique à ce type d'aquifères, utilisable de façon opérationnelle par des ingénieries, des progrès peuvent encore être espérés de la poursuite de la Recherche sur ce thème et par ailleurs la mise en oeuvre de la méthode proposée implique l'acquisition de séries longues de données différentes de celles qui sont habituellement collectées pour la connaissance des eaux souterraines. Il devra en être tenu compte dans la conception des réseaux patrimoniaux de mesure.

Qu'est ce que le scientifique peut apporter aux exploitants et aux gestionnaires

A. MANGIN

Directeur de Recherche au CNRS

Les communications se rapportant à ce thème ont montré combien le karst était particulier et complexe tant dans son approche, que dans sa compréhension et sa maîtrise. La présence d'un réseau de drainage structuré, l'existence de grandes cavités, le fait que localement les vitesses d'écoulement échappent à la loi de Darcy et le comportement discontinu dans le temps et dans l'espace de cet aquifère, sont autant de considérations qui placent le karst à part et conduisent à proposer des méthodes d'études et d'exploitations qui lui sont propres. Or, le bilan des ressources qu'il renferme indique que non seulement on ne peut plus l'ignorer, mais qu'il constitue probablement des réservoirs potentiels, parmi les plus importants et les plus intéressants, tout au moins pour la France et à fortiori pour tous les pays du bassin méditerranéen. A ce titre le karst apparaît parmi les atouts majeurs dans l'enjeu fondamental que l'eau représente pour le troisième millénaire.

Longtemps considéré, comme le milieu qui échappait à toute logique, pour lequel le succès d'exploitation relevait du pur hasard, avec des ressources éminemment vulnérables, les exposés démontrent qu'il n'en est rien et que ce point de vue doit être révisé. Sur le plan de la connaissance fondamentale, de nouveaux concepts sont proposés bien différents de ceux habituellement utilisés pour les milieux poreux et fissurés, tels la perméabilité et l'emmagasinement, avec une approche analytique fondée sur la résolution d'équations différentielles. Ces nouveaux concepts s'appuient davantage sur l'observation phénoménologique, faisant appel à d'autres paramètres qui se réfèrent à des propriétés globales ; en ce sens la démarche est systémique. Ces paramètres sont : le volume dynamique fournissant une idée de l'importance de la zone noyée, l'effet mémoire caractérisant l'inertie du système, le temps de régulation, correspondant à la longueur de la réponse impulsionnelle..., tous ces paramètres décrivent en fait l'hydrogramme unitaire qui donne une image très précise du degré de karstification du système. Plus récemment s'y ajoutent d'autres paramètres comme le degré de liberté du système, son degré de non linéarité et le poids de chaque variable intervenant dans sa description.

L'exemple du karst de la Gervanne (Drôme), comme celui du pompage à gros débit sur le Baget (Ariège), ont prouvé que cette appréciation des problèmes de l'hydrogéologie karstique n'avaient rien de théorique, mais, au contraire, permettaient d'avoir des outils pratiques et efficaces pour exploiter et gérer ses ressources.

En d'autres termes, bien que le karst soit un milieu difficile et complexe, les connaissances actuelles ouvrent des perspectives nouvelles qui rendent désormais possible l'exploitation de ces ressources dans d'excellentes conditions et de pouvoir en assurer la protection sur le plan de la qualité.

Toutefois, les méthodes utilisées sont exigeantes et il y a un prix à payer. C'est, en effet, une autre conception de l'approche de l'aquifère qu'il faut envisager, une autre stratégie. A la différence des aquifères classiques les investigations ponctuelles sont d'un intérêt très limité et il faut presque toujours anticiper. Sans l'obtention de séries chronologiques sur au moins un cycle hydrologique (parfois deux ou trois sont nécessaires) portant sur des observables physiques de la dynamique des écoulements (débits aux sources, niveaux piézométriques, évolution de la qualité des eaux...), il est illusoire de pouvoir porter un jugement sur la nature, les caractéristiques et les possibilités de l'aquifère. Une étude préalable est toujours indispensable. Moyennant quoi des ressources importantes et de qualité sont accessibles. Dans beaucoup de cas il faut donc procéder à un équipement de certains sites en prévision d'une future utilisation.

En outre, nos connaissances sont encore insuffisantes malgré les gros progrès de la dernière décennie. Notamment, en matière d'exploitation et de gestion, la nécessité de faire appel à la modélisation est indispensable et la recherche sur le karst en est à ses débuts dans ce domaine. En effet, cette modélisation doit prendre en compte le comportement fortement non linéaire de cet aquifère, ce qui n'est pas très aisé. Les progrès réalisés ces dernières années dans la modélisation non linéaire laisse entrevoir, à échéance raisonnable, des solutions satisfaisantes.

Au terme des discussions, il est apparu très clairement que le karst constituait une richesse comme ressource, qu'il nécessitait une approche particulière et qu'un effort devrait être fait pour en améliorer la connaissance, mais aussi et surtout, pour affiner les outils qui en permettent l'exploitation et la gestion .

Table ronde du séminaire karst

Participants : M^{me} OLIVEROS-TORO, MM. ARMAND, ALBINET, COMTE, CROCHET, de GRISSAC, LEFROU, MANGIN, PLAUD, ZWAHLEN

Question : *le karst. Quels enjeux ? En valent-ils la peine ?*

Réponse : **A. Mangin**

Le karst offre un important potentiel de ressources en eau, jusqu'ici peu utilisées, car elles sont supposées très vulnérables. Or, l'état de nos connaissances permet d'aller au-delà, en montrant que la réputation de vulnérabilité du karst n'est pas nécessairement justifiée. Le karst constitue un enjeu économique d'importance, dont les caractéristiques variées permettent des usages multiples.

Q. : *En réalité, la gestion et la protection des ressources en eau du karst sont directement dépendantes de l'aménagement du territoire.*

Q. : *Quelles sont les contraintes et les limites imposées par la mise en valeur du karst ?*

R. : **Ph. Crochet**

La contrainte essentielle provient de la nécessité d'acquérir des données et d'apprécier le comportement des systèmes karstiques . Par ailleurs il convient d'effectuer des suivis sur des périodes suffisamment longues . Cette acquisition est peu coûteuse si elle est placée nettement en amont.

Une autre contrainte est liée à la nécessité de communication. La relativement mauvaise image de marque du karst doit être combattue . En effet, les concepts et les méthodes dont nous disposons maintenant permettent d'affirmer qu'"il ne faut plus avoir peur d'aborder le karst, de l'explorer et de l'exploiter". Il faut démythifier et positiver.

R. : **C. Armand**

Jusqu'à présent, l'exploitation du karst a été limitée par les craintes qu'elle est susceptible de faire peser sur l'aménagement du territoire. Mais on voit que maintenant c'est possible. Montpellier et le captage de la source du Lez sont un excellent exemple, à opposer à celui de la région de Narbonne et de l'exploitation des eaux de la vallée de l'Orb. On constate que le recours aux ressources en eau de surface, associé aux canalisations et à l'interconnexion des réseaux (quand elle est possible), peut être très coûteux. Il faut savoir prendre un pari sur la mise en place d'un captage karstique et de ses conditions de protection. Dans le cas du Lez, le

courage politique s'est substitué à un niveau de connaissances limité par rapport au niveau actuel.

R. : B. Sourisseau

Il faut sortir des expressions de l'hydrogéologue ; celle qui veut qu'un forage coûte cher.

R. : C. Lefrou

Un forage de reconnaissance est un ouvrage qui coûte cher et qui nécessite des études préalables. Il convient d'envisager les coûts en termes de nécessité et non de réalisation. Des études bien menées en amont permettent de limiter le coût des reconnaissances par forages.

Intervention de J.J. Collin

Le karst ne fournit pas uniquement les AEP, mais alimente aussi les eaux de surface. Aussi, le coût des mesures doit être rapporté aussi aux eaux de surface. Une coordination est nécessaire, elle est d'ailleurs rappelée par la loi sur l'eau. Il est nécessaire d'aborder le comportement global du système, et non uniquement celui de l'aquifère karstique à exploiter.

Q. : en matière de gestion, quelles sont les attentes des collectivités locales ?

R. : B. de Grissac

Les élus définissent une politique et des objectifs. Mais il se pose un problème d'interface entre les politiques et les scientifiques. Les collectivités attendent des outils de gestion opérationnelle, et non pas des outils de connaissance. La protection des captages illustre bien ce problème.

Q. : quels outils permettent de passer de la connaissance à la gestion ?

R. : J. Grévellec

Un élu attend de l'eau potable au meilleur prix possible, y compris le coût des conditions de protection et de traitement.

Intervention de Cornet

Les eaux du karst présentent des avantages par rapport aux eaux superficielles : elles sont en général plus faciles à traiter, car leurs caractères sont moins variables. Par ailleurs, il existe aussi des karsts anciens protégés, par exemple dans des fossés, sous des recouvrements tertiaires.

Intervention d'un ingénieur algérien, responsable de la gestion de l'eau dans une région d'Algérie.

En Algérie, il existe un aquifère karstique alimentant d'importantes sources (1 à 2 m³/s) toutefois, ces eaux contiennent Na et Cl en quantité. Economiquement, le traitement est souvent plus facile que la recherche d'autres ressources avec un si grand débit. Est-il possible d'envisager de capter les eaux souterraines avant qu'elles acquièrent leur charge en Na et Cl ?

R. : C. Lefrou

Il n'existe pas de réponse générale. Il faut rechercher une solution alternative locale et faire une étude économique pour choisir la meilleure solution en investissement et en fonctionnement.

Intervention de Sourisseau

A Oran, l'AEP a capté, en 1958, une source karstique à forte salinité (3 à 5g/l). De l'eau de surface a été captée à 180 km, à la frontière du Maroc, pour faire un mélange et abaisser la salinité. On ne peut pas se permettre le luxe d'abandonner une ressource d'eau en Algérie.

R. : de Grissac

Les données sont une absolue nécessité. Il faut convaincre les élus de la valeur patrimoniale des données : ce sont des archives. L'acquisition des données est un investissement pour l'avenir avec un retour sur investissement par la suite. Mais l'acquisition de données n'intéresse pas souvent toute la collectivité, mais seulement quelques élus.

Q. : *quel rôle doivent jouer les Agences de l'Eau dans l'acquisition des données ?*

R. : C. Armand

L'Agence doit absolument faire un choix, mais seulement en concertation avec les collectivités concernées. Le rôle de l'Agence est d'optimiser les choix aux différentes échelles du bassin. Les projets locaux ont en général du mal à émerger, parfois parce que les besoins n'existent pas ou sont mal exprimés. Il n'est pas évident qu'on puisse aboutir à une acquisition de données systématiques. Par ailleurs, il n'est pas toujours facile de trouver des maîtres d'ouvrages locaux.

Q. : *Concernant les méthodes d'acquisition des connaissances et les méthodes de gestion ?*

R. : E. Binet

Il faut démythifier et positiver le karst. Mais le gestionnaire reste encore sur sa faim. Les cartes de vulnérabilité constituent un instrument complexe qui introduit un débat sur les moyens de gestion actifs. On ne s'oriente pas vers une connaissance patrimoniale du milieu karstique et de ses ressources. Le débat intervient actuellement, dans un monde éthéré, entre scientifiques, ingénieurs et gestionnaires. Mais en réalité, il existe de nombreux autres

partenaires. Il est donc nécessaire d'accéder aux connaissances et de les transmettre à tous les partenaires. Dans ce but, il faut disposer de synthèses qu'il faut transmettre aux décideurs et aux gestionnaires.

Il faut connaître les ressources en eau en quantité et en qualité, mais il faut aussi connaître les moyens de les conserver. Cette connaissance doit être transmise aux gestionnaires.

Pour cela, doit-on passer par la complexité d'EPIK et de ses 29 classes (cf. la communication de F. Zwahlen et N. Doerfliger) ? Ou bien faut-il passer par une description plus globale et plus "subjective" ?

Qui doit jouer le rôle d'interface ? Qui porte l'interface entre la recherche et les gestionnaires ? Ce sont le service public et les services d'aide à la décision (BRGM, DIREN). Mais ces services ne disposent pas des moyens pour mettre en place un réseau d'observation national, ni non plus pour une démarche de routine.

En Languedoc-Roussillon, la situation est exceptionnellement favorisée pour les eaux souterraines, avec la DIREN et le BRGM/CTE.

SAGE et Commissions locales de l'eau (CLE) paraissent parfois être des alibis ou des raisons intellectuelles poussant à faire faire des études. Est-ce au moins pour obtenir le bon diagnostic ?

Mme Oliveros-Toro

Elle émet des vœux pour que la Direction de l'Eau du Ministère de l'Environnement soit tournée vers l'utilisation et la gestion des ressources en eau. Elle est intéressée par certaines des réponses, notamment le besoin de communication vers l'Etat et vers les collectivités. L'Etat représente un moyen d'impulsion de certains mécanismes, mais une volonté politique locale est nécessaire. Celle-ci est clairement affirmée dans le département de l'Hérault.

E. Binet

L'analyse multicritère devrait déboucher sur une démarche opérationnelle, s'appuyant sur une cartographie, en vue d'une aide à la décision. La démarche de définir des zones de protection doit aboutir à une concertation et à un débat conduisant à l'abandon de la concertation.

Le scientifique s'intéresse à la ressource, au fonctionnement du système, et non pas aux préoccupations économiques.

B. de Grissac

Peut-on garantir l'absence d'introduction d'un polluant dans le réseau AEP ? Bien sûr que non. On ne possède pas d'outil de protection de la ressource. Peut-on le détecter et l'arrêter ? Oui.

En cas de pollution accidentelle dans le karst, peut-on apporter une solution de substitution ? En général, oui, car l'aquifère karstique est fragmenté.

Peut-on protéger la ressource en eau d'un karst ? Oui, mais à quel coût ? La collectivité n'a pas toujours les moyens. Ne vaut-il pas mieux développer un réseau d'alerte et une ressource de substitution ?

C. Lefrou

Il n'existe pas d'outil de gestion de la qualité d'un aquifère. La réglementation est un outil pour protéger la ressource en eau souterraine mais n'est pas un outil pour la gérer, contrairement aux eaux de surface. Il vaut mieux limiter les périmètres de protection des captages à un rôle de protection de la santé publique, et mettre en place des outils de gestion du type de ceux de la police des eaux. L'Etat veut-il (ou peut-il) s'investir dans la mise en place de tels outils de gestion patrimoniale ?

E. Binet

Mieux vaut des périmètres de protection plus petits, mais mieux contrôlés (et mieux contrôlables). Il souhaite que la question des périmètres de protection en régions karstiques avance plus vite dans sa résolution.

F. Zwahlen

Les 29 classes du système EPIK sont une base de réflexion. Les collectivités préfèrent l'eau de leur territoire. Par ailleurs, le subventionnement de l'agriculture doit aller à une agriculture respectueuse des ressources naturelles.

E. Binet

Apprécie que soient liés la vulnérabilité des aquifères et d'une part la protection réglementaire, d'autre part le subventionnement de l'agriculture. La prise de conscience locale en vue d'une appropriation locale de la ressource en eau reflète la conscience d'une appartenance à une entité naturelle, à un périmètre non administratif. La nappe de l'Astien, en Languedoc-Roussillon, a fait l'objet du premier contrat de nappe en France .

Q. : *Quels axes pour un avenir proche ?*

C. Lefrou

Les responsables n'en sont encore qu'à un stade de gestion passive et non pas vraiment active (prévision du régime des cours d'eau, mise en place des périmètres de protection). La gestion active est seulement suggérée par les projets de forages. Mais il existe aussi d'autres idées de gestion active des aquifères karstiques :

- l'accroissement des réserves, par barrage ou par apports d'eaux de surface (recharge artificielle) ;
- l'utilisation de la capacité de stockage souterrain pour soutenir des écoulements de surface, comme alternative au stockage en surface.

Comme l'a souligné M. Albinet, il est nécessaire de faire passer les connaissances scientifiques aux usagers, aux acteurs de terrain susceptibles de faire passer les contraintes de gestion. Le message qui est adressé aux Agences de l'Eau concerne la volonté locale d'acquisition de données : doivent-elles suivre les initiatives locales ? Ou doivent-elles jouer

un rôle d'incitation d'une meilleure connaissance pour une meilleure utilisation et présentation des ressources en eau du karst ?

C. Armand

Il répond à la "provocation" de C. Lefrou, qui parle devant des scientifiques et des ingénieurs attendant de travailler pour les Agences de l'Eau.

Il rappelle l'existence de deux documents de base, SDAGE et 7ème schéma d'intervention, définissant les grands aquifères patrimoniaux, dont les aquifères karstiques. Les Agences de l'Eau n'ont pas vocation de faire du « suivisme ». Il insiste sur la nécessité d'une volonté locale à laquelle les Agences de l'Eau s'associeront toujours pour aboutir à un outil de gestion. Les Agences de l'Eau, seules, ne peuvent pas avoir les moyens de faire des études partout, ni d'acquérir les données ou lancer des programmes d'acquisition de données, si les élus ne sont pas sensibilisés et mobilisés. Toutefois, s'il n'existe pas de perspective d'utilisation de la ressource, il n'y a aucune raison d'investir dans l'acquisition des données .

E. Binet

Il juge cependant nécessaire une anticipation, afin de révéler les points noirs, les difficultés à venir, sans que nécessairement il existe une volonté locale.

En conclusion, les aquifères karstiques ne possèdent pas uniquement de l'eau ; ce sont aussi des milieux "vivants" et patrimoniaux dont la valeur est reconnue dans d'autres domaines. C'est pourquoi il est nécessaire d'établir un interface entre connaissance du milieu et action sur celui-ci . On comprend aujourd'hui, les problèmes des aquifères karstiques et les scientifiques sont mobilisés ; par conséquent, ne faisons pas d'alarmisme systématique au sujet des ressources en eau en régions karstiques .