

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

Michel Bakalowicz<sup>(1) (2)</sup>

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

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

## Résumé

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

## I. INTRODUCTION

Les civilisations méditerranéennes nous apprennent qu'elles ont su très tôt s'organiser autour de trois types de ressources en eau, les fleuves, les nappes phréatiques alluviales et les grandes sources karstiques. Pour chacune, l'homme a développé des techniques spécifiques d'exploitation et de gestion (32, 120). Égyptiens et Babyloniens ont inventé les chaussées ou barrages alimentant des réseaux de canaux. Perses et Assyriens sont à l'origine des qanats, qui se remarquent par les alignements de tas de déblais, et des chadoufs, les puits à balancier. C'est en Mésopotamie, où co-existent ces deux modes d'exploitation de l'eau que la science hydraulique fut inventée, comme le montre le Livre de l'agriculture nabatéenne de Qûâtâmâ (52). Les civilisations méditerranéennes nous ont aussi apporté les techniques nécessaires à l'exploitation d'une ressource en eau à la fois abondante et mystérieuse, celle des grandes sources karstiques (23). Ressource abondante comme en atteste les centaines de sources déchargeant plus de 2 m<sup>3</sup>/s en moyenne, dont nous ne retiendrons que les plus remarquables comme Fontaine de Vaucluse (France, 21.8 m<sup>3</sup>/s) (129), et les sources de Trebinjica (Bosnie Herzégovine, 80 m<sup>3</sup>/s) (109), Dumanli (Turquie, 50 m<sup>3</sup>/s) (12), Ljubljana (Slovénie, 39 m<sup>3</sup>/s) (109), Khabour Ras el Aïn (Syrie, 38.7 m<sup>3</sup>/s) (76, 53), Stella (Frioul, Italie, 36.6 m<sup>3</sup>/s) (144, 143), Ombla (Dubrovnik, Croatie, 33.8 m<sup>3</sup>/s) (109), Pivsko Oko (Yougoslavie, 25.5 m<sup>3</sup>/s) (109), Buna (Bosnie Herzégovine, 23.7 m<sup>3</sup>/s) (109), Kirkgözler (Turquie, 22 m<sup>3</sup>/s) (109), Aïn ez Zarqa, source de l'Oronte (Liban, 12.9 m<sup>3</sup>/s) , El Sinn (Syrie, 10.5 m<sup>3</sup>/s) (34, 53) , Figeih (Syrie, 7.5 m<sup>3</sup>/s) (75, 53) qui alimente en eau la vaste agglomération de Damas, Naraidha (Macédoine, Grèce, 10 m<sup>3</sup>/s) ou l'Almyros d'Héraklion (Crète, Grèce, 6.55 m<sup>3</sup>/s). Ressource mystérieuse surtout qui a fait de ces grandes sources des lieux mythiques de culte, au même titre que le Nil. Car comment expliquer qu'au plus fort de la longue sécheresse estivale méditerranéenne un fleuve puisse continuer à sortir de terre ?

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

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

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

## II. LES PROGRES REALISES

### II.1. La connaissance du milieu karstique

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

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

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

#### **a) Deux pôles extrêmes de structure interne :**

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

#### **b) Deux pôles extrêmes de fonctionnement :**

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

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

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

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

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

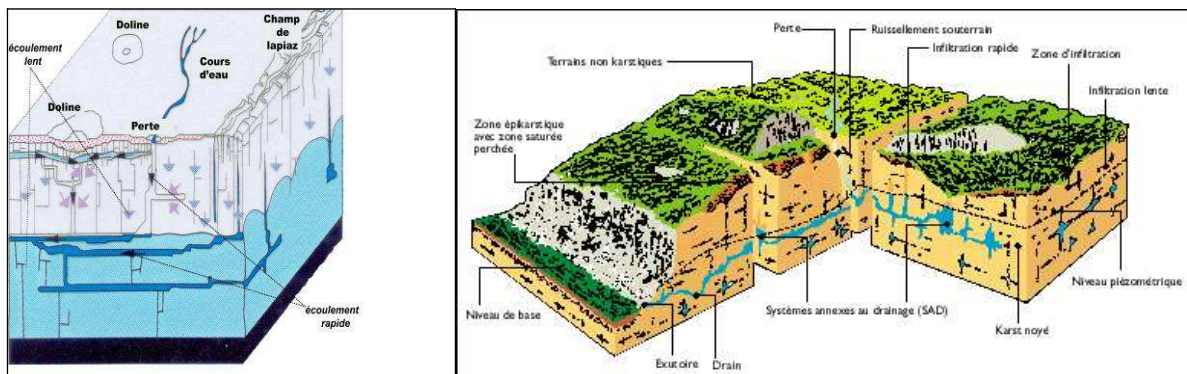


Figure 1. Modèles conceptuels de l'aquifère karstique. À gauche, milieu à double perméabilité avec continuité hydraulique et stockage dans les blocs matriciels d'après (42). À droite, milieu à discontinuités hydrauliques dans la zone noyée, d'après (93).

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

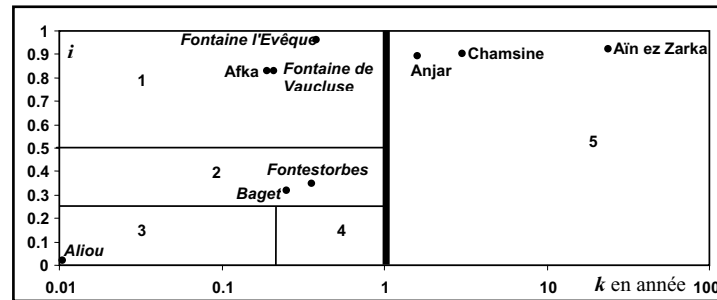


Figure 2. Classification d'aquifères karstiques de France et du Proche Orient, en fonction des caractéristiques de leur infiltration,  $i$ , et de leur zone noyée  $k$ , temps de séjour moyen de l'eau souterraine (53).

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

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

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

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

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

### II.1.3. Les modèles

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

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

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

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

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

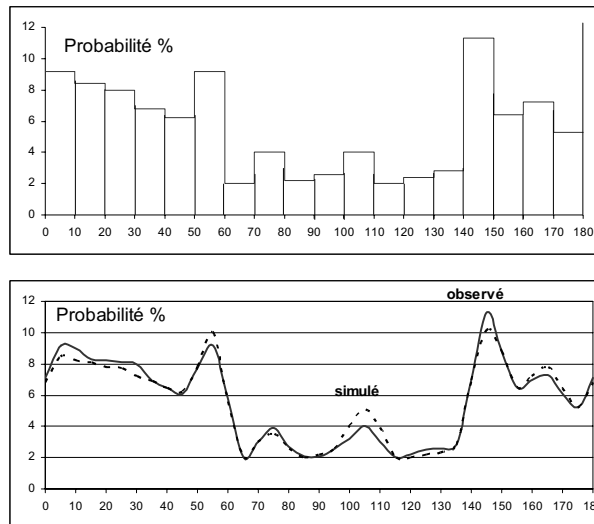


Figure 3. Distribution de la probabilité d'existence d'un conduit karstique selon les directions de l'espace. La distribution simulée est déduite de la détermination des « plans de drainage » à partir de l'analyse microstructurale. La distribution observée est fournie par l'analyse du plan du réseau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

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

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

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

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

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

### II.2.1. La reconnaissance de la structure du milieu

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



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

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

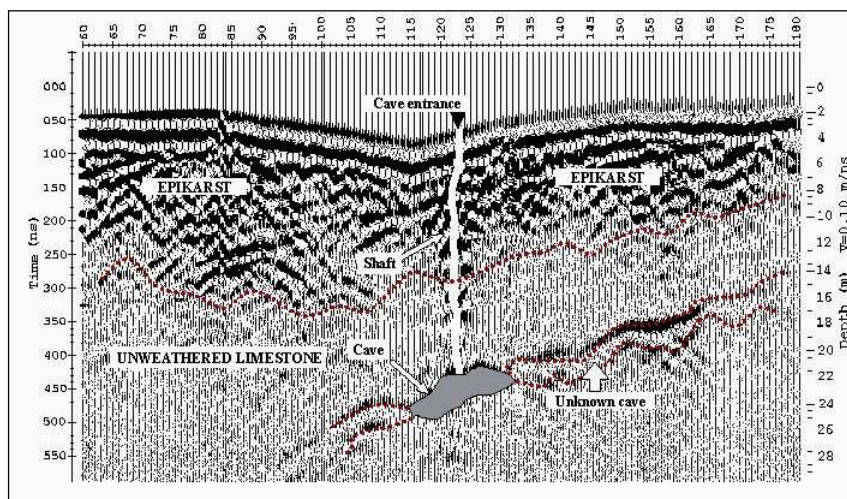


Figure 5. Profil radar obtenu sur le causse de l'Hortus (Hérault), montrant le développement en profondeur de l'épikarst et révélant la grotte, connue, et une grotte inconnue de petites dimensions à environ 25 m sous la surface (1).

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

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

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

De manière générale, les principaux progrès récents sont liés à l'acquisition de données, grâce à des capteurs performants et des chaînes d'acquisition fiables, économes en énergie et à grande capacité de stockage. Ce matériel est particulièrement bien adapté aux études hydrogéologiques en milieu karstique, soumis à une forte variabilité qui exige des mesures fréquentes dans le temps et l'espace. Nous sommes ainsi passés de mesures ponctuelles ou à pas de temps relativement large à des chroniques quasi continues, non seulement de débit et de piézométrie en forage et en cavités naturelles, mais aussi de conductivité, de température, de pH, O<sub>2</sub> dissous, turbidité. L'abondance des données ainsi acquises, d'une part avec le grand nombre de traceurs chimiques et isotopiques disponibles, d'autre part avec les chroniques à pas de temps court, a poussé à rechercher des méthodes d'aide à l'interprétation des données, permettant des traitements variées, de plus en plus complexes, capables de prendre en compte des jeux complexes de données temporelles et/ou spatiales (67, 83, 82, 3, 126, 81, 123, 103, 148, 64). Les aquifères karstiques peuvent maintenant être « mis sur



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

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

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

### III. EN GUISE DE CONCLUSION : LES PROGRES A VENIR

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

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

Des karstifications profondes sont révélées de plus en plus fréquemment, en relation soit avec des zones de subsidence, soit avec des régions soumises à des variations eustatiques marquées, dont la crise messinienne de salinité en Méditerranée, soit avec des circulations thermales enrichies en CO<sub>2</sub> ou en d'autres gaz d'origine profonde, soit enfin dans des bassins sédimentaires où les formations carbonatées constituent des aquifères captifs. L'étude de ces phénomènes bénéficie des outils géochimiques variés, dont la panoplie complète des isotopes, pour mieux comprendre les mécanismes en jeu et la distribution des phénomènes karstiques. Elle devrait en outre aider à intégrer la place du karst dans le cycle global du carbone et son rôle éventuel dans le stockage du CO<sub>2</sub>.

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

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

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

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

## Références bibliographiques

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

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

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

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

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

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

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



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