BASSIN RHONE-MEDITERRANEE-CORSE

GUIDE TECHNIQUE N° 3

CONNAISSANCE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES DANS LES REGIONS KARSTIQUES

JUIN 1999

SDAGE
RHONE MEDITERRANEE CORSE

Conception et rédaction

Michel BAKALOWICZ (CNRS)

En collaboration avec le Comité de Pilotage

Claire BOUCHESEICHE (AGENCE DE L'EAU RMC)
Odile BOUILLIN (BRGM)
Laurent CADILHAC (AGENCE DE L'EAU RMC)
Danièle GAY (DIREN LANGUEDOC ROUSSILLON)
Anne LAURENT (DIREN LANGUEDOC ROUSSILLON)
Jean-Pierre METTETAL (DIREN FRANCHE COMTE)
Guy VALENCIA (DIREN PACA)
Florent VIPREY (DIREN BOURGOGNE)

Photographies

Michel BAKALOWICZ (photo 1)
Maurice ALBINET (photos 2, 4 et 6)
Philippe CROCHET (photos 3 et 7)
Laurent CADILHAC (photos 5 et 11)
Jean-Pierre METTETAL (photo 8)
Fabien HOBLEA (photo 9)
Florent VIPREY (photo 10)

Mise en forme

Claire BOUCHESEICHE (AGENCE DE L'EAU RMC)
Christian LASNIER (AGENCE DE L'EAU RMC)

Nous remercions toutes les autres personnes qui ont contribué à la réalisation de ce guide technique, et, en particulier, Philippe CROCHET et Patrick LACHASSAGNE.

S O M M A I R E

PREAMBULE 3

1 - LE KARST : UN AQUIFERE A LA STRUCTURE ET AU FONCTIONNEMENT ORIGINAUX 7

Concepts de base 7
Définition 7
Caractéristiques et conséquences 7
Conclusions 11

Les outils de reconnaissance et d'exploration des systèmes karstiques 14
Comparaison entre les milieux poreux, fracturés et karstiques 14
Conséquences 15
Méthodologie 17
Les questions de base 17
La démarche 17
Colorations et limites de systèmes karstiques 24
Conclusions 24

2 - IMPACTS DES ACTIVITES HUMAINES SUR LES EAUX SOUTERRAINES DU KARST 28

Impacts qualitatifs : activités humaines et marqueurs de pollution 28

Impacts quantitatifs 30
Modalités 30
Effets 30

3 - PROTECTION ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU KARSTIQUE 31

Problématique de la protection des ressources en eau du karst 31

Gestion active des aquifères karstiques 31
Problèmes posés 32
Modélisation et simulation de l'aquifère karstique 35

Aquifères karstiques et Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux 36
Délimitation du périmètre d'un SAGE 36
Le SAGE Haut-Doubs - Haute-Loue 36
Le SAGE Lez, Mosson, étangs palavasiens (Hérault) 37
Recherche des sources de pollution 37
Le SAGE de l'étang de Salses - Leucate et le SAGE de l'Agly (Aude et Pyrénées-Orientales) 37
Mise en valeur des ressources en eau des aquifères karstiques 38
Le SAGE de la Drôme 38
Le SAGE des Gardons (Gard et Lozère) 39

BIBLIOGRAPHIE 40

Références techniques 40
Références réglementaires pour le captage des sources 40

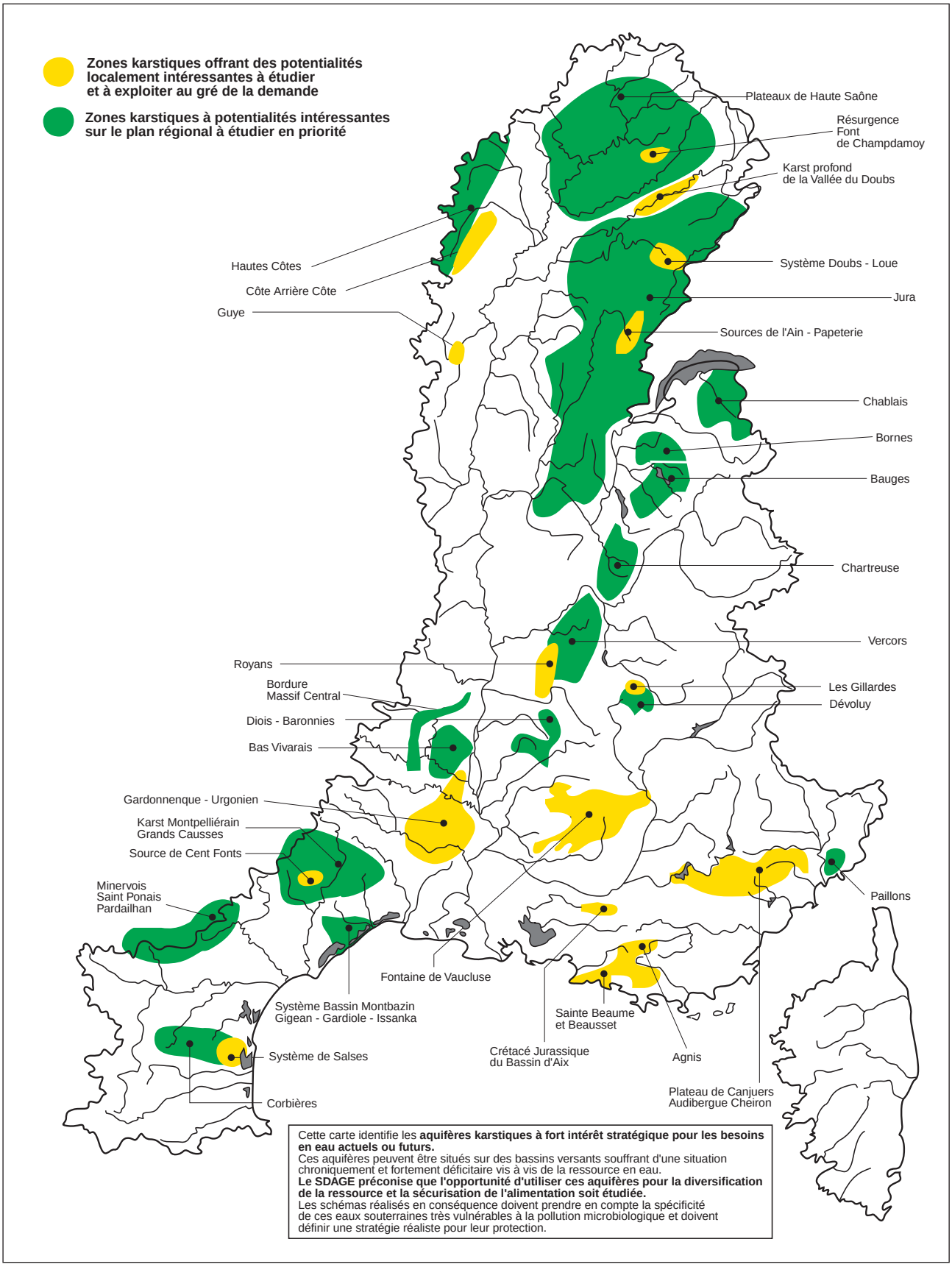


Figure 1 - Milieux aquatiques remarquables à forte valeur patrimoniale : Entités karstiques (carte n°9 du SDAGE, vol. 3)

P R E A M B U L E

Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du bassin Rhône-Méditerranée-Corse (RMC) réaffirme, dans son orientation fondamentale n° 3, l'importance stratégique et la fragilité des eaux souterraines, en particulier celles localisées dans les aquifères carbonatés. En effet, les formations carbonatées du bassin concernent, à l'affleurement, des étendues importantes (plus de 40 000 km^2, soit près du tiers du territoire RMC). Elles constituent souvent des aquifères, dont beaucoup présentent des ***caractères karstiques***. Les ressources en eau de ces formations sont exploitées pour la satisfaction des besoins des collectivités (alimentation en eau potable (AEP)), de l'industrie et de l'agriculture (irrigation), ou sont susceptibles de l'être ; elles soutiennent aussi l'alimentation de nombreux cours d'eau, en particulier pendant l'étiage. Cependant, l'exploitation de ces ressources est très limitée à ce jour. En revanche, ***les réserves de ces aquifères semblent constituer un potentiel de ressource en eau susceptible de répondre à certains besoins locaux ou régionaux.*** C'est en partie la méconnaissance des potentialités d'exploitation et probablement leur sous-estimation qui a conduit à un moindre recours à ces ressources, les démarches classiques d'exploration et de mise en valeur des eaux souterraines étant peu adaptées au caractère karstique des aquifères carbonatés.

Le SDAGE identifie trois priorités en ce qui concerne les eaux souterraines patrimoniales :

- développer une politique de connaissance et de gestion patrimoniale de la ressource en eaux souterraines à l'échelle des systèmes aquifères,
- réserver aux usages nobles (AEP) ou qualitativement exigeants la ressource souterraine,
- accroître le recours, raisonné du point de vue qualitatif, aux aquifères karstiques dans les secteurs où s'exprime d'ores et déjà un déséquilibre marqué entre ressource connue et demande d'eau. A l'échelle de ces territoires où l'adéquation ressource/besoins est particulièrement difficile à atteindre, le SDAGE identifie les ***aquifères karstiques à forte potentialité présumée*** (figure 1) et préconise que l'opportunité d'utiliser ces aquifères pour la diversification de la ressource et la sécurisation de l'alimentation soit étudiée.

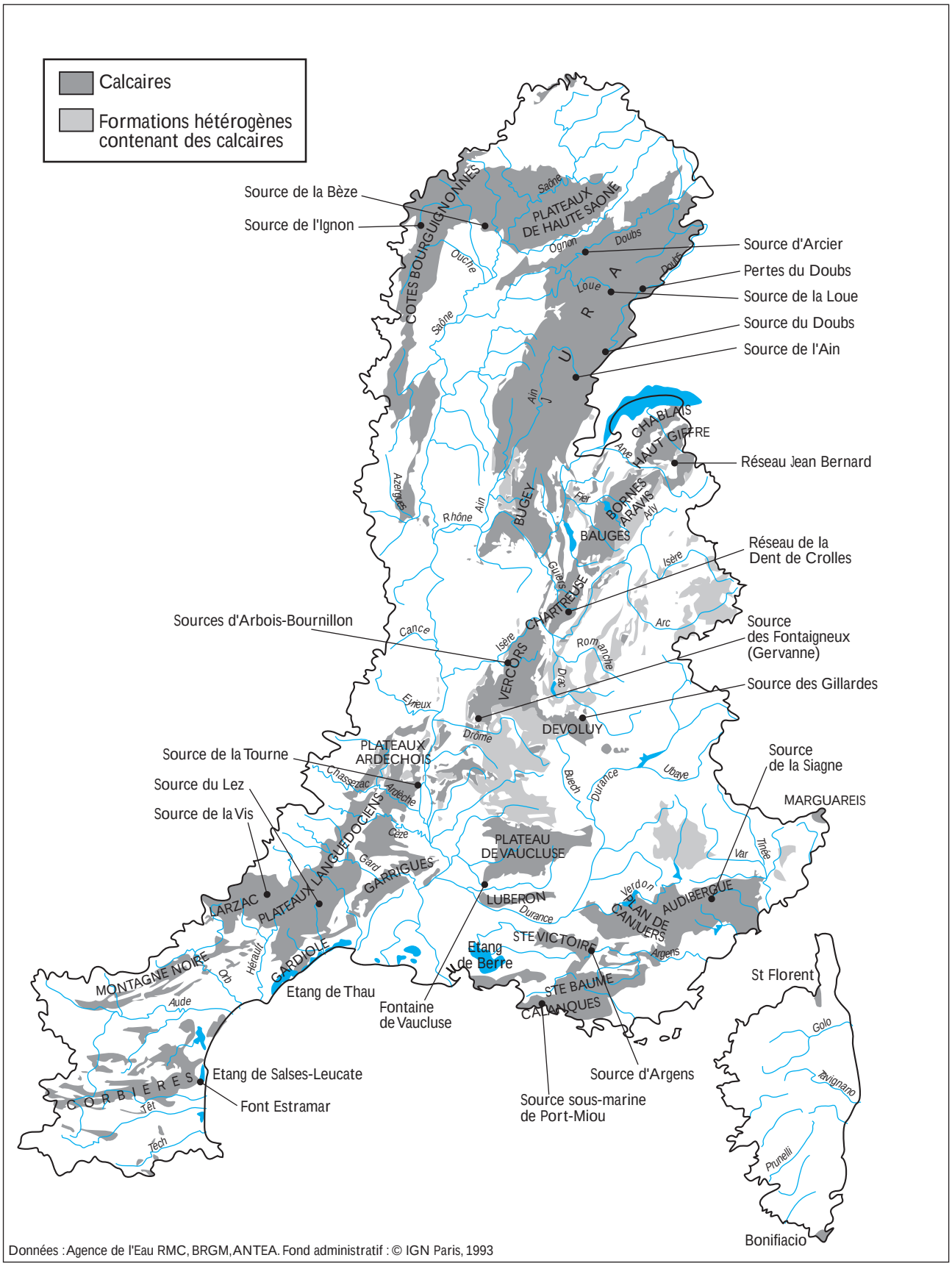
Ce guide technique a pour objet de faciliter la mise en œuvre des préconisations du SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse en matière de connaissance et de gestion des ressources en eau des régions karstiques. Le but est de favoriser le recours à ces ressources, leur protection et leur exploitation selon des méthodes de gestion active adaptées aux caractères spécifiques du karst.

La ***première partie*** de ce document aborde la connaissance des karsts. Elle définit les notions de ***karst*****,** de ***système karstique*** et **d'*aquifère karstique*** ; elle précise les notions de ***structure*** et de ***fonctionnement*** de ce dernier ; elle met en avant l'importance des karsts, en particulier dans le bassin. Les caractéristiques intrinsèques d'un karst en font un milieu complexe à connaître précisément et à explorer. Face à cette difficulté, ***une méthodologie d'approche globale*** du système karstique est présentée.

La ***deuxième partie*** aborde les impacts des activités humaines sur les eaux souterraines du karst. La vulnérabilité de l'aquifère karstique est définie par rapport aux autres ressources en eau, aquifères poreux et fissurés et eaux de surface, de façon à faire apparaître ses particularités face aux pollutions. Puis elle présente l'ensemble des points relatifs à ***l'étude***, à ***l'exploration*** et à ***l'exploitation d'un système karstique***.

Enfin, une ***troisième partie*** aborde les aspects de ***la protection et de la gestion des ressources en eau karstique***. Elle expose les problèmes rencontrés, liés à la particularité des karsts ; elle donne finalement quelques exemples de gestion des karsts sur le bassin Rhône-Méditerranée-Corse.

Ce guide est donc un document technique s'adressant à des personnes ayant déjà quelques notions sur les eaux souterraines et les karsts. Il intéressera particulièrement les techniciens ayant à étudier les potentialités d'un karst en vue de son exploitation. Il offre de nombreux repères sur le déroulement et le contenu de l'étude à réaliser et fait état des expériences déjà menées. Il ne peut néanmoins en aucun cas remplacer l'expérience et la connaissance des hydrogéologues en matière de karst.



Données : Agence de l'Eau RMC, BRGM, ANTEA. Fond administratif : © IGN Paris, 1993

Figure 2 - Les affleurements calcaires et les principaux sites karstiques du Bassin Rhône-Méditerranée-Corse

Le karst dans le bassin Rhône - Méditerranée - Corse

Dans sa 3ème orientation, le SDAGE du bassin Rhône - Méditerranée - Corse fait explicitement référence aux systèmes aquifères à dominante karstique, "*marqués par une forte extension territoriale dont les réserves sont sans doute sous exploitées (ils représentent 27 % des prélèvements en eau souterraine) du fait en partie de potentialités d'exploitation encore mal connues et probablement sous estimées, mais dont la vulnérabilité aux pollutions est bien souvent comparable à celle des eaux superficielles*". Les eaux souterraines du bassin couvrent 70 % des volumes prélevés par les collectivités (AEP essentiellement) et environ 40 % de tous les usages confondus, excepté le refroidissement des centrales thermiques. Plus de 20 % des captages AEP d'eau souterraine de l'ensemble du bassin prélèvent l'eau d'aquifères karstiques. Dans certains départements de Franche-Comté, ce pourcentage atteint 80 %.

Le karst dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse est bien développé (figure 2) et concerne les formations géologiques suivantes :

1) des bandes de calcaires et de dolomies du Paléozoïque (Pyrénées, Corbières, Montagne Noire et Cévennes),
2) les calcaires du Trias (Haute-Saône, Var),
3) les calcaires et dolomies du Lias, du Jurassique et du Crétacé inférieur (Pyrénées, Corbières, Languedoc et sud des Causses, Vivarais, Pré-Alpes du Sud et Provence, Pré-Alpes du Nord (photo 1) et Dauphiné, Jura, Bourgogne),
4) les calcaires du Crétacé supérieur et du Tertiaire (Minervois et Corbières occidentales).

L'extension des ensembles karstiques, très variable, s'étend de quelques km^2 à environ 1100 km^2 pour le système karstique de Vaucluse. Certains ensembles (Vaucluse, Corbières orientales) sont constitués d'un seul système, d'autres (karst nord-montpelliérain) d'un nombre important de petits systèmes. Ce fractionnement est en général bien expliqué par les conditions géologiques (faible extension de l'ensemble carbonaté, forte intensité de la tectonique), mais aussi par les variations de niveau de base, responsables de la création de nombreux réseaux de conduits karstiques plus ou moins superposés (cas des systèmes karstiques de haute montagne).

Photo 1
Gouffre sur le massif du Parmelan (74)

Principales caractéristiques des karsts du bassin Rhône - Méditerranée - Corse.

Ces systèmes karstiques sont souvent binaires (cf. figure 5, page 10), c'est-à-dire qu'ils drainent, en plus de l'infiltration directe dans les calcaires, des écoulements de surface par des pertes ; ceux-ci doivent être pris en compte dans la gestion et la protection des eaux souterraines. Le cas de la liaison entre les pertes du Doubs et la source de la Loue (Franche-Comté) est de ce point de vue exemplaire (cf. page 36).

Les karsts de haute montagne sont en général dépourvus de couverture (sol, sédiments détritiques), ce qui les rend sensibles aux altérations de surface (photo 2). Tel est le cas de certaines stations d'altitude des Préalpes calcaires. Dans le Jura et les Alpes, ces karsts possèdent des réseaux de drainage bien évolués. Dans certains secteurs, la karstification a atteint un tel niveau de développement que le stockage est réduit. Le massif karstique du Haut Giffre, près de Samoëns en Haute-Savoie, est parcouru par des écoulements souterrains, dont le bassin d'alimentation couvre 4 km^2 ; ainsi s'est développé un réseau de conduits profond de 1602 m et long de plus de 20 km : le gouffre Jean Bernard (réseau spéléologique resté pendant longtemps le plus profond au monde). Dans le massif de la Chartreuse, le modeste plateau (2 km^2) de la Dent de Crolles, constitué de calcaires urgoniens, est parcouru par un réseau de cavités de plus de 50 km, étagées sur quatre niveaux, pour 600 m de dénivellation.

En revanche, dans certaines situations, les exutoires karstiques localisés en basse altitude (Jura et Alpes) peuvent être masqués par une couverture récente importante (fluvio-glaciaire, alluvions, moraines) qui peut engendrer la constitution de réserves notables. Cependant, les émergences cachées, directement dans des aquifères alluviaux, ne rendent pas facile l'étude de tels aquifères à fortes ressources potentielles.

Les variations importantes du niveau de base ont aussi conduit à la mise en place d'exutoires karstiques sous le niveau de lacs (lac d'Annecy), de lagunes littorales (étangs de Thau, de Lapalme et de Salses-Leucate) ou de la mer (côte des Alpes-Maritimes et du Var, calanques marseillaises). L'abondance des massifs karstiques le long du littoral méditerranéen a créé des situations hydrogéologiques extrêmement complexes (karst voisin des étangs de Thau (cf. page 34) et de Salses-Leucate (cf. page 37)). Les systèmes karstiques ont été en partie envahis naturellement par l'eau marine du fait de la remontée du niveau marin au cours des derniers 15 000 ans, ce qui a profondément modifié leur fonctionnement. De ce fait, les risques d'intrusion marine liés à l'exploitation des eaux souterraines sont élevés et sont difficiles à prévoir sans une étude détaillée préalable. En Languedoc-Roussillon, des remontées de gaz carbonique d'origine profonde favorisent, et ont certainement favorisé dans le passé le développement de la karstification en profondeur sous le niveau des sources. Cette condition particulière peut être responsable de caractéristiques aquifères particulièrement intéressantes (grande capacité de stockage, bon développement du drainage dans la zone noyée), mais encore assez mal connues.

Il n'est pas rare que des forages, atteignant en profondeur des calcaires, sous d'autres formations géologiques, recoupent des cavités importantes et fournissent des débits intéressants. Tel est le cas des calcaires du Jurassique moyen dans la vallée du Doubs. Il s'agit d'aquifères, sans exutoire identifié en surface, dans lesquels la karstification s'est développée en profondeur selon des modalités encore mal élucidées. Présents dans de nombreux bassins, ces aquifères karstiques profonds très mal connus paraissent receler des réserves importantes, mais dont la reconstitution n'est pas évaluée ; la présence d'eaux à long temps de séjour a parfois été révélée. L'exploitation de ces aquifères profonds doit par conséquent être conduite avec une grande prudence, tant que leurs conditions de recharge n'ont pas été démontrées.

De manière générale, la pollution diffuse sur les karsts du bassin est réduite. C'est la conséquence de la faible pression anthropique sur les territoires karstiques. Cependant, là où la couverture de sol ou de sédiments est assez épaisse (Franche-Comté), des cultures intensives se développent et, avec elles, les teneurs en nitrates des eaux souterraines augmentent.

La qualité bactérienne des eaux de sources karstiques est presque toujours médiocre pendant les périodes de hautes et moyennes eaux. Les rejets d'eaux usées dans le karst, concentrés ou dispersés, en sont l'origine. C'est pourquoi les captages de ces sources pour l'eau potable doivent comporter un dispositif de traitement adapté aux spécificités du karst. En revanche, l'apparition de turbidités fortes pendant ces mêmes périodes, habituelle sur nombre de sources, est un problème plus délicat à traiter, surtout pour de petits captages ; la disposition du captage lui-même (captage réalisé à proximité du conduit, et non directement dedans) peut dans certains cas améliorer la situation.

1 LE KARST : UN AQUIFERE A LA STRUCTURE ET AU FONCTIONNEMENT ORIGINAUX

Concepts de base

Définition

Le karst est un paysage résultant de processus particuliers d'érosion (la ***karstification***). Ces processus sont commandés par la dissolution des roches carbonatées (calcaires et dolomies) constituant le sous-sol des régions concernées. C'est l'eau de pluie infiltrée dans ces roches qui assure cette dissolution. L'eau acquiert l'acidité nécessaire à la mise en solution de la roche en se chargeant de gaz carbonique (CO_2) produit dans les sols par les végétaux et les colonies bactériennes. Le paysage de surface, constitué en général de dépressions fermées (appelées *dolines*, pour les petites, et *poljés*, pour les plaines d'inondation), est associé à un paysage souterrain, dont les grottes et les gouffres parcourables par l'homme font partie (figure 3 et photo 3).

Le karst est par conséquent un paysage original (photo 4), créé par les écoulements d'eau souterraine. L'eau circule en son sein, s'y accumule et émerge par des sources aux débits souvent considérables (photos 5 et 6), mais très fluctuants dans le temps (Fontaine de Vaucluse, débit moyen : 20 m^3/s ; source de la Loue, débit moyen : 10,8 m^3/s). ***Le karst est donc également un aquifère : l'aquifère karstique***.

Définitions

Un ***aquifère*** est une formation géologique possédant une ***perméabilité*** suffisante pour que l'eau souterraine puisse y circuler. Un aquifère est constitué d'une ***zone non saturée***, ou ***zone d'infiltration***, dont les vides, occupés par de l'air, sont parcourus par de l'eau, et d'une ***zone noyée*** ou ***saturée***, ou ***nappe aquifère***, dont tous les vides sont remplis d'eau. Si la ***porosité*** du milieu, c'est-à-dire le rapport du volume des vides au volume total de la formation, est forte (supérieure à 10 %), l'aquifère peut posséder une ***capacité de stockage*** intéressante, dont les ***réserves*** peuvent être exploitées. La zone d'infiltration est séparée de la zone saturée par la ***surface de la nappe***, dont on mesure le ***niveau piézométrique***. Ce dernier varie en fonction de l'alimentation par l'infiltration et de la vidange naturelle, par les sources ou au profit d'autres aquifères, et de la vidange artificielle par les prélèvements (pompage et drainage).

Caractéristiques et conséquences

Caractéristiques

La karstification transforme une formation carbonatée fracturée, ***l'aquifère carbonaté fissuré***, caractérisé par une ***architecture géologique*** (géométrie de la formation, caractères pétrographiques et géochimiques, comportement mécanique, distribution des fractures), en un ***aquifère karstique.***

1) ***L'aquifère karstique est le seul type d'aquifère où c'est la circulation d'eaux dans la formation géologique qui façonne les vides de l'aquifère et induit des caractéristiques aquifères spécifiques.***

2) La constitution d'un aquifère karstique peut être rapide à l'échelle des temps géologiques : quelques milliers à quelques dizaines de milliers d'années. De ce fait, l'aquifère karstique enregistre les variations, même de faible amplitude, du niveau de base où est localisée la source, par le développement d'un drainage associé à chaque niveau. Toutes les régions karstiques présentent la marque de plusieurs phases de karstification, dont seules les plus récentes, associées au niveau de base actuel, participent au fonctionnement de l'aquifère. Ainsi, un aquifère carbonaté peut présenter un réseau de conduits visitables, ne fonctionnant plus : c'est une partie non fonctionnelle de l'aquifère karstique.

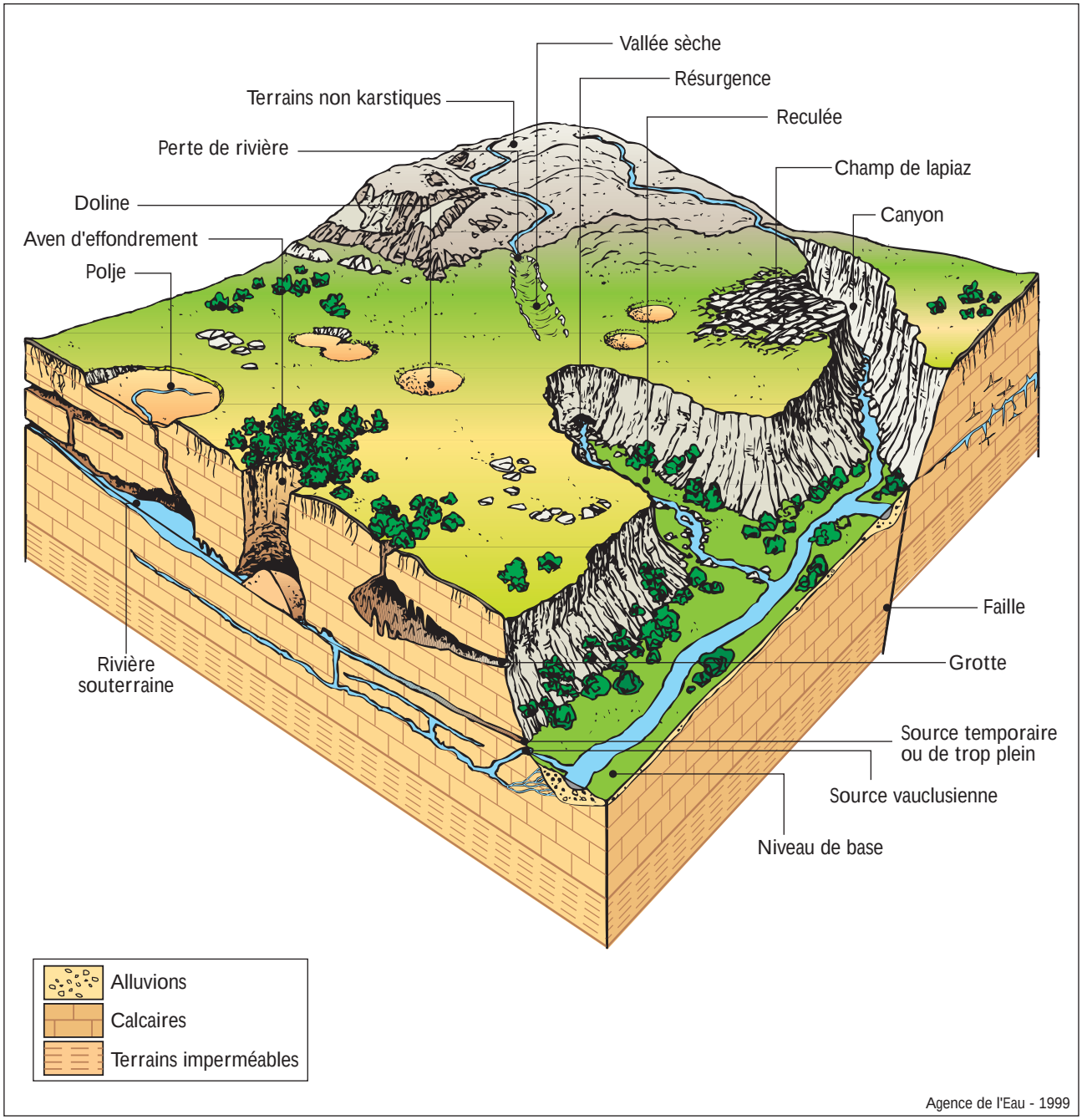


Figure 3 - Paysage karstique

C'est pourquoi il n'est pas suffisant de constater l'existence de phénomènes karstiques ; il faut aussi et surtout considérer la fonctionnalité karstique de l'aquifère. Cela revient à vérifier l'adéquation entre l'existence d'une structure karstique et son fonctionnement.

3) Dans l'aquifère karstique (figure 4), les écoulements ont créé des vides ***organisés en une structure hiérarchisée*** de drainage, ***le réseau de conduits***, de l'amont (la surface) vers l'aval (la source, exutoire en général unique de l'aquifère). Souvent, au cours de la saison de recharge de l'aquifère, des remontées importantes de l'eau dans le réseau de conduits provoquent l'inondation de réseaux supérieurs, habituellement sans écoulement, et la mise en fonctionnement de sources temporaires de trop plein.

Conséquences

L'aquifère karstique, à maturité, possède un réseau de conduits organisé à la façon d'un bassin versant de surface.
L'aquifère karstique n'est pas d'un type unique : il existe une grande variété d'aquifères karstiques en fonction de l'état de développement de la karstification, depuis le pôle ***aquifère fissuré*** jusqu'au pôle ***aquifère karstique pur***.
Le degré d'évolution karstique de l'aquifère se traduit dans son fonctionnement hydrogéologique.

4) L'aquifère karstique présente une organisation des écoulements souterrains, qui détermine celle des vides qu'ils créent. Dans cette organisation (figure 4), ***les deux fonctions classiques (stockage et drainage) sont séparées***, au moins dans la zone noyée, et sont assurées par des éléments distincts de la structure :
- le ***drainage*** est assuré par un réseau de conduits hiérarchisé.
- le ***stockage*** est fourni soit par les parties microfissurées ou poreuses de la roche non karstifiée, soit par des cavités karstiques, parfois de grandes dimensions, connectées au drainage par des zones à fortes pertes de charge (Systèmes Annexes au Drainage, SAD).

Le stockage est réalisé par un ensemble d'éléments hydrauliquement indépendants les uns des autres, mais tous connectés plus ou moins bien au réseau de conduits. Il en résulte un compartimentage hydraulique responsable de très fortes hétérogénéités.

5) L'aquifère karstique se distingue des aquifères poreux et des aquifères fissurés par le fait qu'il possède des vides de grandes dimensions, dans lesquels les eaux souterraines sont susceptibles de circuler très vite (photo 7).
Les dimensions des vides dans le karst couvrent une très large gamme de valeurs, depuis les fissures d'ouverture micrométrique et longues de plusieurs mètres jusqu'à des conduits de quelques dizaines de mètres de section et longs de plusieurs kilomètres. De même, les vitesses d'écoulement souterrain vont de moins de quelques centimètres par heure à plusieurs centaines de mètres par heure.
De ce fait, dans les aquifères karstiques fonctionnels, la très grande majorité des eaux séjourne moins d'un cycle hydrologique, et souvent seulement quelques jours à quelques semaines. Pour cette raison, toutes les caractéristiques physiques, chimiques et hydrauliques, présentent une très grande variabilité spatiale et temporelle.

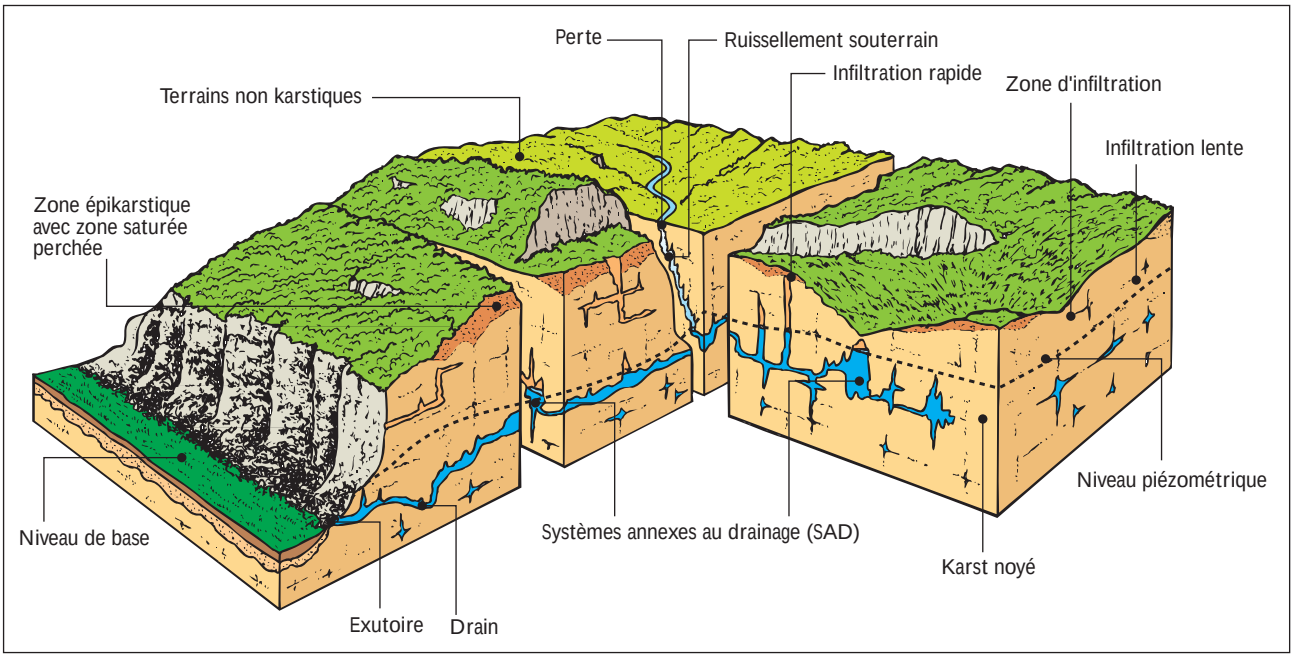


Figure 4 - L'aquifère karstique (d'après Mangin, 1975)

6) L'aquifère karstique possède des modalités d'infiltration particulières qui n'existent pas dans les autres aquifères (figure 4).

Il existe en surface, sur quelques mètres d'épaisseur, une zone plus perméable du fait de l'altération : ***la zone épikarstique ou épikarst***. L'épikarst rassemble l'eau d'infiltration dans une nappe perchée locale et discontinue, drainée vers le bas soit par les vides les plus larges en un ruissellement souterrain rapide, soit par les vides de petites dimensions, en une infiltration lente écoulant un mélange d'air et d'eau.
Par ailleurs, au contact de formations imperméables et du calcaire, des pertes absorbent les écoulements de surface et constituent une alimentation directe par ruissellement à fort débit de la zone noyée.

Par conséquent, lorsque des écoulements de surface contribuent à l'alimentation de la zone noyée à partir de pertes, ***l'aquifère karstique au sens strict n'est qu'une partie du système karstique***, puisque ce dernier est alors constitué de l'aquifère proprement dit et du bassin de surface drainé par des pertes (photo 8).

On distingue donc (figure 5) :
- les ***systèmes karstiques unaires*** (système karstique = aquifère karstique),
- les ***systèmes karstiques binaires*** (système karstique = aquifère karstique + bassin de surface drainé par des pertes).

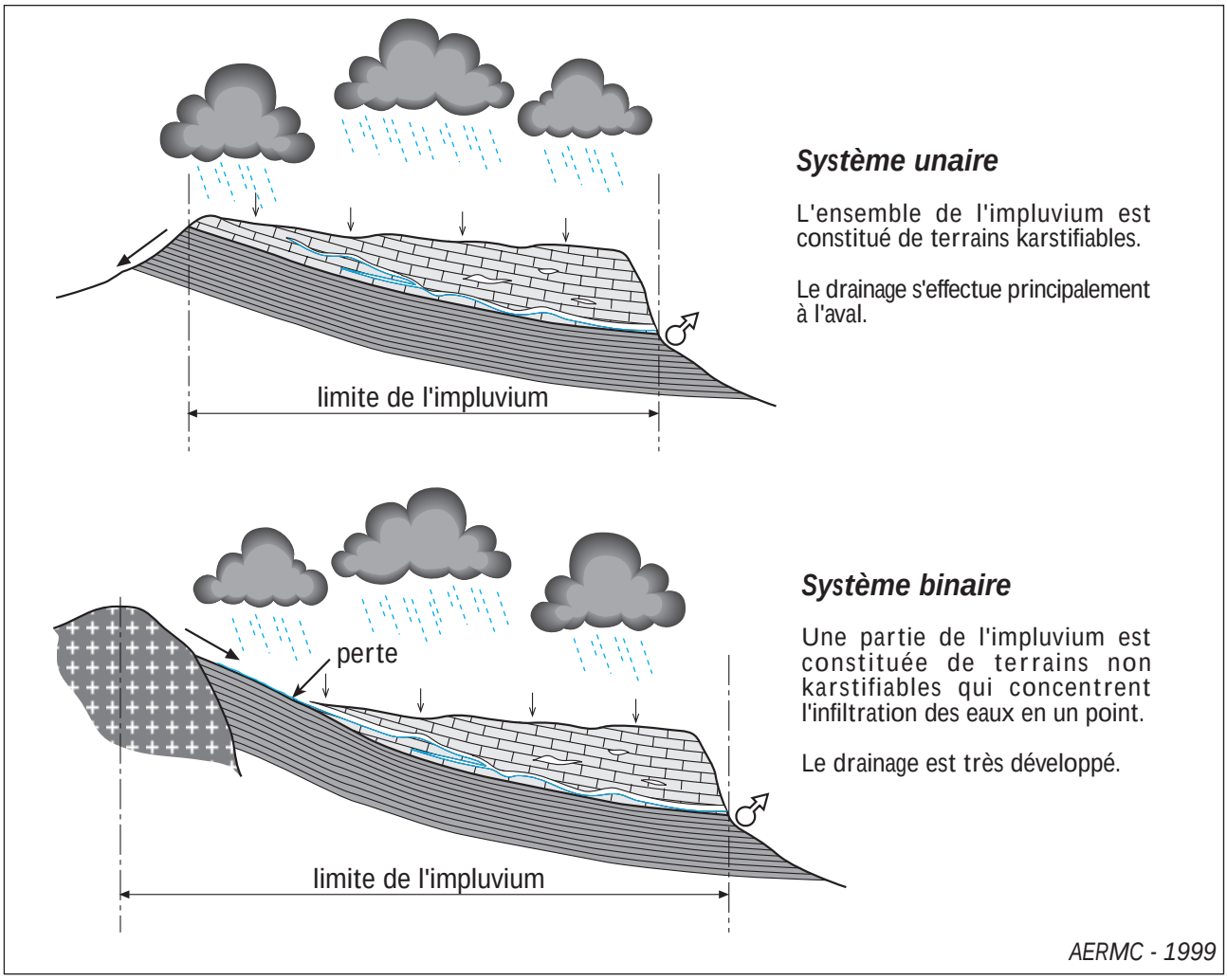


Figure 5 - Les deux types de systèmes karstiques

Source, émergence, résurgence ou exsurgence ?

Les sorties d'eau du karst sont toujours des sites extraordinaires, ne serait-ce que parce que les massifs et les plateaux qui les dominent sont dépourvus d'eau. A la suite de E.A. Martel, le fondateur de la spéléologie en France, l'appellation "source" est en général soigneusement évitée sous le prétexte que les ***sources*** ne peuvent qu'être alimentées par des eaux pures, filtrées naturellement. Martel ne voyait dans la plupart des sources karstiques que la ***résurgence*** d'eaux de surface engouffrées dans des pertes. Il les distinguait des ***exsurgences***, sources ne recevant aucune eau en provenance de pertes de rivière. Finalement, les résurgences sont des sources de systèmes karstiques binaires, alors que les exsurgences sont celles de systèmes karstiques unaires. Quant aux ***émergences***, ce sont celles dont l'origine n'est pas connue.

7) Le karst est réputé ***très vulnérable aux pollutions par comparaison avec les autres aquifères***, du fait des caractères suivants :

- faible rôle filtrant de la zone d'infiltration,
- faible effet de la dispersion et de la dilution lié à l'organisation des écoulements,
- temps de séjour de l'eau trop court pour qu'un effet auto-épurateur intervienne au sein de l'aquifère,
- importante variabilité temporelle de la qualité de l'eau.

La vulnérabilité du karst présente en contrepartie certains caractères intéressants qui doivent être pris en compte dans les projets de mise en valeur :

- élimination généralement rapide des pollutions accidentelles,
- effets retardateurs (adsorption, dispersion) en général réduits,
- amélioration rapide (à l'échelle du cycle hydrologique) de la qualité de l'eau à l'exutoire à la suite de changements dans les rejets de pollutions chroniques ou saisonnières (modifications des pratiques, mise en place de stations de traitement), c'est-à-dire que les effets cumulatifs d'un cycle sur le suivant sont faibles ou négligeables, du fait du temps de séjour très inférieur à un an,
- nette différence de qualité et de comportement entre les périodes d'étiage (fonctionnement capacitif, temps de séjour long) et de crue ou de hautes eaux (fonctionnement transmissif, temps de séjour court).

Conclusions

1) La mise en place d'un réseau de drainage karstique est déterminée par des facteurs fixant l'architecture du milieu et précédant les processus de karstification. Ces facteurs ne sont pas les causes de la karstification ; ils déterminent le cadre dans lequel les processus karstiques interviennent pour transformer le milieu, dès que les conditions nécessaires sont réunies. Ce sont :

- ***la géologie*** : lithologie, géométrie de la formation aquifère, fracturation (= perméabilité initiale) découlant de la succession des mouvements tectoniques et du comportement mécanique de la roche,
- ***l'association de bassins versants de surface*** sur terrains imperméables aux roches calcaires,
- ***la géomorphologie régionale*** : position du niveau de base hydraulique, fixant la localisation du point bas de la formation aquifère (= position de la source, qui est le niveau d'eau imposé le plus bas vers lequel convergent tous les écoulements souterrains), importance du relief (= épaisseur de la zone d'infiltration).

Leur étude définit le cadre dans lequel le karst a pu se développer, mais ne fournit aucune information sur l'organisation karstique, ni sur son fonctionnement.

2) Les processus de karstification proprement dits agissent sur les roches calcaires grâce au ***potentiel de karstification*** défini par :

- ***le climat*** qui fixe les précipitations et le couvert végétal, dont dépendent le débit d'eau traversant l'aquifère et la quantité de CO_2 disponible (flux de solvant),
- ***la géomorphologie***, qui impose :

  - l'énergie nécessaire à l'écoulement pour le transport des matières dissoutes (= gradient hydraulique),
  - en partie, le flux de solvant traversant l'aquifère, quand existe du ruissellement de surface aboutissant à des pertes,
  - l'épaisseur de la zone d'infiltration : l'eau souterraine conserve d'autant plus d'aptitude à dissoudre le calcaire en profondeur que la zone d'infiltration est peu épaisse.

3) Les phases de karstification successives, imposées par exemple par des variations climatiques ou morphologiques, sont responsables de la mise en place de formes de surface et souterraines qui constituent des paysages complexes. Cette complexité des paysages s'exprime dans la plupart des massifs karstiques par un fonctionnement hydrogéologique également complexe.

4) ***Compte tenu de leurs spécificités, les aquifères karstiques doivent être abordés au moyen d'un ensemble d'outils de reconnaissance et d'exploration adaptés.***

Photo 2
Un karst de haute montagne :
lapiaz du désert de Platé
Flaine (74)

Photo 3
Rivière souterraine du gouffre de la Combe aux Prêtres. Francheville (21)

Photo 4
Un paysage karstique caractéristique : le cirque de Navacelles (34)

Photo 5
Sources du Guiers Vif St Pierre d'Entremont (38)

Photo 6
Source du Lison Nans sous Sainte Anne (39)

Les outils de reconnaissance et d'exploration des systèmes karstiques

Comparaison entre les milieux poreux, fracturés et karstiques

La nature même du karst impose le recours à une méthodologie spécifique pour l'étude des systèmes karstiques. Cette méthodologie est notablement différente de celle appliquée aux aquifères poreux et fracturés. En effet :

1) ***Dans les milieux poreux et fracturés***, les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère peuvent être déterminées sur des sites localisés (forages, puits et piézomètres). La représentativité spatiale de ces sites est connue grâce à la définition d'un ***volume élémentaire représentatif*** (VER) et de la géométrie de l'aquifère. Dans les aquifères poreux, il existe une continuité hydraulique entre tous les vides parcourus par l'eau, du fait que les caractéristiques hydrauliques sont peu variables dans l'espace. Trois étapes sont suivies pour caractériser l'aquifère :

- Définition de la géométrie de l'aquifère au moyen de la géologie et éventuellement de la géophysique.
- Définition des caractéristiques hydrauliques locales (porosité, perméabilité, emmagasinement) au moyen d'essais de pompage ; dans un tel milieu homogène, la loi de Darcy est valide en tout point et en tout temps.
- Régionalisation des données locales, en utilisant d'autres paramètres (lithologie, piézométrie). Elle est possible parce que l'hétérogénéité du milieu n'est pas trop forte et parce qu'elle peut être décrite avec une approximation suffisante ; le milieu peut même être considéré comme homogène à un niveau d'échelle approprié (hecto ou kilométrique selon la nature poreuse ou fracturée), notamment du fait de sa continuité hydraulique.

Les milieux poreux et fissurés peuvent par conséquent être modélisés au moyen d'outils informatiques résolvant les équations de l'écoulement pour simuler de façon généralement acceptable les écoulements et le transport de matière en leur sein.

La loi de Darcy, fondement de l'hydrogéologie des milieux poreux et fissurés continus

La fonction transmissive des aquifères, qui permet l'écoulement de l'eau, le transport de matières et la transmission d'effets comme la pression, dépend de leur nature, exprimée par les paramètres géométriques et hydrodynamiques. La ***loi de Darcy***, qui a été établie expérimentalement, est le fondement même de l'hydrodynamique souterraine.
Cette loi énonce que le ***débit d'eau Q*** en m^3/s transitant verticalement dans une colonne de sable saturé en eau, est proportionnel à la ***section de la colonne S*** en m^2, à la ***perte de charge par unité de longueur, i***, sans dimensions, et à un coefficient de proportionnalité, dit ***coefficient de perméabilité K***, en m/s, soit :

$$Q = K.S.i$$

La ***perte de charge i*** par unité de longueur est définie comme le ***gradient hydraulique***, rapport de la ***hauteur de charge h***, à la ***longueur l sur laquelle s'effectue l'écoulement***.
Mais la loi de Darcy n'est vérifiée que si quatre conditions sont parfaitement respectées. Elles concernent le ***réservoir***, qui doit être ***continu, isotrope*** et ***homogène***, et l'***écoulement***, qui doit être ***laminaire***, c'est-à-dire caractérisé par des lignes de courant continues, parallèles, rectilignes et occupant entre elles la même position relative. Ces conditions de validité s'appliquent bien aux aquifères poreux en général. Elles ne sont pas respectées dans les formations très hétérogènes, ni dans les parties d'aquifères où les vitesses d'écoulement sont très élevées, par exemple près des ouvrages de captage.

Dans les aquifères karstiques, les hétérogénéités sont considérables, et les vitesses d'écoulement, localement très rapides dans les conduits ; par conséquent, la loi de Darcy n'est pas valide, sauf très localement, dans des secteurs éloignés ou non influencés par les écoulements dans les conduits, et lorsque les écoulements sont très lents.

2) ***Dans l'aquifère karstique au sens strict***, la karstification organise progressivement les écoulements et la structure des vides. Le fonctionnement de l'aquifère est déterminé totalement par l'existence de cette structure des vides, dont il rend compte. ***L'aquifère karstique est alors fonctionnel***. Les effets de cette organisation sur le fonctionnement de l'ensemble sont les suivants :

- séparation des fonctions transmissive et capacitive,
- apparition de très forts contrastes de perméabilité, dépassant 10^6, responsables de discontinuités hydrauliques, notamment pendant les périodes d'écoulement majoritairement rapide (crues),
- selon l'état de recharge de la zone noyée, fonctionnement de certaines parties en charge (comportement captif) ou en écoulement libre,
- existence de vitesses d'écoulement souterrain très rapides (quelques centaines de m/h),
- variabilité spatiale et temporelle considérable des caractéristiques physiques et hydrauliques du milieu, aussi bien dans la zone noyée que dans la zone d'infiltration,
- observations en forages souvent sans rapport avec les caractéristiques d'ensemble de l'aquifère,
- cartes piézométriques ne fournissant pas une réelle information sur les écoulements souterrains et leur organisation, même en multipliant les points d'observation,
- non validité de la loi de Darcy en tout point, ni en tout temps.

3) ***L'aquifère karstique est souvent soumis à des modifications de la position de son niveau de base***, orientant les écoulements souterrains différemment de la situation responsable du développement et du fonctionnement de son réseau de drainage du moment. Le système karstique perd alors sa fonctionnalité, c'est-à-dire que son réseau de drainage ne présente plus de fonctionnement karstique. Cette situation apparaît sous l'effet d'un ennoyage complet et d'une modification de la direction générale des écoulements souterrains, résultant d'une transgression marine ou d'un alluvionnement externe bloquant l'ancienne émergence. Il s'agit alors d'un ***aquifère karstique non fonctionnel***, possédant souvent une importante capacité de stockage ; l'aquifère présente une continuité hydraulique ; il peut alors être étudié avec les méthodes classiques. Cependant, le réseau de drainage inactif peut être réactivé sous l'effet de modifications des conditions locales ou régionales d'écoulement (pompage, drainage minier, décolmatage), ce qui fait alors réapparaître des discontinuités locales et un fonctionnement karstique typique.

Conséquences

Les caractéristiques hydrauliques de l'ensemble de la zone noyée ne peuvent en aucun cas être déterminées au moyen de l'approche traditionnelle "forage - essais de puits", même en multipliant les points d'observations. *Mais cela ne signifie pas que le forage n'est pas un moyen d'exploitation de l'aquifère karstique, ni un dispositif utile pour obtenir des informations.*

Il faut insister sur le fait que ***la mesure d'un niveau d'eau dans un forage est difficilement interprétable en l'absence d'informations complémentaires***. En effet, le forage peut recouper un conduit appartenant au réseau de drainage, cas à faible probabilité de réalisation ; il peut aussi traverser une zone de stockage (système annexe au drainage), lié à un conduit par des pertes de charge plus ou moins fortes, ou bien traverser, comme cela est classique, une zone microfissurée, à très faible perméabilité. Des essais de pompage et de traçages peuvent aider à situer le forage par rapport à la structure karstique, à condition que les observations soient faites simultanément sur différents éléments de cette structure (source, source temporaire, cavité atteignant une circulation ou la zone noyée). En outre, on sait maintenant que les différentes fractures recoupées par un forage présentent fréquemment des charges différentes à un instant donné et que ces valeurs varient dans le temps.

Les méthodes d'analyse de la géométrie de l'aquifère (géologie, géophysique, analyse de la fracturation) sont insuffisantes, sinon impuissantes, pour définir l'existence et la position du réseau de drainage karstique, encore moins son fonctionnement, soit parce que les objets possèdent une taille trop faible (géophysique), soit parce que leur position et leur fonction ne sont ni directement, ni uniquement liées à la structure géologique.

Enfin, la géométrie de la formation aquifère est souvent bien plus large que le système karstique lui-même. Son analyse ne suffit pas à déterminer les limites du système. De même, compte tenu des discontinuités hydrauliques, la carte piézométrique ne permet pas de positionner les limites avec les systèmes voisins, par exemple sur des crêtes piézométriques.

Les techniques actuelles de modélisation mathématique, basées sur une représentation maillée, ne permettent pas de simuler de manière satisfaisante les écoulements et les transports de matière dans les aquifères karstiques (cf. page 35).

C'est pourquoi il est souhaitable d'étudier chaque aquifère karstique dans sa totalité, de manière à prendre en compte dans sa globalité l'organisation de son drainage souterrain et sa fonctionnalité. Dans ce but, le suivi en continu des écoulements aux exutoires du système (source pérenne, sources de trop plein) et le suivi du chimisme des eaux (enregistrement de la conductivité, campagnes d'échantillonnages pour analyses chimiques) constituent les informations de base nécessaires à la compréhension du fonctionnement karstique.

Photo 7
Grotte de Bournillon
Chatelus (38)
La rivière souterraine en crue.

Photo 8
Perte récente et spectaculaire
du ruisseau du Gour
Champlive (25)

Méthodologie

Les questions de base

Le système karstique doit être étudié par une approche globale, qui permet de prendre en compte l'ensemble de l'unité de drainage (figure 4). Cette approche doit répondre aux questions suivantes, relatives à l'étude, à l'exploration, à l'exploitation, à la gestion et à la protection des ressources en eau du système :

1. Le système possède-t-il un fonctionnement karstique ? C'est-à-dire possède-t-il une structure de drainage karstique qui soit fonctionnelle ?
2. Quelle est l'extension du système ?
3. Le système possède-t-il des réserves dans sa zone noyée ? Sont-elles importantes et cohérentes avec l'objectif ?
4. Les ressources du système sont-elles suffisantes compte tenu des objectifs fixés ? Les réserves sont-elles importantes ? Leur qualité est-elle convenable ?
5. Ces réserves autorisent-elles une surexploitation temporaire ?
6. Existe-t-il des conduits anciens, habituellement sans écoulement souterrain rapide, susceptibles d'être réactivés lors de phénomènes exceptionnels (crues) ou nouveaux (pompage, mise en charge, etc.) ?
7. Peut-on démontrer l'exploitabilité de l'aquifère ?
8. Quels sont le dispositif de captage et sa localisation les plus appropriés, sur les plans quantitatif et qualitatif, compte tenu des caractéristiques de l'aquifère ?
9. Quel est l'impact de l'exploitation sur les autres ressources et sur les autres milieux ?
10. Connaissant la vulnérabilité du système, quel(s) scénario(s) peut (peuvent) être proposé(s) pour protéger la ressource en eau souterraine ? Comment définir les périmètres de protection ?

La démarche

Selon les cas, l'étude d'un système karstique est conduite soit pour définir son aptitude à fournir un débit donné d'exploitation (pour une AEP, un soutien d'étiage), soit pour caractériser sa vulnérabilité en vue d'établir les périmètres de protection de captages. La démarche est la même dans l'ensemble, puisqu'il est nécessaire ***d'appréhender le fonctionnement du système*** dans les deux cas, à partir d'une approche globale, développée en plusieurs phases. Mais le contenu de ces phases est évidemment différent.

Cette approche consiste à mettre en œuvre à la fois des méthodes de terrain (analyse de la géologie, inventaire cartographique des phénomènes karstiques, traçages artificiels) et des méthodes d'analyse des données (chroniques de débit de sources (figure 6), séries de données géochimiques (figure 11) fournies par des suivis saisonniers de sources et par des campagnes de prélèvements).

Études en vue de l'exploitation (figure 10)

a) Phase d'identification

La *phase d'identification* a pour but de répondre aux questions 1, 2 et 3. Elle doit permettre d'identifier le type de système (fissuré, karstique fonctionnel ou karstique non fonctionnel) et de mettre en évidence la présence de réserves. Elle fait appel à des méthodes d'étude conventionnelles (géologie structurale, stratigraphie, etc.), mais aussi spécifiques au milieu karstique (analyse de la morphologie, y compris l'inventaire des phénomènes karstiques, distribution de fréquence de la minéralisation des eaux souterraines, débits classés, analyse des courbes de récession).

b) Phase de caractérisation

La *phase de caractérisation* doit répondre aux questions 4 et 5. Elle a pour but de définir les caractéristiques de la zone noyée à partir de l'étude des débits et du traçage naturel et artificiel. Elle s'appuie sur des méthodes spécifiques au karst. Elle fournit des précisions sur le fonctionnement karstique.
Pour démontrer l'existence de réserves exploitables, il faut procéder à l'analyse des séries temporelles de débit et de piézométrie : analyse des hydrogrammes de décrue et de tarissement (figure 7), analyses des hydrogrammes à l'échelle annuelle ou pluriannuelle.
Pour définir l'origine de l'eau, les conditions d'écoulement (libre, en charge, en zone d'infiltration) et les temps de séjour, on a recours aux traçages artificiels quantitatifs et à l'analyse du traçage naturel, par les méthodes de l'hydrogéochimie et de la géochimie isotopique.

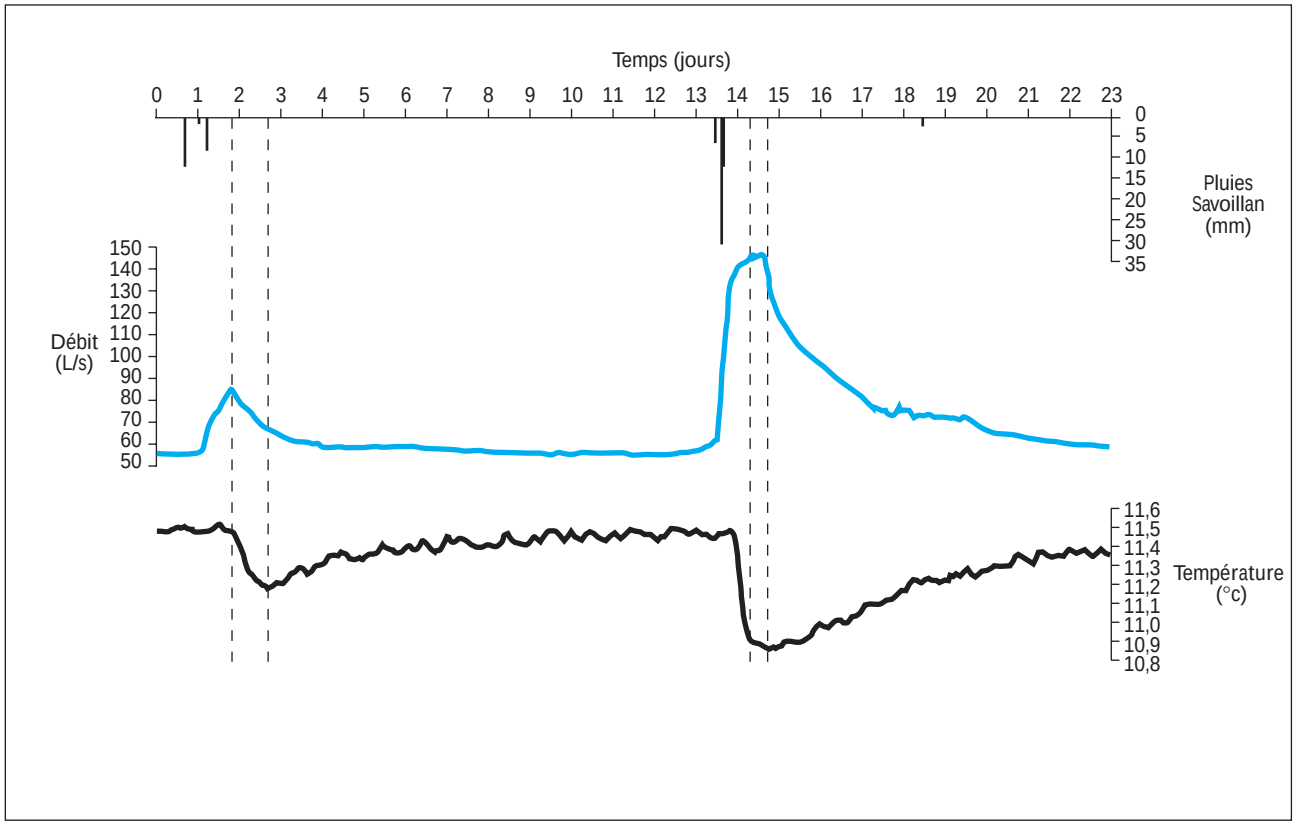


Figure 6 - Impact des précipitations sur le débit et la température à la source de Font Marin (84)
Période du 10/09/92 au 22/09/92 (R. Lastennet - 1994)

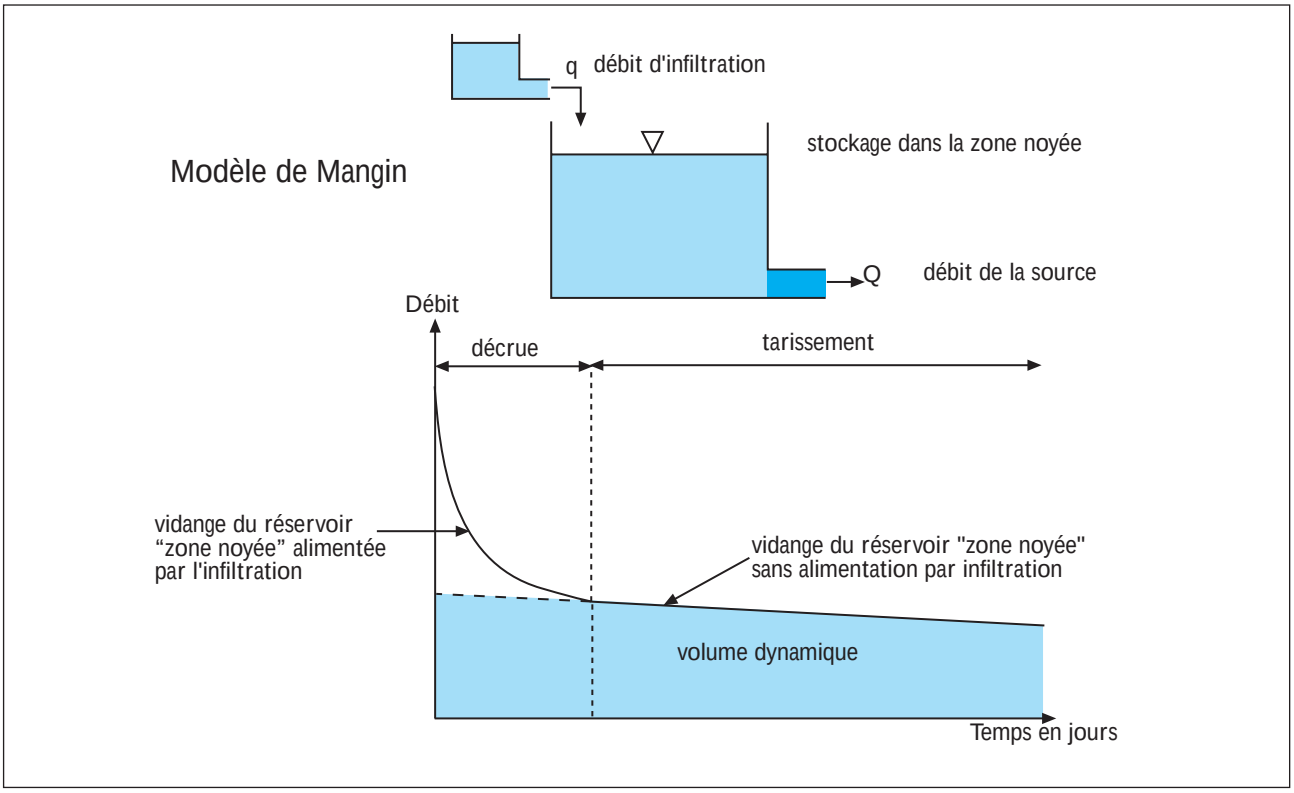


Figure 7 - Décomposition de la récession de l'hydrogramme selon la méthode de Mangin
Analyse de la décrue et du tarissement

c) Phase de démonstration

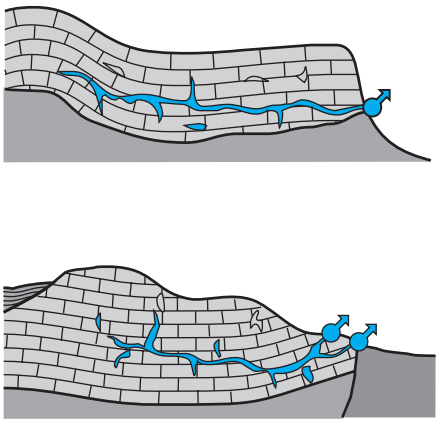
La *phase de démonstration* (figure 10) est mise en œuvre pour définir le mode d'exploitation le mieux adapté à la structure du système étudié en répondant aux questions 6, 7 et 8. Selon que le système possède des réserves mobilisables ou non, ou un conduit pénétrable, son exploitation pourra être envisagée soit à partir de pompages sollicitant les réserves, soit au moyen d'un barrage souterrain créant une réserve.

1) Lorsque l'existence de réserves a été démontrée, cette phase a pour but de vérifier si ces réserves sont mobilisables. En effet, le stockage peut être réalisé principalement dans la zone d'infiltration (en particulier dans l'épikarst) ou dans la zone noyée, mais sans que le réseau de conduits soit toujours apte à assurer une continuité hydraulique entre toutes les parties des réserves. Lorsque la mobilisation de ces réserves de la zone noyée est possible, il faut définir le site de pompage le mieux approprié (à l'exutoire, sur une cavité naturelle ou en forage) et les conditions de l'essai (débit, durée, points de contrôle, point de rejet des eaux).

Cette phase doit d'abord s'attacher à caractériser les écoulements dans le réseau de drainage et les conditions d'émergence, car la mobilisation des réserves dépend essentiellement de la position du drain par rapport aux réserves. En effet, le conduit principal aboutissant à la source peut être disposé de deux façons différentes (figure 8) :

- ***le drain principal est situé à la partie supérieure de la zone noyée*** (*source jurassienne ou aquifère à drainage épiphréatique*) ; l'écoulement peut y être localement libre, donc sans continuité hydraulique de l'aval vers l'amont dans la zone noyée. Un pompage dans le drain ne permet pas un rabattement sous son niveau ; son débit est alors limité par le débit naturel. Un pompage dans un système annexe au drainage (SAD) peut autoriser un rabattement suffisant pour détourner l'écoulement du drain et pour solliciter une petite partie de la réserve : le SAD est alors utilisé en réserve tampon.

- ***le drain principal est situé plus ou moins profondément dans la zone noyée*** (*source vauclusienne ou aquifère karstique phréatique profond*) ; l'écoulement dans le drain est captif. Il constitue une continuité hydraulique de l'aval vers l'amont, ce qui autorise des rabattements sous le niveau de base, sollicitant, sinon l'ensemble, du moins une grande partie des réserves de la zone noyée. Il est alors possible d'extraire des débits supérieurs aux débits naturels de la source : l'aquifère peut être surexploité temporairement, en fonction de ses ressources et de sa capacité de stockage.



Système jurassien

Degré de fracturation, lithologie, et stratification déterminent une faible résistance à l'écoulement des eaux.

Le drainage s'organise au voisinage du niveau de l'exutoire.

Système vauclusien

Degré de fracturation, lithologie, et stratification déterminent une forte résistance à l'écoulement des eaux.

Le drainage s'organise sous le niveau de l'exutoire.

Figure 8 - Organisation du drainage en système vauclusien et jurassien (adapté d'après Marsaud).

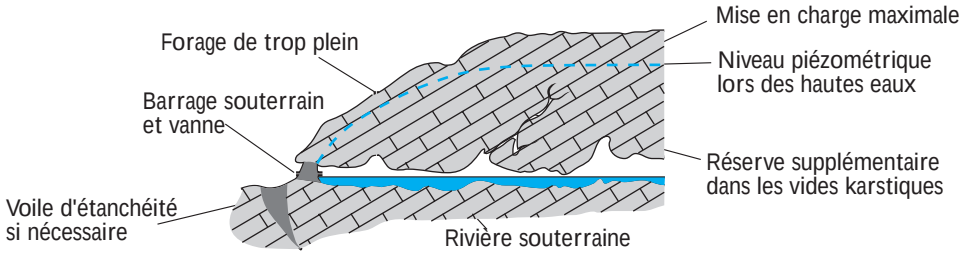
Compte tenu notamment de l'existence de conduits dans la zone noyée des aquifères karstiques, l'interprétation des essais de pompage ne peut pas reposer sur l'utilisation des modèles classiques, représentant soit un milieu poreux, soit un milieu fissuré.

Dans le cas des systèmes karstiques évolués et fonctionnels, les paramètres hydrodynamiques et les lois d'écoulement classiquement utilisés pour caractériser un milieu aquifère et simuler son comportement ne sont plus adaptés. L'interprétation des pompages d'essai doit faire appel à une démarche spécifique. Le but n'est alors plus de déterminer les caractéristiques de la structure du milieu, mais de décrire les réponses obtenues au point de pompage et, si possible, à l'exutoire du système, pour caractériser le fonctionnement de la zone noyée. Ces informations fournissent les éléments permettant 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.

Néanmoins, pour les systèmes à karstification peu développée (aquifères fissurés), les modèles existants sont utilisables, car la structure originelle du milieu n'est que peu modifiée. De même, pour les systèmes karstiques non fonctionnels, les modèles des milieux poreux ou fissurés peuvent, sous certaines conditions, en représenter le fonctionnement.

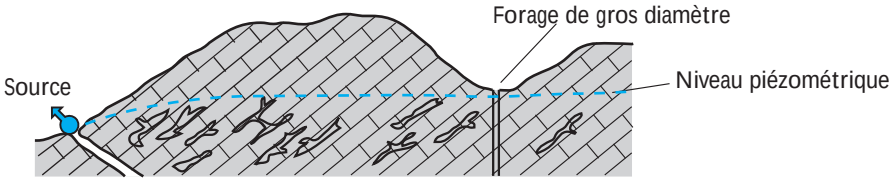
2) *Lorsqu'il n'existe pas de réserves, mais seulement un conduit pénétrable de dimensions importantes*, cette phase peut conduire à proposer la réalisation d'un barrage souterrain et à analyser sa faisabilité. Le barrage a pour but de créer une mise en charge pour accumuler des réserves (exemple de Coaraze, Alpes Maritimes). La technique du barrage souterrain a aussi été expérimentée dans l'émergence sous-marine de Port Miou (Calanques, Bouches du Rhône), dans le cas où existe un stockage probablement important, pour repousser les eaux marines ou saumâtres et limiter la salinisation de l'eau d'origine karstique.

Barrage souterrain sur un drain



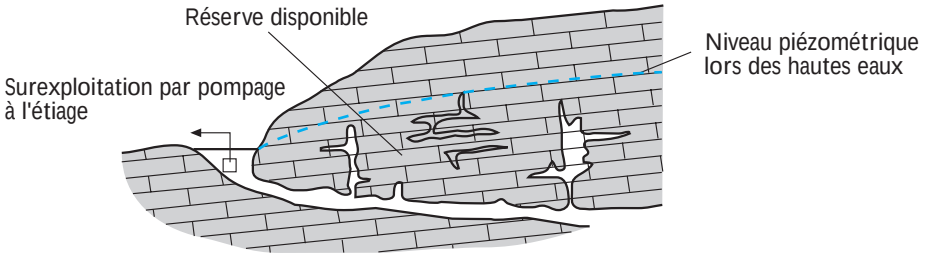
Création d'une réserve supplémentaire dans les vides karstiques des systèmes annexes de l'axe de drainage (ce dernier ne pouvant offrir qu'un faible volume)

Forage sur un système annexe



Exploitation de la zone noyée du karst par pompage à fort débit sur un forage de gros diamètre en amont de la source

Exploitation directe à l'exutoire



Sollicitation des réserves de la zone noyée par l'intermédiaire du drain

Figure 9 - Différents modes d'exploitation des aquifères karstiques (P. Crochet - 1996)

d) Phase d'évaluation

La *phase d'évaluation* conduit à appréhender le fonctionnement de l'ensemble du système en condition d'exploitation, mais aussi ses limites et sa vulnérabilité. Elle s'appuie sur un essai de pompage de longue durée qui doit prendre en compte toutes les observations possibles sur l'ensemble du système. En particulier, l'incidence du pompage doit être déterminée non seulement sur la source et les écoulements en aval, mais aussi sur tous les ouvrages existants, même s'ils sont situés à des distances de plusieurs kilomètres.
Cette phase doit fournir tous les éléments nécessaires pour l'aide à la décision dans le but de gérer durablement les ressources du système : impacts des prélèvements en volume et en extension géographique, impacts des activités humaines sur la qualité, carte des risques, carte de vulnérabilité (à l'échelle régionale), réseau de surveillance (débits, niveaux et qualité). Le réseau de surveillance doit obligatoirement prendre en compte le suivi des débits aux sorties du système, car c'est le seul moyen d'évaluer l'incidence des prélèvements sur son fonctionnement d'ensemble. Les informations piézométriques n'ont le plus souvent qu'un intérêt local, difficile à considérer seul sans l'information générale.

Études en vue de la protection (figure 10)

Les questions relatives à la protection de la ressource en eau en région karstique relèvent de deux problématiques différentes, mais complémentaires :

- la prévision des impacts éventuels d'aménagements existants ou envisagés, en vue de préconiser les mesures à prendre.
- l'établissement des périmètres de protection.

Ces études doivent être également conduites selon quatre phases.
Les deux premières (identification et caractérisation) sont les mêmes que celles décrites précédemment dans le volet "études en vue de l'exploitation", pour mémoire :

a) ***la phase d'identification*** du système, qui s'appuie sur la géologie et l'étude morphologique pour définir la géométrie de la formation aquifère, les limites géologiques probables du système et l'existence éventuelle de structures karstiques, et qui fournit une identification et un inventaire des risques et des sources de pollution,

b) ***la phase de caractérisation*** du système, dont le but est d'identifier le type de système (fissuré, karstique fonctionnel ou karstique non fonctionnel) par l'analyse de son fonctionnement, afin de révéler les particularités de fonctionnement (infiltration rapide, écoulement rapide et peu dispersif dans le réseau de conduits),

Les suivantes consistent en :

c) ***la phase de définition de la vulnérabilité***, qui analyse l'état de surface du système, pour caractériser les conditions d'infiltration, dresse une cartographie de l'occupation des sols, définit les impacts qualitatifs et quantitatifs des activités humaines et fournit une évaluation des paramètres contrôlant le degré de vulnérabilité,

d) ***la phase d'élaboration des documents d'aide à la décision***, qui propose, à partir d'un système d'information géographique et de recommandations, des scénarios pour les différents périmètres de protection et pour les plans d'aménagement de l'espace.

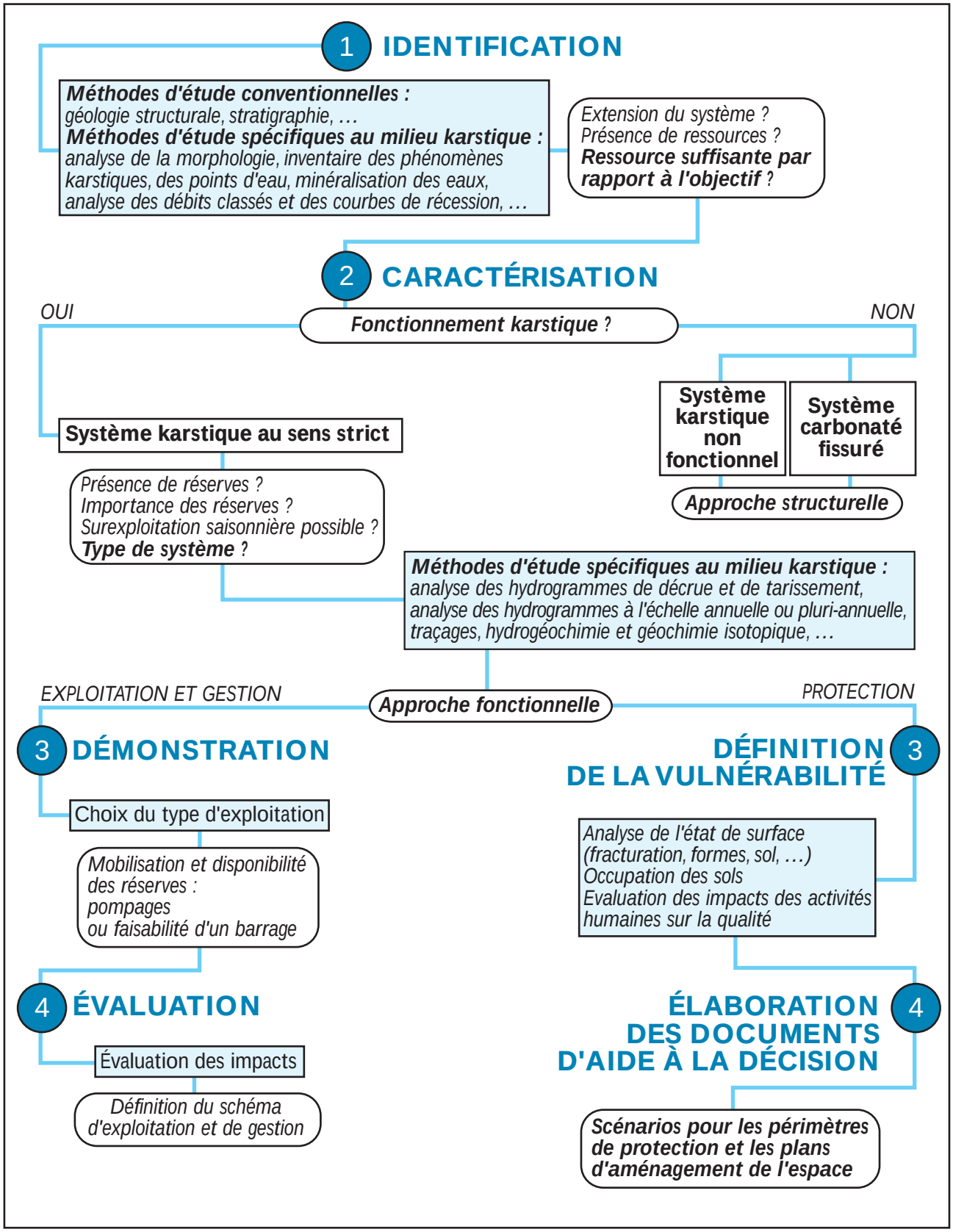


Figure 10 - Description des différentes étapes de l'étude d'un karst en vue de son exploitation, de sa gestion et de sa protection

Colorations et limites de systèmes karstiques

Pour identifier l'origine de l'eau, il peut être nécessaire d'avoir recours à des traçages ou des colorations. On peut consulter utilement les recensements existants des colorations effectuées (par exemple Franche Comté ou bassin Rhône-Méditerranée-Corse). Ces inventaires regroupent les traçages effectués par des compétences variées (bureaux d'études, universités, spéléologues, ...). Pour cette raison, certains résultats de traçages peuvent être considérés comme douteux en raison de l'absence de contrôle scientifique réel. Ils donnent donc des indications dont certaines devront être validées par de nouvelles expériences refaites dans des conditions rigoureuses. Ces inventaires font actuellement l'objet d'une réactualisation avec validation des données d'origine.

De manière générale il est nécessaire de dénoncer l'usage des fluocapteurs (dispositifs de charbon actif destinés à révéler le passage du colorant fluorescent dans une source), comme cela est pratiqué pour les colorations effectuées depuis les années 60. En effet, différentes études ont montré que la technique de détection des colorants fluorescents par des fluocapteurs conduit à des erreurs fréquentes, autant du fait de contamination du charbon actif par les manipulateurs qu'à cause de la fixation de substances fluorescentes naturelles (matières organiques dissoutes, algues) ou polluantes (hydrocarbures). De plus, dans certains secteurs, l'abondance des expériences a également pu provoquer des confusions quant aux résultats.

Conclusions

Alors que l'approche traditionnelle, sur les aquifères alluviaux en particulier, peut être menée sur une durée relativement courte lorsque l'on s'intéresse à un secteur géographiquement peu étendu, les études à mener sur les systèmes karstiques nécessitent des investigations plus complexes et plus étendues dans le temps.
Il est en effet nécessaire de considérer l'ensemble du bassin d'alimentation des ressources qu'il est envisagé de capter et il est souhaitable de réaliser un suivi hydrodynamique et hydrochimique au moins sur un cycle hydrologique complet.
Ce suivi constitue en effet la base de données essentielle à la connaissance du système karstique.
Cette approche plus longue permet de fournir les documents d'aide à la gestion de l'espace, à l'échelle du système, en vue de protéger durablement la ressource en eau en qualité et en quantité.

Les captages en milieu karstique ont démontré qu'il était possible de mobiliser localement des débits très importants sur un seul point de prélèvement (source du Lez : 1,5 à 2,0 m^3/s) et qu'ils autorisaient des prélèvements supérieurs au débit naturel d'étiage par surexploitation temporaire ou par la réalisation d'un stockage souterrain (gestion active de l'aquifère).

Expériences de colorations et traçages artificiels

Depuis plus d'un siècle, les spéléologues cherchent à orienter leurs explorations de grottes en fonction des relations hydrauliques avec certaines sources. Si parfois la géologie suffit à affirmer la réalité d'une liaison entre une perte ou une grotte quelconque et une émergence karstique, il faut le plus souvent recourir à une expérience de coloration pour la démontrer.

Le colorant classiquement utilisé est la ***fluorescéine***, produit industriel dont la substance chimique active est l'***uranine***. Ce colorant est fluorescent, c'est-à-dire que lorsqu'il reçoit une lumière de longueur d'onde déterminée, dite lumière d'excitation, il ré-émet une lumière dans une longueur d'onde différente, dite lumière d'émission ; l'uranine ré-émet une lumière verte de fluorescence.

L'intérêt de tels colorants est la faible teneur à laquelle ils peuvent être détectés à l'œil nu (0,01 mg/L). Quelques kilogrammes de fluorescéine introduits dans une perte (photo 9) suffisent souvent pour que le colorant soit révélé à la source en vision directe (photo 10). Le lien perte - émergence est alors démontré par ***coloration***. Cette technique impose un contrôle visuel continu et l'usage de quantités importantes.

Toutefois, les conditions d'écoulement ou d'exploitation de la source peuvent conduire à ce que les teneurs de sortie soient inférieures à la valeur de détection à l'œil nu. On doit alors utiliser un appareil (spectrofluorimètre) qui permet d'une part de s'assurer qu'il s'agit bien du traceur fluorescent introduit, d'autre part de mesurer sa concentration (la limite inférieure actuellement mesurable pour l'uranine est de l'ordre de 10^{-5} mg/L, soit 0,00001 mg/L).

Un dispositif a été préconisé pour réaliser un échantillonnage continu de la source que l'on cherche à colorer. Il s'agit du ***fluocapteur***, sachet contenant du charbon actif immergé dans l'eau courante. Le charbon actif adsorbe certaines substances, dont l'uranine, que l'on extrait ensuite par élution. Cette méthode, utilisée massivement, car très simple de mise en œuvre, présente un inconvénient majeur : le charbon actif fixe facilement toutes sortes de substances organiques, dont certaines sont fluorescentes, y compris le colorant fixé sur l'expérimentateur. La fluorescence peut donc être à tort attribuée à de l'uranine véhiculée par l'eau souterraine ; il se peut aussi que l'uranine n'ait alors pas pu " trouver la place " de se fixer. Ainsi, certaines expériences de coloration fournissent des résultats qui traduisent l'un de ces problèmes, et non pas une information hydrogéologique.

Dans ces conditions, il est préférable de prélever régulièrement des échantillons d'eau. Cette méthode, certes plus lourde et plus complexe, permet de travailler dans les conditions normales d'exploitation de la ressource. Elle fournit l'assurance qu'il s'agit bien du colorant injecté ; elle permet d'utiliser des doses plus faibles, ce qui évite de contaminer en colorant l'aquifère à long terme. Mais surtout, cette méthode permet d'établir un bilan du produit injecté et fournit une courbe de restitution, données qui sont utilisées pour reconstituer les conditions d'écoulement entre le point d'injection et la source ; ces informations précises simulent le passage d'un nuage de polluant, dont le comportement serait voisin de celui du colorant, dans les mêmes conditions hydrologiques que l'expérience. Cette méthode est dite ***essai de traçage***, comme on pratique un essai de pompage.

Recherche d'une ressource en eau exploitable dans le karst de la Drôme
Exemple du système karstique de la Gervanne.

La vallée de la Drôme est touchée depuis quelques années par un contexte de pénurie en eau. Face à cette situation, les acteurs locaux ont fait réaliser une étude dont l'objectif était la mise en évidence d'éventuelles ressources exploitables dans des aquifères karstiques, soit pour l'AEP, soit pour le soutien d'étiage.

Quatre systèmes karstiques de la Drôme (haute Gervanne, Archiane, Saou et les aquifères carbonatés profonds de la moyenne vallée de la Drôme) ont ainsi été *identifiés* comme étant susceptibles de posséder la ressource recherchée.

Ensuite, chacun de ces aquifères a été *caractérisé*. 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", élément de structure d'une zone noyée en amont de la source, d'autre part de l'inertie du système, traduisant la présence de réserves dans cette zone noyée.

C'est dans ce contexte qu'une 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 conduit appartenant au réseau de drainage, comme cela a été confirmé par deux traçages.
Les pompages d'essai réalisés ensuite mettent en évidence qu'il est possible de mobiliser à partir du forage un débit supplémentaire par rapport au débit naturel de la source (gain de 30 litres par seconde pour 100 litres par seconde pompés) provenant des réserves. Il apparaît donc possible d'extraire de cet aquifère karstique un débit supérieur au débit naturel d'étiage de la source. Les réserves, sollicitées fortement en période de pompage, peuvent ensuite être reconstituées rapidement en saison de recharge. Les essais réalisés jusqu'ici laissent penser que la réserve pourrait fournir à l'étiage 200 à 400 litres par seconde supplémentaires.

Photo 9
Injection de fluorescéine dans une perte
Réseau de la Carbone de Menouille
Cernon (39)

Difficultés liées à la protection réglementaire.
Exemple de la source d'Arcier (Besançon, Doubs)

La source d'Arcier, spectaculaire émergence karstique, a été captée à l'époque romaine (en l'an 170) pour alimenter Besançon en eau. Elle apparaît en bordure de la plaine alluviale du Doubs, au fond d'un court vallon dans les calcaires jurassiques. Cette source draine le plissement formant le relief de Montfaucon, ainsi que le plateau de Saône, vaste zone déprimée occupant le fond d'un synclinal parcouru par des écoulements superficiels se perdant dans les calcaires. Après des essais de coloration ayant donné naissance à diverses hypothèses sur les écoulements souterrains, deux traçages réalisés en 1985 ont montré que la résurgence unique de l'une des pertes est la source d'Arcier. D'autres colorations et l'analyse de la structure géologique ont permis de définir les limites du bassin d'alimentation de la source. Son étendue est de l'ordre de 100 km^2 et son débit moyen de 1,6 m^3/s.

La définition des périmètres de protection de ce captage a débuté en 1986 ; en raison de la complexité du dossier et des nombreux acteurs associés à cette démarche, le premier rapport n'a pas eu de suite. Il prévoyait la mise en place d'un périmètre rapproché couvrant la totalité du bassin d'alimentation ; si les vitesses de circulations justifiaient ce dimensionnement, son application administrative rencontrait des difficultés insurmontables avec, par exemple, l'inscription aux hypothèques des contraintes pour toutes les parcelles concernées. De plus, ces contraintes ne dépassaient guère le cadre administratif existant.

La loi sur l'eau de 1992 a nécessité la reprise du dossier et la définition de nouveaux périmètres. Il est proposé en particulier que :

- les zones de pertes soient classées en périmètre immédiat ainsi que les " regards " sur les circulations souterraines,
- les zones inondables et les zones proches des pertes soient classées en périmètre rapproché,
- le périmètre éloigné englobe la totalité du système.

De plus :
- les stations d'épuration devront être dotées de bassins d'orage,
- une étude pédologique précisera l'aptitude des sols à l'épandage de produits organiques,
- les périodes d'épandage seront réglementées,
- l'exploitation de la forêt sera soumise à certaines règles,
- une commission de suivi sera mise en place.

Photo 10
La restitution du traceur (fluorescéine)
Ruisseau du Rhoin
Bouillant (21)

2 IMPACTS DES ACTIVITES HUMAINES SUR LES EAUX SOUTERRAINES DU KARST

Impacts qualitatifs : activités humaines et marqueurs de pollution

Dans les régions karstiques, les cavités naturelles, avens, dépressions et pertes de cours d'eau, ont été utilisées de tous temps comme lieux de décharge (dépotoirs et charniers) et de rejet d'eaux usées (photo 11). Malgré la réglementation très stricte interdisant ces pratiques, des exemples récents montrent qu'elles ont encore cours. Il faut rappeler que toutes les cavités naturelles et les dépressions sont des points d'accès privilégiés aux réseaux de conduits karstiques, susceptibles de transmettre rapidement et sans dispersion les pollutions introduites à leur niveau. L'essentiel des pollutions des aquifères karstiques, accidentelles ou chroniques, provient de ces points particuliers.

Les principaux marqueurs de pollutions identifiées sont les suivants :

1) *Pollution concentrée* par des rejets d'effluents dans un cours d'eau drainé par des pertes karstiques, ou par des rejets directs dans des cavités :
   - domestiques : N, Cl, B, (PO_4), bactéries et virus.
   - agricoles : N, Cl, bactéries et virus, produits phytosanitaires.
   - industriels (plus rares) : solvants (traitements de surface, laveries et industries du bois),
   - hydrocarbures (généralement peu ou non mobilisables).

2) *Pollution diffuse* sur la surface karstique du fait des activités :
   - agricoles : N, (Cl), (PO_4), carbone organique dissous (COD) et carbone organique particulaire (COP) supports de développement bactérien, pesticides, bactéries.
   - épandage de boues : N, (Cl), carbone organique dissous (COD) et carbone organique particulaire (COP) supports de développement bactérien, bactéries.
   - routières : Cl (salage) susceptible de favoriser la mobilisation de métaux lourds, hydrocarbures, herbicides.

3) *Turbidité des eaux*, problème important dans certaines régions. Ce problème peut être lié au ruissellement en système binaire (érosion des sols), ou à la mise en suspension de colmatage de sédiments karstiques sous l'effet de mises en charge fortes (crues) ou de rabattements importants lors de pompages provoquant des décolmatages.

4) *Métaux lourds* : exceptionnels dans les eaux de sources karstiques parce que le milieu est en général très oxygéné et, donc, défavorable à leur mobilisation et parce qu'il n'existe pas d'effets cumulatifs dans les eaux du fait du renouvellement saisonnier. Cependant, il existe probablement une accumulation à proximité des zones d'introduction (routes, zones agricoles) en association avec la matière organique (COD et COP).

Il faut souligner ici ***l'importante variabilité temporelle des réponses chimiques dans les systèmes karstiques*** (figure 11). Ce phénomène est la traduction dans le temps de l'hétérogénéité spatiale des conditions d'écoulement, qui se manifeste par des effets lointains à plusieurs kilomètres et par un comportement non linéaire : il n'existe pas de relation concentration - distance, ni concentration - débit, comme l'attestent entre autres les réponses des traçages.

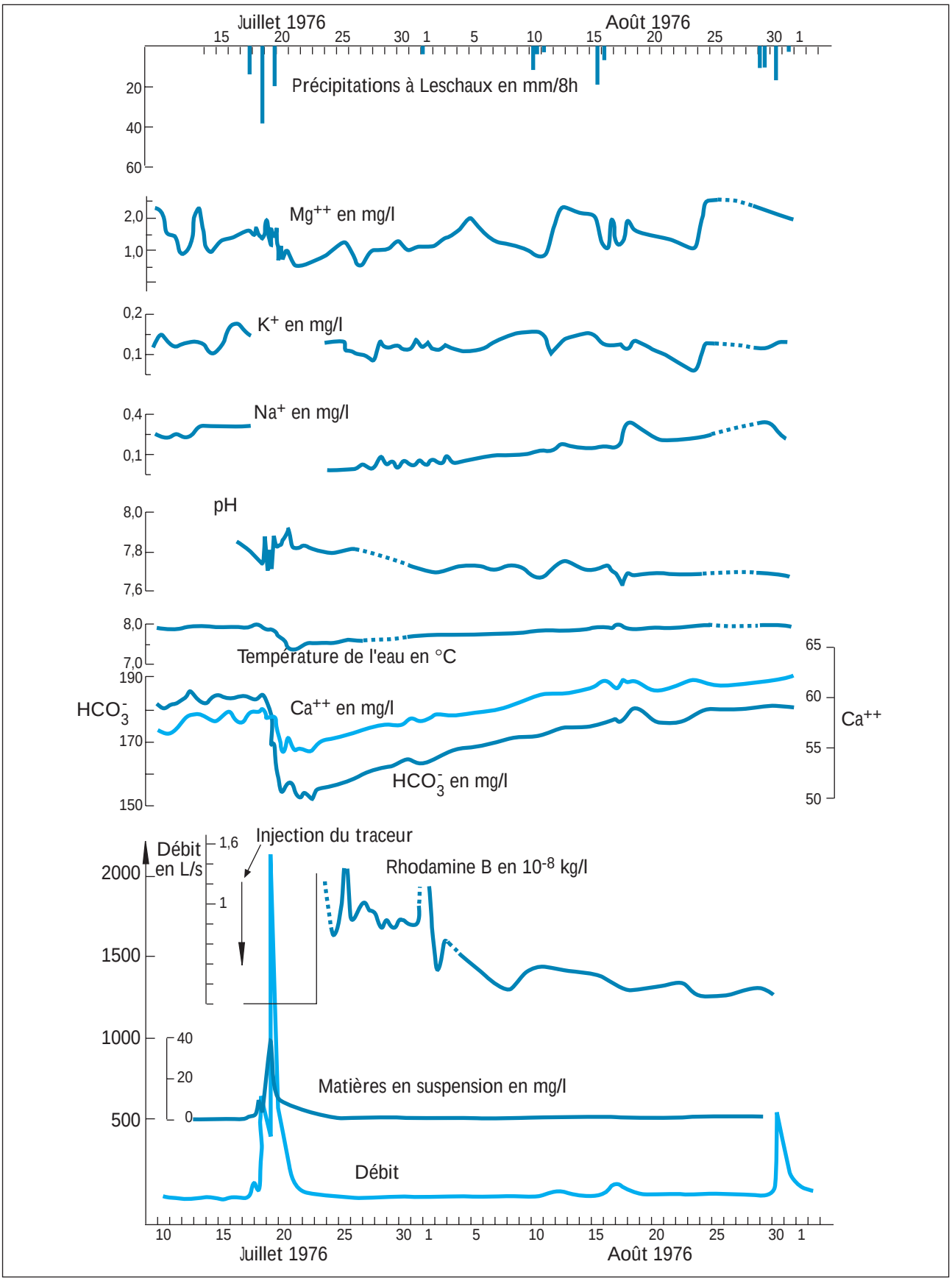


Figure 11 - Variations des principaux paramètres à l'exutoire du système de Bange-Eau Morte (Savoie) en juillet et août 76 (M. Lepiller - 1980)

Impacts quantitatifs

Modalités

Les impacts quantitatifs sont liés soit aux prélèvements (pompages en forage et sur source), soit aux rejets, en général concentrés sur des points particuliers du système (perte, aven ou dépression fermée). Contrairement à ce qui se passe en milieu poreux, de façon générale dans le karst, il n'existe pas de relation linéaire entre le prélèvement ou le rejet et son effet sur l'écoulement au sein ou à l'exutoire du système, qui soit déductible par exemple de l'hydrogramme unitaire moyen, ni dans le temps, ni dans l'espace.

En fait, tout dépend d'abord de la localisation du point de pompage ou de rejet :

1) sur le drain :
   - jurassien : existence de seuils hydrauliques, limitant le débit pompé à celui passant au droit du seuil hydraulique,
   - vauclusien : continuité hydraulique dans la zone noyée assurée par le drain (comportement captif) ; le débit de pompage est limité par la hauteur de rabattement et par les pertes de charges entre les zones de stockage et ce drain ;
2) sur un système annexe au drainage (SAD) :
   - avec un drain jurassien : détournement de l'écoulement du drain vers le SAD pompé, limitation du débit pompé du fait de seuils hydrauliques ; le SAD joue alors le rôle de réserve tampon permettant d'exploiter à un débit un peu supérieur en moyenne à celui qui passe dans le drain,
   - avec un drain vauclusien : continuité hydraulique dans la zone noyée assurée par le drain (comportement captif) ; les conditions sont les mêmes que pour le pompage direct dans le drain ;
3) hors structure karstique : milieu à très faible perméabilité, limitant considérablement le débit d'exploitation ou le débit injecté, et ses effets.

Effets

Les effets des pompages dépendent évidemment de la position du point de prélèvement dans la structure de la zone noyée du karst.

- Dans un conduit ou un SAD, l'effet est ressenti parfois à plusieurs kilomètres, en fonction du débit pompé.
- Le pompage crée une inversion de gradient hydraulique entre le conduit et les zones capacitives (SAD), comparable à ce qui se produit au cours de crues, mais de façon durable, ce qui permet des transferts d'eau non négligeables.
- Comme dans les autres types d'aquifères, les prélèvements simultanés sur les réserves, surtout lorsqu'ils interviennent dans le réseau de drainage, de type vauclusien, ont un effet cumulatif.
- Les sources pérennes ou de trop plein s'assèchent de façon saisonnière ou permanente, du fait de la surexploitation saisonnière (ex. : source du Lez pendant l'étiage).
- Des rabattements très forts sont susceptibles de produire des décolmatages de cavités remplies de sédiments argileux, ou de faire apparaître des seuils hydrauliques provoquant la partition de la zone noyée en secteurs indépendants, déconnectés les uns des autres.

En général, sauf si l'aquifère a été soumis à une surexploitation systématique de durée supérieure à un cycle hydrologique, ces effets disparaissent très rapidement dès l'arrêt des prélèvements ou lorsque survient une saison pluvieuse compensant la surexploitation : le retour à l'état initial est très rapide.

3 PROTECTION ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU KARSTIQUE

Problématique de la protection des ressources en eau du karst

En milieu poreux ou fissuré, les contraintes qu'il est nécessaire d'imposer pour la protection de captages sont en général moins contraignantes et moins étendues qu'en milieu karstique et, par conséquent, à la fois mieux contrôlables sur le plan réglementaire et plus acceptables sur le plan financier.

En milieu karstique, les effets sont suffisamment lointains et très marqués pour que souvent, par exemple, le périmètre de protection rapproché soit confondu avec le bassin d'alimentation de la source dans son ensemble, qui peut atteindre parfois quelques centaines de km^2 (source du Lez : 400 km^2 ; Fontaine de Vaucluse : 1100 km^2).

En outre, en région karstique, il existe souvent des points très sensibles (avens, pertes), reliant directement la surface à la zone noyée, qu'il est tentant d'inclure dans le périmètre immédiat, ce que permet la réglementation et ce que souhaitent certains hydrogéologues agréés. L'application rigoureuse de la réglementation en vigueur permettrait alors une protection efficace de la ressource. Mais elle conduit à mettre en place des contraintes telles que tous les projets de développement peuvent être abandonnés sur de grandes étendues, au détriment des collectivités locales. L'abandon de la ressource en eau karstique au profit d'une autre est parfois proposé. Dans d'autres cas, le traitement de l'eau est imposé, dans les mêmes conditions que pour le captage des eaux de surface ; cela conduit parfois à des solutions très coûteuses auxquelles aurait pu être préférée la recherche d'une autre ressource en partenariat ou non avec d'autres collectivités. Une troisième voie est en train de voir le jour. Elle repose sur l'analyse des différents usages de la ressource, et des éventuels conflits, et sur la définition d'une politique d'exploitation et de gestion de l'eau, reposant sur une politique territoriale. Cette approche prend alors en compte tous les aspects économiques de l'eau (aussi bien l'eau "activités de plein air" que l'eau "réserve de soutien d'étiage", l'eau "AEP", l'eau "agricole" ou l'eau "industrielle").

Gestion active des aquifères karstiques

La gestion active d'un aquifère est généralement conçue par rapport à la quantité : les modalités d'exploitation de l'eau souterraine doivent être telles que la pérennité de la ressource ne doit pas être menacée. En ce qui concerne les aquifères poreux et fracturés, le débit d'exploitation d'un ouvrage est le plus souvent très inférieur à la recharge naturelle de l'aquifère. Schématiquement, la gestion active d'un aquifère poreux ou fracturé consiste à définir le nombre d'ouvrages d'exploitation, leur localisation et leur débit d'exploitation, compte tenu des caractéristiques de l'aquifère (transmissivité, réserves) et de ses conditions de recharge.

Problèmes posés

Dans le cas du karst, la question concernant le débit d'exploitation d'un ouvrage se pose souvent en des termes différents des milieux poreux. En effet, les débits d'exploitation sur un seul site peuvent largement excéder le débit naturel du système ; par exemple, à la source du Lez, le débit d'exploitation (1,7 m^3/s) est très supérieur au débit naturel au cours des mois d'étiage (de l'ordre de 0,5 m^3/s), alors qu'il est en moyenne annuelle de 2 m^3/s. Dans certains cas, la surexploitation est même permanente et provoque des rabattements considérables (des valeurs supérieures à 300 m sont connues), responsables d'effets lointains importants.

Un seul ouvrage d'exploitation peut donc suffire à satisfaire des besoins importants, s'il a recoupé un conduit ou une zone productive. De ce fait, le nombre de forages dans un même système karstique est souvent réduit et, donc, contrôlable. Un nombre important de forages est plus souvent lié à la faible probabilité de recouper un conduit ou une cavité karstique.

Toutefois, les techniques actuelles de foration, rapides et peu onéreuses, tendent à permettre la multiplication de forages, surtout lorsque la zone d'infiltration n'est pas trop épaisse. C'est ainsi que certains aquifères karstiques présentent des caractères favorables à la multiplication des forages : faible épaisseur de la zone d'infiltration, fort développement de la karstification dans la zone noyée avec une grande fréquence spatiale et un fort degré de connexion des conduits. La conséquence est alors une multiplication des forages, susceptibles de provoquer une surexploitation permanente responsable d'un abaissement considérable de la surface piézométrique, de l'assèchement, temporaire ou définitif des sources et des rivières de surface qu'elles alimentent et de la modification des caractéristiques physico-chimiques des eaux (apparition de phénomènes d'oxydation induisant une forte minéralisation, par exemple). Par comparaison avec les milieux poreux, toutes ces modifications apparaissent en général très rapidement.

Le captage des sources karstiques. Aspect réglementaire

La loi sur l'eau de 1992 prévoit que, parallèlement à l'instruction du dossier "périmètre de protection", soit traité le volet "autorisation" ou "déclaration de prélèvement". Or, l'article 232.5 du Code Rural impose que tout prélèvement garantisse un débit réservé correspondant à 1/10 du module (débit moyen interannuel sur une période d'au moins 5 ans).

L'application de cette réglementation, qui ne souffre aucune exception, peut restreindre très sévèrement le captage des émergences karstiques dont le débit d'étiage est fréquemment inférieur à cette valeur. La réglementation ne s'applique qu'aux émergences donnant naissance à un cours d'eau pérenne.

En revanche, en ce qui concerne les prélèvements à partir de forages, la réglementation appliquée est celle concernant tous les types d'aquifères. Doivent être soumis à déclaration les pompages supérieurs à 8 m^3/h et à autorisation ceux dépassant 80 m^3/h. Les procédures d'établissement des dossiers d'incidence des pompages s'appuient toujours sur une démarche adaptée au milieu alluvial (pompages d'essai et mesure de l'impact dans des piézomètres ou forages voisins) ; celles-ci sont inadaptées au karst, puisque des ouvrages proches du pompage sont souvent peu concernés, au contraire des sources, situées à des distances parfois importantes. Une méthodologie adaptée au karst, pour l'établissement de documents d'incidence, est en cours d'étude.

Dans tous les cas, la gestion de la ressource impose de connaître les limites du système, ses conditions de recharge et le débit moyen de recharge sur une période assez longue (plusieurs cycles). Il est essentiel de connaître les effets des pompages, pour différentes conditions hydrologiques, sur la source et sur chacun des sites d'exploitation (essais d'interférence entre puits). Dans le cas où existe un petit nombre de sites d'exploitation, ces informations sont assez faciles à réunir ; en outre, les conditions d'exploitation peuvent être contrôlées assez aisément.

Cependant, dans le cas d'une exploitation par des sites multiples, toutes ces informations ne peuvent plus être réunies. Même lorsqu'elle est réalisable, l'exploitation individuelle et dispersée de l'aquifère karstique s'accorde difficilement avec sa nature, d'autant plus que les modèles mathématiques actuellement testés sur les aquifères karstiques sont incapables de simuler leur fonctionnement local, mais seulement leur fonctionnement d'ensemble. C'est pour cette raison que certains aquifères karstiques, actuellement soumis à une surexploitation intensive (par exemple en Espagne) doivent être abandonnés : coûts d'exploitation prohibitifs (rabattements importants nécessitant beaucoup d'énergie), qualité de l'eau trop altérée, intrusion d'eau marine.

Exemple d'aquifère karstique fortement sollicité à partir d'un nombre important de forages

Dans la région Poitou-Charentes, et notamment dans le bassin du Clin, les calcaires constituent un aquifère intéressant surtout en raison de la faible profondeur de la zone noyée. Les indices de karstification sont nombreux.

Le développement de l'irrigation du maïs a conduit à solliciter de plus en plus cette ressource en eau. De très nombreux puits sont forés chaque année (plus de 500) et les demandes d'autorisation pour des pompages supérieurs à 80 m^3/h sont courantes. Toutefois, comme il n'existe pas de disposition particulière applicable au karst en matière d'analyse de l'incidence de tels pompages, c'est la démarche classique des milieux poreux qui est appliquée : essai de pompage et surveillance des niveaux dans les puits environnants ; l'autorisation est accordée si l'impact du pompage est faible ou nul. Or, dans le karst, les pompages atteignant les conduits permettent d'extraire des débits importants (supérieurs à 100 m^3/h) sous de très faibles rabattements : l'incidence est alors jugée négligeable et le pompage est autorisé. En revanche, les pompages effectués dans les zones mal drainées, s'ils provoquent des rabattements importants, ne permettent pas l'extraction de forts débits et n'ont donc pas d'incidence sur l'aquifère.

En conséquence, dans cette région le nombre de pompages à débit élevé s'est considérablement accru, en soustrayant aux écoulements karstiques des débits significatifs. Les sources et les cours d'eau superficiels qu'elles alimentent se tarissent désormais pendant plusieurs mois par an.

Dans ces conditions hydrogéologiques, l'incidence des pompages devrait être évaluée selon des critères différents de ceux appliqués aux aquifères alluviaux et fissurés. Ce pourrait être une démarche comparable à celle qui a cours pour les eaux de surface, prévoyant le maintien d'un débit réservé. Mais une telle approche impose la connaissance préalable du fonctionnement des systèmes karstiques et de leurs limites, pour ensuite définir des règles de gestion communes. Seule une gestion de l'ensemble du système peut permettre de rétablir une situation acceptable des écoulements de surface. Sinon, la situation évoluera rapidement vers celle bien connue dans le sud de l'Espagne, où les pompages excessifs ont totalement dénoyé certains aquifères karstiques, provoquant l'abandon d'exploitations agricoles et de captages AEP.

La source du Lez et l'AEP de Montpellier

La source du Lez draine un système karstique bien connu, simple, car drainé par une seule source très importante, mais localement fortement anthropisé. Ce système s'étend sur environ 400 km^2. Il est constitué par les calcaires secondaires très karstifiés et par des marnes (formations imperméables), sur lesquelles se produisent des écoulements temporaires drainés par des pertes ; des sources temporaires, caractérisant des débordements locaux de la zone noyée, se produisent aussi au contact des calcaires et des marnes. Son débit naturel, avant les pompages, variait entre 0,3 et plus de 10 m^3/s.

La source du Lez alimente Montpellier et une partie de son agglomération en eau potable, en fournissant environ 1,7 m^3/s depuis 1981. Le débit d'exploitation a été volontairement limité à une valeur inférieure au débit moyen de la recharge (environ 2 m^3/s), d'une part parce qu'il existe quelques autres captages plus modestes sur le système, d'autre part parce que ce débit en étiage est responsable d'un rabattement maximal de l'ordre de 65 m, pour lequel peut apparaître une certaine turbidité.

Une surveillance est imposée par les services de l'État ; elle porte sur la source elle-même (débit, hauteur d'eau, qualité), ainsi que sur un réseau de piézomètres (une trentaine) répartis sur l'ensemble du système karstique (hauteur d'eau mesurée périodiquement ou enregistrée selon les cas). Une commission de suivi, sous l'égide de la MISE (Mission Inter-Services de l'Eau) de l'Hérault, effectue régulièrement un contrôle de leur évolution. Jusqu'à présent, il n'a pu être mis en évidence aucun effet dû à une surexploitation des réserves, qui se reconstituent bien lors de chaque recharge annuelle.

La source d'Issanka et l'AEP de Sète et de Frontignan

La source d'Issanka, près de Balaruc-les-Bains (Hérault), est captée pour l'AEP de Frontignan et de Sète, en même temps que certains autres points d'eau, sources ou forages, appartenant probablement au même aquifère. Il s'agit d'un ensemble karstique complexe, mal connu et possédant des relations mal définies avec du thermalisme et des eaux marines.

Les deux problèmes majeurs posés par ces captages sont :
- la diminution des apports d'eau douce à la lagune (étang de Thau), tenue pour responsable, en partie du moins, de la dégradation de la qualité de l'étang et de ses coquillages,
- l'intrusion potentielle d'eau marine dans l'aquifère.

L'étude en cours révèle une interconnexion très complexe entre des hydrosystèmes différents : la lagune, l'aquifère thermal et un ou des aquifères karstiques d'extension encore mal définie, dans lesquels des éléments de structure de drainage non fonctionnels, hérités de phases anciennes (Tertiaire), paraissent jouer un rôle local. Le débit naturel d'exhaure de l'ensemble ne peut pas être connu du fait de l'existence d'une source, à 30 mètres en fond d'étang, la source de la Vise. Faute de connaissances précises, aucun plan de gestion réelle ne peut être mis en œuvre. Cependant, le débit total d'exploitation est volontairement limité à une valeur modeste (15 litres par seconde environ) ainsi que le rabattement maximal limité à la cote 0 NGF. Une surveillance de la salinité et du niveau est assurée sur un réseau de piézomètres implantés dans la presqu'île de Balaruc, ainsi que sur la source de la Vise et une autre source voisine. Mais l'hétérogénéité de l'aquifère dans ce secteur, accrue par l'abondance de phénomènes paléokarstiques, ne permet pas d'établir un protocole rigoureux d'exploitation et de surveillance de l'aquifère.

Modélisation et simulation de l'aquifère karstique

Les exemples cités montrent que la gestion active des ressources en eau des aquifères karstiques n'a pas été mise en place sur la base d'une modélisation mathématique de l'aquifère, comme cela est fait pour les aquifères poreux ou fracturés. En effet, les modèles traditionnels imposent d'être capable de proposer une distribution spatiale des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, dans sa zone noyée. L'application des modèles maillés aux systèmes karstiques permet de reconstituer de façon plus ou moins satisfaisante l'évolution des débits à la source. Mais, les caractéristiques du modèle n'ont en général rien à voir avec la réalité. Tel est le cas du modèle "Vaucluse" développé en 1977 par le BRGM, dans lequel le "drain" introduit doit être large de quelques kilomètres pour simuler correctement l'évolution des débits de la source.

Mais surtout ce type de modélisation ne permet pas de prévoir les effets d'une exploitation ni dans l'espace, ni au cours du temps. Quelques nouvelles voies en matière de modélisation et de simulation sont à l'étude et ne semblent pas encore prêtes à devoir être généralisées (voir les actes du séminaire "Pour une gestion active des ressources en eau du karst", Montpellier, novembre 1996 ; séminaire "Modélisation du karst", 6ème colloque d'hydrologie en pays calcaire, La Chaux-de-Fonds, août 1997). Les modèles globaux, à réservoirs, conviennent bien à la simulation des débits de sources karstiques, bien que ces outils aient quelques difficultés à restituer convenablement à la fois les valeurs des débits de crue et celles des faibles débits.

Pour le moment, une démarche plutôt descriptive est mise en œuvre. Elle repose sur l'accumulation de données relatives à l'architecture du système, à son fonctionnement, karstique ou non, et à la structure de ses écoulements souterrains. Cette démarche doit conduire à élaborer un ***modèle conceptuel du système*** qui décrive son fonctionnement d'ensemble et, dans la mesure du possible, son fonctionnement local dans des secteurs particuliers (par exemple entre perte et source, dans la zone d'infiltration, dans les secteurs déprimés en surface). Enfin, que la gestion du système karstique ait pour but la pérennité de la quantité des prélèvements ou la qualité de l'eau souterraine, elle concerne des étendues importantes sur lesquelles il faut nécessairement croiser toutes les informations disponibles pour fournir tous les éléments qui permettent de définir les dispositifs les mieux appropriés pour protéger la ressource en eau souterraine.

Les réseaux d'observation et le karst

L'évolution de l'état des nappes aquifères en milieu poreux ou fissuré est suivie grâce à un réseau de mesures piézométriques. Celles-ci sont réalisées sur des puits et des forages, dont la représentativité est telle qu'elles permettent de reconstituer la géométrie de la surface piézométrique à l'échelle régionale.

En milieu karstique, les observations faites sur des forages sont rarement représentatives de la situation de l'ensemble de l'aquifère. En revanche, le débit des sources karstiques et son évolution au cours du temps donnent une information très précise sur l'ensemble du système. C'est pourquoi les réseaux d'observations et de contrôle des ressources en eau karstique doivent s'appuyer sur des stations de mesures hydrométriques installées immédiatement à l'aval des sources.

Par ailleurs, étant donné que les systèmes karstiques d'une même région possèdent des caractères différents (état de la karstification à des stades de développement différents, système unaire ou binaire, importance variable du stockage en zone noyée, épaisseur différente de la zone d'infiltration, présence éventuelle d'une couverture perméable de sol ou d'alluvions, etc.), il est nécessaire de choisir les sources devant faire partie du réseau de manière à prendre en compte les différentes situations.

Enfin, compte tenu de la variabilité remarquable des débits des sources karstiques, et contrairement aux réseaux piézométriques, les mesures périodiques sont inexploitables ; un suivi en continu des débits s'impose. Le contrôle de la qualité des eaux des sources karstiques devrait être réalisé dans les mêmes conditions. L'enregistrement de la conductivité de l'eau et de sa température est certainement la meilleure solution pour obtenir les informations nécessaires à la réalisation d'échantillonnage en vue de l'analyse chimique et bactériologique.

Aquifères karstiques et Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux

La loi sur l'eau du 3 janvier 1992 (article 5) a institué les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE), instruments juridiques permettant de concilier la protection quantitative et qualitative des ressources en eau superficielle et souterraine, des écosystèmes aquatiques et des zones humides avec les différents usages de l'eau et favorisant une gestion locale et partenariale de la ressource en eau.

Les SAGE privilégient une approche globale des différents problèmes liés à l'eau. Dans les secteurs où les aquifères karstiques sont importants, les SAGE doivent donc prendre en compte les spécificités qui en résultent.

Ceci doit entraîner des démarches diverses, parmi lesquelles :
- des réflexions spécifiques concernant la délimitation du périmètre de certains SAGE,
- la recherche de sources de pollution parfois lointaines,
- des efforts particuliers pour la mise en valeur des ressources en eau des aquifères karstiques, afin de contribuer à la satisfaction des besoins en eau et, éventuellement, au soutien des étiages (gestion active).

Ces démarches peuvent aujourd'hui être illustrées par certains SAGE du Bassin Rhône-Méditerranée-Corse.

Délimitation du périmètre d'un SAGE

Le territoire sur lequel va être établi un SAGE doit avoir une cohérence physique et géographique, en même temps qu'une cohérence socio-économique garante de la faisabilité d'une gestion concertée.

Dans le cas où des aquifères karstiques sont présents et étendus, la recherche de la cohérence physique du périmètre doit en tenir compte et cela peut conduire à adopter un périmètre différent du bassin versant topographique, ou à regouper ensemble différents bassins. Il n'est cependant pas toujours possible, pour diverses raisons, d'intégrer la totalité d'un bassin hydrogéologique dans le périmètre d'un SAGE et on devrait rechercher, s'il y a lieu, une bonne articulation entre deux SAGE voisins.

On donnera pour exemples de cette recherche de cohérence la définition des périmètres de différents SAGE du bassin Rhône-Méditerranée-Corse : le SAGE "Haut-Doubs - Haute Loue", et le SAGE "Lez, Mosson, étangs palavasiens".

Le SAGE "Haut-Doubs - Haute-Loue" (Doubs)

Le principal enjeu du SAGE "Haut-Doubs - Haute-Loue" est la recherche d'une solution à des problèmes aigus de ressource en eau, notamment superficielle : entre Pontarlier et Ville du Pont, le Haut-Doubs perd dans des réseaux karstiques la quasi-totalité de son débit à l'étiage et ces pertes alimentent en partie la source de la Loue. L'objectif à atteindre est évidemment de maintenir dans le Doubs un niveau d'eau suffisant, tout en respectant le débit de la Loue. Pour bien prendre en compte cette problématique particulière, directement liée à l'importance des aquifères et

circulations karstiques dans le secteur, les deux bassins, celui du Haut-Doubs et celui de la Haute-Loue, ont été réunis dans le périmètre du SAGE, qui comprend la totalité du bassin d'alimentation de la source karstique de la Loue.

Ainsi défini, ce périmètre, d'une superficie d'environ 2 325 km^2, a permis de prendre en compte de façon satisfaisante l'essentiel des enjeux liés à l'eau et de conduire les investigations complémentaires nécessaires. La Commission Locale de l'Eau a ainsi retenu un certain nombre de mesures qui devraient permettre d'améliorer la situation. Parmi celles-ci, on citera la mise en place, à titre expérimental, de dispositifs réversibles de limitation des pertes du Doubs qui devraient permettre de réduire l'effet de “court-circuit” résultant des circulations karstiques.

Le SAGE “Lez, Mosson, étangs palavasiens” (Hérault)

La définition du périmètre du SAGE “Lez, Mosson, étangs palavasiens” a fait l'objet d'une réflexion approfondie. En effet, la moitié environ du périmètre de ce SAGE est située en zone karstique : 5 systèmes karstiques distincts, situés essentiellement dans la partie nord et ouest du périmètre, ont été identifiés. Le plus connu est celui de la source du Lez, bien étudié préalablement à la mise en exploitation de cette source en 1981 pour l'alimentation en eau potable de Montpellier (*Cf.* page 34).

Le karst, par son extension et son importance, participe à l'ensemble du fonctionnement hydraulique du secteur et il est susceptible d'apporter des solutions à certains des objectifs du SAGE, notamment la satisfaction, en quantité et en qualité, des besoins en eau croissants de la ville de Montpellier et de nombreuses autres communes. Il impose également des contraintes particulières, notamment en matière d'assainissement autonome ou de protection des captages.

Dans un premier temps, la prise en compte de la totalité du bassin d'alimentation de la source du Lez dans le périmètre du SAGE avait été envisagée. Cette option a été réduite par la suite, en raison de quelques imprécisions dans la définition des limites, mais aussi pour des raisons administratives (les acteurs locaux souhaitaient éviter que le SAGE concerne deux départements) et pour respecter un certain équilibre territorial entre la zone amont du périmètre et la zone aval.

Suite à ces réflexions, la Commission Locale de l'Eau envisage de faire réaliser une étude globale afin de mieux connaître les relations entre les eaux superficielles et les eaux souterraines. Différentes options sont également à l'étude pour assurer une meilleure sécurité de l'alimentation en eau de la ville de Montpellier.

Recherche des sources de pollution

Le SAGE de l'étang de Salses - Leucate et le SAGE de l'Agly (Aude et Pyrénées-Orientales)

L'étang de Salses-Leucate, d'une superficie d'environ 5 400 hectares, fait partie des plus grandes lagunes du Languedoc-Roussillon. Les enjeux socio-économiques qui lui sont liés sont importants puisque cet étang cumule une activité conchylicole (dans sa partie nord), une activité de pêche traditionnelle et une fréquentation touristique importante avec plus de 80 000 personnes en été. Son alimentation en eau douce est principalement assurée par les émergences de Font Dame

et Font Estramar, issues des circulations karstiques développées dans les calcaires des Corbières Orientales et dont l'origine se situe dans le bassin voisin de l'Agly.

Dans ce cas, la prise en compte de l'aquifère karstique dans son intégralité est indispensable puisque les apports de ses exutoires conditionnent la qualité des eaux de l'étang, par le débit d'eau douce qu'ils apportent et aussi par les éventuelles pollutions qu'il pourraient véhiculer. Cependant, la structure géologique complexe du secteur, ajoutée à la différence des enjeux entre la zone littorale et le bassin versant de l'Agly, ont conduit à la réalisation de deux SAGE distincts, dont les périmètres correspondent aux bassins hydrographiques. Une articulation entre ces deux SAGE a été prévue afin de bien prendre en compte les spécificités liées à l'importance des circulations karstiques. En particulier, une étude a été engagée en août 1997 afin de savoir si les arrivées diffuses d'eau douce, liées à ces circulations karstiques participent, ou non, à la pollution microbiologique de l'étang.

Mise en valeur des ressources en eau des aquifères karstiques

Dans de nombreux cas, les aquifères karstiques sont largement représentés au sein du périmètre d'un SAGE sans que leur extension à l'extérieur du bassin versant hydrologique ne justifie des dispositions particulières pour le choix de ce périmètre. Leur présence et les particularités qui leur sont liées peuvent néanmoins être un atout et permettre, notamment, d'atteindre des objectifs d'adéquation ressources-besoins par la mobilisation de ressources nouvelles et éventuellement par une gestion active de celles-ci.

Deux SAGE du bassin Rhône-Méditerranée-Corse peuvent, de ce point de vue, être cités pour exemples : le SAGE de la Drôme et le SAGE des Gardons.

Le SAGE de la Drôme (Drôme)

Le SAGE de la Drôme a été le premier engagé dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse (approbation par arrêté préfectoral le 30 décembre 1997). Ses principaux enjeux étaient la gestion quantitative de la ressource et la gestion physique des milieux. Sur le plan quantitatif, la Drôme et ses affluents présentent un régime hydrologique contrasté avec des étiages sévères en été (aggravés par de nombreux prélèvements), et de forts débits de crue en hiver/printemps. Il en résulte des déficits globaux particulièrement importants sur l'aval du cours de la Drôme.

Les aquifères karstiques sont bien représentés, principalement dans la partie nord du bassin versant de la Drôme et avaient fait l'objet de premières investigations, préalablement à la mise en place du SAGE (Cf. page 26). Ils sont donc logiquement apparus au fil des réflexions de la Commission Locale de l'Eau comme un moyen de satisfaire certains des besoins en eau de la basse vallée de la Drôme. C'est ainsi que l'exploitation future du karst de la Gervanne constitue un exemple intéressant de valorisation de ce type de ressource. Conjuguée à d'autres dispositions (limitation des prélèvements, création de retenues collinaires, interconnexions de réseaux....), cette exploitation devrait contribuer à restaurer l'équilibre hydrologique du secteur concerné.

Le SAGE des Gardons (Gard et Lozère)

Les principaux enjeux du SAGE des Gardons sont la dynamique et le fonctionnement de la rivière (dégradée par les extractions de matériaux alluvionnaires), la prévention et la protection contre les inondations, la gestion équilibrée du milieu naturel et l'adéquation ressources-besoins.

Un aquifère karstique étendu (plus de 300 km^2) et puissant (200 mètres et plus) occupe la partie centrale du bassin versant des Gardons. Il est alimenté par ses bordures (affleurements nord et sud de la cuvette de la Gardonnenque et de l'Uzège) et par le Gardon lui-même (pertes de Boucoiran et de Dions) et il se vidange naturellement par des exutoires temporaires (les Frégeires) ou permanents (La Baume, Collias...) qui constituent la seule alimentation du bas Gardon en étiage.

Une étude de cet aquifère a été réalisée, préalablement à la phase d'élaboration du SAGE, afin de compléter les connaissances sur son fonctionnement et ses potentialités et d'identifier les possibilités d'un accroissement des prélèvements tout en prenant en compte les contraintes liées au milieu naturel, à l'aval du système.

Photo 11
Rejet direct et localisé
d'eaux usées dans le karst (88)

B I B L I O G R A P H I E

REFERENCES TECHNIQUES

- Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux Rhône - Méditerranée - Corse (1996). Comité de Bassin Rhône - Méditerranée - Corse
- Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux : Guide méthodologique, oct. 1992. Action COST 65 (1995). Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas.
- COST Action 65, Final report, 446 p. European Commission, Directorate General, Science, Research and Development. EUR 16547 EN.
- Revue Hydrogéologie, 3, 1997. Numéro thématique " karst ". Ed. BRGM.
- Actes du Séminaire national " Pour une gestion active des ressources en eau du karst ", Montpellier, novembre 1996. 224 p. Ed. BRGM
- Actes du Séminaire " Modélisation du karst ", 6ème Colloque d'hydrogéologie en pays calcaire et en milieu fissuré, La Chaux-de-Fonds, 10-17 août 1997. In : Sciences et techniques de l'environnement, Université de Franche-Comté, mém. Hors série, 12-1997, 326 p.
- Bakalowicz (1996). La zone d'infiltration des karsts. Hydrogéologie, 4, p.3-21. Ed. BRGM.
- Bulletin d'Hydrogéologie (1995). Numéro spécial Action européenne COST 65 - Rapport suisse. Aspects hydrogéologiques de la protection des eaux souterraines en régions karstiques. Vol. 14, 256 p. Publié par le Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel. Ed. Peter Lang.

REFERENCES REGLEMENTAIRES POUR LE CAPTAGE DES SOURCES

- Décret n° 93-743 du 29 Mars 1993 relatif à la nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration en application de l'article 10 de la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau.

- Code rural : article L 232.5

COLLECTION DES NOTES ET GUIDES TECHNIQUES DU SDAGE RHONE-MEDITERRANEE-CORSE

NOTES [1] TECHNIQUES DÉJA PUBLIÉES

Note technique n°1 :“ Extraction de matériaux et protection des milieux aquatiques ”
Édition Décembre 1996.

Note technique n°2 :“ Eutrophisation des milieux aquatiques ”
Édition Décembre 1996

GUIDES [2] TECHNIQUES DÉJA PUBLIÉS

Guide technique n°1 :“ La gestion des boisements de rivières ”
Fascicule 1 :“ Dynamique et fonctions de la ripisylve ”
Fascicule 2 :“ Définition des objectifs et conception d’un plan d’entretien ”
Édition Septembre 1998.

Guide technique n°2 :“ Détermination de l’espace de liberté des cours d’eau ”
Édition Novembre 1998.

Guide technique n°3 :“ Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques ”
Édition Mai 1999.

[1] Notes techniques SDAGE :

Ce sont des documents qui ont pour objectif de rendre le SDAGE plus opérationnel en traduisant ses orientations sous forme de stratégies calées sur le terrain, de définition de priorités, d’objectifs quantifiés, qui peuvent assez directement être mis en oeuvre par les services, les CLE, etc.. Ce ne sont ni des guides techniques spécialisés, ni des guides méthodologiques, mais beaucoup plus des documents de stratégie d’action au niveau du bassin, ou au niveau de territoires spécifiques identifiés par le SDAGE. Leur caractère stratégique conduit à les soumettre à l’approbation du Comité de Bassin avant leur diffusion.

[2] Guides techniques SDAGE :

Ce sont des documents qui n’ont pas le caractère stratégique des notes techniques. Ils explicitent des sujets et des concepts, développent des méthodologies et/ou des approches techniques novatrices qui sont évoquées dans le SDAGE, mais n’ont pas encore fait l’objet de publications larges, et nécessitent à ce titre une information ciblée, à destination notamment des techniciens, services de l’Etat, bureaux d’études.

Ce guide technique a pour objet de faciliter la mise en œuvre des préconisations du SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse en matière de connaissance et de gestion des ressources en eau des régions karstiques. Le but est de favoriser le recours à ces ressources, leur protection et leur exploitation selon des méthodes de gestion active adaptées aux caractères spécifiques du karst.

La ***première partie*** de ce document aborde la connaissance des karsts. Elle définit les notions de ***karst*****,** de ***système karstique*** et **d'*aquifère karstique*** ; elle précise les notions de ***structure*** et de ***fonctionnement*** de ce dernier ; elle met en avant l'importance des karsts, en particulier dans le bassin. Les caractéristiques intrinsèques d'un karst en font un milieu complexe à connaître précisément et à explorer. Face à cette difficulté, ***une méthodologie d'approche globale*** du système karstique est présentée.

La ***deuxième partie*** aborde les impacts des activités humaines sur les eaux souterraines du karst. La vulnérabilité de l'aquifère karstique est définie par rapport aux autres ressources en eau, aquifères poreux et fissurés et eaux de surface, de façon à faire apparaître ses particularités face aux pollutions. Puis elle présente l'ensemble des points relatifs à ***l'étude***, à ***l'exploration*** et à ***l'exploitation d'un système karstique***.

Enfin, une ***troisième partie*** aborde les aspects de ***la protection et de la gestion des ressources en eau karstique***. Elle expose les problèmes rencontrés, liés à la particularité des karsts ; elle donne finalement quelques exemples de gestion des karsts sur le bassin Rhône-Méditerranée- Corse.

Ce guide est donc un document technique s'adressant à des personnes ayant déjà quelques notions sur les eaux souterraines et les karsts. Il intéressera particulièrement les techniciens ayant à étudier les potentialités d'un karst en vue de son exploitation. Il offre de nombreux repères sur le déroulement et le contenu de l'étude à réaliser et fait état des expériences déjà menées. Il ne peut néanmoins en aucun cas remplacer l'expérience et la connaissance des hydrogéologues en matière de karst.

SECRETARIAT TECHNIQUE DU SDAGE

Agence de l'Eau
Rhône-Méditerranée-Corse
2-4, allée de Lodz (près de l'avenue Tony Garnier)
69363 LYON Cédex 07
Tél. : 04 72 71 26 54
Fax : 04 72 71 26 03

DIREN RHONE ALPES
Délégation de Bassin RMC
19, rue de la Villette
69425 LYON Cédex 03
Tél. : 04 72 13 83 15
Fax : 04 72 13 83 59

Agence de l'Eau
rhône méditerranée corse

PREFET COORDONNATEUR DU BASSIN RHONE-MEDITERRANEE-CORSE
DIRECTION REGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT
RHONE-ALPES
DELEGATION DE BASSIN