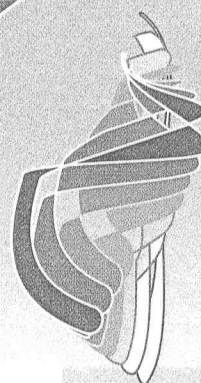
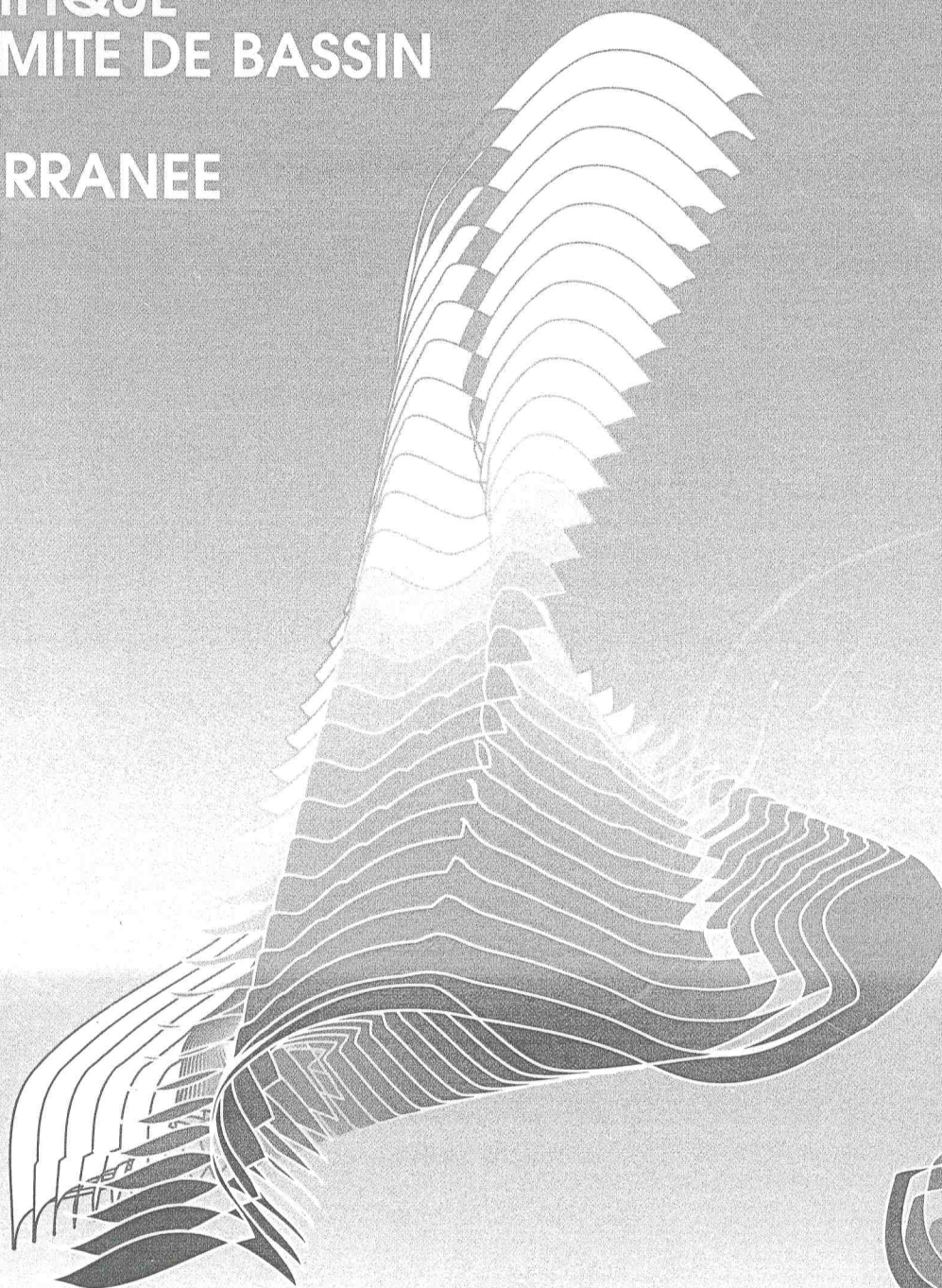


CONSEIL
SCIENTIFIQUE
DU COMITE DE BASSIN
RHONE
MEDITERRANEE
CORSE



**REFLEXIONS SUR LES POSSIBILITES
D'EXPLOITATION
EN EAUX SOUTERRAINES
DES AQUIFERES KARSTIQUES**

JUILLET 1994



rhône méditerranée corse

Le Comité de Bassin s'est interrogé sur les aquifères karstiques, très développés dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse, comme ressource potentielle d'appoint ou de substitution: cette ressource est-elle un mythe ou une réalité ?

Cette question, posée par le Président du Comité de Bassin au Conseil Scientifique lors de la mise en place de ce dernier le 15 janvier 1993, visait à l'éclairer sur :

- les relations entre la typologie des systèmes karstiques et leurs potentialités à constituer des réserves d'eau
- les modalités pratiques et techniques d'appréciation et de mobilisation de cette réserve.

Ce rapport présente un état des réflexions menées pour répondre à cette demande par Messieurs C. Droque et P. Chauve, membres du Conseil Scientifique du Comité de Bassin.

à Pierre-Bénite , le 27 septembre 1994

Le Président du Comité de Bassin
Rhône -Méditerranée-Corse



H. TORRE

Le Président du Conseil Scientifique
du Comité de Bassin
Rhône -Méditerranée-Corse



M. LEVEAU

Comité de Bassin
rhône méditerranée corse

Conseil scientifique

**REFLEXIONS SUR LES POSSIBILITES D'EXPLOITATION
DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES
DES AQUIFERES KARSTIQUES**

par

Pierre CHAUVE* et Claude DROGUE**

*** Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée
Université de Franche Comté, Besançon**

**** Laboratoire d'Hydrogéologie
Université de Montpellier II, Sciences et Techniques**

INTRODUCTION

Les ressources en eau exploitables des aquifères karstiques sont-elles un mythe ou une réalité ?

C'est apparemment un mythe, si l'on considère les échecs, quelquefois cuisants, de certains travaux ; c'est une réalité par contre, si l'on tient compte des réussites nombreuses et parfois spectaculaires que l'on peut relever en différentes régions.

L'origine de la question précédente, dans sa formulation un peu excessive, repose en fait sur une réalité : c'est la difficulté qu'il y a souvent à expliquer les raisons de ces échecs et de ces réussites.

Pour cela, il est nécessaire de bien saisir, non seulement la grande complexité de structure de ce type d'aquifère, mais aussi, les différents mécanismes qui sont à l'origine de cette complexité.

Cet effort de compréhension est justifié, car, les ressources en eau des karsts représentent sur le territoire de l'Agence, certainement plus de 60% des eaux souterraines encore disponibles.

Ainsi, pour la région méditerranéenne (pl. 1 et 2), les aquifères karstiques qui occupent une superficie d'environ 9500 km², (superficie à laquelle il faut ajouter 3000 km² de karsts sous couverture, reconnus par forages) ont un débit global de l'ordre de 150 m³/s (carte des ressources en eau des karsts français méditerranéens, ci-jointe). On notera que dans cette région méridionale, les karsts ne sont exploités qu'à moins de 25%. Cette ressource encore disponible, constitue donc un facteur important du développement économique.

La présente note se propose :

- de présenter un bref rappel des caractères essentiels de l'aquifère karstique, d'après les connaissances actuelles,
- d'explicitier, d'après ces caractères, quelques exemples de résultats de recherches d'eau souterraines,
- de suggérer enfin, des orientations de travaux de recherche, suggestions qui pourront être précisées si nécessaire, dans une note complémentaire.

CARACTERES DE L'AQUIFERE KARSTIQUE ET DE SON FONCTIONNEMENT

Les massifs calcaires sont des ensembles de roches perméables en grand. S'ils ne sont pas recouverts par d'autres terrains, les massifs calcaires ne comportent pas de réseaux hydrographiques de surface développés. L'action des eaux se marque cependant en surface et à l'intérieur des masses calcaires par une morphologie particulière : dolines, gouffres, vallées sèches et par des grottes et des galeries, mais aussi dans la masse calcaire par des réseaux de petites fissures. Ces formes de dissolution sont caractéristiques des calcaires karstifiés. A l'intérieur les eaux y circulent plus ou moins rapidement; quelquefois, elles s'y trouvent piégées. Le karst correspond à l'ensemble de ces formes et aux eaux qui s'y écoulent.

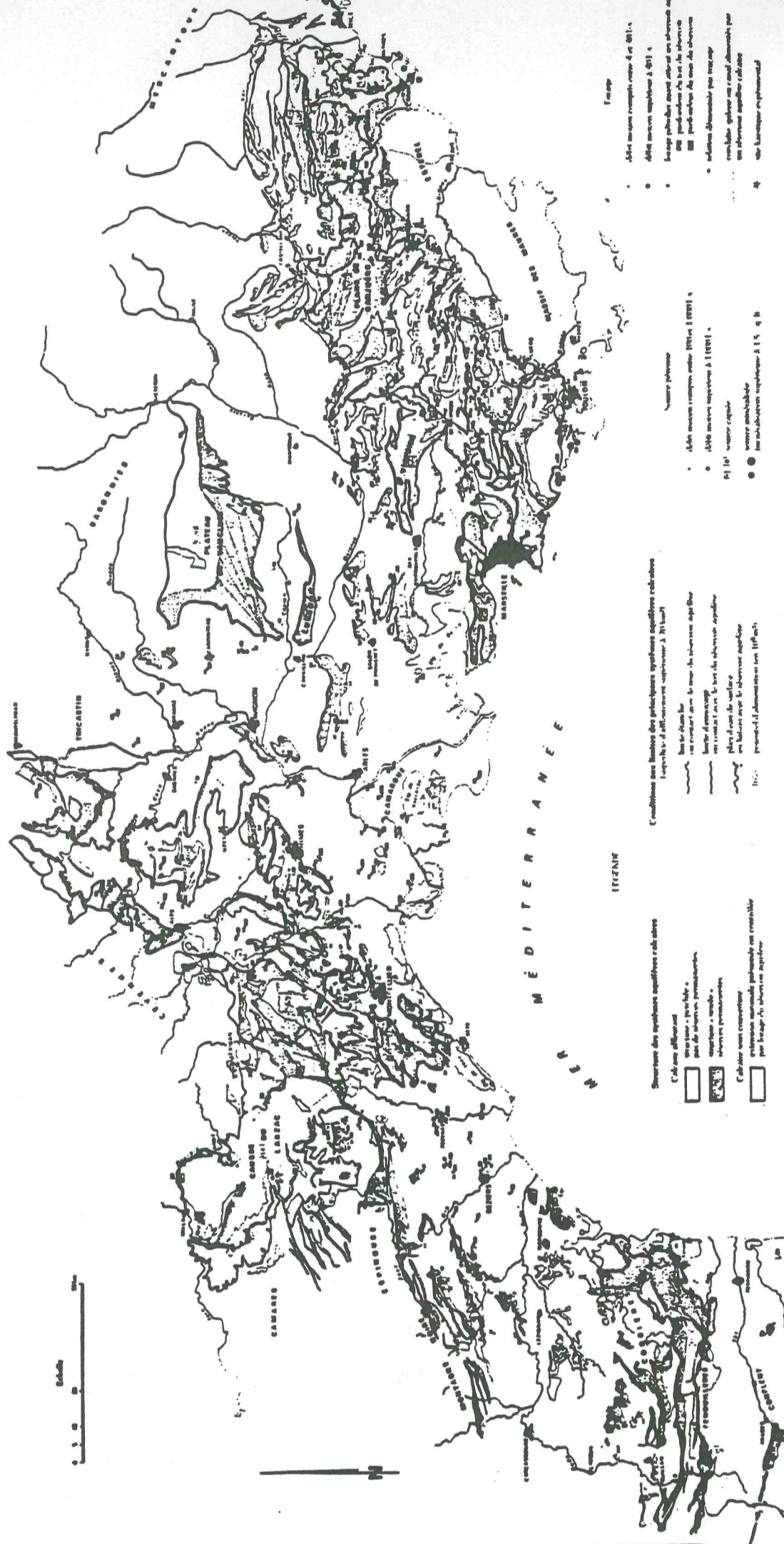
Les écoulements de surface sont concentrés dans des vallées profondes qui entaillent généralement toute l'épaisseur des calcaires jusqu'au niveau imperméable de base.

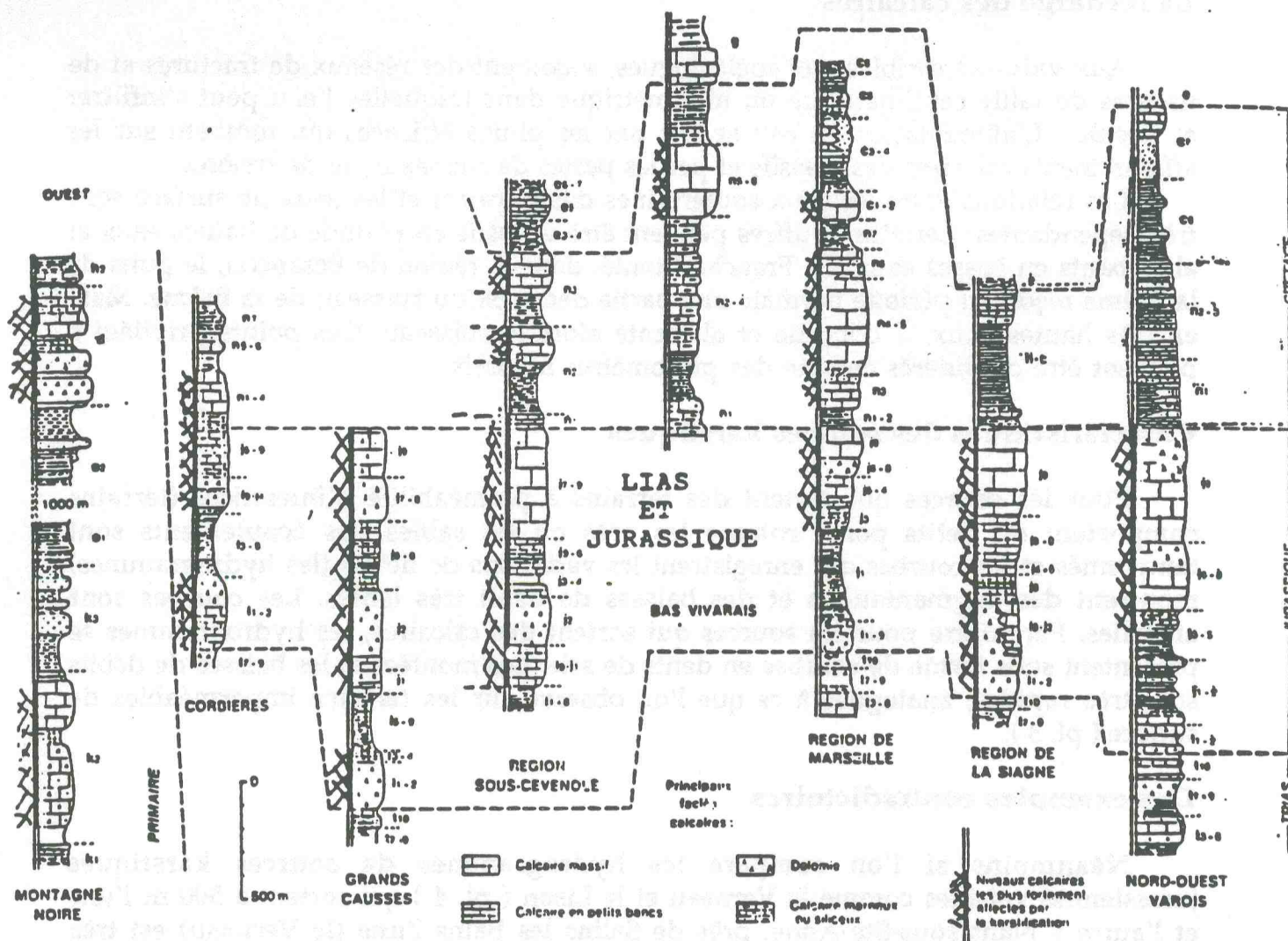
Les sources sortent généralement dans les flancs de ces vallées; dans le Jura on les trouve aussi en tête des reculées. Les sources sont peu nombreuses et concentrées et donnent directement naissance à des cours d'eau. Néanmoins leurs débits varient dans des proportions considérables. A des crues exceptionnelles succèdent souvent des étiages sévères et quelquefois des assèchements.

Laboratoire d'Hydrogéologie
de l'U.S.T.L. - Montpellier

Service géologique régional
Langue des Rensselaers du BRCM

C. Drogue, A.M. Laty, H. Paloc





PI-2 LES NIVEAUX CARBONATES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE KARSTIFIÉS DANS LA RÉGION MÉDITERRANÉENNE.

En certaines régions, les roches carbonatées les plus fortement affectées par la karstification, peuvent atteindre une épaisseur supérieure à 1500 m.

Cet ensemble de coupes lithologiques, depuis la Montagne Noire jusqu'au Nord-Ouest Varois, se réfère à la carte de la page précédente.

La recharge des calcaires

Aux vides accessibles aux spéléologues, s'ajoutent des réseaux de fractures et de fissures de taille centimétrique ou millimétrique dans lesquelles l'eau peut s'infiltrer et circuler. L'alimentation en eau se fait par les pluies efficaces qui tombent sur les affleurements calcaires des massifs et par les pertes de ruisseaux ou de rivières.

Les relations entre les eaux souterraines des calcaires et les eaux de surface sont très dépendantes. Certains gouffres peuvent être émissifs en période de hautes eaux et absorbants en basses eaux. En Franche-Comté, dans la région de Besançon, le puits de la Brême reçoit en période normale une partie des eaux du ruisseau de la Brême. Mais en très hautes eaux, il déborde et alimente alors le ruisseau. Ces points privilégiés peuvent être considérés comme des piézomètres naturels.

Caractéristiques des sources karstiques

Pour les sources qui sortent des terrains à perméabilité d'interstices (terrains comportant de petits pores comme les grès ou les sables) les écoulements sont tamponnés et les courbes qui enregistrent les variations de débits (les hydrogrammes) montrent des augmentations et des baisses de débit très lentes. Les courbes sont amorties. Par contre pour les sources qui sortent des calcaires, les hydrogrammes se présentent sous forme de courbes en dents de scie. Les montées et les baisses de débits sont très rapides, analogues à ce que l'on observe sur les terrains imperméables de surface (pl. 3).

Des exemples contradictoires

Néanmoins si l'on compare les hydrogrammes de sources karstiques jurassiennes voisines comme le Verneau et le Lison (pl. 4) qui sortent à 500 m l'une et l'autre à Nans-sous-Ste-Anne, près de Salins les Bains l'une (le Verneau) est très irrégulière, alors que la seconde (le Lison) est plus tamponnée. L'hydrogramme du Lison intègre en effet plusieurs hydrogrammes élémentaires de bassins versants plus réduits dont les réponses sont décalées dans le temps.

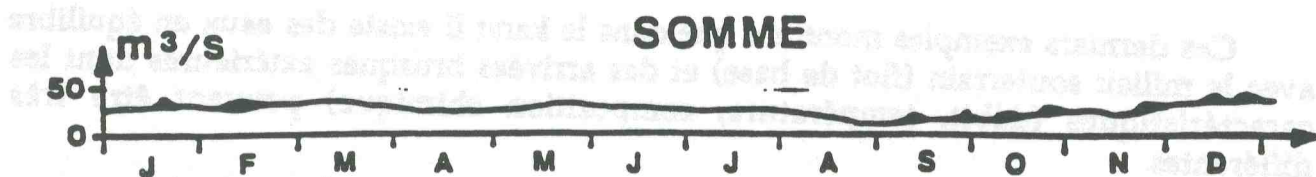
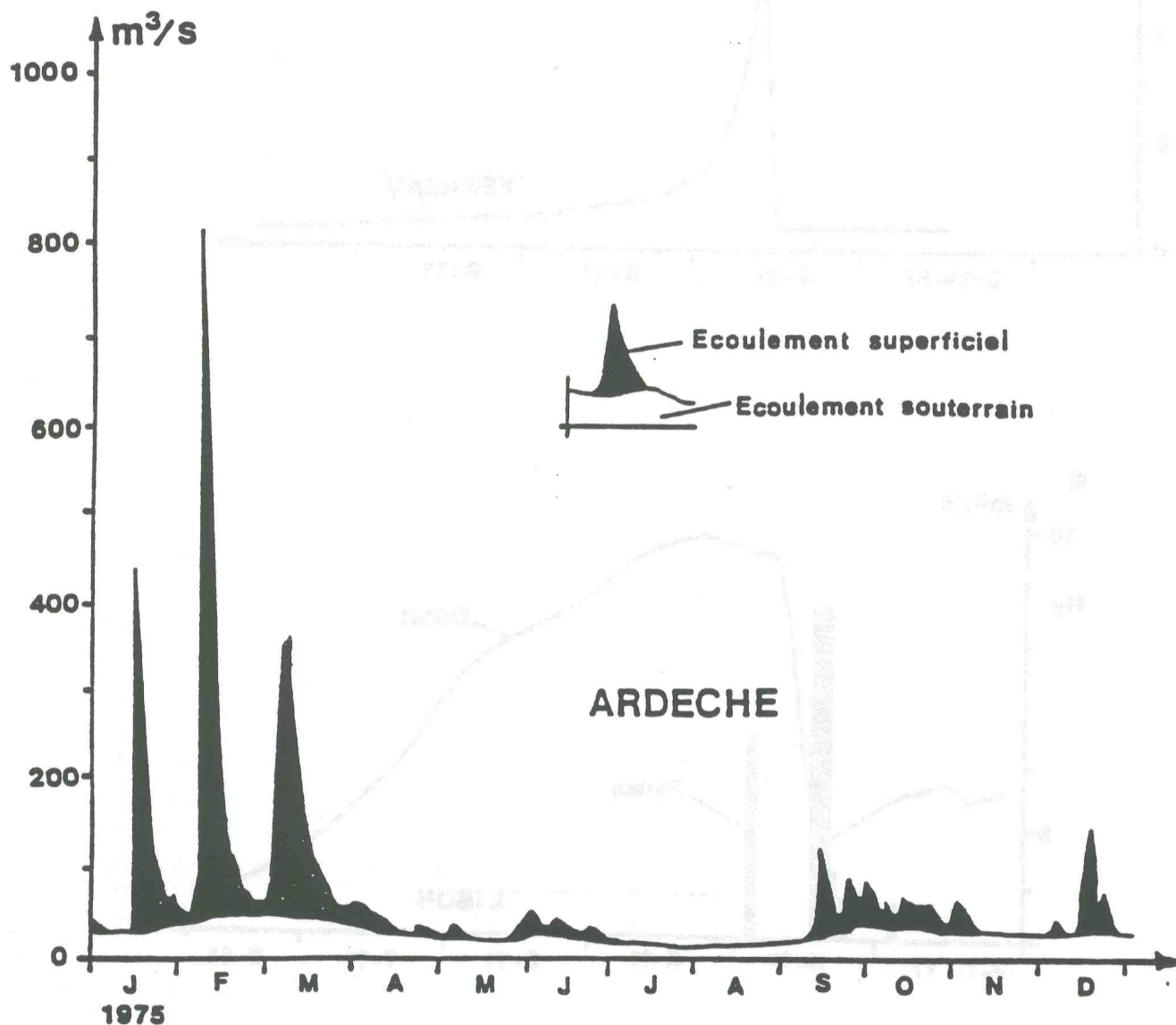
Les trop-pleins

On connaît de nombreux exemples de sources temporaires ou à faible débit situées à une cote légèrement supérieure à l'exutoire principal d'un aquifère calcaire qui fonctionnent en trop-plein de la source principale et qui acquièrent temporairement ses caractéristiques physico-chimiques. En Franche-Comté, en amont de Besançon, la source Bergeret sert de trop-plein à la source d'Arcier et la source de la Grotte Sarrazine, près de Salins les Bains joue le même rôle par rapport aux Lison.

Des réponses caractéristiques

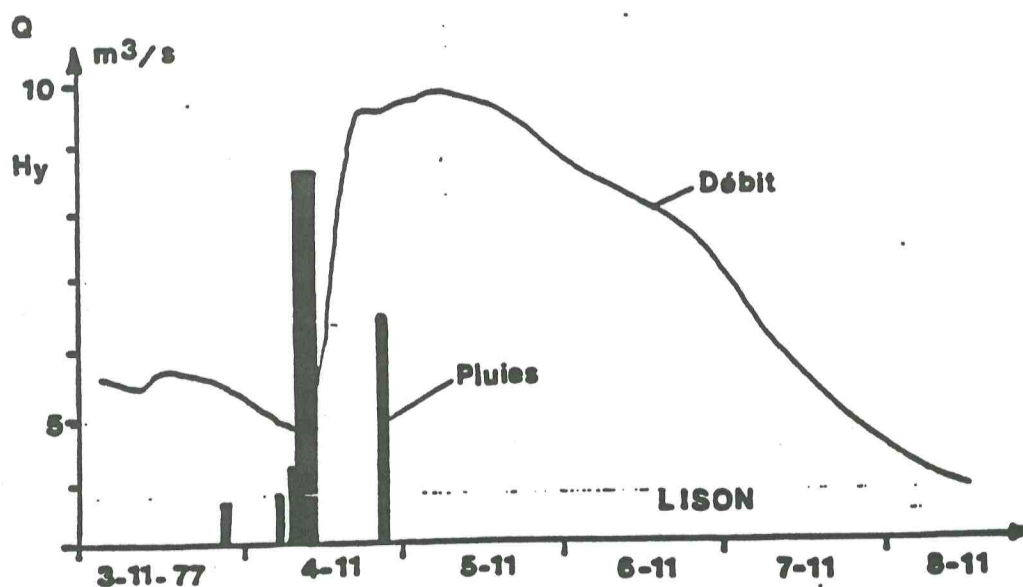
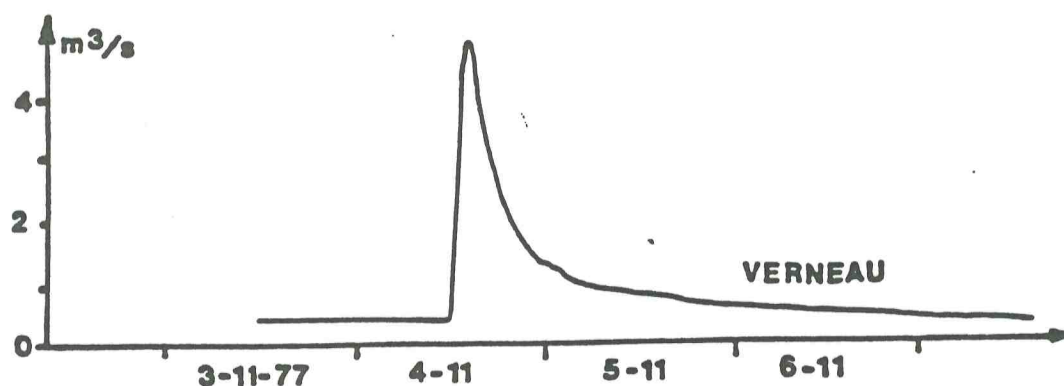
Les périodes de crue sont des épisodes très instructifs. Lors de la montée de crue arrivent des eaux extérieures dont les caractéristiques physiques et chimiques sont différentes des eaux contenues dans le karst et en équilibre avec le milieu calcaire souterrain. Par exemple des eaux froides et faiblement minéralisées provenant d'une pluie de printemps ou d'automne se marquent par une baisse de la température et une diminution des teneurs en bicarbonate et en calcium à la source du Verneau (pl. 5 et

P1.3 - HYDROGRAMMES SIMPLES DE LA SOMME ET DE L'ARDECHE
montrant la part importante des écoulements de surface pour
l'Ardeche (document BRGM)



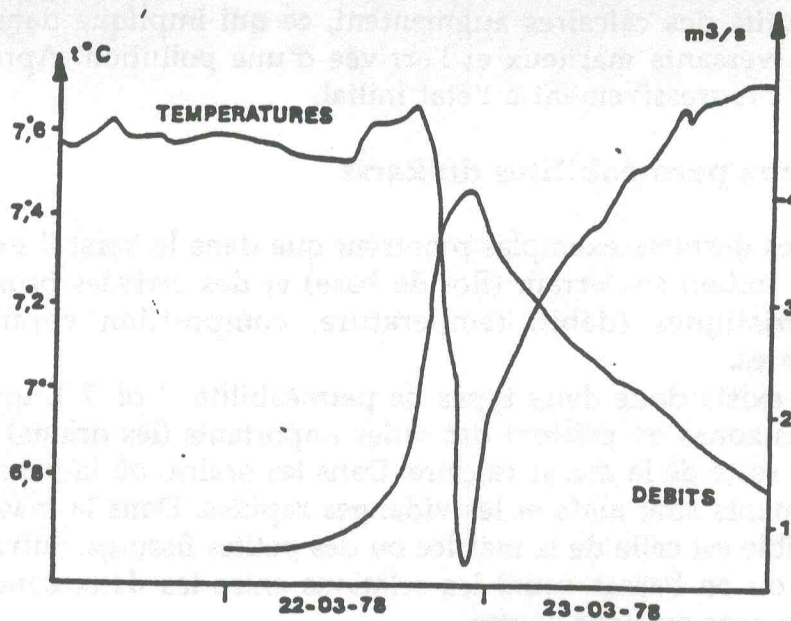
l'arrivée d'une pollution. Après la pluie, en décrue, on revient progressivement à l'état initial.

P1.4 - HYDROGRAMME SIMPLE DU VERNEAU ET COMPLEXE DU LISON



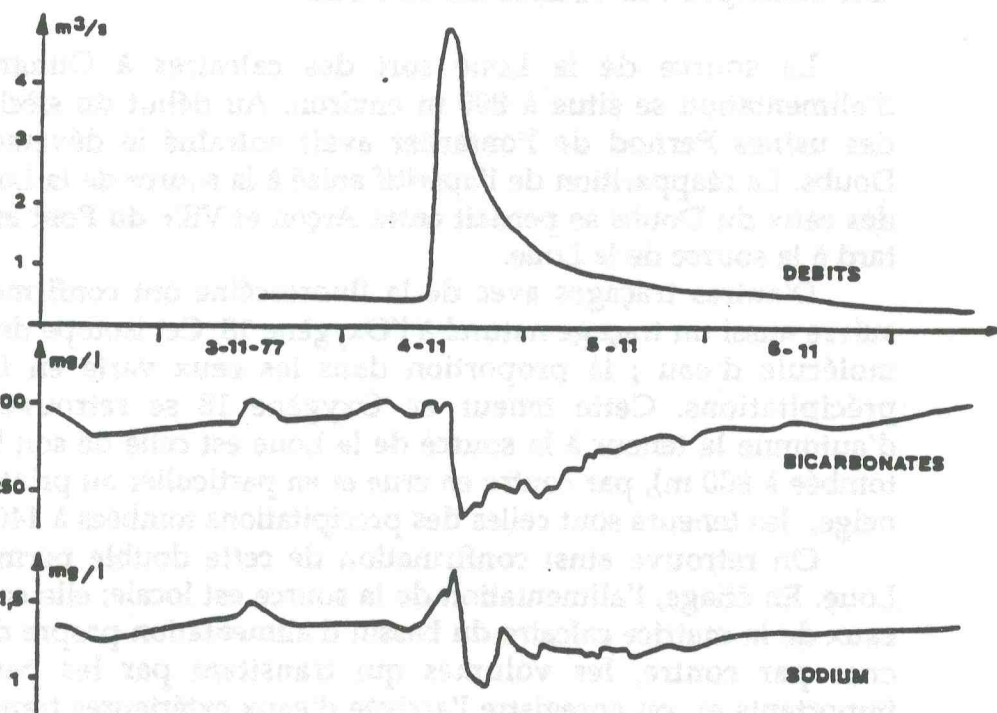
Les deux perméabilités du karst

Ces derniers exemples montrent que dans le karst il existe des eaux en équilibre avec le milieu souterrain (flot de base) et des arrivées brusques extérieures dont les caractéristiques (débit, température, composition chimique) peuvent être très différentes.



P1.5 - VARIATION DE LA TEMPERATURE DE LA SOURCE DU VERNEAU
LORS D'UNE AVERSE DE PRINTEMPS

P1-6-VARIATION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE LA SOURCE
DU VERNEAU LORS D'UN EPISODE PLUVIEUX



pl. 6). Mais les teneurs en nitrate ou en sodium qui sont des éléments non constitutifs des calcaires augmentent, ce qui implique dans ce cas, un lessivage des bassins versants marneux et l'arrivée d'une pollution. Après la pluie, en décrue, on revient progressivement à l'état initial.

Les deux perméabilités du karst

Ces derniers exemples montrent que dans le karst il existe des eaux en équilibre avec le milieu souterrain (flot de base) et des arrivées brusques extérieures dont les caractéristiques (débit, température, composition chimique) peuvent être très différentes.

Il existe donc deux types de perméabilité (pl. 7), une perméabilité très élevée dans les zones où existent des vides importants (les drains) et une perméabilité faible dans le reste de la masse calcaire. Dans les drains, où la perméabilité est très élevée les écoulements sont aisés et les vidanges rapides. Dans la masse calcaire la perméabilité plus faible est celle de la matrice ou des petites fissures. Suivant l'état hydrologique (en hautes ou en basses eaux) les relations entre les deux zones de perméabilité se font dans un sens ou dans l'autre.

Une conséquence pour les stations d'épuration

On voit ainsi le rôle bénéfique des bassins d'orage qui recueillent les eaux chargées et polluées résultant du lavage des surfaces imperméabilisées en début de pluies et le rôle néfaste, en ce même début de crue, des déversoirs d'orage qui rejettent les eaux les plus chargées dans le milieu naturel.

Un exemple : la source de la Loue

La source de la Loue sort des calcaires à Ouhans à 528 m. Son bassin d'alimentation se situe à 800 m environ. Au début du siècle, l'incendie spectaculaire des usines Pernod de Pontarlier avait entraîné le déversement d'absinthe dans le Doubs. La réapparition de l'apéritif anisé à la source de la Loue a montré qu'une partie des eaux du Doubs se perdait entre Arçon et Ville du Pont et ressortait 48 heures plus tard à la source de la Loue.

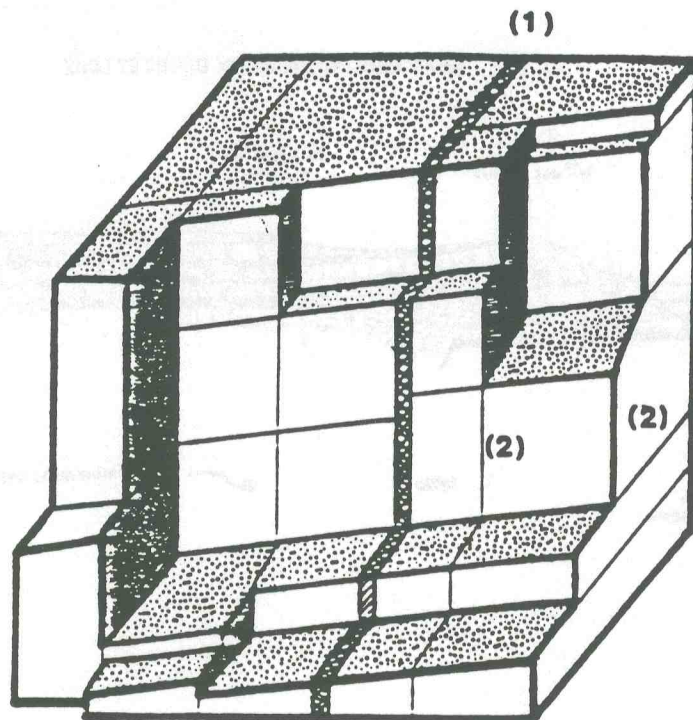
D'autres traçages avec de la fluorescéine ont confirmé le phénomène. On peut suivre aussi un traçage naturel à l'Oxygène 18. Cet isotope de l'oxygène fait partie de la molécule d'eau ; la proportion dans les eaux varie en fonction de l'altitude des précipitations. Cette teneur en Oxygène 18 se retrouve aux sources. En étiage d'automne la teneur à la source de la Loue est celle de son bassin d'alimentation (eau tombée à 800 m), par contre en crue et en particulier au printemps lors de la fonte de la neige, les teneurs sont celles des précipitations tombées à 1400 m au Mont d'Or.

On retrouve ainsi confirmation de cette double perméabilité à la source de la Loue. En étiage, l'alimentation de la source est locale; elle correspond à la vidange des eaux de la matrice calcaire du bassin d'alimentation propre de la source de la Loue; en crue par contre, les volumes qui transitent par les pertes du Doubs sont très importants et on enregistre l'arrivée d'eaux extérieures transitant rapidement dans les drains.

La boîte noire

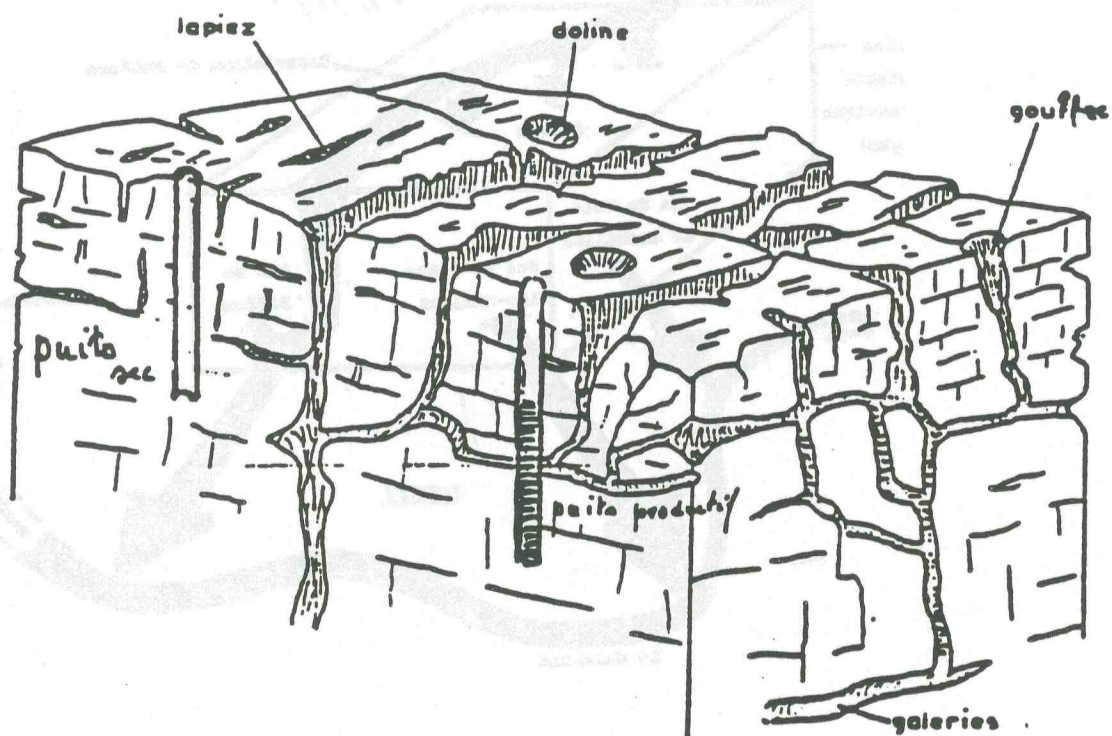
Mais comment se fait le passage. S'agit-il d'une simple galerie ? S'agit-il d'une

Schéma théorique

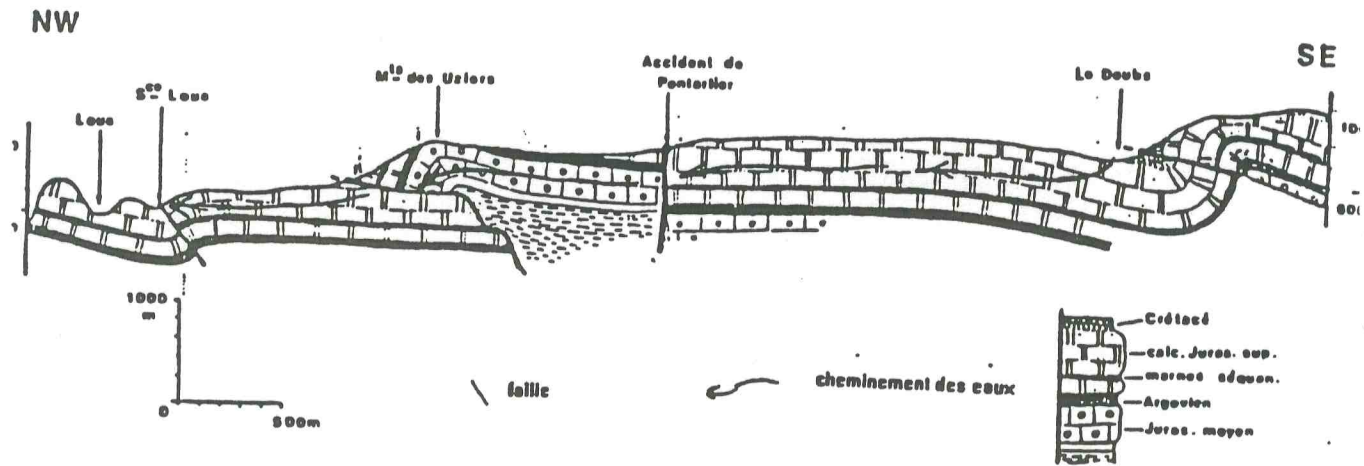


- (1) grandes fractures +/- zones de drainage
 (2) petites fractures dans des zones de faible perméabilité

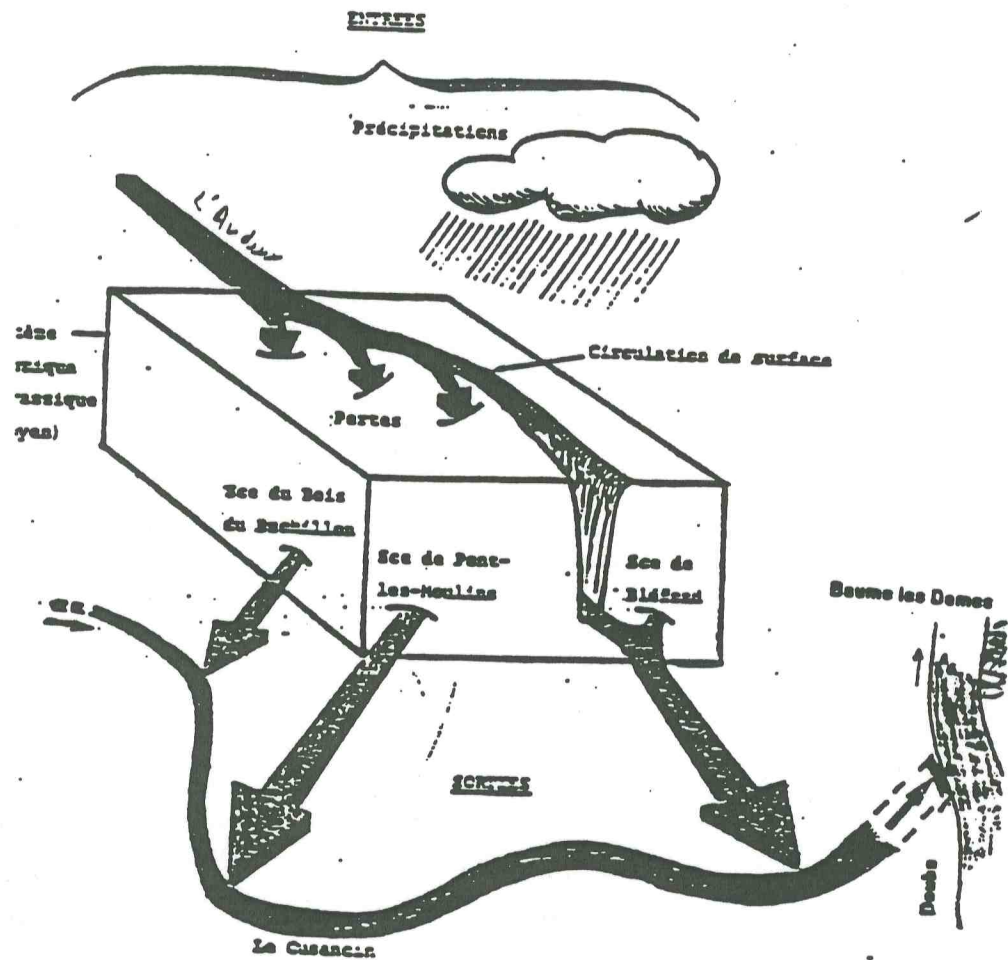
Schéma réel



P1.8 - COUPE GEOLOGIQUE ENTRE DOUBS ET LOUE



P1.9 - LE SYSTEME DE L'AUDEUX



nappe ? ... La réponse est difficile, d'autant plus qu'en profondeur existe un niveau marneux important et que la structure est complexe (pl. 8). Dans les grottes ou dans les gouffres on observe aussi bien des rivières souterraines torrentielles que des zones de calme.

Aussi présente-t-on les écoulements dans le karst sous forme systémique (pl. 9) avec une entrée connue (précipitations, pertes de rivières ...) et une sortie également connue (les sources). Entre les deux, le cheminement des eaux n'est pas connu; on place donc entre les deux une boîte noire sur laquelle on peut faire des hypothèses. On sait qu'il existe des systèmes simples avec une prédominance de drains préférentiels qui peuvent être explorés (réseau du Verneau, par exemple) et des systèmes complexes dus à la superposition ou à l'interconnexion de réseaux simples ou bien encore des systèmes formés par des terrains finement fissurés et assimilables aux nappes à perméabilité d'interstices.

Et la géologie ?

Les connaissances géologiques directes (études de terrains) et indirectes (auscultations géophysiques) permettent de préciser la géométrie des réservoirs calcaires, de situer les zones de fracturation préférentielles, donc de préciser les zones de meilleures perméabilités.

Associée aux études hydrodynamiques et en particulier aux bilans qui peuvent en être tirés, le contexte géologique permet de définir ou de préciser l'extension des bassins versants donc, des zones d'alimentation et de proposer des zones de protection.

CARACTERES DE L'AQUIFERE KARSTIQUE ET CONSEQUENCES SUR LES RECHERCHES D'EAU SOUTERRAINE.

Remarque préalable

Une roche carbonatée compacte, non tectonisée, constitue en règle générale un réservoir aquifère médiocre sinon nul. La fracturation tectonique est un préalable indispensable à la formation d'un aquifère karstique. La karstification (agrandissement des vides par dissolution de la roche) qui se développe ensuite sur une fracturation sera d'autant plus importante que :

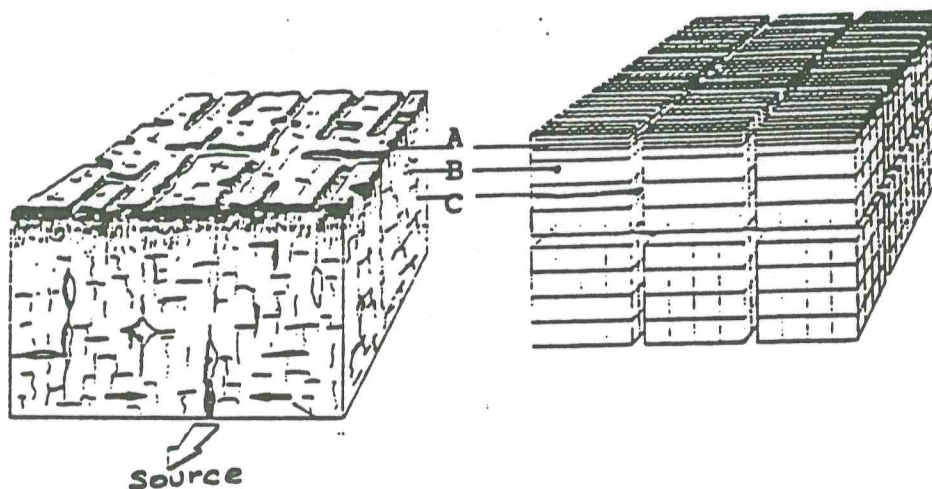
- l'ouverture tectonique aura été conséquente,
- le flux de l'eau disponible pour la percolation dans la fracture et le pouvoir de corrosion de ce flux, seront élevés.

Ces facteurs ont pu être d'importance différente au cours d'une genèse, non seulement entre massifs karstiques voisins, mais aussi d'un secteur à un autre d'un même karst. Ceci explique les résultats apparemment contradictoires, qui peuvent être obtenus en recherche d'eau, sur un même massif.

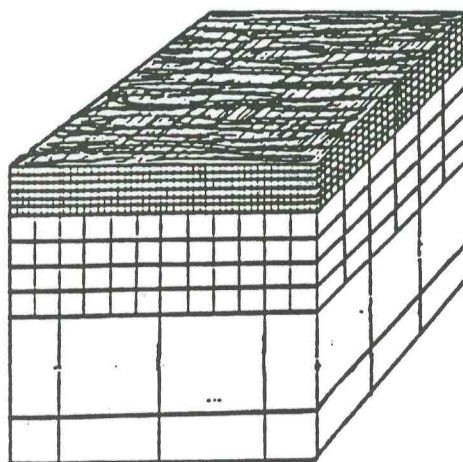
SENSIBILITE DES FRACTURES A LA KARSTIFICATION

Conditions tectoniques

Les fractures dont les plans étaient normaux aux contraintes tectoniques distensives, ont subi une ouverture maximale et sont - à priori - les plus favorables à la karstification, les autres facteurs étant égaux par ailleurs.



Pl. 10 a . REPRESENTATION CONCEPTUELLE DE L'AQUIFERE KARSTIQUE
A: Décompression de sub-surface , karstification
préférentielle, karst hypodermique.
B: Bloc fissuré , C: Fentes ou chenaux entre blocs.



Pl. 10 b . REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU KARST: . DIMINUTION
DE LA DENSITE DE FRACTURATION PERMEABLE AVEC LA
PROFONDEUR.

Cette proposition, intellectuellement séduisante, recouvre en fait une réalité beaucoup plus complexe. En effet, pour des efforts tectoniques donnés, appliqués aux limites d'un massif, le champ des contraintes au sein de ce massif, est souvent organisé de façon très irrégulière, en intensité et en direction. Ainsi, une fracture a pu être soumise, le long de sa trajectoire, à des conditions favorables à une ouverture tectonique en un point et défavorables en un autre. En conséquence, les possibilités d'écoulement ne seront pas constantes tout le long d'un tel accident.

Ceci pourrait expliquer

- l'échec d'un forage implanté sur une faille, alors qu'ailleurs, sur la même faille, un autre forage est productif,
- qu'un site de faille, correspondant à une zone de compression, soit peu perméable, alors que latéralement à quelques mètres ou dizaines de mètres de celle-ci, la distension associée à la compression sur la faille, soit à l'origine d'une fracturation perméable.

Morphologie des failles

Les failles peuvent correspondre à des discontinuités nettes et fines matérialisées par un miroir de faille poli, pouvant se refermer facilement. d'autres comme les failles à rejet horizontal (décrochement) sont jalonnées par des bandes de roches écrasées souvent assez larges (quelques décimètres à plusieurs dizaines de mètres pour l'accident de Pontarlier dans le Jura). Ces zones sont plus particulièrement perméables.

Tectoniques superposées

Les failles peuvent être ouvertes ou fermées selon l'orientation des contraintes qui les affectent ou par l'orientation de nouvelles contraintes. Leur état dépend donc de la superposition des états de contraintes qui se sont succédées au cours du temps, de l'orientation de ces contraintes par rapport à celle des failles et de leur intensité. De plus, les effets successifs de ces contraintes étalées dans le temps peuvent être difficilement discernables.

Ainsi dans le Jura, la couverture calcaire témoigne de son jeu le long d'accidents anciens de socle d'orientation N50, d'une fracturation en extension à l'Oligocène selon les orientations N20 et d'une phase de compression N150 responsable du plissement de la chaîne jurassienne.

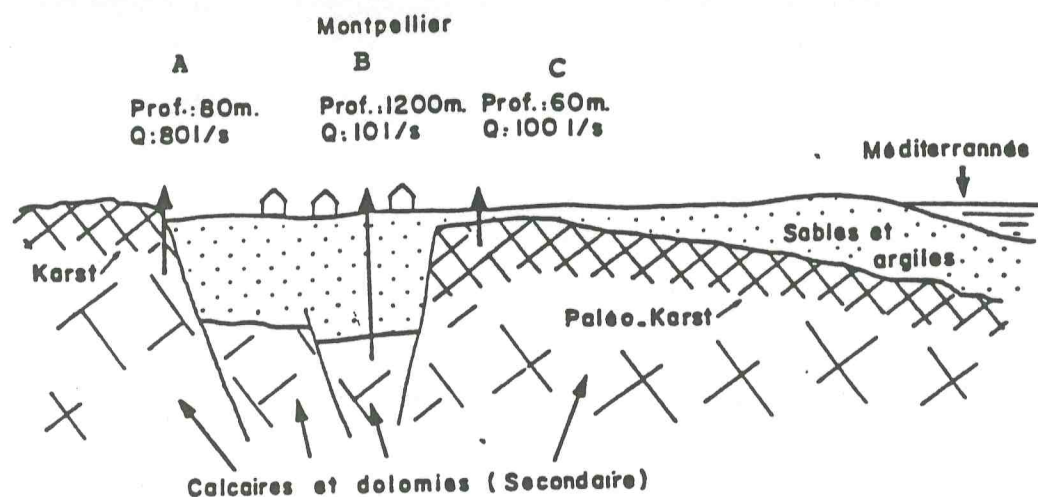
Confinement et décompression

Cas général

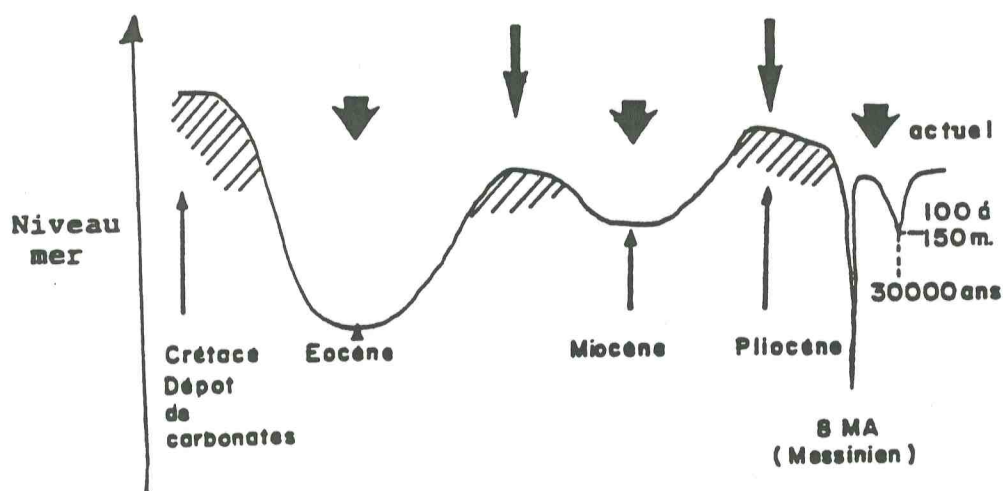
Aux contraintes tectoniques, se superposent les contraintes de confinement ou lithostatiques. Ces contraintes dues au poids des couches sus-jacentes, provoquent la compaction de la roche et la fermeture progressive des fractures avec la profondeur.

D'après les observations sur un grand nombre de forages, on peut en schématisant, distinguer sur un karst affleurant :

- entre 0 et 10 m de profondeur : une zone superficielle, décomprimée et très karstifiée ou karst hypodermique, à conductivité hydraulique élevée, (jusqu'à 10^{-2} m/s),
- entre 10 et 100 m, une zone bien karstifiée, avec possibilité d'existence de fentes très ouvertes et de drains ou chenaux karstiques. La conductivité hydraulique peut être comprise ici entre 10^{-3} et 10^{-5} m/s,



Pas de karst + colmatage : $\rightarrow$ $\diagup \diagdown$, Karstification : $\rightarrow$ $\rightarrow$



Pl. 11 . KARSTS DE LA REGION DE MONTPELLIER ET RESULTATS DE FORAGES DE RECHERCHE D'EAU .

A: Forage de l'Université de Montpellier II ,
 B: Forage du Triangle,
 C: Forage du Pont Trinquat.

En bas: Explication des processus de karstification et de non karstification (avec colmatages éventuels), selon la position relative du niveau de la mer depuis la fin du Crétacé.

Les dernières regressions (8 MA et 30 000 ans), sont certainement à l'origine de la karstification rencontrée sous le niveau de la mer, en zones littorales

- au-delà, des fractures ou des vides karstiques importants peuvent être présents, mais avec une densité plus faible que dans les zones supérieures. La roche est ici plus massive.

Cette structure peut être schématisée par un agrégat de blocs - cubiques par simplification - séparées par des fentes - ou chenaux - ouvertes et à forte conductivité hydraulique.

Les blocs, sont fissurés ; cette fissuration leur confère une faible conductivité (Pl.10a). Ce modèle géométrique doit être complété en introduisant une diminution de la maille de fracturation productrice avec la profondeur ; diminution très forte dans les premiers mètres sous le sol (Pl.10b).

Malheureusement, cette zone conductrice et capacitive du karst hypodermique, se trouve bien souvent en zone non saturée, de ce fait inexploitable par pompage. La seule situation favorable est celle où le massif karstique, siège d'un paléo-karst, est en situation profonde recouvert par un terrain discordant.

Ceci pourrait expliquer :

- les débits élevés obtenus sur des forages de faibles profondeurs :

par exemple :

- 50 l/s, sur le forage profond de 120 m, qui alimente l'Université de Montpellier II,
- 150 l/s, sur un forage de 50 m dans des calcaires barrémiens de la Drôme (BRGM),
- 80 l/s, sur un forage de 60 m dans des calcaires de l'Infralias de la Grand Combe, Gard (Languedoc - Hydroservices),

- le fait que nombre de bureaux d'études interrogés, disent avoir eu leurs meilleurs résultats sur des forages de profondeur inférieure à 100 m.

Le karst hypodermique est à l'origine des débits élevés obtenus au toit des karsts enfouis sous une couverture d'âge postérieur à la karstification ; c'est le cas notamment des forages du Pont Trinquat et de ceux de la terminaison ouest du massif de la Gardiole (Hérault) avec des productions de l'ordre de 100 l/s (Pl.11). Des débits importants sont observés pour les mêmes raisons dans des exploitations minières (mines de bauxite, de plomb-zinc ...).

A des profondeurs importantes, la karstification conductrice peut subsister, mais localisée et souvent difficile à situer. L'échec d'un forage très récent, profond de 400 m, réalisé sur les Grands Causses est un exemple de cette difficulté, comme également le forage de 1200 m produisant 10 l/s (le Triangle, Montpellier) et bien d'autres ouvrages profonds (forage pétrolier au nord de Béziers).

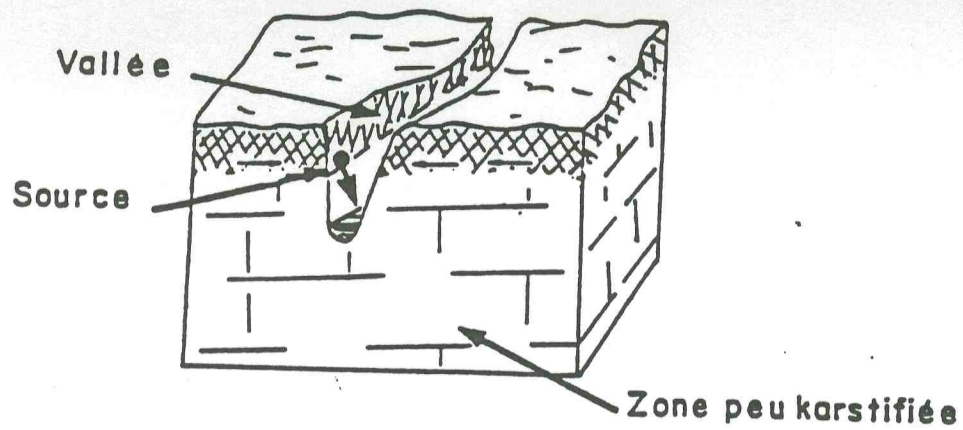
Cependant des réussites sont réelles :

- 12 l/s sur un forage de 400 m, dans des calcaires crétacés, dans le Gard (BRL),
- hors de France, mais un résultat significatif : 80 l/s entre 1500 et 2000 m dans des calcaires du Turonien du Sud Tunisien.

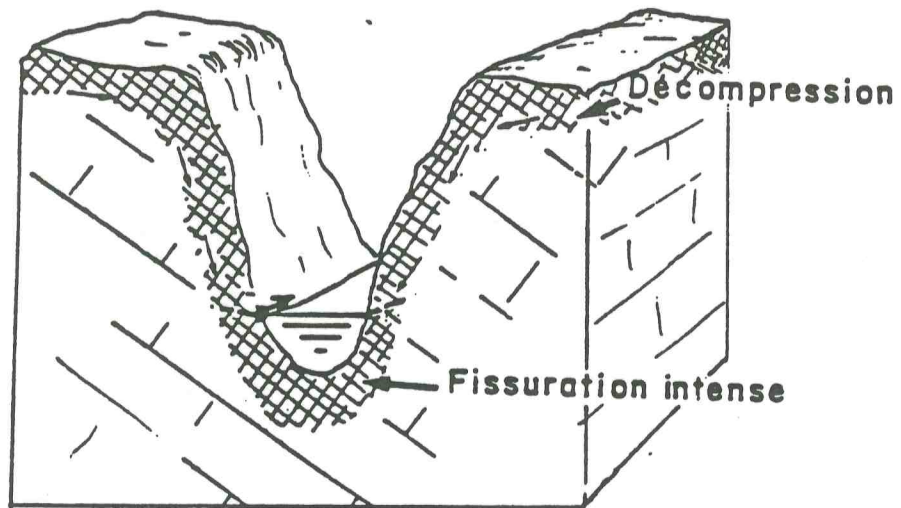
Il faut citer ici le projet intéressant de deux forages de 600 m dans le Crétacé moyen du Vaucluse (BRGM Marseille).

On notera qu'une karstification profonde peut être due à des variations du niveau de base lors de la genèse karstique (cas des karsts noyés littoraux).

PI-12

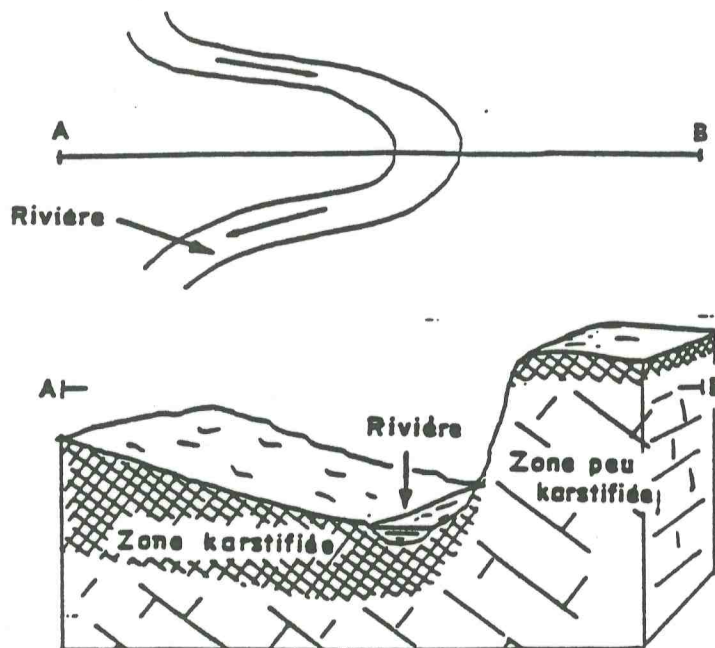


Creusement rapide d'une vallée et karstification perchée



Vallée ancienne, avec karstification sur les flancs et au fond de la vallée.
Présence d'une zone noyée liée au cours d'eau.

PI-13



Coupe d'un méandre

Cas particulier des vallées

Le rôle de la décompression s'observe également dans les travaux de forages en régions entaillées de vallées profondes.

Si le creusement de la vallée a été plus rapide que la décompression, le karst se trouve en situation perchée, donc non saturé et inexploitable. par contre, si la vallée est ancienne, une karstification peut accompagner le profil de la vallée ; la partie basse de cette karstification peut renfermer alors une zone saturée liée au cours d'eau et exploitable par forage (Pl.12).

Ceci pourrait expliquer par exemple le débit voisin de 150 l/s sur un forage de 50 m dans le Ludien à Ners (Gard, SAEP de la Droude, Berga-Sud).

Dans le Jura des forages exécutés dans les zones de plateau : Crançot (5 m³/h), Valdahon (5 forages secs) ou dans l'avant pays : Charcenne (1 forage productif sur 7) n'ont pas donné les résultats escomptés.

Par contre dans la vallée du Doubs, en amont de Besançon la papeperie de Novillars exploite depuis le début du siècle environ 1000 m³/h sur 4 forages, et d'autres forages à Novillars, Chalèze, Thise dépassent 100 m³/h. Plus à l'amont vers Baume-les-Dames, des forages (Branne, Santoche) viennent d'être réalisés avec des débits avoisinant 150 m³/h. Il convient d'ajouter que tous ces forages se trouvent dans le faisceau bisontin, c'est-à-dire en zone plissée.

La conjonction des plissements transverses ou des abaissments d'axe et de la présence d'une vallée profonde favorise sans doute le drainage. C'est ce que nous avons montré en étudiant la localisation des principales sources jurassiennes qui se situent la plupart dans les zones d'abaissement d'axe de plis transverses à des vallées profondes. Le forage de Lods (200 m³/s) dans la vallée de la Loue se trouve dans ce contexte.

De plus, la recherche d'eau le long des cours d'eau, ou des vallées sèches, doit se faire préférentiellement à l'intérieur des méandres et non à l'extérieur de ceux-ci. Du fait de la genèse d'un méandre, la partie intérieure correspond à d'anciennes positions du lit, sous lesquelles l'infiltration de volumes d'eau importants a donc pu se produire et favoriser ainsi la karstification (PL.13). Ceci a été observé en particulier sur les forages de reconnaissance des barrages sous-cévenols d'écêtement des crues construits sur le karst (barrages de Ceyrac et de Conqueyrac).

CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE ELEVEE PRES DES SOURCES

Le point bas de la limite du karst, sur lequel prend naissance une source, provoque la convergence des écoulements souterrains ; le flux disponible est alors important et la karstification en conséquence plus active ici que dans les autres secteurs du massif.

Ceci pourrait expliquer les résultats très positifs de forages réalisés immédiatement à l'amont de sources karstiques :

- captage de la source du Lez, pour l'alimentation de la ville de Montpellier, avec un débit supérieur à 1500 l/s (CGE),
- le débit de 200 l/s sur un forage du Causse-de-la-Selle, près des sources des

Cent-Fons, (Hérault, CGE),

- 80 l/s, près de la source de Saint-Clément-de-Rivière, au Nord de Montpellier,
- 300 l/s dans des calcaires urgoniens, près de sources, à Uzès (Gard).

- Les échecs fréquents de forages implantés loin des sources (5 l/s sur un forage de 150 m dans le Bois de Paris (Gard, SIVOM du Brestalou, Languedoc, Hydroservices).

ROLE DE LA LITHOLOGIE

La fracturation d'une roche constituée de petits bancs est souvent plus dense que celle d'une roche massive, pour des conditions structurales équivalentes. De plus, les joints de stratification, qui constituent des surfaces de moindre résistance, sont souvent le siège de ruptures et de déplacements relatifs des deux bancs jointifs. Sur cette ouverture mécanique, des chenaux de dissolution peuvent ainsi se mettre en place. Alors que les failles ou décrochements ont souvent des plans proches de la verticale, donc difficilement intersectés par un forage lui-même vertical, les joints peuvent être par contre peu inclinés et de ce fait plus facilement recoupés par un forage. Des photographies de vidéo-carottage l'ont bien mis en évidence.

Ceci pourrait expliquer la bonne production de forages réalisés dans ces calcaires bien lités, par exemple :

- 20 l/s dans l'infra-Lias de la bordure Cévenole (Languedoc- Hydroservices),
- 30 l/s dans des calcaires du Berriasien de la région de Corconne (Gard).

IMPORTANCE DE L'ETENDUE DU MASSIF KARSTIQUE

Il tombe sous le sens, qu'un réservoir karstique peu étendu, ne peut pas supporter une exploitation à un débit élevé, qui épuiserait rapidement de faibles réserves. Ceci concerne les structures karstiques de dimensions réduites, délimitées par des terrains encaissants non karstiques et imperméables, ainsi que les aquifères compartimentés, à compartiments confinés non communicants.

Ceci pourrait expliquer

- la décroissance rapide du débit - à l'origine pourtant faible - du forage du Triangle (Montpellier, Pl.11) qui a atteint probablement, un compartiment peu étendu d'un graben profond,
- l'échec de l'essai par pompage sur le karst du goufre de la Peyrère (Pyrénées ariégeoises, 1990), qui est au sein d'un massif carbonaté de dimensions réduites, enserré dans un encaissant imperméable. (débit naturel maximal : 9 m³/s en crue, débit moyen : 0,14 m³/s, débit supplémentaire exploitable par pompage : 0 m³/s !).

APPLICATIONS DE L'ANALYSE DE L'HYDROGRAMME RELEVÉ SUR UNE SOURCE KARSTIQUE

La source par laquelle se vidange une nappe est un point singulier de celle-ci, à condition de potentiel et à flux variable. Elle permet un accès privilégié aux écoulements souterrains; son régime traduit certains caractères de l'aquifère et en particulier la diffusivité, la géométrie plus ou moins complexe des aquifères, son compartimentage et la variabilité du signal entrée.

Ainsi et en premier lieu, l'analyse de l'hydrogramme relevé sur une source permet de quantifier la ressource en eau renouvelable sous l'effet de l'infiltration efficace (40% d'infiltration efficace pluriannuelle sur les karsts affleurants méditerranéens). C'est une donnée importante dans la gestion d'un aquifère, gestion qui peut s'appuyer sur une modélisation des relations pluie-débit.

Ensuite, dans certains travaux, l'analyse de l'hydrogramme est utilisée pour reconnaître l'existence et l'importance des réserves permanentes du karst (il s'agit des réserves situées à une cote inférieure à celle de la source). Cette démarche est fermement contestée dans d'autres études qui rappellent que cet emmagasinement ne peut être déterminé que par pompage avec rabattement sous le niveau de l'exutoire et que l'hydrogramme traduit notamment des conditions locales proches de l'émergence.

LES KARSTS LITTORAUX

De Perpignan à Nice, le long de la côte, des massifs karstiques constituent de puissants aquifères, comme l'attestent de nombreuses venues d'eau, littorales ou sous-marines.

Grâce aux anomalies de température, de salinité et de résistivité que provoque l'intrusion d'eau douce ou saumâtre dans le milieu marin, un certain nombre de ces émergences a pu être décelé ; mais certaines d'entre elles ne sont qu'imparfaitement localisées et il en est probablement encore d'inconnues. Leur débit parfois très important (Port Miou, débit d'étiage voisin de 3 m³/s ; Font Estramar, débit d'étiage : 0,8 m³/s) a motivé de nombreuses études. Toutefois, leur intérêt économique est tempéré par leur minéralisation élevée, parfois proche de celle de l'eau de mer (de 1 à 20 mg/l). Cette minéralisation acquise par mélange des eaux karstiques avec des eaux marines du biseau salé, varie en fonction du débit. Ainsi, en crue, certaines de ces émergences évacuent des eaux chimiquement potables.

Des expériences de captage, en amont des zones de mélange, ont été tentées, comme par exemple, l'aménagement de l'émergence de Port Miou (calanque de Cassis) par l'édification d'un barrage immergé.

Certaines de ces sources présentent des salinités assez limitées. Elles peuvent alors être utilisées pour l'irrigation ou l'aquaculture (alimentation de la pisciculture de Font-Dame, dans les Corbières orientales ; captage partiel de la source de l'abysses dans l'Etang de Thau).

Le débit moyen total en mer pour l'ensemble karstique littoral, doit dépasser 20 m³/s. L'intérêt de cette ressource, en zones à forte demande, n'est pas à démontrer; encore faut-il développer des techniques permettant de réaliser les captages, avant la contamination des eaux souterraines par les eaux marines.

ORIENTATIONS POUR DE NOUVEAUX TRAVAUX

Ce paragraphe pourra faire l'objet d'une note complémentaire détaillée. A titre indicatif, voici, quelques réflexions sur des orientations possibles de nouveaux travaux de recherche, qui tiennent compte des argumentations discutées dans le texte, et de la nécessité économique de mobiliser de nouvelles ressources, en certaines régions.

En Franche-Comté, peu de recherches ont été effectuées, car on a préféré utiliser directement les eaux des sources ou exploiter les nappes alluvionnaires. mais des succès ont été remportés, (Chailluz pour Besançon, Lods pour le syndicat de la

Haute Loue). Récemment des prospections aux résultats intéressants et prometteurs ont été réalisées dans la moyenne vallée du Doubs à l'amont de Besançon, dans la région de Baume les Dames. Cependant entre la vallée moyenne du Doubs et la Haute Chaîne, les calcaires n'ont pas été testés ; des forages d'étude ou de reconnaissance s'avèrent nécessaires pour reconnaître leur comportement hydrologique et la qualité des eaux qu'ils contiennent, d'autant plus que les nappes alluviales qui constituent l'essentiel des ressources actuelles sont l'objet d'une concurrence entre les aménagements de surface, leur exploitation comme granulats et leur maintien en zone de captage.

Dans les régions sud, les travaux doivent concerner deux domaines : les aquifères continentaux et les karsts littoraux.

Pour les aquifères continentaux on peut d'ores et déjà retenir comme susceptibles d'être prospectés : les karsts des Corbières et de la basse vallée de l'Aude ; les séries en petits bancs de l'Infralias de la bordure cévenole, les calcaires profonds dans les grands fossés distensifs de toute la région sud, etc.

L'exploration des conduits karstiques des grandes sources littorales et sous marines devrait pouvoir être réactivée, par plongées ou plutôt par le développement d'automates d'investigation et de mesures in-situ, mais ceci obligatoirement en liaison avec des hydrogéologues. A ce propos, il faut signaler que l'ANVAR, soutient un avant-projet d'étude de faisabilité d'un automate justement destiné à l'exploration des conduits karstiques.

Enfin, des forages de reconnaissance pourraient, dès à présent, être implantés avec profit, en amont de certaines sources littorales.

Sur l'aspect méthodologique, des recommandations de prospection pourront être proposées, par exemple :

- privilégier lorsque c'est possible, les recherches sur les plongements d'axe de plis,
- dans les vallées, s'attacher à la prospection des intérieurs de méandres,
- rechercher les séries calcaires en bancs minces, de préférence aux calcaires massifs,
- retenir les grandes zones faillées et intersections de failles, plutôt que les failles isolées,
- dans les programmations d'études, prévoir d'abord, lorsque c'est possible, des travaux sur les zones les plus proches des émergences, ou les conductivités hydrauliques sont les plus élevées de l'ensemble du karst. Ceci, afin de reconnaître la profondeur de la karstification et ainsi les rabattements maximaux possibles lors d'une exhaure éventuelle par pompage.
- de toute manière prévoir des forages de reconnaissance de manière à tester lithologiquement et hydrauliquement les grands compartiments

CONCLUSION

La recherche d'eau dans les calcaires reste une démarche complexe. Elle nécessite une reconnaissance géologique et géophysique préalable, un bilan hydrogéologique, des forages accompagnés de tests et de développements des ouvrages. c'est une opération délicate qui doit être menée par des spécialistes qui prennent en compte l'aspect global de la recherche

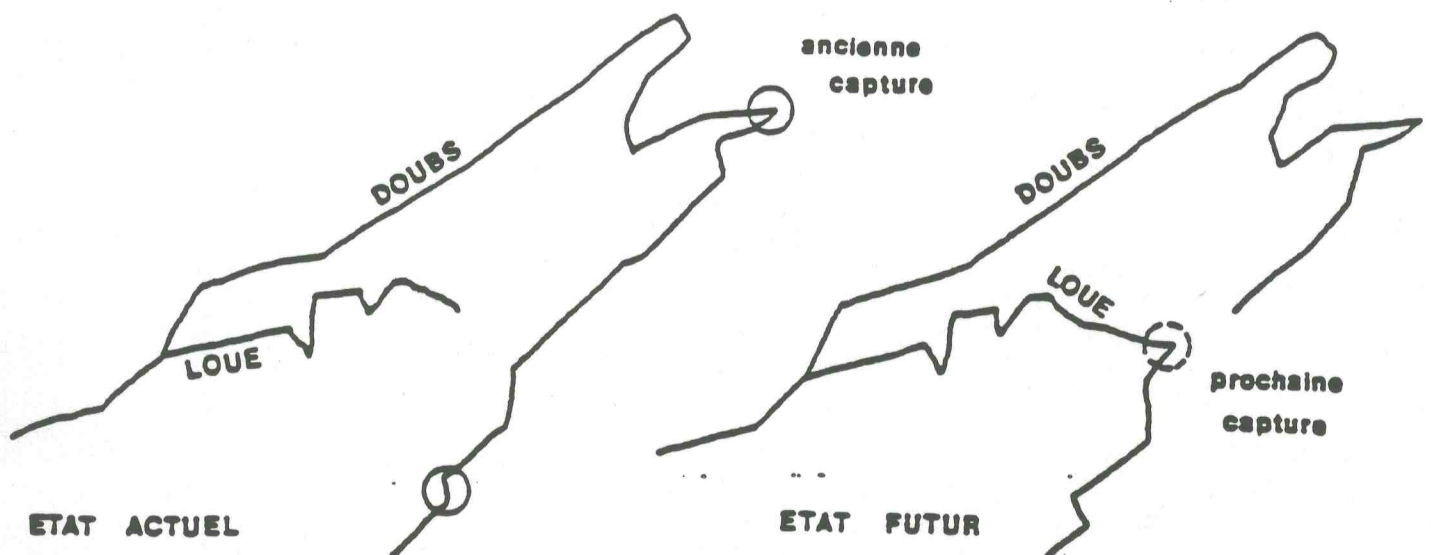
Les karsts : des systèmes évolutifs

Les zones karstifiées sont-elles des systèmes figés, non car la dissolution naturelle des calcaires, donc la karstification se poursuit. Des modifications sensibles à l'échelle humaine ont déjà été observées. Par exemple le détournement d'une partie des eaux du plateau de Saône qui se dirigeaient vers la source du Maine dans la vallée de la Loue en faveur de la source d'Arcier dans la vallée du Doubs ou encore, dans la région de Baume les Dames, l'assèchement de la source de Bléfond au dépens de la source de Pont les Moulins. De même à terme peut-on prévoir le captage du haut cours du Doubs par la Loue.

L'action de l'homme est perceptible : variation plus grande des débits des sources et des cours d'eau à la suite de l'imperméabilisation de surfaces considérables (toits, routes, parkings) ou de rectification de cours d'eau abaissant les nappes d'accompagnement des rivières (Dugeon dans la région de Pontarlier).

Néanmoins, la dissolution des calcaires se poursuit inexorablement. Entre 40 et 100 tonnes de calcaires sont dissous annuellement par kilomètre carré et exportés par les eaux courantes. On conçoit donc que les massifs calcaires importants soient récents (terrains d'âge secondaires et tertiaires), qu'à l'ère primaire ils soient plus rares et qu'au Précambrien ils soient pratiquement absents.

On a pu estimer dans la zone méditerranéenne, d'après les valeurs actuelles de la dissolution, qu'un magasin karstique pouvait se mettre en place en moins de 500.000 ans.



EVOLUTION PROBABLE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE DU DOUBS