

Le karst superficiel

Etude des écoulements hypodermiques

sur un site expérimental

Corconne (Gard)

Jean-Louis GUYOT
Hydrosol

Les Aurières

30200 BAGNOLS-sur-CEZE

Résumé : Le site expérimental de Corconne (région nord-montpelliéraine) a permis l'étude du karst superficiel et plus particulièrement des écoulements hypodermiques. Des essais d'injection d'eau et des expériences de traçage ont été réalisés sur les 47 forages du périmètre. Ils ont démontré de manière expérimentale l'existence d'écoulements à composante horizontale sur plusieurs dizaines de mètres, en zone non saturée.

Mots-Clés : Hydrogéologie, karst superficiel, écoulements hypodermiques, site expérimental, Corconne, Gard.

Abstract : THE SUPERFICIAL KARST : HYPODERMIC FLOWINGS ON EXPERIMENTAL AREA.

The superficial karst plays a specific part in the genesis and working of karst aquifer.

In the northern region of Montpellier, the experimental area of Corconne (Gard) gave the opportunity of studying the superficial karst, especially hypodermic flowings. Tracing and water injection tests have been done in the 47 sinkings of the area. They experimentally proved that flowings with horizontal component exist on several dozen meters in non-saturated area.

Key-words : Hydrogeology, superficial karst, hypodermic flowings, experimental area, Corconne, Gard.

- c'est là que s'effectue le début de l'infiltration dans le magasin karstique. La conductivité hydraulique relativement élevée de cette zone facilite grandement cette infiltration. C'est pour cela que le ruissellement sur le karst est très peu important. Les coefficients d'infiltration parfois très élevés sur le karst sont dus à ce phénomène;

- l'activité biologique est particulièrement importante dans cette zone décomprimée qui permet le développement racinaire. Le dégagement de gaz carbonique est élevé, l'eau d'infiltration est donc très agressive et une partie importante de l'acquisition chimique de l'eau se fait à ce niveau.

Cette zone constitue l'interface entre le magasin karstique et le milieu extérieur.

III. LE SITE DE CORCONNE

Le site expérimental de Corconne, mis en place par le laboratoire d'hydrogéologie de l'Université des Sciences et des Techniques du Languedoc, est situé à une trentaine de km au N de Montpellier, à la limite des départements du Gard et de l'Hérault.

Ce site est installé sur des calcaires du Berriasien (fig. 2) et est limité à l'E par la faille de Corconne. Des calcaires dont l'épaisseur des bancs est d'ordre centimétrique à décimétrique sont affectés d'un léger pendage vers le SE.

Le périmètre expérimental est équipé de 47 forages profonds de 9 à 12 m, d'un diamètre de 60 mm, n'atteignant pas la zone saturée située à une profondeur d'environ 45 m. Ces forages sont répartis en mailles carrées de 4 et 8 m.

Ce site expérimental a fait l'objet de nombreuses études : GRILLOT (1977), GIRONA (1978), KRIVIC (1978), LE MASNE (1979), STENMANS (1980), GOUISSET (1981), GUYOT (1983) et BOTTON (1984).

Photo 1 : Site expérimental de Corconne. Vue de la faille limitant à droite les calcaires du Berriasien et à gauche l'Hauterivien.

Experimental area of Corconne. Fault view with Berriasian limestones at right and Hauterivian at left.



Cette étude est le résumé de la première partie d'une thèse, préparée au laboratoire d'hydrogéologie de l'Université des Sciences et des Techniques du Languedoc (Montpellier) soutenue en 1983.

I. INTRODUCTION

Le karst superficiel joue un rôle déterminant dans la genèse et le fonctionnement de l'aquifère karstique.

Une série d'expériences d'injections et de traçages réalisée sur le périmètre expérimental de Corconne, va permettre l'analyse quantitative de ces écoulements hypodermiques.

II. LE KARST SUPERFICIEL

L'aquifère karstique est caractérisé par la superposition des phénomènes de dissolution à ceux de la fissuration. Ceci se traduit par la mise en place d'un milieu perméable très hétérogène comprenant :

- des domaines à karstification très développés (drains ou conduits);
- des éléments de roches à fracturation peu ouverts et à karstification peu évoluée (blocs-fissurés).

A l'affleurement comme pour les autres roches, le massif carbonaté subit une décompression qui provoque l'ouverture d'une fracturation intense, siège d'une karstification importante. Ce développement préférentiel en sub-surface sur une épaisseur variable de l'ordre de quelques mètres, repose en profondeur sur une roche moins karstifiée. Cette anisotropie est la cause des écoulements hypodermiques (fig. 1).

Ces écoulements hypodermiques à composante horizontale suivent deux destinées :

- a) une percolation lente dans la fissuration des blocs,
- b) une infiltration rapide sur les fractures karstifiées (drains) liées au magasin karstique profond.

La zone décomprimée et altérée de sub-surface présente un grand intérêt pour les raisons suivantes :

81231

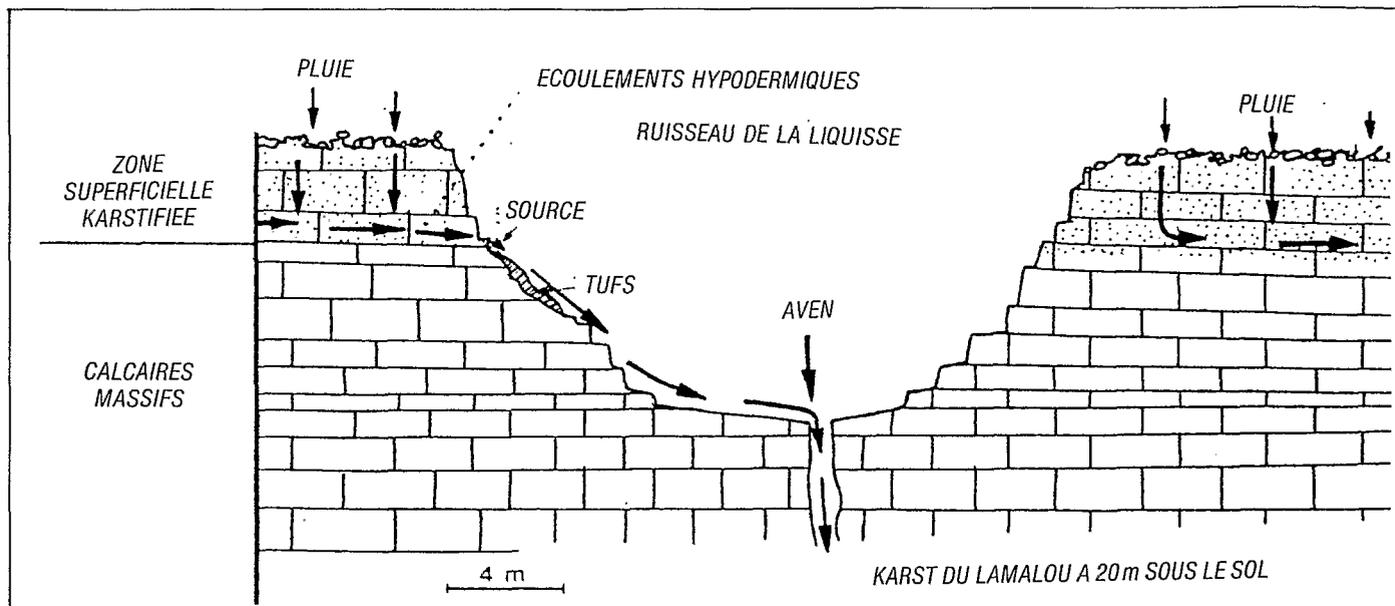


Figure 1 : Ecoulements hypodermiques dans les calcaires du Valanginien du Causse de l'Hortus (Gard), d'après DROGUE C. (1969).
Hypodermic flowings in the upper Valanginian limestones of «Causse de l'Hortus (Gard)», by DROGUE C. (1969).

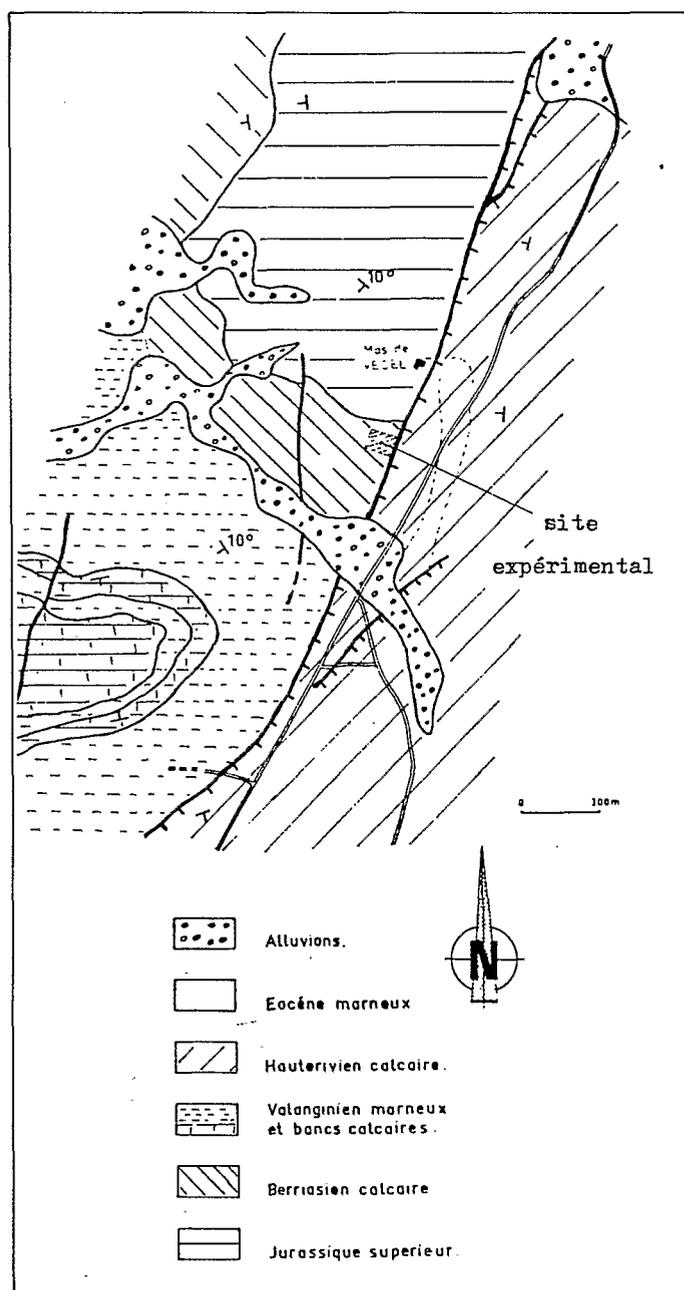


Figure 2 : Site expérimental de Corconne (Gard). Carte géologique.
Experimental area of Corconne (Gard). Geologic map.

IV. ÉTUDE DES ÉCOULEMENTS HYPODERMIQUES

1. Mise en évidence du phénomène

Une série d'injections à débit constant a été réalisée sur chacun des 47 forages afin de mettre en évidence les écoulements hypodermiques dans le karst superficiel. Pour cela, lors de chaque injection, les niveaux piézométriques des forages avoisinants ont été mesurés, permettant de répertorier 32 relations entre forages (remontée du niveau piézométrique de quelques centimètres à plusieurs m).

Sur certains forages, des bruits d'écoulements étaient nettement perceptibles alors qu'aucune remontée du niveau d'eau n'était enregistrée. Ces phénomènes ont été observés essentiellement sur les forages 5, 27 et 34 qui sont restés secs pendant toute la période d'observation (décembre 1981 à juillet 1982).

Au total, 116 circulations interforages ont été dénombrées (fig. 3), correspondant à une longueur cumulée de 1140 m en plan, ce qui est considérable pour un petit secteur de moins de 400 m². Il est en effet à noter que la grande maille (forages distants de 8 m) n'a été le siège d'aucune circulation horizontale évidente.

Il est également intéressant de remarquer que ces écoulements ne sont pas réciproques; en effet, l'injection du forage 18 a eu pour conséquence une remontée de 55 cm dans le forage 19, alors que l'injection du forage 19 est restée sans effet sur le 18. Ces phénomènes ont déjà été observés sur le site de captage de la source du Lez (MARJOLET et SALADO, 1976).

2. Analyse directionnelle

Afin de déterminer les directions privilégiées des écoulements hypodermiques mis en évidence par les injections, des histogrammes de fréquence directionnels ont été réalisés à partir de la figure 3.

Les histogrammes obtenus avec des classes directionnelles de 10 degrés sont représentés par la figure 4 :

4a - exprimée en nombre de relations par classe,
4b - exprimée en longueur cumulée par classe.

On note une nette prédominance des écoulements vers l'E, avec un maximum dans la direction N 090-120. Le pendage des couches sur le site est faible (environ 10 degrés) et de direction N 150-160. Il est possible que le pic observé pour les circulations interforages corresponde à l'influence du pendage compte tenu des directions du maillage.

En comparant ces diagrammes à ceux obtenus par l'analyse de la fracturation par classe de longueur, on remarque une certaine analogie avec l'histogramme des fractures de 3 à 8 m (fig. 5d); ce qui est tout à fait logique vu que les forages sont distants de 4 m les uns des autres.

Il apparaît donc nettement que les directions des écoulements hypodermiques sont conditionnées par les facteurs structuraux de l'aquifère (pendage, fracturation).

3. Influence de la faille de Corconne

Sur la figure 3, le nombre de circulations horizontales (écoulements hypodermiques) observés (n) décroît en s'éloignant de la faille de Corconne. Le maximum est obtenu pour une distance (d) comprise entre 4 et 8 m, ce qui correspond à un drain recoupé par les forages 5, 27 et 34, sensiblement parallèle à la faille (fig. 6).

Ceci montre l'importance des drains dans l'organisation des écoulements hypodermiques et peut expliquer également la figure 3. En effet, compte tenu de l'influence du maillage, la convergence des écoulements hypodermiques vers les forages 5, 27 et 34 entraîne un pic de direction N 090-120.

4. Les expériences de traçage

Afin de caractériser ces écoulements hypodermiques d'un point de vue quantitatif, des expériences de traçage à la fluorescéine en régime forcé ont été réalisées sur une dizaine de forages. Ces résultats ont permis l'étude de la dispersion du traceur et le calcul des vitesses de déplacement du colorant.

Ces expériences ont été réalisées en collaboration avec A. PULIDO-BOSCH de l'Université de Grenade (Espagne).

Chaque expérience de coloration a été accompagnée de mesures piézométriques afin de déterminer le régime d'écoulement. Les prélèvements ont été effectués à l'aide d'hydrocapteurs et de petites pompes immergées.

Pour connaître l'évolution de la réponse en fonction du temps, quatre injections successives ont été effectuées sur le forage numéro 2. La première au début, en régime transitoire, les trois suivantes alors que les niveaux étaient stabilisés, c'est-à-dire en régime permanent (fig. 7).

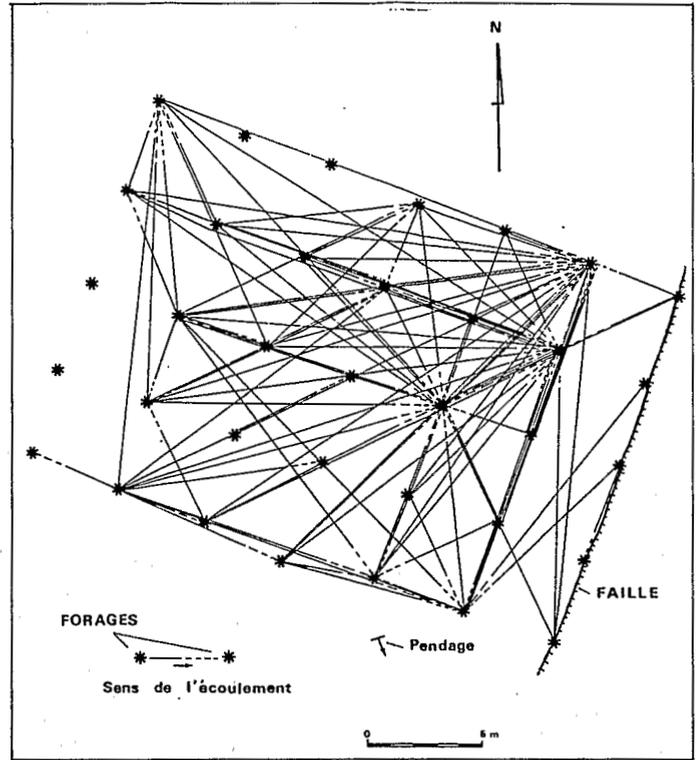


Figure 3 : Relations horizontales entre forages pendant les injections. Péri-mètre expérimental de Corconne (Gard). Petite maille (4 m). Horizontal connections between sinkings during injections. Experimental area of Corconne (Gard).

La stabilité des résultats obtenus lors des trois injections en régime permanent (concentration maximale et temps mis au colorant pour arriver : dt) va nous amener à ne réaliser que deux injections pour les autres forages :
 - une en régime transitoire (au début de l'injection);
 - une en régime permanent.

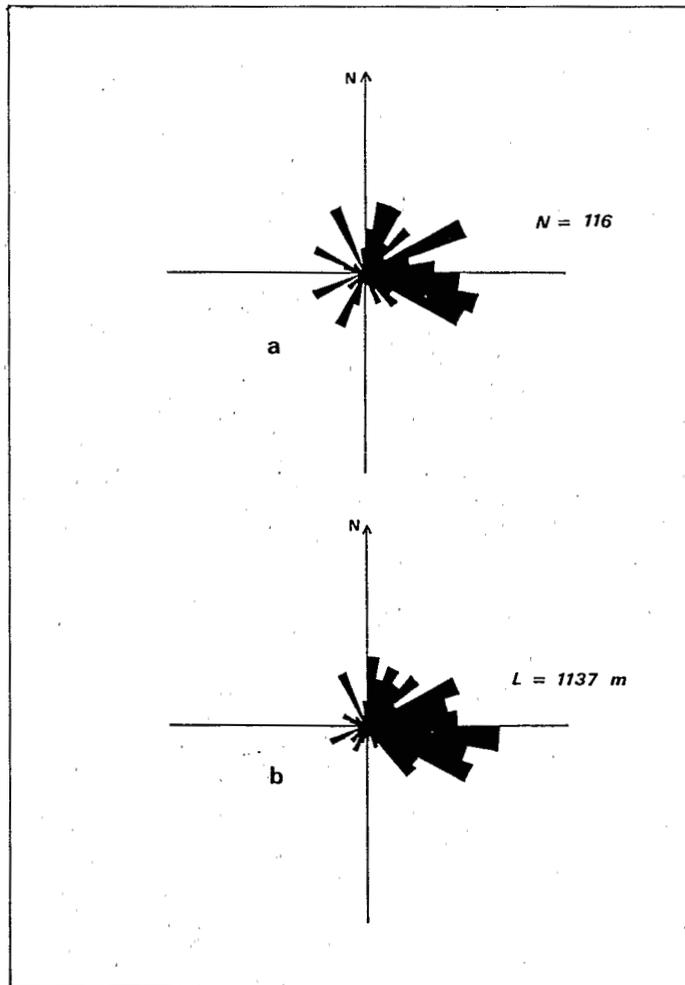


Figure 4 : Histogrammes de fréquence directionnels (classes de 10 degrés) exprimés : a) en nombre, b) en longueur cumulée. Directional frequency graphs (10 degrees class) in : a) number, b) added length.

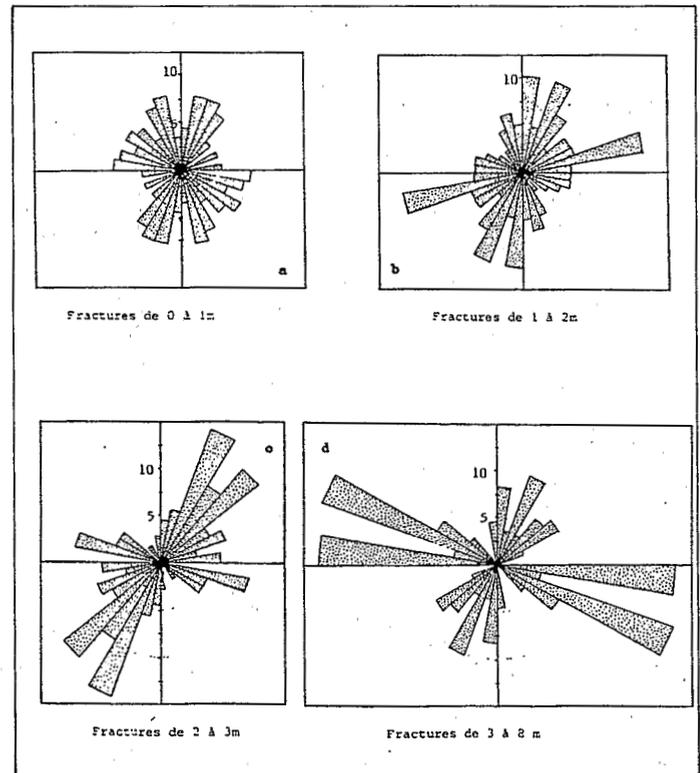


Figure 5 : Macrofracturation - microfracturation. Diagrammes de fréquences relatives par classes de longueur (longueurs cumulées), d'après GOUISSET Y. (1981). Macrofracturation - microfracturation. Frequency chart by class of length (added length), by GOUISSET Y. (1981).

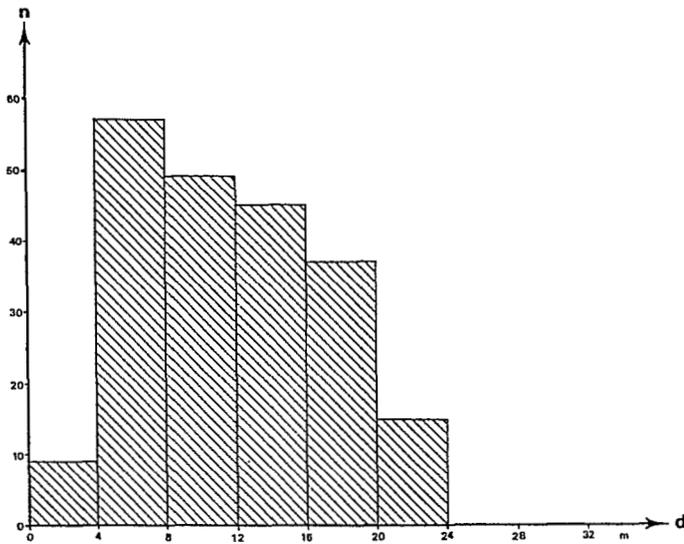


Figure 6 : Influence de la distance de la faille (d) sur le nombre de relations inter-forages (n).
Influence of fault distance (d) on the connection number (n).

Compte tenu de la forme symétrique des nuages de restitution de la fluorescéine, le temps de transfert (dt) est pris au maximum de concentration. Les vitesses de déplacement du traceur, obtenues à partir du temps de transfert et de la distance horizontale entre les forages concernés (dl) varient sensiblement d'une injection à l'autre (tableau 1).

Les valeurs relativement élevées obtenues correspondent aux circulations dans des joints ouverts importants reliant les forages des zones les plus perméables. Ces expériences de traçage ne concernent que les zones à forte perméabilité de ce karst superficiel,

comme le montrent les courbes de restitution de la fluorescéine (nuage symétrique et très peu étalé).

5. Etude des courbes de descente

Les essais d'absorption étant terminés, la vidange du forage injecté a été suivie grâce à l'enregistrement du niveau piézométrique par un limnigraphe pneumatique.

L'étude de la descente des niveaux d'eau dans les forages en fin d'injection montre une descente rapide, voire instantanée, puis une pseudo-stabilisation (fig. 9).

Des courbes analogues ont été obtenues lors de la vidange consécutive à la crue de novembre 1979 (BOTTON, 1984).

Ce phénomène peut s'expliquer par la présence d'un joint ouvert dans un milieu peu perméable. La première partie de la courbe correspond à la vidange du forage par ce joint, la seconde par la vidange à travers les fines fissures de la roche. Ces discontinuités sont probablement des joints de stratification ouverts sous l'effet de la décompression ou des ripages bancs sur bancs. Une représentation schématique de ces phénomènes est donnée par la figure 10.

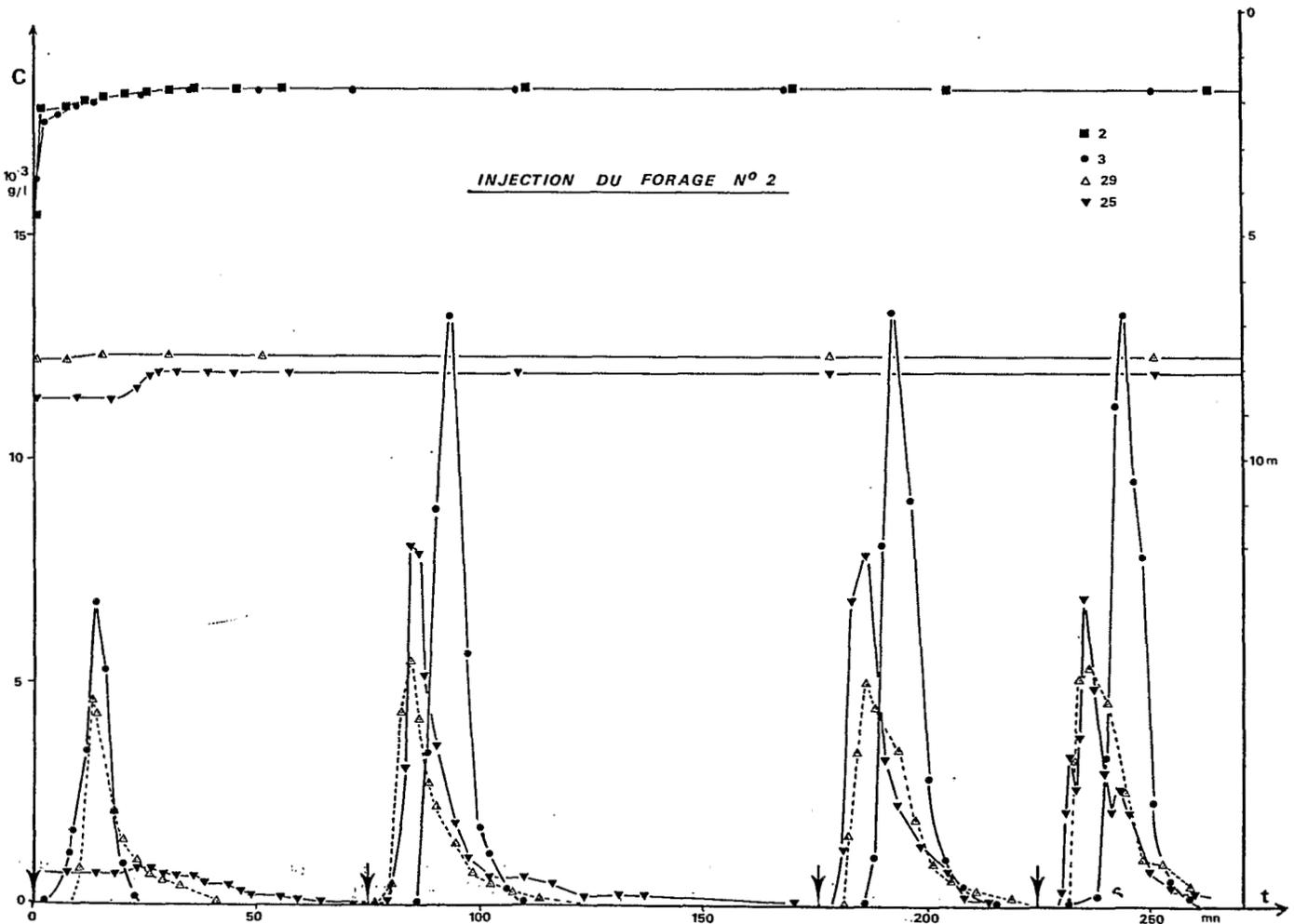
V. DISTRIBUTION DES COEFFICIENTS DE CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

A partir des caractéristiques de l'injection (débit, charge hydraulique), un coefficient de conductivité hydraulique équivalente (K) a pu être calculé pour chacun des 47 forages par la méthode de TER-LETSKATA :

$$K = f(H/D) \times Q/H^2$$

Figure 7 : Courbe de restitution de la fluorescéine et évolution des niveaux piézométriques. Les flèches indiquent les injections instantanées de fluorescéine. Les courbes du bas correspondent à la restitution du traceur (C = concentration en 10⁻³ g/l), celles du haut à l'évolution des niveaux piézométriques.

Fluorescein restitution graph and piezometric levels evolution.



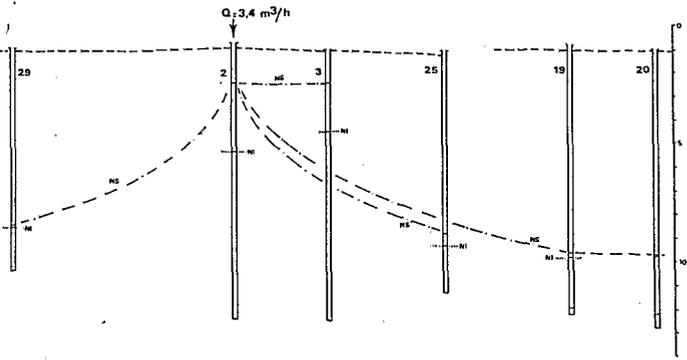


Figure 8 : Niveau piézométrique théorique lors des traçages en régime permanent : NI = niveau initial; NS = niveau stabilisé.
Theoric piezometric level during water-tracings in permanent flowing.

où K = coefficient de conductivité hydraulique

H = charge hydraulique

D = diamètre du forage

Q = débit d'injection.

Les valeurs obtenues correspondent à la perméabilité globale équivalente du forage en milieu homogène. Le tableau 2 donne la distribution de ces coefficients de conductivité hydraulique équivalent.

Si les valeurs observées sont celles généralement admises pour le karst :

10^{-7} m/s pour les zones à fines fissures,

10^{-3} m/s pour les drains,

on note cependant un pourcentage beaucoup plus important pour les valeurs élevées.

Comme pour l'ensemble de l'aquifère karstique, le karst superficiel est caractérisé par une forte hétérogénéité des «perméabilités».

La distribution de fréquence de ces coefficients de conductivité hydraulique montre que le phénomène est bien représenté par une

distribution log-normale, comme le montre le bon ajustement linéaire obtenu sur papier gaussien-logarithmique (fig. 11).

VI. CONCLUSION

Les essais d'injection d'eau sur le site expérimental de Corconne (Gard) ont permis de mieux définir l'organisation des écoulements sur ce karst superficiel.

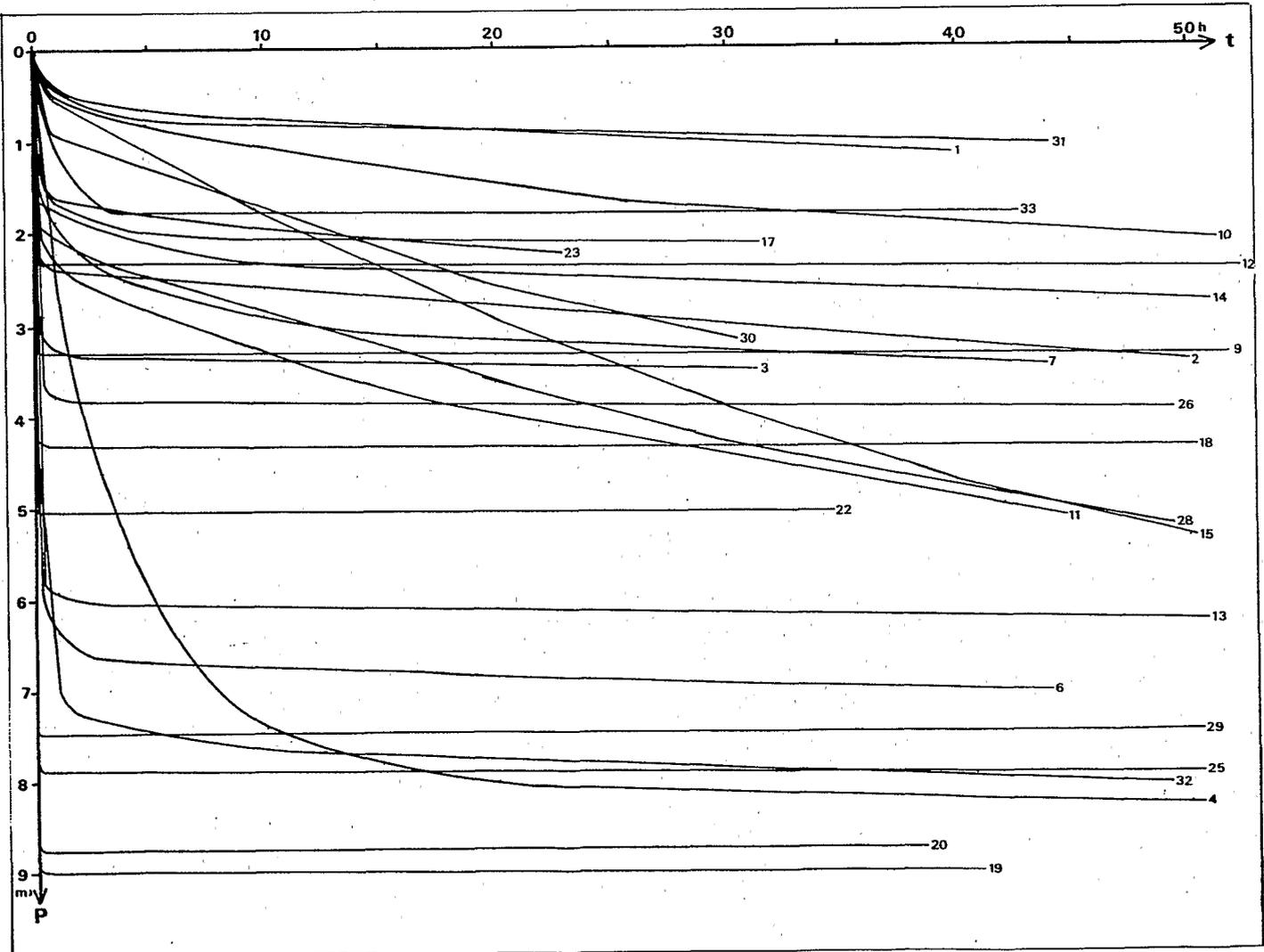
— Les essais d'absorption ont montré une forte hétérogénéité des «perméabilités», que ce soit une hétérogénéité verticale (analyse des courbes de descente) ou horizontale (calcul des coefficients de conductivité hydraulique équivalente). Les valeurs de conductivité hydraulique obtenues sur les 47 forages indiquent l'existence dans ce karst superficiel de drains très perméables ($K = 10^{-3}$ m/s) et de zones finement fissurées à faible coefficient de conductivité hydraulique ($K = 10^{-7}$ m/s).

La structure du karst superficiel semble donc identique à celle du karst en général. On note toutefois que les valeurs de conductivité hydraulique sont proportionnellement plus élevées pour le karst superficiel, ce qui correspond à l'existence d'un grand nombre de discontinuités vraisemblablement liées aux phénomènes de décompression lithostatique.

La distribution horizontale des valeurs de conductivité hydraulique obéit à une loi log-normale tout comme les nappes en milieu poreux ou fissuré.

— L'étude des relations hydrauliques entre différents forages a permis la démonstration des écoulements hypodermiques à forte composante horizontale dans la zone non saturée d'un aquifère karstique. Il s'agit là de la conséquence de l'anisotropie en conductivité du karst près de la surface. Des écoulements sub-horizontaux ont pu être relevés entre des forages distants de 20 m. Les écoulements hypodermiques cessent lorsqu'ils rencontrent une fracture ouverte sur le karst profond.

Figure 9 : Evolution des niveaux piézométriques après arrêt de l'injection.
Piezometric levels evolution after injection stopping.



ETUDE DES ECOULEMENTS HYPODERMIQUES

— Les traçages réalisés à la fluorescéine sur les zones les plus perméables ont démontré l'existence de ces écoulements horizontaux à faible profondeur dans la zone non saturée. Les vitesses de déplacement du traceur observées varient de 6 à 60 m/h.

Cette étude a donc permis de vérifier expérimentalement l'existence de écoulements hypodermiques dans la zone non saturée d'un aquifère karstique. Le grand nombre de circulations mis en évidence démontre l'importance du karst superficiel dans les modalités d'infiltration des précipitations.

TABLEAU 1 : Distribution des vitesses de déplacement
Distribution of displacement speeds

vitesse de déplacement (m/heure)	régime transitoire		régime permanent	
	nombre	%	nombre	%
0 à 9	2	13	1	7
10 à 19	3	19	6	40
20 à 29	5	31	2	13
30 à 39	1	6	2	13
40 à 49	3	19	1	7
50 à 59	1	6	2	13
60 à 69	1	6	1	7
Total	16	100	15	100

TABLEAU 2 : Distribution des coefficients de conductivité hydraulique équivalente
Distribution of hydraulic conductivity coef.

conductivité hydraulique (mètres/seconde)	nombre	%	% cumulé
$10^{-7} \leq K < 10^{-6}$	11	23.4	23.4
$10^{-6} \leq K < 10^{-5}$	12	25.5	48.9
$10^{-5} \leq K < 10^{-4}$	13	27.7	76.6
$10^{-4} \leq K < 10^{-3}$	6	12.8	89.4
$10^{-3} \leq K < 10^{-2}$	2	4.2	93.6
Pertes totales	3	6.4	100.0
Total	47	100.0	

BIBLIOGRAPHIE

- AVIAS (J.) - 1967 - Observations sur une nappe de fissures dans les gneiss cévenols à l'occasion des études de reconnaissance du site de barrage de Saint Jean du Gard. *La Houille Blanche* n° 1, p. 47-60.
- BERTRAND (J.), MATHEY (B.), MORNOD (L.) - 1973 - Inversion temporaire du gradient hydraulique dans un karst et hétérogénéité de la perméabilité. *Bulletin de la Société Neuchâteloise de Sciences Naturelles*, T. 96, p. 97-103.
- BOTTON (R.) - 1984 - Etude de certaines modalités du fonctionnement de l'aquifère karstique (zone d'infiltration et zone saturée) sur deux champs de forages nord-montpelliérains. Thèse de troisième cycle, Montpellier.
- CASSAN (M.) - 1980 - Les essais d'eau dans la reconnaissance des sols. Ed. Eyrolles, 275 p.
- DROGUE (C.) - 1969 - Contribution à l'étude quantitative des systèmes hydrologiques karstiques d'après l'exemple de quelques karsts périméditerranéens. Thèse de doctorat d'état Sciences Naturelles, Montpellier.
- DROGUE (C.) - 1980 - Essai d'identification d'un type de structure de magasins carbonatés fissurés. Application à l'interprétation de certains aspects du fonctionnement hydrogéologique. Mémoire hors série de la Société Géologique de France, N 11, p. 101-108.
- GIRONA (J.-M.) - 1978 - Introduction à l'étude de la zone non saturée d'un milieu carbonaté fissuré : forme des écoulements, thermométrie. Thèse de troisième cycle, Montpellier.
- GOUISSET (Y.) - 1981 - Le karst superficiel. Genèse hydrodynamique et caractéristiques hydrauliques. Application à un karst du Languedoc. Thèse de troisième cycle, Montpellier.
- GRILLOT (J.-C.) - 1979 - Structure des systèmes aquifères en milieu fissuré. Thèse de doctorat d'état, Sciences Naturelles, Montpellier.
- GUYOT (J.-L.) - 1983 - La zone non saturée dans l'aquifère karstique. Analyse des écoulements hypodermiques sur périmètre expérimental. Rôle

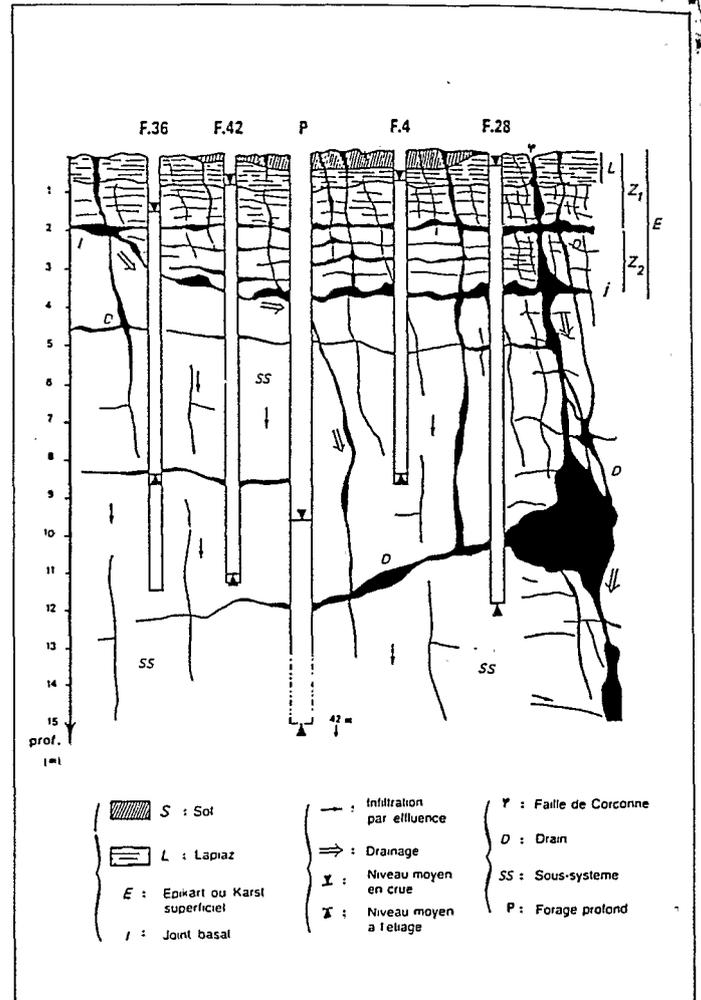


Figure 10 : Représentation schématique de la zone d'infiltration et de son fonctionnement (Corconne), d'après BOTTON R. (1984).
Schematic representation of infiltration area (Corconne), by BOTTON R. (1984).

de la zone non saturée dans la différenciation des régimes de deux sources karstiques (Monts de Pardailhan, Montagne Noire). Thèse de troisième cycle, Montpellier.

KIRALY (L.) - 1969 - Anisotropie et hétérogénéité de perméabilités dans les calcaires fissurés. *Ecloga Geologica Helv.* Vol. 62/2, p. 613-619.

KRIVIC (P.) - 1979 - Etude chimique des eaux de la zone non saturée dans un karst (périmètre expérimental de Corconne). Rapport de DEA-Montpellier.

MANGIN (A.) - 1974-1975 - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. *Annales de Spéléologie* T. 29, fasc. 3 & 4. T. 30, 1.

MARJOLET (G.) et SALADO (J.) - 1976 - Contribution à l'étude de l'aquifère karstique de la source du Lez (Hérault) : aspect hydrochimique - aspect hydrodynamique. Thèse de troisième cycle, Montpellier.

MATHEY (B.), SIMEONI (G.-P.) - 1971 - Estimation de la perméabilité en terrain calcaire par essais d'injection d'eau. Actes du Colloque d'Hydrologie en pays calcaire. *Annales Scientifiques de l'Université de Besançon*. Troisième série, fasc. 15, p. 165-175.

SIMEONI (G.-P.) - 1976 - Analyse statistique des perméabilités ponctuelles des calcaires aquifères du Jura Neuchâtelois (Suisse). Actes du deuxième Colloque d'Hydrologie en pays calcaire. *Annales Scientifiques de l'Université de Besançon*. Fasc. 25, p. 391-404.

Article reçu le 1.2.85
Accepté le 9.6.85