

Approche des transferts de pollution bactérienne dans une crue karstique par l'étude des paramètres physico-chimiques

Bacteriological pollution transport related to a flood in a karstic system according to physico-chemical parameter analysis

C. Joseph, C. Rodier, M. Soulie, F. Sinégre et R. Baylet

Volume 1, numéro 1-2, 1988

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705004ar>
DOI : <https://doi.org/10.7202/705004ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)
1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Joseph, C., Rodier, C., Soulie, M., Sinégre, F. & Baylet, R. (1988). Approche des transferts de pollution bactérienne dans une crue karstique par l'étude des paramètres physico-chimiques. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 1(1-2), 73–106. <https://doi.org/10.7202/705004ar>

Résumé de l'article

L'exploitation des systèmes aquifères karstiques est toujours effectuée sous des contraintes liées à leur forte vulnérabilité. Une étude complète d'un épisode de crue de la source du Lez a été réalisée grâce à une coopération entre les Services de Santé et l'Université. Cette étude comporte une observation des paramètres physico-chimiques et bactériologiques sur une période de 15 jours, correspondant à une réponse hydrodynamique impulsionnelle sur la totalité du bassin. Les pas de temps d'échantillonnage varient de 4 à 24 heures.

L'interprétation des résultats physico-chimiques met en évidence une disjonction nette entre les variations piézométriques et le passage de différents volumes d'eau. L'écoulement des eaux plus chaudes (16,5 °C) observé lors de l'étiage, eaux d'origine profonde plus chargées chimiquement se poursuit jusque vers le milieu de la décrue pour faire place à l'arrivée d'eaux plus froides correspondant à des infiltrations rapides puis retardées. Les eaux les plus chaudes sont caractérisées par des variations des teneurs en magnésium, les teneurs en calcium restant à peu près constantes. Inversement; les eaux froides de l'infiltration retardée ont de faibles variations des teneurs en magnésium et sont tracées par une forte augmentation des valeurs en calcium.

Le risque sanitaire maximal est lié au début de l'arrivée des eaux froides. Les eaux d'étiage et les eaux profondes sont légèrement contaminées. Les eaux d'infiltration retardée sont peu contaminées. En dehors des zones de perte du réseau hydrographique et des axes d'infiltration rapide, la vulnérabilité de l'aquifère est faible à l'échelle du bassin.

Approche des transferts de pollution bactérienne dans une crue karstique par l'étude des paramètres physico-chimiques

Bacteriological pollution transport related to a flood in a karstic system according to physico-chemical parameter analysis

C. JOSEPH (1), C. RODIER (1), M. SOULIE (1) (*), F. SINEGRE (2),
R. BAYLET (2), P. DELTOUR (3)

RÉSUMÉ

L'exploitation des systèmes aquifères karstiques est toujours effectuée sous des contraintes liées à leur forte vulnérabilité. Une étude complète d'un épisode de crue de la source du Lez a été réalisée grâce à une coopération entre les Services de Santé et l'Université. Cette étude comporte une observation des paramètres physico-chimiques et bactériologiques sur une période de 15 jours, correspondant à une réponse hydrodynamique impulsionnelle sur la totalité du bassin. Les pas de temps d'échantillonnage varient de 4 à 24 heures.

L'interprétation des résultats physico-chimiques met en évidence une disjonction nette entre les variations piézométriques et le passage de différents volumes d'eau. L'écoulement des eaux plus chaudes (16,5 °C) observé lors de l'étiage, eaux d'origine profonde plus chargées chimiquement se poursuit jusque vers le milieu de la décrue pour faire place à l'arrivée d'eaux plus froides correspondant à des infiltrations rapides puis retardées. Les eaux les plus chaudes sont caractérisées par des variations des teneurs en magnésium, les teneurs en calcium restant à peu près constantes. Inversement, les eaux froides

(1) Laboratoire d'Hydrologie Mathématique - Université des Sciences et Techniques du Languedoc - Place E. Bataillon - 34060 Montpellier Cédex, France.

(2) Institut Bouisson-Bertrand - Laboratoire Régional de Contrôle des Eaux - Rue de la Croix Verte - 34000 Montpellier, France.

(3) Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales (D.D.A.S.S.) - 85 avenue d'Assas - 34000 Montpellier, France.

de l'infiltration retardée ont de faibles variations des teneurs en magnésium et sont tracées par une forte augmentation des valeurs en calcium.

Le risque sanitaire maximal est lié au début de l'arrivée des eaux froides. Les eaux d'étiage et les eaux profondes sont légèrement contaminées. Les eaux d'infiltration retardée sont peu contaminées. En dehors des zones de perte du réseau hydrographique et des axes d'infiltration rapide, la vulnérabilité de l'aquifère est faible à l'échelle du bassin.

Mots-clés : karst, crue, transfert, bactériologie, pollution.

SUMMARY

The exploitation of karstic aquifer systems for the supply of potable water raises the problem of the evaluation of sanitary risks, in view of their great vulnerability. To supply a great urban center, a yield as high as several cubic metres per hour is required, and this magnitude corresponds to that of an underground basin of several km², so that it is difficult to monitor and protect.

Analytical observations from sanitary control platforms on potable water catchments have shown the existence of periods of high bacteriological pollution synchronizing systematically with periods of a rise of water.

These bacteriological pollution transfers depend on the general conditions in which the aquifer functions. It seemed interesting, for the prevention of contamination, to examine all these hydrogeologic functions observed during a water rise, using bacteriological parameters.

This study was based on observations made during an overall flood period following a prolonged drought throughout the whole basin supplying the city of Montpellier (France). The aim was to carry out a correlation test on the functioning of a karstic aquifer, with regard to :

- the variation of the main physico-chemical parameters,
- the principal pathogenic germs,
- the commonly observed indicators of faecal contamination.

This operation, undertaken in close collaboration with the sanitation board and the university authorities, required considerable investment in human, material and financial resources.

Montpellier, a city with a population of 250 000 inhabitants, is supplied with potable water from the source of the River Lez. The water catchment is situated upstream of a major resurgence (12 m³/s during the water rise), tapping water from a principal drainage channel at a depth of 40 metres.

The area of the basin feeding the spring was evaluated to be 150 km² by adjustment to the 450 km² of Jurassic and Cretaceous outcropping karstified limestone, north of Montpellier. Even if the limits of the basin are not precisely defined, some of its parameters are well known. The aquifer consists of different structural zones, almost like independent

sub-systems, having in common a rapid drainage network. The response observed at the exurgence is compared globally with the pluviometric signs, as well as with the effects produced in each structural zone, the transfer time, chemistry, temperature, recession, etc..

The whole aquifer must be considered under pressure and it is this state of pressure which is probably responsible for the directional flow of the water from the rock matrix and of that circulating in the major karstification areas. The aquifer may be either in a state of injection or drainage and this notion is supported by the chemical and thermal fluctuations at the exurgence point.

A one-year experimental programme, based on our knowledge of this aquifer, has been set up in collaboration with forecasters at the National Meteorological Office. All have been on the alert and ready to intervene, equipped with all the necessary staff and apparatus to ensure reliable sampling and analyses. The following procedures were performed :

- sampling every 4 hours during the first 48 hours ;
- sampling every 12 hours during the following 48 hours.

Then until the end of the study, sampling took place every 24 hours with :

- 1 bacteriological sample in sterile condition,
- 1 sample for physico-chemical analyses in the laboratory,
- temperature measurements with a 1/10° mercury thermometer,
- resistivity measurements,
- pH measurements with two standards,
- a limigraphic reading.

This period of water rise, hydrologically homogeneous throughout the whole basin in the form of a single impulsive response lasting about 10 days, was characterised by the circulation of two types of water masses : from the rock matrix and resulting from rapid infiltration. The mixture of these two bodies, each with a distinct chemical character, is a function of the state of pressure in the aquifer. At the end of the rise, a third type of water intervenes, that of retarded infiltration.

The best criteria for identifying these volumes of water are thermal ones. The most variable elements are magnesium and calcium. Deep waters with a temperature of 16 °5 are characterised by a variation in magnesium, and cold water, by a variation in calcium. The highest value of calcium is related to the passage of water bodies attributed to the influence of retarded infiltration.

The geological observations and the processing of results by factorial analyses show a clear distinction between the chemical rise and the piezometric rise. The hydraulic rise point is constituted by water with the same chemical characteristics as that of the lowest water level. The most important dilution due to rapid transfer in the basin is observed in the middle of the water fall. These synchronized with the highest bacteriological pollution rate for most of the elements.

This study has provided a global appreciation of the sanitary risks and shows how pollution mechanisms function. Risks are permanent, even during the passage of the deepest water with

a long residence time. This phenomenon raises the question of the duration and mode of survival of non encystable bacteria indicators in the karst system. The survival time appeared to be about a year or more.

There is always a covariation between the physico-chemical elements and bacteriological pollution where the aquifer is under high pressure and when the water rises or has reached its maximum level, or when the water starts to fall. It is when the level of the water starts to drop that the main peaks of bacteriological pollution are observed. From this moment onwards, the whole basin functions like a drained system and the absence of covariation in the physico-chemical and bacteriological parameters are signs that the flow has become heterogeneous.

For sanitation purposes it may be sufficient to monitor temperature and other chemical elements, in order to determine when an additional treatment of the water is required to maintain its potability. An appropriate apparatus is being devised to this end.

Key-words : karst aquifer, water supply, sanitation, bacteriology, pollution.

Des périodes de fortes pollutions bactériennes sont souvent observées lors des crues des systèmes karstiques. Il en résulte un risque sanitaire élevé lors de leur exploitation. Une part de ces pollutions doit dépendre des modalités de transfert des volumes d'eau. Il devrait être possible, à partir d'une étude précise de la répartition des différents paramètres physico-chimiques et bactériologiques observables durant une crue, de disposer d'un moyen de prévision.

L'investigation diachronique d'un épisode de crue de la source du Lez (Hérault, France) survenant après un étiage prolongé a été rendue possible par la collaboration d'un certain nombre d'organismes publics ou privés : Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales de l'Hérault, Ministère de la Santé, Météorologie Nationale, Ville de Montpellier, Institut Bouisson-Bertrand, Compagnie Générale des Eaux, Université des Sciences et Techniques du Languedoc*.

1 - CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE

Le choix de la période d'observation a été établi à partir des données antérieurement connues (DROGUE 1964, 1969 ; FABRIS, 1970 ; DUBOIS, 1972 ; MARJOLET, SALADO, 1975, 1976) sur le bassin versant karstique de la Source du Lez, et des mesures faites sur le réseau de surveillance d'exploitation de la source.

* Le financement de l'étude a été assuré par le Ministère de la Santé et l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc .

La prévision nécessaire à la mise en place du dispositif d'observation et de mesure d'un épisode de crue provoqué par une pluie généralisée sur tout le bassin (40 stations d'observation pluviométriques) pour une intensité supérieure à 40 mm/jour a été assurée par la Météorologie Nationale.

Les prélèvements et les mesures sur la source ont été faits dans le déversoir de mise en charge de l'aqueduc, avec un pas de temps de 4 h durant les premières 48 h, de 12 h pour les 48 h suivantes, puis enfin de 24 h jusqu'à la fin de la période d'observation, selon le protocole suivant :

- 1 prélèvement bactériologique en conditions stériles,
- 1 prélèvement pour analyse physico-chimique en laboratoire,
- mesure des températures de l'eau au thermomètre à mercure au 1/10 de °C (TEMP),
- mesure de la conductivité (COND),
- mesure du pH avec référence à deux étalons (pHTE).

Le réseau de mesures hydrologiques comprenait :

- . 4 stations pluviographiques,
- . 7 enregistrements limnigraphiques : 5 sur le bassin, 2 (F13 et F6) à l'amont immédiat (200 m) de la source sur des piézomètres, en relation avec le conduit karstique aboutissant à la source.

Les paramètres analysés au laboratoire sont reportés tableau 1.

Une analyse d'un échantillon moyen d'eau de pluie prélevé sur le pluviomètre de St-Vincent-de-Barbeyrargues (figure 1) a été réalisée.

La numérotation de l'échantillon a été établie à l'aide d'un code à 4 chiffres : les deux premiers pour le jour du mois et les deux derniers pour l'heure de prélèvement. Exemple : 0721 : le 07/11/1982 à 21 heures.

2 - CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

La source du Lez, source vauclusienne pérenne, 7ème de France par son débit (module moyen annuel : 2,3 m³/s) jaillit à une quinzaine de kilomètres au nord de Montpellier (figure 1).

La ville de Montpellier capte cette résurgence pour son alimentation en eau potable, à raison de 800 à 1 200 l/s. Jusqu'en 1982, le captage s'effectuait par des pompes immergées par - 11 m dans la vasque de débordement de la source. La demande croissante de la ville et les faibles débits d'étiage ont nécessité la conception d'un captage pour un rabattement supérieur. Depuis 1982, le prélèvement s'effectue directement dans la galerie karstique à 90 m de profondeur, donnant 2 000 l/s avec un rabattement maximum de - 30 m sous la cote de débordement. Lors de la crue de Novembre 1982, le prélèvement hebdomadaire moyen par la ville a été de 922 l/s.

La source du Lez est située le long d'une faille N20° séparant les terrains du Berriasien calcaire et du Valanginien plus marneux. Cette faille appartient à un système d'accidents parallèles dont le plus important est celui de Corconne à l'Ouest, mettant en contact les for-

Tableau 1.-Méthodes analytiques.

Table 1.- Analytic methods.

METHODE UTILISEE OU APPAREILLAGE		PRECISION
Calcium (Ca) Magnésium (Mg)	Complexométrie (EDTA)	1 mg/l
Sodium (Na) Potassium (K)	Spectrophotométrie d'absorption atomique	0,05 mg/l
Titre alcalimétrique complet (TAC - HCO ₃ ⁻)	NF T90-036	3 mg/l (= 0,3 °F)
Chlorures (Cl ⁻)	NF T90-014	2 mg/l
Sulfates (SO ₄ ⁼)	Néphelométrie	5 mg/l
Conductivité (COND)	Conductimètre Hoelzle - Chelius	0,2 µS.cm ⁻¹
pH	pHmètre Schott-Grate CF 818	0,1
Température (TEMP)	Thermomètre à mercure	0,1 °C
Turbidité (TURB)	Méthode des gouttes mastic	5 gouttes
Matière organique (MO)	NF T90-018	0,05 mg/l
Matières totales en suspension (MTS)	NF T90-105	0,5 mg/l
Microflore totale aérobie mésophile MTA)	Filtration sur membrane Milieu de culture : gélose T.S.A. Incubation 30 °C pendant 48 h	Se référer à l'annexe de la norme NF T90-414 : limites de confiance à 95 % attachées au nombre de colonies dénombrées par boîte
Coliformes totaux (CT)	Filtration sur membrane filtrantes Circulaire du 21 janvier 1960 (J.O. 15 mars 1960)	
Coliformes fécaux (CF)		
Streptocoques fécaux (SF)		
Pseudomonas aeruginosa (PA)	Filtration sur membrane Milieu sélectif au ceftrimide Incubation 37 °C pendant 48 h	

mations jurassiques avec celle du Tertiaire (Eocène-Oligocène) reposant sur le Crétacé. L'ensemble de ces failles délimitent de petits bassins de même allongement à remplissage Eocène et Oligocène. Ces formations tertiaires constituent une barrière peu perméable sur l'aval du bassin ; elles sont à l'origine de l'exsurgence de la source en position de karst barré.

Le bassin d'alimentation de la source estimé par calage de bilan, à environ 170 km² (DROGUE, 1969 et GUILBOT, 1975), se développe pour l'essentiel dans les formations du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur (Berriasien). Cependant, sa délimitation précise en surface n'est pas encore effectuée, en raison de la complexité des échanges entre les différents compartiments géologiques sur une surface d'environ

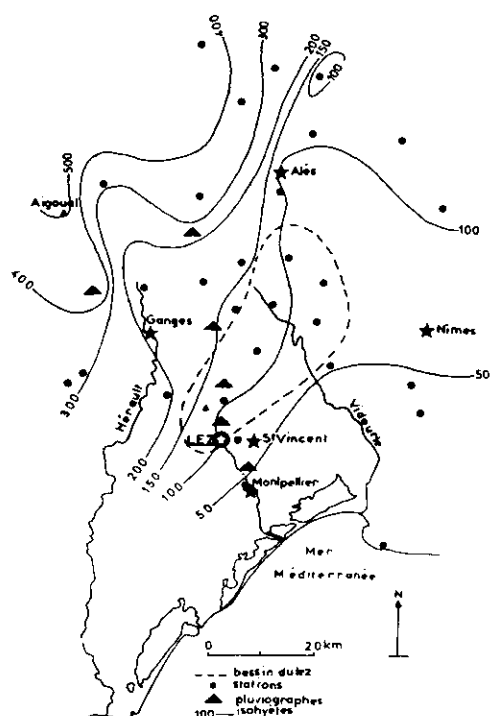


Figure 1.- Carte des hauteurs de précipitations cumulées (7-8/11/82).

Figure 1.- Map of rainfall cumulative depthes (7-8/11/82).

400 km². Seuls les axes de drainage préférentiels aboutissant à la source sont actuellement mis en évidence par piézométrie, observation thermique et coloration.

Les galeries aboutissant à la source sont de grande taille (section supérieure à 10 m²), des débits de pointes de crue de 15 à 20 m³/s sont facilement transités. Elles correspondent à un réseau karstique de premier ordre initialement formé en milieu aérien se trouvant actuellement noyé. Les formations calcaires de la région ont été affectées durant le Plioquaternaire par une karstification intense pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres d'épaisseur (DUBOIS, 1964, VAIL *et al.*, 1979).

Différents éléments (thermique, hydrologique, bactériologique et chimique) de sources à l'aval du Lez, semblent montrer que la source du Lez n'est pas l'exutoire le plus en aval du bassin dont elle dépend (Thèse F. TOUET, en cours).

3 - ÉTUDE HYDROLOGIQUE DE LA CRUE

■ La pluie

La perturbation ayant engendré les pluies à l'origine de la crue, est de type méditerranéen. La carte des hauteurs de précipitations cumulées (figure 1) présente un fort gradient positif vers le Nord en fonction de la distance à la mer et de l'altitude.

Les précipitations se sont réparties en deux séries d'impulsions (figure 2) les 7 et 8 novembre 1982 avec une intensité croissante du Sud-Est au Nord-Ouest. L'analyse des hyétogrammes dans les secteurs correspondant au bassin d'alimentation de la source du Lez donne des intensités maximales supérieures à 10 mm/h, avec une pluie totale tombée dépassant 100 mm.

Les teneurs en Na⁺ (22,9 mg/l) et Cl⁻ (46,1 mg/l) obtenues pour la totalité de la pluie à St-Vincent-de-Barbeyrargues sont égales à 8 fois

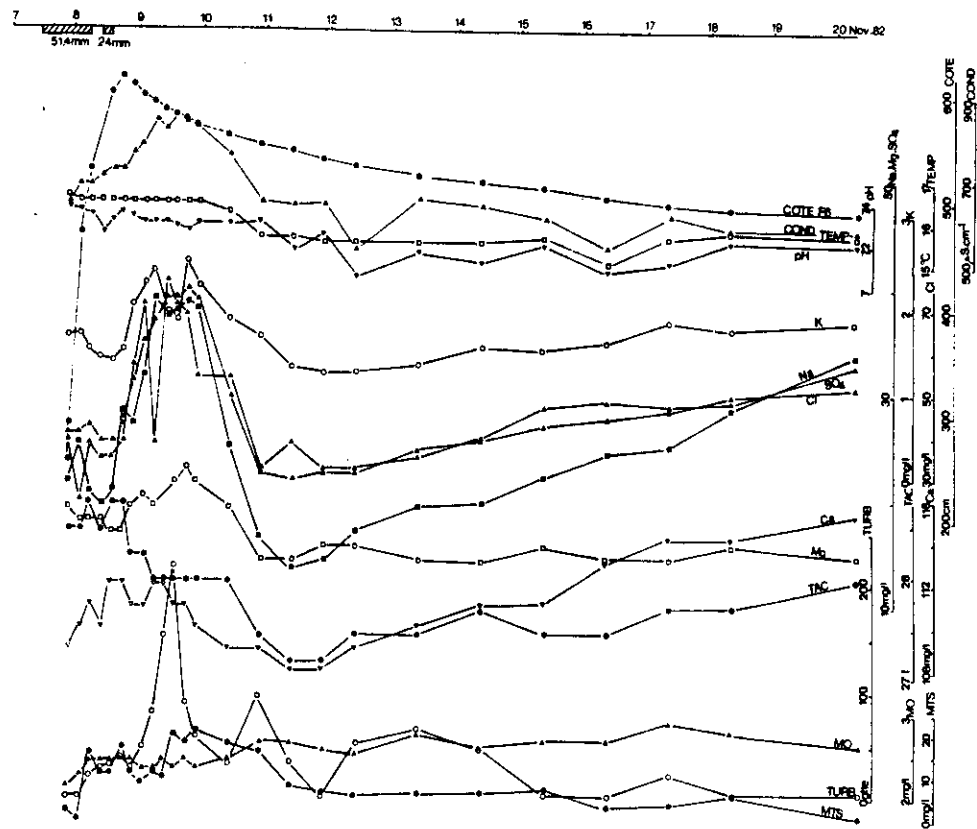


Figure 2.- Variations des paramètres physico-chimiques en fonction du temps.

Figure 2.- Physical and chemical parameter vs. time.

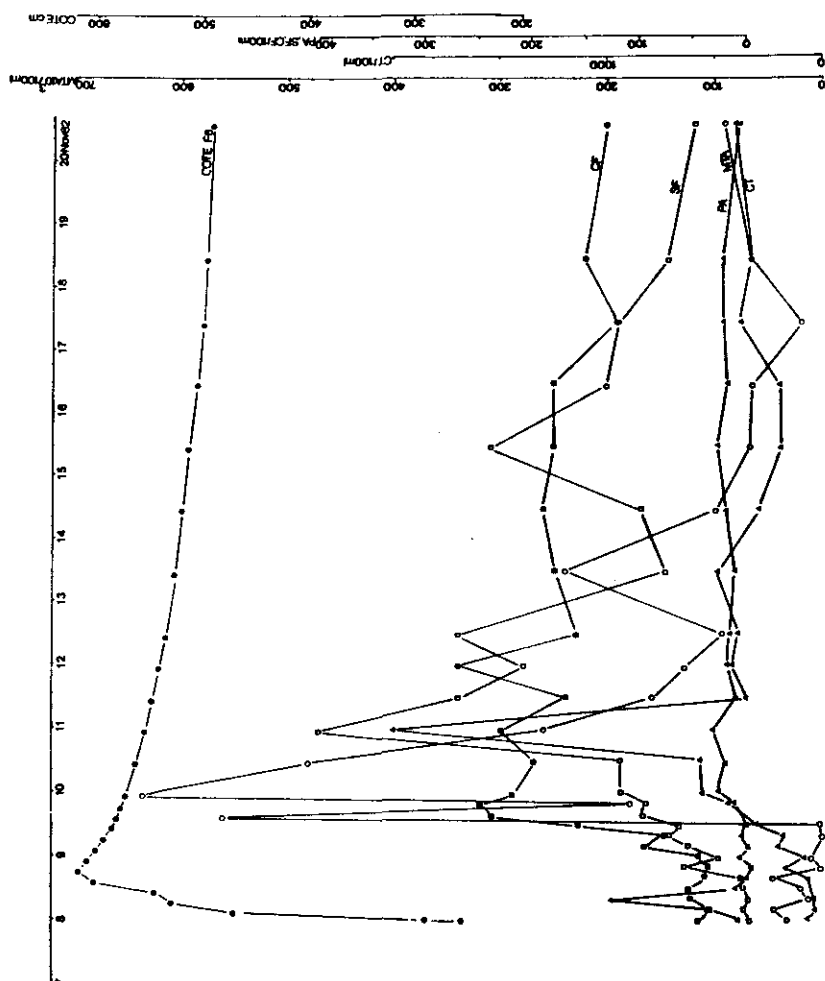


Figure 3.- Variations des paramètres bactériologiques en fonction du temps.

Figure 3.- Bacteriological parameters vs. time.

la moyenne pondérée annuelle (MBA M., 1971 ; UIL H., 1978). C'est une conséquence du mélange d'embruns marins à la pluie en raison de la violente tempête à l'origine de l'épisode pluvieux.

■ La crue

La crue a été observée à partir de deux forages (F13 et F6) et par le relevé de la cote de l'eau dans la vasque de la source. En raison de l'assèchement de la source par les pompages d'exploitation, durant les premières observations, les cotes ont été mesurées sur le forage F6, 200 m à l'amont de la source, le niveau du 6.11.82 donnant l'origine.

La crue à la source reflète la succession des deux épisodes pluvieux (figure 2). Le temps de réponse au premier épisode est de 7 heures, et prend en compte la reconstitution de réserve facilement utilisable du sol, après une longue période de sécheresse, le débit de la source est alors aux environs de $4 \text{ m}^3/\text{s}$. Au deuxième épisode pluvieux, alors que la cote piézométrique est déjà remontée de 3 m, le temps de réponse se réduit à 1 h 30. Les temps de transfert dans la zone non saturée et l'aquifère partiellement rechargé sont beaucoup plus rapides et la pointe de crue atteint alors un débit de $5,4 \text{ m}^3/\text{s}$.

4 - ÉVOLUTION GÉNÉRALE DES PARAMÈTRES ÉTUDIÉS DURANT L'ÉPISODE DE CRUE

L'examen de la variation des paramètres en fonction du temps (figure 2 et 3) rend compte de la diversité des tendances dans l'évolution des variables observées.

a. Evolution des paramètres physico-chimiques mesurés

Pendant la montée du niveau piézométrique (une quinzaine d'heures) la température reste relativement constante et l'on observe une petite baisse de la teneur de la plupart des éléments chimiques en particulier K^+ , Cl^- , Na^+ , Mg^{++} et SO_4^{--} . Ces variations peuvent s'expliquer par l'arrivée en faible quantité d'une eau peu minéralisée ayant pour origine une infiltration proche de l'exutoire. Un certain nombre de pertes sont connues sur le bassin versant superficiel à l'amont immédiat de la source. Par ailleurs Ca^{++} et TAC présentent une faible augmentation pouvant avoir comme origine une percolation au travers du sol. La valeur en Cl^- , 50 mg/l, proche de celle de la pluie, mais aussi des teneurs habituellement observées en étiage ne permet pas d'étayer cette hypothèse.

Après ce premier épisode très court, il y a pendant 48 heures une augmentation générale des concentrations, toujours sans variation sensible de la température. La pointe de crue coïncide avec le début de cette période, et c'est douze heures après qu'un certain nombre d'éléments atteignent leur maximum de concentration : il s'agit de Na^+ , Mg^{++} , SO_4^{--} , K^+ , Cl^- . Les travaux antérieurs (MARJOLET, SALADO, 1976 ; BAKALOWICZ, 1979) sur une crue de la source du Lez admettent que cette réponse chimique a pour origine une concentration par évapotranspiration lors de séjours prolongés dans la zone saturée. Les eaux ainsi marquées

seraient ensuite chassées en avant par les eaux d'infiltration rapide : c'est l'infiltration différée.

Le volume écoulé durant cette période correspond à une lame d'eau évaluée à 3 cm sur tout le bassin versant. La mobilisation de cette lame d'eau sur une surface de 170 km² devrait se faire à partir de la zone non saturée avec des temps de transfert très courts correspondant à un effet piston unique pour toute la superficie du bassin versant. Cette hypothèse valable et confirmée pour des petits bassins versants est plus difficilement justifiable sur des bassins versants largement supérieurs à une centaine de km².

L'existence de teneurs en Cl⁻ apparemment anormales à la source du Lez a fait l'objet de nombreux travaux. LEGRAND (1976) après une étude de la répartition spatiale et temporelle de Cl⁻ au cours d'averse donne pour la pluie à 20 km au nord de Montpellier, une valeur moyenne annuelle de 10 mg/l, avec une valeur maximale de 92 mg/l. A partir de ces données en appliquant la méthode du bilan des chlorures donnée par SCHOELLER (1962) il trouve pour l'année 1970 une valeur de pluie efficace égale à 48 %. Cette valeur forte lui fait contrôler par lixiviation, les possibilités pour Cl⁻ d'un échange roche-eau. Les résultats obtenus sur des calcaires jurassiques donnent après 30 jours une teneur d'équilibre de 26 mg/l. Une expérience tentée avec des faciès plus marneux du Crétacé ou du Trias aurait certainement conduit à des valeurs plus fortes. MBA (1971) confirme également ces valeurs. UIL (1978), pour l'année 1975-76, entreprend un bilan détaillé des Cl⁻ dans l'aquifère du Lez, et à partir de la constatation de l'existence d'un déficit en chlorures conclut à un apport de 21,3 mg/l par échange avec la roche. Pour l'augmentation des teneurs spécifiques aux crues, l'auteur en reporte l'origine au sous système nord du bassin versant. C'est dans cette zone que des forages pétroliers ont reconnu l'existence de Trias salé (Communication orale - Sté TOTAL). L'hypothèse d'une origine roche pour les Cl⁻ en période de crue ne peut être considérée comme convenablement étayée à partir de ces observations.

Deux paramètres chimiques ne deviennent pas maximaux : le TAC en baisse depuis le début de la crue se stabilise et le Ca²⁺ décroît après avoir subi une légère augmentation. Leur évolution sera discutée avec les variations de l'équilibre calco-carbonique.

Les observations thermiques apportent des indications complémentaires. La crue étudiée a lieu en novembre 1982. Selon les secteurs du bassin, la température extérieure est comprise entre 12 °C et 15 °C. Les eaux à l'infiltration à cette même époque ont des températures entre 12 °C et 14 °C (UIL, 1978), l'aquifère se trouve à la température du régime non influencé de fin d'étiage à 16 °C. Les conditions sont donc favorables à un traçage thermique froid des circulations rapides tel que ceux que l'on peut observer sur des bassins karstiques montagneux (BAKALOWICZ, 1979). Or, durant cette partie de la crue, la température de la source reste stabilisée à 16,5 °C au 1/10 de degré près. Cette observation va dans le sens d'une origine roche pour les augmentations de teneurs constatées, avec mise en mouvement d'eau non mobilisable sans forte mise en charge de l'aquifère.

Au-delà de ce temps (soit 3 jours 1/2 après le début de la crue) tous les paramètres chimiques ainsi que la température subissent une forte diminution, la chute de température enregistrée de 16,5 °C à 15,5 °C marque la participation des eaux d'infiltration rapide aux volumes écoulés. La décrue se caractérise par une augmentation régulière des diff-

rents éléments. Cependant pour Ca^{++} , Na^+ , Cl^- et faiblement K^+ , cette augmentation est plus rapide et aboutit (8 jours après le début de la crue) à des teneurs supérieures à celles de l'étiage.

Parmi les paramètres physiques, la turbidité montre deux maximums : le premier apparaissant au début de la réponse chimique, le deuxième arrivant 8 heures après. Les matières totales en suspension ont un maximum très étalé, s'étendant sur une période recouvrant la crue piézométrique et la réponse chimique. En fin d'observation, les matières totales en suspension diminuent. La matière organique augmente légèrement en début de crue et conserve des valeurs élevées jusqu'à la fin.

L'étalement des variations et la présence de valeurs plus fortes liées à la crue piézométrique et à la réponse chimique, font penser à deux origines possibles pour les transits particuliers :

- remise en suspension par apparition de régime turbulent aux grandes vitesses de circulation d'un stock déposé dans les conduits karstiques ;
- mise en suspension lors de la percolation au travers des sols et maintien en suspension tant que la vitesse est suffisante.

b. Evolution du système calcocarbonique (figure 4)

L'étude des variations des paramètres indicateurs de l'état du système $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-carbonate}$ donne aussi des informations sur le fonctionnement de l'aquifère karstique. Les paramètres utilisés sont la pression partielle équilibrante de CO_2 ($p\text{CO}_2$) et un indice de saturation (ΔpH) écart entre le pH réel et le pH d'équilibre. La $p\text{CO}_2$ équilibrante correspond à la $p\text{CO}_2$ fictive d'une atmosphère en contact avec l'eau, tous les équilibres étant supposés réalisés (ROQUES H., 1972 ; BAKALOWICZ M., 1979, 1980). Les valeurs de $p\text{CO}_2$ et ΔpH ont été calculées à partir des données chimiques obtenues sur chaque prélèvement, et portées sur la figure 4.

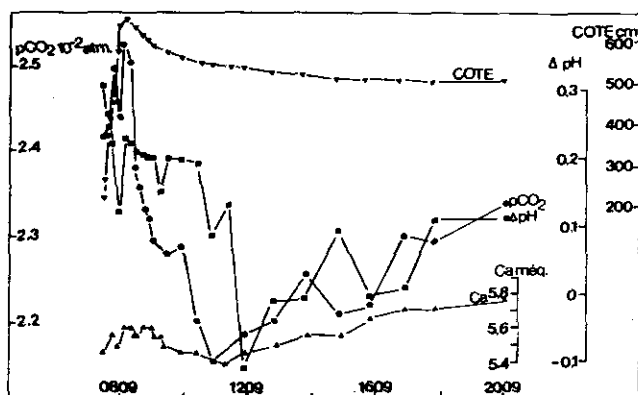


Figure 4.- Evolution de $p\text{CO}_2$, ΔpH , Ca et Cote en fonction du temps.

Figure 4.- Evolution de $p\text{CO}_2$, ΔpH , Ca and Cote vs time.

Dans un premier temps, les eaux gardent leurs caractéristiques d'étiage avec les $p\text{CO}_2$ les plus élevées ; $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Atm} > p\text{CO}_2 > 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ Atm}$, avec un ΔpH variant autour de 0,2. Ces eaux bien sursaturées correspondent à des volumes dont le temps de séjour dans l'aquifère a été assez long pour donner lieu à un départ de CO_2 sans qu'il y ait rééquilibrage avec la phase minérale du réservoir, la cinétique de mise à l'équilibre du CO_2 étant une réaction beaucoup plus rapide.

Dans un deuxième temps, dès le début de la réponse chimique de l'aquifère, et durant toute la durée de celle-ci jusqu'à la réponse thermique il y a baisse de $p\text{CO}_2$ équilibrante jusqu'à $2,2 \cdot 10^{-2} \text{ Atm}$, le ΔpH se maintenant vers 0,2. Pendant toute cette période il y a baisse du TAC et de Ca^{++} . Si l'on retient l'hypothèse donnée par l'interprétation de la réponse thermique de l'aquifère, il pourrait s'agir de volumes d'eau pour lesquels un long temps de séjour dans l'aquifère aurait rendu possible à la fois un départ de CO_2 , puis par déplacement des équilibres avec diminution de la minéralisation et précipitation de calcite, un rééquilibrage avec les formations calcaires encaissantes.

Au moment de la réponse thermique froide, corrélativement à la baisse de toutes les teneurs, les $p\text{CO}_2$ sont à leur plus faible valeur. Le ΔpH devenu négatif indique une sous-saturation des eaux venant de l'émergence. Cette évolution de la chimie signe avec certitude l'arrivée d'eau d'infiltration rapide. Leur temps de séjour dans l'aquifère a été trop court pour donner lieu à l'acquisition de la charge chimique correspondant à l'équilibre avec la $p\text{CO}_2$ de la phase gazeuse avec laquelle elles ont été en contact.

A partir du 1209 la lente montée des teneurs pour Cl^- , Na^+ , Ca^+ , SO_4^{--} , jusqu'à des valeurs supérieures à celles de l'étiage, est accompagnée par une augmentation des $p\text{CO}_2$ et le retour à des valeurs de ΔpH positives. Il s'agit d'eau se trouvant au contact d'une phase gazeuse à $p\text{CO}_2$ de plus en plus forte, et dont les temps de séjour sont assez longs pour permettre l'acquisition d'une certaine minéralisation. Ces eaux peuvent être identifiées à celles de l'infiltration retardée par percolation au travers de la zone non saturée des sols et de l'épikarst. A l'arrêt des observations, en raison de temps de transfert plus long les eaux sont de nouveau sursaturées.

c. Evolution des paramètres bactériologiques

Les paramètres bactériologiques ont une variabilité beaucoup plus grande de leur répartition.

La microflore totale aérobie mésophile présente un maximum en fin de crue chimique et montre également un pic isolé le 13 à 9 heures.

Les coliformes fécaux ont un maximum très étalé dans le temps dont le début est associé à la réponse chimique ; cependant, ils restent présents à des taux élevés jusqu'à la fin des observations. Les streptocoques fécaux et les coliformes totaux se manifestent lors de l'arrivée des eaux d'infiltration rapide, mais les coliformes totaux présentent un pic plus localisé dans le temps (autour du 1021).

d. Conclusions

L'évolution des paramètres chimiques mesurés et calculés révèle le passage durant l'épisode de crue de quatre volumes d'eau repérables

par rapport à la réponse thermique froide de l'aquifère. Les eaux à 16,5 °C correspondent à des eaux de type étiage puis à des eaux d'une réponse chimique interprétée par des temps de séjour plus longs dans l'aquifère. Les eaux à 15,5 °C venant ensuite sont les eaux de l'infiltration rapide puis de l'infiltration retardée. Les paramètres physiques et bactériologiques ne s'intègrent pas directement dans ce classement.

5 - ÉTUDE DES CORRÉLATIONS DES ÉLÉMENTS ENTRE EUX

a. Éléments chimiques

Pour un certain nombre de paramètres : Na^+ , Cl^- , K^+ , Mg^{++} et la conductivité, on remarque une covariation globale durant tout l'épisode de crue (figure 2). Ce comportement est induit par la forte variation des teneurs durant la crue, entre d'une part les eaux d'étiage et de la réponse chimique, et d'autre part les eaux d'infiltration rapide puis retardée.

Sur la représentation du Ca^{++} en fonction du Mg^{++} (figure 5) les échantillons se divisent en deux groupes bien distincts. Depuis l'échantillon caractéristique des eaux de l'étiage 0721 jusqu'à l'échantillon 1009, le magnésium varie beaucoup, le calcium peu ; c'est un domaine pour lequel les températures des eaux restent élevées et voisines de 16,5 °C. Au-delà de l'échantillon 1009, c'est l'inverse : pour les températures inférieures à 15,6 °C il n'y a pratiquement plus de variations du magnésium, le calcium augmente jusqu'à la fin de l'échantillonnage.

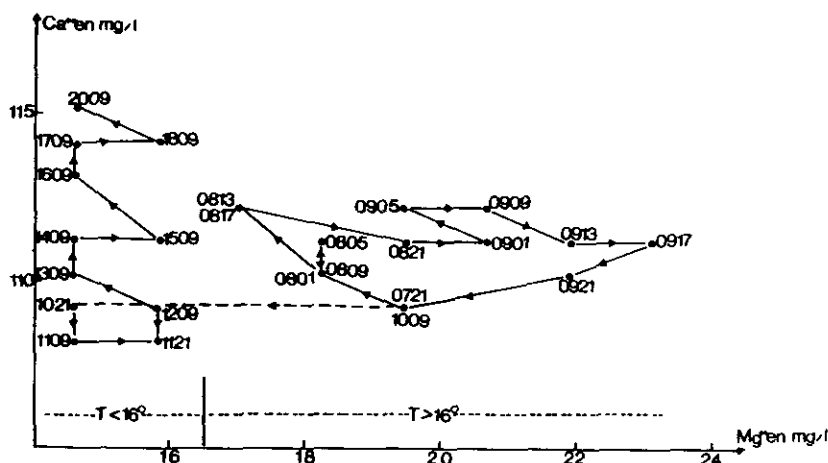


Figure 5.- Relations Ca^{++} - Mg^{++} .

Figure 5.- Relationships between Ca^{++} - Mg^{++} .

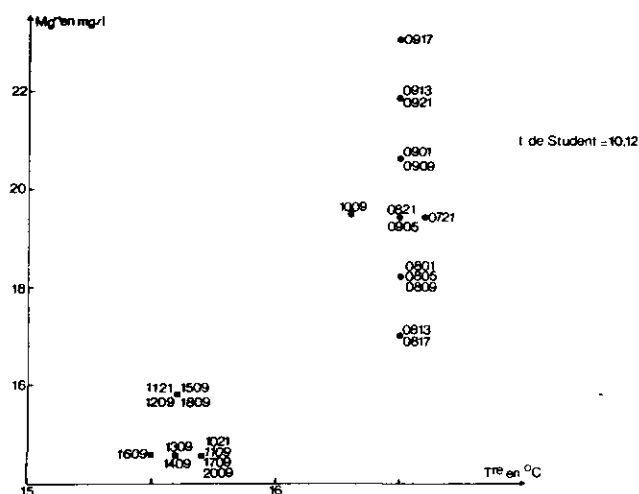

 Figure 6.- Relations Mg^{++} - température.

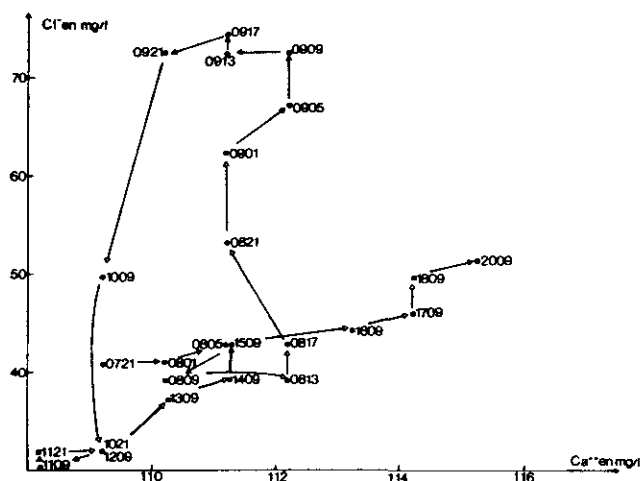
 Figure 6.- Relationships between Mg^{++} - temperature.

 Figure 7.- Relations Ca^{++} - Cl^- .

 Figure 7.- Relationships between Ca^{++} - Cl^- .

En fonction de la température le magnésium (figure 6), se répartit en deux populations bien distinctes, moins de 16 mg/l et plus de 16 mg/l. Les teneurs dispersées supérieures à 16 mg/l caractérisent la zone noyée du karst et les volumes d'eau de la réponse chimique. Les teneurs regroupées inférieures à 16 mg/l correspondent à l'infiltration rapide et à l'infiltration retardée. La cinétique de mise à l'équilibre avec une phase solide en CO_3Mg est lente ; il en résulte un groupement des teneurs pour les dissolutions correspondant à des temps de contact courts.

Sur le graphique des variations du calcium en fonction des chlorures (figure 7) jusqu'à l'échantillon 1009 marquant le début des effets de dilution, il n'y a pas de corrélation entre ces deux éléments. A partir de l'arrivée des eaux plus froides Ca^{++} et Cl^- évoluent parallèlement. En fin d'échantillonnage, la tendance évolue vers des valeurs encore supérieures en Ca^{++} et en Cl^- et non vers un retour à des teneurs comparables à celles des eaux d'étiage.

Globalement, Ca^{++} et SO_4^{--} ne sont pas corrélés (figure 8). A partir de l'arrivée des eaux d'infiltration, calcium et sulfates sont covariants. L'augmentation des teneurs en sulfates peut être attribuée au lessivage des formations marneuses légèrement pyriteuses du Crétacé.

On note également une corrélation positive globale des sulfates avec Na^+ (figure 9). Cette liaison est plus nette pour les échantillons correspondant à l'arrivée des eaux d'infiltration retardée. Ces observations correspondent à la remarque faite § 2-a., de l'augmentation des teneurs en Na^+ , Ca^{++} , Cl^- et SO_4^{--} en fin de période d'observation.

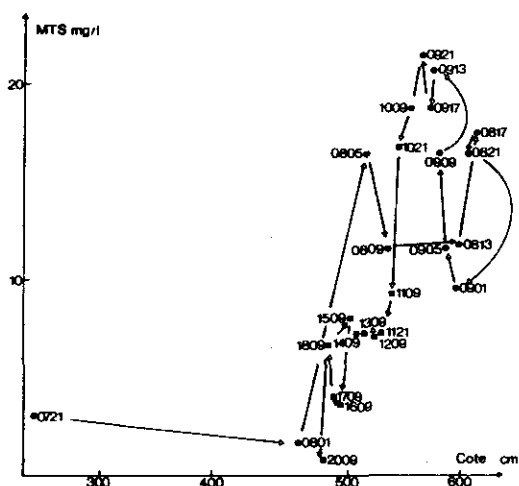


Figure 10.- Relations MTS - COTE.

Figure 10.- Relationships between MTS - COTE.

b. Paramètres physiques

COTE et MTS sont bien corrélés positivement (figure 10) abstraction faite de l'échantillon 0721, échantillon caractéristique des eaux d'étiage.

Les matières totales en suspension sont corrélées principalement avec la conductivité (figure 11). Les échantillons prélevés en fin d'observation ont des teneurs en matières totales en suspension équivalentes à celles des eaux d'étiage.

De plus, les taux les plus importants de MTS correspondent aux échantillons à conductivité maximale, et non à ceux traduisant l'arrivée des eaux d'infiltration.

Tout se passe comme si la présence des MTS était liée à la vitesse dans les conduits karstiques avec remise en mouvement des particules déposées sur les parois.

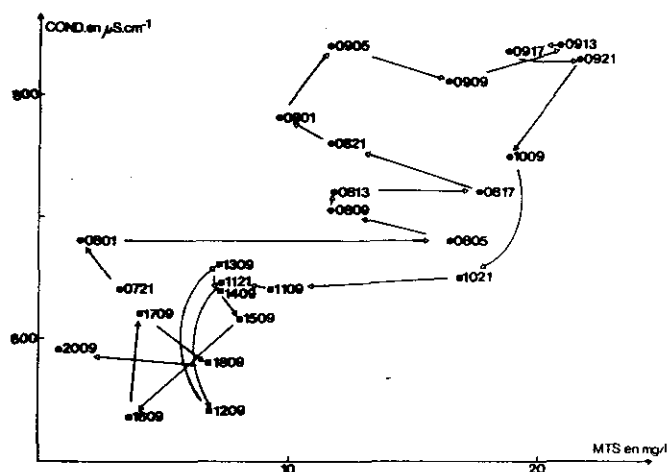


Figure 11.- Relations MTS - Conductivité.

Figure 11.- Relationships between
MTS - conductivity.

Comme pour le magnésium, les matières organiques (figure 12) se répartissent en deux populations différentes (t de Student = 2,13). De plus, les taux de MO les plus élevées arrivent très tard (1709), bien après les crues piézométrique et chimique. Les matières organiques ne sont corrélées ni à Cl^- , ni à Na^+ , ni à K^+ . Les valeurs de matières organiques les plus importantes appartiennent à des échantillons de l'infiltration retardée. L'augmentation des valeurs de matière organique aurait donc pour origine des temps de séjour plus longs dans la zone non saturée.

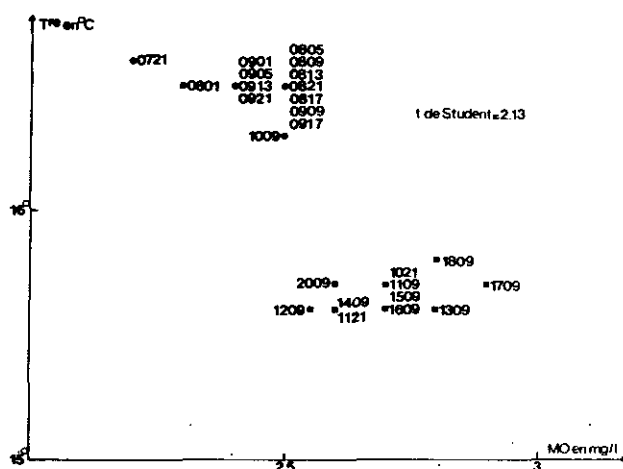


Figure 12.- Relations MO - Température.

Figure 12.- Relationships between
MO - Temperature.

Dans leur ensemble, les variables bactériologiques ne sont pas liées aux variables physico-chimiques. Seuls les paramètres CT et SF présentent une évolution pouvant être décrite sur la totalité de l'épisode de pollution.

A partir de l'étiage et jusqu'au maximum de la crue piézométrique l'étude de la relation SF-CT (figure 13) met en évidence l'absence d'une augmentation sensible des valeurs de ces deux paramètres. Pendant toute la période du début de la décrue piézométrique synchrone de la baisse des résistivités, les valeurs de SF et CT augmentent régulièrement jusqu'à l'échantillon 1021, correspondant au premier effet marqué de la dilution. Durant l'observation de la décrue une évolution plus complexe apparaît. Les CT deviennent moins variables de 190 à 500/100 ml, les CF gardent une amplitude de variation supérieure comprise entre 48 et 270/100 ml. Ces valeurs sont significativement différentes par rapport aux limites de confiance à 95 % de la méthode de dénombrement utilisée. La variation de CT et SF durant l'épisode de crue doit probablement dépendre de mécanismes différents, à partir de l'apparition des eaux plus froides.

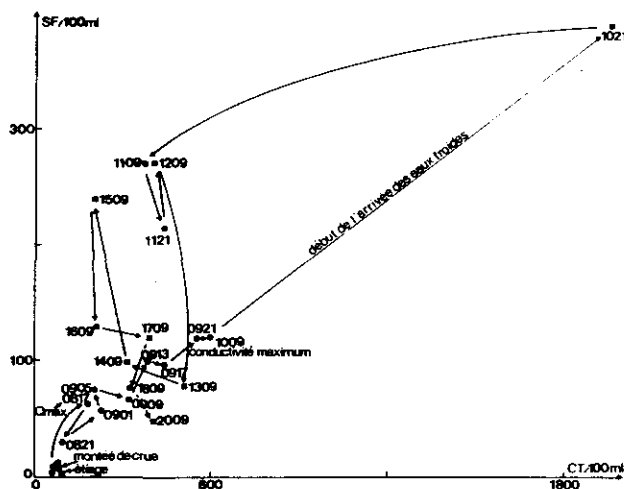


Figure 13.- Relationships between
CT - SF.

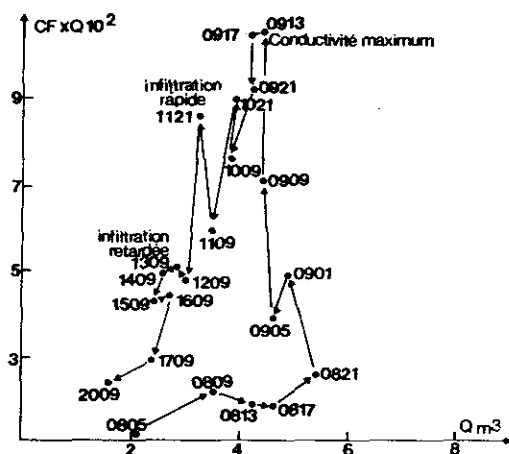


Figure 14.- Relations $(CF \times Q) - Q$.

Figure 14.- Relationships between $(CF \times Q) - Q$.

Une estimation des débits d'après les niveaux pris sur l'exutoire de la source a été faite pour donner une représentation (figure 14) des variations en flux entre CF et Q. Du début de l'écoulement au maximum de la pointe de crue il n'y a pas de variation notable du flux de CF malgré une augmentation du débit jusqu'à $5,4 \text{ m}^3/\text{s}$. De la pointe de la crue au minimum de résistivité, l'augmentation du flux en CF est continue et rapide malgré la décroissance des débits de $5,4 \text{ m}^3/\text{s}$ à $4,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Le début de l'arrivée des eaux froides et la période du maximum de dilution ne sont pas marqués par une augmentation du flux de CF mais par une légère diminution. La

fin de l'épisode de crue correspond à un retour aux valeurs des flux de l'étiage. Le cycle ainsi décrit est totalement indépendant des variations du débit, et des effets de l'infiltration retardée.

Par ailleurs, les PA ne présentent, ainsi que les MTA, aucune liaisons avec les autres variables étudiées et les matières organiques ne sont pas liées avec les paramètres bactériologiques.

Pour la totalité des échantillons, les variables bactériologiques ne sont pas fortement corrélées avec les variables physico-chimiques.

6 - ANALYSE MULTIDIMENSIONNELLE

Une première analyse en composantes principales centrée réduite, a été réalisée sur l'ensemble des échantillons, et la température scindant l'échantillonnage de la crue en deux groupes (cf. 2-a), il a été réalisé une ACP pour chaque groupe. Les variables bactériologiques considérées comme des variables expliquées par rapport aux autres paramètres physico-chimiques ont été utilisées en variables supplémentaires, corrélées avec les facteurs résultant des variables explicatives et représentées dans l'espace des variables.

a. ACP n°1 sur l'ensemble des échantillons

Une première analyse a été réalisée à partir des 25 échantillons et de 14 variables physico-chimiques (Ca^{++} , K^+ , Na^+ , Mg^{++} , TAC, Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$, COND, PHTe, TEMP, TURB, COTE, MO, MTS) et de 5 variables bactériologiques (MTA, CF, CT, SF et PA).

Les corrélations entre les 19 variables et les 3 axes factoriels sont retranscrites tableau 2. Les 3 premiers facteurs rendent compte de 76,73 % de la variance totale (dont 48,28 % pour le premier, 15,80 % pour le deuxième, et 12,56 % le troisième).

Tableau 2.- ACP n°1 sur l'ensemble des échantillons.
Corrélations entre variables et facteurs.

Table 2.- Principal components analyses on the whole samples. Correlations between the variables and factors.

	AXE 1	AXE 2	AXE 3
Ca	- 0.1291	0.5969	- 0.4912
K	- 0.7732	0.3211	- 0.3006
Na	- 0.8352	0.3864	- 0.3057
Mg	- 0.9167	- 0.1738	- 0.0755
TAC	- 0.4947	- 0.5618	- 0.3415
Cl	- 0.8916	0.3808	- 0.1591
SO ₄	- 0.6920	0.5339	- 0.0532
COND	- 0.8951	- 0.1761	+ 0.2138
PHTE	- 0.6312	- 0.5700	- 0.1348
TEMP	- 0.8259	- 0.4919	- 0.1492
TURB	- 0.6158	0.2320	0.5407
COTE	- 0.4095	0.2838	0.5938
MO	0.6165	0.6193	0.2417
MTS	- 0.6821	- 0.0895	0.5342
MTA	- 0.2663	0.1266	0.2805
CT	0.1388	0.1650	0.4105
CF	0.0598	0.4786	0.4039
PA	0.1118	- 0.3819	- 0.1191
SF	0.4090	0.2286	0.5619

Dans l'espace des variables sur la représentation dans le plan I-II (figure 15) un certain nombre de variables sont mal représentées. TAC, COTE, TURB, MTS et aucune des variables bactériologiques ne se trouve assez proche du cercle de corrélation 1 pour pouvoir être interprétée.

■ Le facteur I est déterminé par la température, la minéralisation autre que HCO_3^- et Ca^{++} et une part du pH et de MO. Les matières organiques sont opposées aux autres paramètres déterminant l'axe. Au côté positif de l'axe correspondent les échantillons les moins minéralisés en magnésium, tel le 1109 alors que du côté négatif on retrouve l'échantillon 0913, figurant parmi les plus riches en magnésium. Le magnésium est un élément différenciant pour cet axe.

■ Le facteur II est constitué dans l'ordre par les variables suivantes + MO, + Ca^{++} , + $\text{SO}_4^{=}$ du côté positif et -PHTE, -TAC et -TEMP du côté négatif.

Le pH, MO et $\text{SO}_4^{=}$ participent à la fois au facteur I et au facteur II. La représentation du diagramme $\text{Ca}^{++}/\text{SO}_4^{=}$ (figure 8) montre une corrélation positive entre ces deux éléments pour les derniers échantillons. Par contre, il y a indépendance entre les variations de Ca^{++} et de $\text{SO}_4^{=}$ pour toute la partie s'étendant de l'étiage jusqu'à la crue piézométrique. Le côté positif est marqué par les échantillons riches en $\text{SO}_4^{=}$, et en Ca^{++} , tel le 1709.

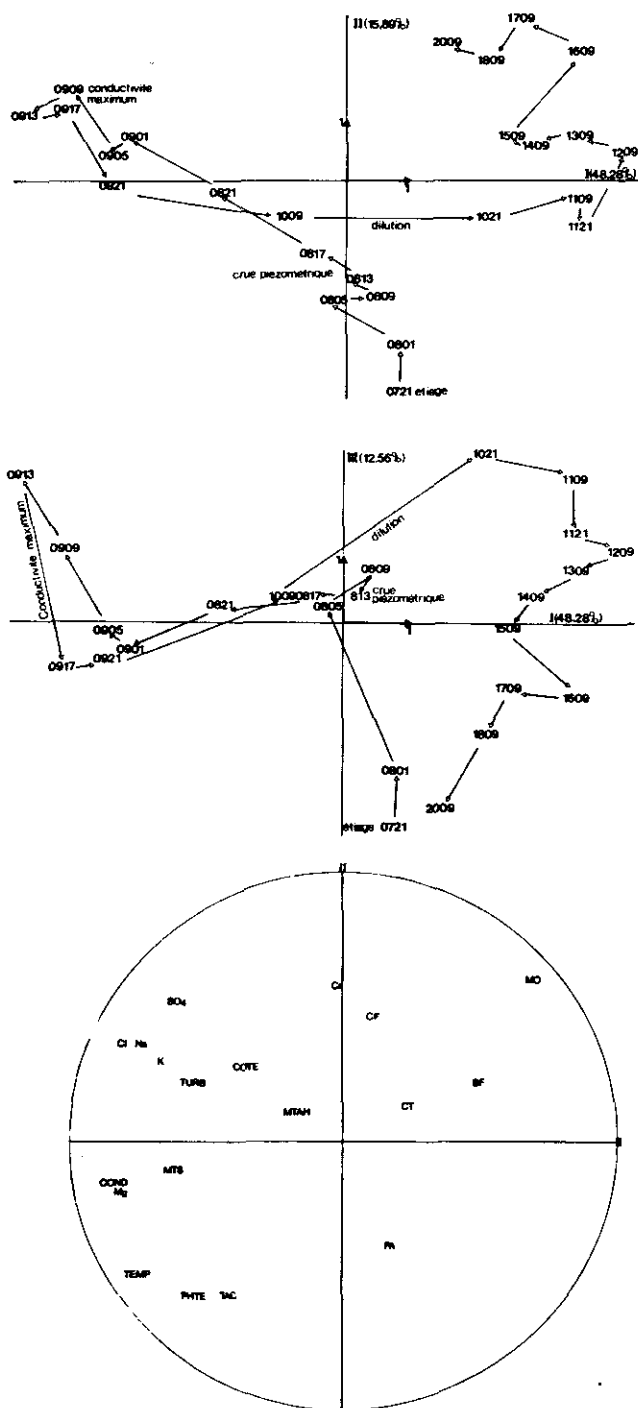


Figure 15.- Analyse en composantes principales n°1 : crue de la source du Lez. Ensemble des échantillons.

Figure 15.- P.C.A. : Lez spring flooding. Whole sample.

■ Le facteur III est constitué par des variables mal représentées dans le plan I-II, +COTE, +MTS, +SF, pour son côté positif, +TURB s'y projetant également, -Ca⁺⁺, -TAC pour son côté négatif. Cet axe est donc à mettre en relation avec les paramètres liés à la vitesse de l'eau et à l'entraînement particulaire minéral ou organique et aux faibles teneurs en Ca⁺⁺ et TAC. Les streptocoques fécaux, les coliformes fécaux et totaux se projettent également à l'extrémité positive de l'axe III.

Dans l'espace des individus la répartition des échantillons dans le plan des axes I, II (figure 15) rend compte de l'évolution chimique générale au cours de l'épisode de crue. Les eaux d'étiage représentées par l'échantillon 0721 situé du côté négatif de l'axe II ont des teneurs relativement faibles en Ca⁺⁺, SO₄⁼ et MO. Jusqu'à l'échantillon 0905 (maximum de conductivité) selon un trajet assimilable à une droite de mélange entre les eaux d'étiage et celles de la réponse chimique, il y a augmentation des teneurs en Cl⁻, Na⁺, K⁺, Mg⁺⁺, SO₄⁼. Les échantillons 0817 et 0821 (maximum de débit) ne donnent lieu à aucune différenciation particulière. Les teneurs restent élevées durant la décrue jusqu'à l'échantillon 0921 (décroissance du débit de crue de 33 %). Ensuite les deux échantillons 1009 et 1021 correspondant à l'infiltration rapide amènent à l'extrémité positive de l'axe I. A partir de l'échantillon 1309 (décroissance de 50 % du débit de crue) il y a augmentation des teneurs en K⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄⁼ et Ca⁺⁺ et TAC. La fin des observations correspond au maximum des projections sur l'axe II interprété comme l'axe de la minéralisation calcocarbonique, alors que le début se positionnait au minimum. L'axe I traduit l'évolution du chimisme autre que HCO₃⁻ et Ca⁺⁺ entre la réponse chimique de l'aquifère et l'infiltration rapide. L'axe II correspond aux eaux de l'infiltration retardée avec une légère augmentation de Ca⁺⁺, TAC. Pour les variables participant à cet axe, il n'y a pas rétablissement des caractéristiques d'étiage, les conséquences de l'épisode de crue se font encore sentir.

Sur la représentation de l'événement crue dans le plan I-III (figure 18) la crue piézométrique, le maximum de conductivité et l'arrivée des eaux d'infiltration rapide sont bien individualisés.

L'axe III est déterminé par TURB, MTS, SF, matières particulières dont la mise en mouvement est plus importante durant la point de crue piézométrique et lors du passage des volumes d'eau de l'infiltration rapide. A partir de l'échantillon 1309 (arrivée des eaux d'infiltration retardée marquées par la montée des teneurs en Ca⁺⁺ et TAC après la baisse liée aux eaux d'infiltration rapide), il y a retour vers l'état initial. L'échantillon de fin d'observation 2009 se positionne à proximité de celui caractérisant les eaux d'étiage 0721. Seul CF se maintient à des valeurs plus élevées.

b. ACP n°2 sur les 14 premiers échantillons

Ce sont les échantillons "chauds" (T > 16 °C) le magnésium y est variable et le calcium beaucoup moins. La température étant relativement constante pour ce groupe, elle n'a pas été utilisée comme variable.

Les corrélations entre les 18 variables et les 3 axes factoriels sont retranscrites tableau 3. Les premières composantes rendent compte de 82,35 % de la variance totale (dont 51,95 % pour la première, 20,85 % pour la seconde, et 9,54 % pour la troisième).

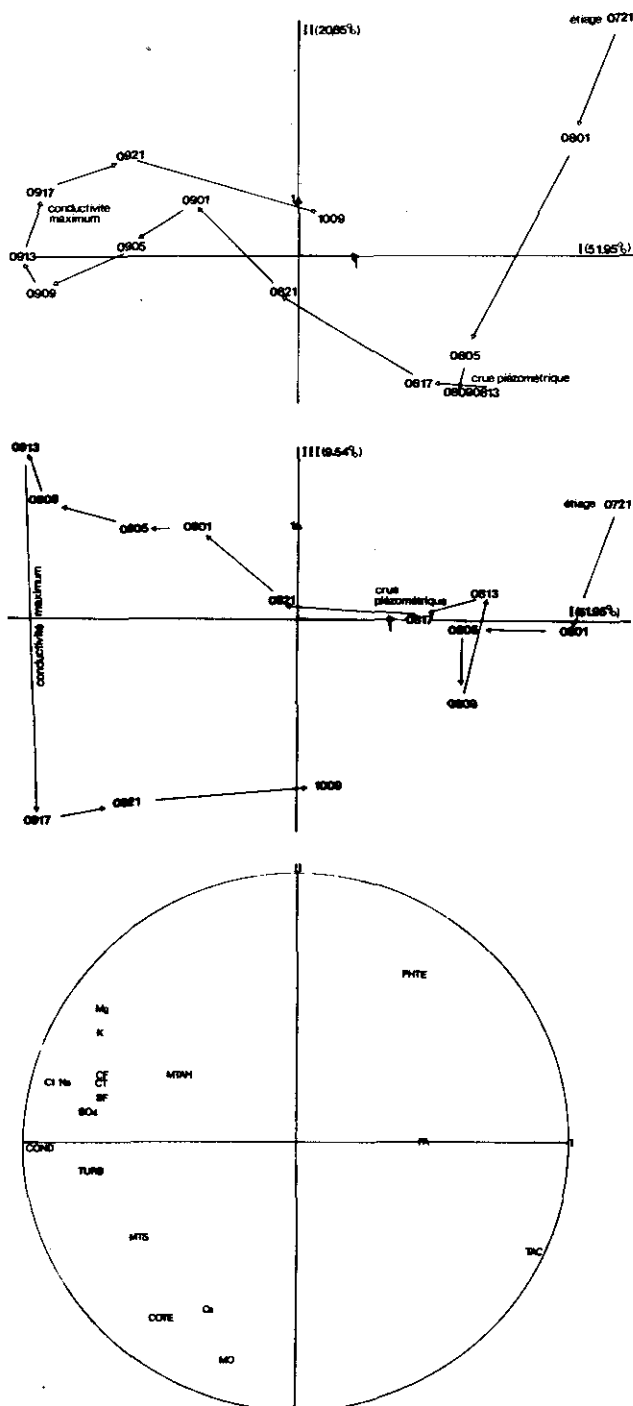


Figure 16.- Analyse en composantes principales n°2. Crue de la source du Lez. 14 premiers échantillons.

Figure 16.- P.C.A. : Lez spring flooding. First 14th samples.

Tableau 3. - ACP n°2 sur les 14 premiers échantillons.
Corrélations entre les variables et les facteurs.

Table 3. - Principal components analyses on the first 14 samples. Correlations between the variables and the factors.

	AXE 1	AXE 2	AXE 3
Ca	- 0.3842	- 0.6112	0.3629
K	- 0.7463	0.4387	- 0.1681
Na	- 0.9039	0.2417	0.0386
Mg	- 0.7928	0.5029	- 0.1539
TAC	0.8250	- 0.3950	0.1270
Cl	- 0.9590	0.2447	- 0.0015
SO ₄	- 0.8301	0.1342	0.0926
COND	- 0.9689	- 0.0433	- 0.0744
PHTE	0.3669	0.6592	0.4339
TURB	- 0.8162	- 0.0840	0.3465
COTE	- 0.5896	- 0.6646	- 0.1656
MO	- 0.3201	- 0.8215	- 0.3577
MTS	- 0.6592	- 0.3513	- 0.3598
MTA	- 0.4830	0.2595	- 0.1665
CT	- 0.7855	0.2417	- 0.2049
CF	- 0.7707	0.2617	- 0.3404
PA	0.4006	0.0164	- 0.0539
SF	- 0.7713	0.1794	- 0.3390

Sur la représentation des variables dans le plan I-II (figure 16) la plupart des variables sont proches du cercle de corrélation 1, les corrélations sont donc bien meilleures que dans le cas du traitement de l'ensemble des échantillons.

Le facteur I est déterminé par -MTS, -TURB, -COTE, la minéralisation (en -Cl⁻, -Na⁺, -SO₄⁼, -Mg⁺⁺, -K⁺) -COND, et en opposition avec tous les paramètres précédents par TAC.

CT, CF, SF sont corrélés à 0,77 avec l'axe I. Ils sont très proches de Cl⁻, Na⁺, SO₄⁼, puis de K⁺, Mg⁺⁺, variables marquant la réponse chimique de l'aquifère et TURB. Il n'y a aucune proximité avec Ca⁺⁺, MO, COTE et ils sont opposés à TAC.

La présence en plus grand nombre d'indicateurs bactériens corrélativement à la réponse chimique pose question. Au § 4-a, en raison de l'environnement thermique, la réponse chimique a été interprétée comme une chasse de volumes d'eau provenant de zones du karst noyé et habituellement non sollicités. L'hypothèse de l'entraînement de stock depuis la zone non saturée ne peut être retenue. Deux hypothèses seront discutées avec l'interprétation des indicateurs bactériens : suivi en zone noyée dans des conditions de milieu favorable, et mélange à faible débit avec des eaux à fortes teneurs.

Le facteur II est marqué du côté positif par +Mg⁺⁺, +PHTE et du côté négatif par -MO, -COTE, -Ca⁺⁺. Il oppose le magnésium à la minéralisation calcocarbonique et aux matières organiques.

Le facteur III est relativement mal caractérisé. Il a une plus faible contribution à la variance totale (9,54 %) avec TURB se projetant du côté positif. Il représenterait, mais à moindre titre que pour la totalité des échantillons, une part de l'entraînement particulaire.

Dans l'espace des individus, (plans I, II) (figure 16) les échantillons se distribuent le long de l'axe I selon une augmentation régulière des concentrations jusqu'au maximum de conductivité pour amorcer ensuite une diminution des teneurs jusqu'à l'échantillon 1009 marquant le début de l'arrivée des eaux d'infiltration rapide. Par rapport à l'axe II l'étiage est marqué par les fortes valeurs de représentation et la crue par les plus faibles valeurs (baisse du Ca^{++} et du TAC).

La représentation des échantillons dans le plan I-III montre une variation régulière depuis l'échantillon 0801 (fin de l'étiage) jusqu'au maximum de conductivité (0913), avec augmentation de la turbidité ; à partir de l'échantillon 0917 s'amorce la décroissance des teneurs en Ca^{++} et en MTS, avec retour progressif, par rapport à l'axe I, à des valeurs voisines de celles observées durant la crue piézométrique.

c. ACP n°3 sur les 11 derniers échantillons (figure 17)

Ce sont les échantillons "froids" ($T < 16^\circ$) pour lesquels Ca^{++} varie, le magnésium restant constant ; la température évoluant dans ce groupe, elle a été entrée comme variable.

Les 3 premiers axes factoriels rendent compte de plus de 78 % de la variance totale avec 51,56 % pour le premier, 15,68 % pour le deuxième et 11,09 % pour le troisième.

Les résultats sont nettement différents des deux analyses précédentes. Participent à la contribution de l'axe I, d'une part $+\text{Cl}^-$, $+\text{Ca}^{++}$, $+\text{Na}^+$, $+\text{SO}_4^{--}$, $+\text{TAC}$, $+\text{K}^+$ pour son côté positif et $-\text{COTE}$, $-\text{MTS}$ pour son côté négatif. La turbidité se projette sur cet axe. Cet axe représente donc la minéralisation induite par la participation à l'écoulement des eaux de l'infiltration retardée.

Les facteurs II et III sont nettement moins bien individualisés en raison à la fois du faible nombre d'échantillons et de la moindre homogénéité de la population qu'ils représentent. Le critère de différenciation pour la formation de ce groupe a été la température plus basse. Or, dans le détail de l'hydrogramme, seuls les 9 derniers échantillons représentent pour certains paramètres physico-chimiques, une variation allant dans le même sens.

Le facteur II est représenté par $+\text{PHTE}$, $+\text{TEMP}$, $+\text{MTS}$, $+\text{COND}$, pour son côté positif. Il pourrait correspondre à l'influence de l'infiltration rapide sur les variables TEMP et MTS, car il est marqué à ses extrémités par les échantillons 1121 et 1209 délimitant le début et la fin du passage des volumes d'eau de l'infiltration rapide.

Le facteur III est d'interprétation plus aléatoire. Il est représenté du côté positif par $+\text{Mg}^{++}$, $+\text{PHTE}$; TURB se projette du côté négatif. Il est marqué du côté positif par la présence des échantillons 1121 et 1809 à teneur légèrement plus forte en magnésium et de faible turbidité. Il pourrait donc représenter les apports faibles et irréguliers d'eaux de type étiage plus riches en magnésium et non turbides.

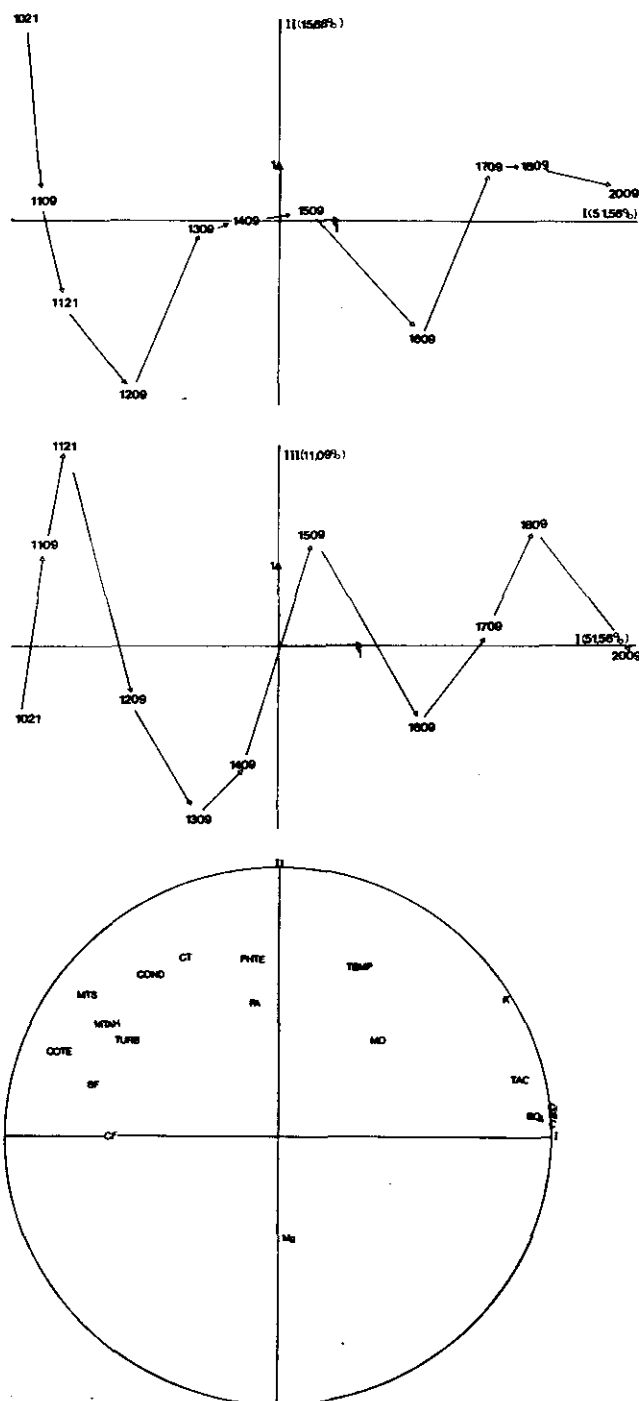


Figure 17.- Analyse en composantes principales n°3. Crue de la source du Lez. 11 derniers échantillons.

Figure 17.- P.C.A. : Lez spring flooding. Last 11th samples.

Tableau 4.- ACP n°3 sur les 11 derniers échantillons.
Corrélations entre les variables et les facteurs.

Table 4.- Principal components analyses on the last
11 samples. Correlation between the variables
and the factors.

	AXE 1	AXE 2	AXE 3
Ca	0.9826	0.1240	- 0.0908
K	0.7812	0.3310	- 0.0964
Na	0.9708	0.1154	- 0.0549
Mg	- 0.0564	- 0.3614	0.6146
TAC	0.8205	0.2439	- 0.2838
Cl	0.9833	0.1156	0.0125
SO ₄	0.9239	0.0932	0.1280
COND	0.4383	0.6026	0.0815
PHTe	- 0.1824	0.6739	0.5116
TEMP	0.2469	0.6547	0.4680
TURB	- 0.6324	0.3650	- 0.6136
COTE	- 0.9836	0.0952	0.0131
MO	0.2913	0.3861	- 0.0413
MTS	- 0.7613	0.5337	- 0.0280
MTA	- 0.6679	0.4228	- 0.3284
CT	0.4524	0.6671	- 0.2328
CF	- 0.7238	0.0077	0.1899
PA	- 0.1960	0.5020	0.3528
SF	- 0.7536	0.2179	0.1391

Les variables bactériologiques ne sont pas sur le cercle des corrélations I, mais peuvent être interprétées. CF et SF sont proches et corrélés à l'axe I par respectivement des valeurs de - 0,75 et - 0,72. L'axe I étant interprété comme la minéralisation des eaux de l'infiltration retardée, il y a indication d'une décroissance en CF et SF pour l'épisode de la fin de la décrue observée. CT est corrélé à 0,66 avec l'axe II et est donc indépendant de SF et CF. D'après l'interprétation faite précédemment pour cet axe, CT serait dépendant d'apports tardifs d'eaux plus diluées.

Dans le plan I-II de l'espace des individus, l'axe I représentant la minéralisation de l'infiltration retardée est toujours parcouru dans le sens croissant. L'axe II correspond aux quatre échantillons de l'infiltration rapide. L'échantillon 1609 à conductivité plus faible et pH plus faible, peut être interprété comme un apport plus tardif d'eau d'infiltration rapide. Dans le plan I-III on observe une oscillation entre les deux extrémités de l'axe III.

Les eaux n'ont pas repris les caractéristiques physico-chimiques de l'étiage. La fin de l'épisode de crue semble marquée par la coexistence de trois types d'écoulement de volume d'eau ayant des origines différentes : tarissement de l'infiltration rapide, participation de plus en plus forte de l'infiltration retardée et écoulement de la zone noyée.

d. Conclusions

Pour les variables physico-chimiques l'analyse fait à partir des trois ACP rend compte et permet une discussion sur les modalités du système karstique en crue. Cela est moins évident pour les variables bactériologiques dont le comportement n'apparaît pas directement lié aux principales variations analysées. La seule liaison interprétable est celle existant avec les volumes d'eau de l'infiltration retardée.

7 - INTERPRÉTATION DES INDICATEURS BACTÉRIENS

■ *Pseudomonas aeruginosa*

Pseudomonas aeruginosa est une bactérie vivant normalement à l'état saprophytique dans l'eau et le sol humide ou sur les végétaux ; elle résiste mal à la dessiccation (CARBON C. 1969 ; LE MINOR *et al.*, 1982 ; CIAN-MAURIN L., 1980). Cette bactérie est capable de se multiplier dans une eau très pauvre en matières organiques ; il a été vérifié qu'elle était apte à se multiplier dans de l'eau distillée (FAVERO *et al.*, 1971).

L'eau pouvant être considérée comme un des réservoirs naturels de ce germe les faibles variations de concentration observées au cours de l'étude paraissent logiques.

Pseudomonas aeruginosa est bien représenté dans les eaux de l'infiltration retardée. Ce comportement différent de celui des MTA dont les teneurs sont légèrement décroissantes pour la même période pourrait s'expliquer par une grande multiplication de PA dans les sols devenus très humides après le fort épisode pluvieux ayant généré la crue.

■ Coliformes fécaux, coliformes totaux, streptocoques fécaux

la survie de ces micro-organismes varie de plusieurs jours à quelques mois, selon leur type et les conditions physico-chimique, métabolique ou nutritive plus ou moins favorables.

Dans les eaux, la survie des coliformes fécaux (RODIER J., 1978) est du même ordre que celle des Salmonelles, celle des coliformes totaux étant supérieure à celle des streptocoques fécaux considérablement plus élevée. L'autoépuration microbienne dans un milieu aéré est caractérisé par une décroissance exponentielle variable selon les groupes (LECLERC *et al.*, 1977) plus rapide pour les streptocoques fécaux que pour les coliformes. Dans tous les cas, le taux de réduction est supérieur à 99 % au bout de 5 jours (WALKER, LECLERC, 1973, in LECLERC *et al.*, 1977).

Dans le cas particulier des péloïdes de stations thermales (CAPDEPUY *et al.*, 1983 :

- les coliformes fécaux (*E. coli*) nécessitent 12 semaines à pH 7 pour une élimination totale,

- les streptocoques fécaux sont retrouvés après 5 mois de contact à raison de 10^6 /gramme de péloïde alors qu'il y avait une concentration de 10^7 /gramme au départ. La reprise de ces péloïdes peut aboutir à des concentrations de 10^2 à 10^3 .

Dans les sols, des facteurs favorisant la survie des coliformes et des streptocoques fécaux ont été mis en évidence par différents auteurs (KIBBEY *et al.*, 1978 ; LABELLE *et al.*, 1980 ; POSTGATE, 1967), en particulier le taux d'hydratation et un pH proche de la neutralité (BELL, 1976, GUDDING *et al.*, 1975). Pour évaluer la survie le nombre des facteurs à prendre en compte est très important, humidité atmosphérique, temps pluvieux, température, insolation, caractéristiques physiques du sol, état de la microflore (RUDOLFS *et al.*, 1951). Les résultats obtenus par les différents auteurs sur la survie des micro-organismes sont en grand nombre et toujours à rapporter à des conditions particulières d'observation ou d'expérimentation (P. BOUTIN, 1982). Il ne s'en dégage pas une notion de $1/2$ vie ou de temps de réduction décimal permettant une mesure objective du taux de survie.

Les systèmes karstiques sont particulièrement vulnérables à la pollution bactérienne en raison de l'absence d'horizon filtrant au-dessus des niveaux aquifères. L'autoépuration dans la zone aérée n'a pu être mise en évidence (ALLEN *et al.*, 1973). Les concentrations bactériennes observées sont plutôt corrélées à l'état hydrologique qu'aux valeurs de débit, l'infiltration en est concentrée et la décharge rapide, il peut y avoir stockage de charge polluante dans l'aquifère (JAMIER, 1976).

De nombreux auteurs mettent en évidence le rôle des relations rapides de l'aquifère avec le milieu superficiel (FABRE G. *et al.*, 1985). Dans certains cas des corrélations de populations bactériennes ont été observées avec des éléments lessivables de la surface ou de l'épikarst (sulfure de fer, sidérite) ainsi que l'existence de mécanismes d'adsorption et de décharge au niveau des argiles et de la matière organique (CHAUVE, *et al.*, 1982).

Les observations de MISEREZ *et al.*, (1976), BURGER (1983) sur le karst jurassien montrent que tout se passe comme si le transfert des bactéries allait de pair avec la réponse chimique de l'aquifère et la transmission des pressions hydrauliques. Pour ces auteurs l'autoépuration est nulle et à chaque recharge il y a une forte émission de bactéries saprophytes des sols et des bactéries humaines par déblocage des bactéries de leur site souterrain.

MOESCHLER *et al.*, (1980) constate sur l'observation détaillée physico-chimique et bactériologique d'une crue de l'Areuse que le nombre des bactéries augmente avec la montée des eaux pour atteindre son maximum pendant la décrue. Le maximum de bactéries fécales est concomitant d'eau de plus faible concentration à forte teneur en oxygène provenant d'une infiltration rapide.

Les observations faites sur la crue du Lez et étudiées par analyse factorielle sont explicables si l'on admet simultanément l'existence de taux de survie comparable pour les CT et SF à ceux actuellement reconnus dans les péloïdes des stations thermales, et l'incidence des transferts bactériens par des circulations rapides. Ainsi que dans les études faites dans le Jura suisse il y a augmentation des concentrations bactériennes avec le débit, et la réponse chimique de l'aquifère, le maximum de concentration se produisant durant la décrue de l'aquifère.

Le maximum de 10^3 en CT observé pendant la crue marque l'évolution de l'équilibre calco-carbonique, lié aux arrivées d'eau à circulations rapides. Le pas d'échantillonnage retenu n'a probablement pas rendu possible la mise en évidence du début du phénomène. Les premières fortes valeurs en CF apparaissant 4 heures avant l'arrivée des eaux froides,

peuvent être interprétées comme étant la conséquence d'un mélange avec les eaux chaudes profondes, de faibles quantités d'eau froide mais très fortement polluées. Durant la période de prédominance des eaux correspondant à l'infiltration retardée le flux de pollution CF, SF, CT se maintiendra à des valeurs supérieures à celles des eaux d'étiages.

■ Microflore totale aérobie mésophile : M.T.A.

La désignation MTA regroupe des micro-organismes qui se multiplient à la température de 30 °C dans des conditions d'aérobiose. Leur recherche est surtout destinée à évaluer le degré de protection d'une nappe.

"En effet dans la plupart des eaux profondes vit une flore bactérienne relativement constante. En conséquence, son accroissement peut traduire l'apport de bactéries étrangères, donc une défaillance dans la protection de la nappe, surtout si ces variations coïncident avec des périodes de fortes pluies" (RODIER, 1978).

La microflore totale aérobie diminue du début des observations jusqu'au maximum de la réponse chimique. Cette constatation va dans le sens de l'absence d'apports ayant une origine superficielle directe pour cette partie de l'écoulement.

L'augmentation des teneurs en MTA, comme pour les CF, se produit quelques heures avant la chute thermique, et se maintient pendant toute la durée du passage des volumes d'eau de l'infiltration rapide.

Par rapport aux risques de pollutions à l'échelle du bassin depuis la surface du sol, ces résultats en MTA indiquent que l'aquifère en l'état actuel ne présente pas une grande vulnérabilité, sauf au niveau des pertes plus ou moins directes du réseau superficiel vers l'aquifère souterrain.

8 - CONCLUSION

L'observation détaillée de la crue de novembre 1982 a confirmé la diversité de la réponse d'un aquifère karstique complexe comme celui du Lez, lors d'un épisode pluvieux majeur s'étendant à toute la surface du bassin et intervenant après une période d'étiage de près de 9 mois.

Selon l'échelle des observations, les résultats peuvent être utilisés pour l'interprétation des principales caractéristiques de fonctionnement du système, ou pour préciser des détails du mécanisme de certaines circulations souterraines. En l'état actuel des connaissances sur l'aquifère, seul le niveau d'information général est utilisable dans l'appréciation des risques sanitaires.

Il y a une séparation très nette entre la crue piézométrique et la réponse chimique, séparation marquée principalement par une différence thermique synchrone d'une grande variation du Mg^{++} pour les eaux les plus chaudes, et du Ca^{++} pour les eaux froides.

La réponse chimique chaude de l'aquifère est marquée par une augmentation de la minéralisation autre que calco-carbonique. Elle est

interprétée en raison de l'environnement thermique comme le passage de volume d'eau du karst noyé provenant de zones habituellement non sollicitées. L'arrivée des eaux plus froides met fin à la forte sursaturation des eaux, celles-ci devenant temporairement sous-saturées lors du passage des eaux de l'infiltration rapide avec de plus faibles valeurs de la pCO_2 équilibrante. L'infiltration retardée venant ensuite correspond à une lente montée des teneurs en Cl^- , Na^+ , Ca^{++} , $SO_4^{=}$, accompagnée par une augmentation des pCO_2 et le retour à des valeurs de ΔpH positives.

En fin de période d'observation, soit 12 jours après la pointe de crue, l'augmentation des teneurs en Ca^{++} traçant le passage des eaux d'infiltration retardée, se poursuit. L'analyse factorielle met bien en évidence ce phénomène ; physico-chimiquement l'épisode de crue n'est pas terminé ; il sera nécessaire à l'avenir de prendre en compte des durées de temps d'observation plus longues.

Les paramètres biologiques les plus variants sont CF, MTA, SF, pour lesquels l'analyse factorielle dégage trois types de variations :

- augmentation faible de CT et SF bien corrélée avec le chimisme durant tout l'épisode de la réponse chimique,
- une augmentation plus forte de CT, SF et MTA se produisant quelques heures avant le marquage thermique des eaux d'infiltration rapide, et se maintenant pendant la durée de leur passage,
- une décroissance générale des éléments bactériens pendant toute la période correspondant au flux d'eau d'infiltration retardée, sauf pour CT qui ne présente pas de variation et se maintient.

Le risque sanitaire est donc présent sur une grande partie de l'épisode de crue, particulièrement pendant la période d'arrivée des eaux les plus froides. Cependant, le pas d'échantillonnage de cette période, réalisé en fonction de la faible décroissance des débits n'a pas été adapté aux variations du chimisme et de la bactériologie à la source. Des prélèvements plus rapprochés auraient probablement permis de déceler plus de détails dans les mécanismes de transfert et de pollution.

Les corrélations entre les éléments bactériens et physico-chimiques et l'interprétation par analyse factorielle rendent compte de deux mécanismes pour expliquer la répartition du risque sanitaire au cours de l'épisode de crue.

Dans un premier temps, il y a covariation entre les indicateurs bactériens et les éléments chimiques, pendant toute la crue piézométrique puis pendant la fin de la réponse chimique. Cette période correspond à celle de l'existence de fortes pressions dans le karst, débit supérieur à $5 m^3/s$. Les volumes d'eau transitant durant cette période ayant pour origine le karst noyé, l'hypothèse la plus probable est celle de la survie de ces micro-organismes dans des conditions de milieu favorable, pelloïdes tapissant les conduits karstiques par exemple. Leur mise en suspension et leur entraînement résulteraient de plus grandes vitesses de circulation de l'eau.

Dans un deuxième temps, les paramètres de la pollution sont devenus non covariants entre eux et avec la physico-chimie des eaux. Il peut s'agir d'un effet d'échelle consécutif au changement de pas de temps des observations. Cependant la rémanence de la pollution semble liée au passage des eaux de l'infiltration retardée.

Dans le détail le début des pics maximaux pour CF, SF et MTA se produit quelques heures avant la baisse thermique. Cette observation peut être le résultat d'un effet de dilution. Un mélange de 5 m³/s d'eau plus chaude à 16,5 °C de la zone noyée du karst à 200 m/l de CF avec 0,01 m³/s d'une eau plus froide à 10 °C donne une eau de 16,48 °C à 2,2.10³ CF. Le niveau de pollution ainsi engendré ne pourra pas être détecté à partir de l'observation de variable physico-chimique.

Cependant, en dehors de la prévision de ce premier pic de pollution, si l'on admet la répétitivité des principaux mécanismes de fonctionnement à l'échelle d'une crue, les meilleurs indicateurs susceptibles de donner une information sur les types d'eau participant à l'écoulement de la source seraient la température, puis l'observation du système calco-carbonique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLEN M.J., MORRISON J.M. (1973). Bacterial movement through fractured bed rock. *Ground Water*, 11(2): 6-10.
- BAKALOWICZ M. (1979). Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse doct. Etat, Paris, 269 p..
- BAKALOWICZ M. (1980). Un précieux informateur hydrogéologique : le système chimique CO₂-H₂O-Carbonate. C.R. Réunion S.G.F.-A.G.S.O.-S.F.M.C. "Cristallisation - Déformation - Dissolution des carbonates", pp. 11-23.
- BELL R.G. (1976). Persistence of fecal coliforms indicators bacteria on alfalfa irrigated with municipal sewage lagoon effluent. *J. Environ. Qual.*, 5(1): 39-42.
- BOUTIN P. (1982). Risques sanitaires provenant de l'utilisation d'eaux polluées ou de boues de station d'épuration en agriculture. Techniques et Science Municipales. *L'eau*, déc. 1982: 547-557.
- BURGER A. (1983). Prospection et captage des eaux souterraines des roches carbonatées du Jura. *Gaz-Eau-Eaux usées*, 63ème année, 9: 533-583.
- CAPDEPUY M., CANTET P., DARGELOS V.R., NGUYEN BA C., CANELLAS J. (1983). Le comportement d'éventuels contaminants bactériens dans un péroïde végétal-minéral (BARBOTAN LES THERMESGERS). *Journ. Français d'Hydrologie*, 14(fasc. I) n°40: 113-119.
- CARBON C. (1969). Les infections à pyocyaniques. *Concours Médical*, 91(7): 1289-1296.
- CHAUVE P., MANIA J., MORRE-BIOT N., REMY F. (1982). Evolution physico-chimique des eaux souterraines contaminées à travers un milieu calcaire fissuré dans la région de Baume-les-Dames (Doubs). 3ème Colloque Hydrologie en pays calcaire - Neuchâtel. Ann. Sci. Univ. Besançon, Géol. Mém. 1, p. 103-114, 1 carte, 1 coupe, 1 tabl., 3 paragraph..
- CIAN-MAURIN L. (1980). Mise au point d'une méthode d'isolement de *P. aeruginosa* dans l'eau. Application de cette méthode à la recherche de *P. aeruginosa*, dans le bassin hydrographique de la Seine. Thèse Doctorat de 3ème cycle, n°6, Univ. Paris V.
- DROGUE C. (1964). Sur l'étude hydrogéologique des principales résurgences de la région nord-montpelliéraine. Mém. C.E.R.H., tome 1, pp. 62-121, 25 fig..
- DROGUE C. (1969). Contribution à l'étude quantitative des systèmes hydrologiques karstiques d'après l'exemple de quelques karsts périméditerranéens. Thèse Doct. Sci. Nat., Montpellier, 452 p..
- DUBOIS P. (1964). Les circulations souterraines dans les calcaires de la région de Montpellier. *Bull. E.R.G.M.*, (2): 1-31.
- DUBOIS P. (1972). Notes karstologiques sur le Causse de l'Hortus (Hérault). *Etude quaternaires* 1: 39-51.
- FABRE G., MAURIN Y. (1985). Environnement et hydropollution du site de Bramabiau dans les grands Causses français. *Ann. de la Soc. Géol. de Belgique*, 108: 49-53.
- FABRIS H. (1970). Contribution à l'étude de la nappe karstique de la source du Lez. Thèse 3ème cycle Montpellier, 78 p..

- FAVERO M.S., CARSON L.A., BOIKD W.W., PETERSEN N.J. (1971). *Pseudomonas aeruginosa* : growth in distilled water from hospitals. *Science*, 173: 836-838.
- GUDDING R., KROGSTAD D. (1975). The persistence of *E. coli* and *Salmonella typhimurium* in fine grained soil. *Acta Agriculturae Scandinavica*, XXV(4): 285-288.
- GUILBOT A. (1975). Modélisation des écoulements d'un aquifère karstique (liaison pluie-débit). Application aux bassins de Saugras et du Lez. Thèse d'Univ. Montpellier, 117 p., 60 fig..
- JAMIER D. (1976). Pollution et protection des aquifères karstiques. Bull. Centre d'Hydrogéol. (édité à l'occasion du 10ème anniversaire de la création du Centre d'Hydrogéologie), Neuchâtel, n°1, pp. 67-76.
- KIBBEY H.J., HAGEDORN C., Mc COY E.L. (1978). Use of fecal streptococci as indicator of pollution in soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 35(4): 711-717.
- LABELLE R., GERBA C. et al., (1980). Relationships between environmental factors, bacterial indicators and the occurrence of enteric viruses in estuarine sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 39(3): 588-596.
- LECLERC H., BUTTIAUX R., GUILLAUME J., WATTRE P. (1977). Microbiologie appliquée Ed. Doin, Paris, 228 p..
- LEGRAND B. (1976). Le lessivage des sols par les eaux météoriques. Exemples de deux bassins nord-Montpelliérains. Thèse de spécialité Géol. Appl., 97 p..
- LE MINOR L., VERON M. (1982). Bactériologie médicale. Flammarion. Médecine Sciences, p. 371.
- MARJOLET G., SALADO J. (1975). Remarques sur les relations observées entre crues et variations chimiques de l'eau d'une émergence karstique. 3ème R.A. S.T., Montpellier, 1975, p. 247.
- MARJOLET G., SALADO J. (1976). Contribution à l'étude de l'aquifère karstique de la source du Lez (Hérault). Aspect hydrochimique et aspect hydrodynamique. Thèse Doc. Spécial. Géol. Appl. Montpellier, 240 p..
- MBA M. (1971). Contribution à l'étude des variations des teneurs en chlore des eaux souterraines de quelques karsts de la région languedocienne. 113 p., Thèse 3ème cycle Montpellier.
- MISEREZ J.J., SIMEONI G.P., BERNASCONI R., BRANDT C., DEPALLENS D., DOMONT G., KELLENBERGER Y.S., MOESCHLER D., VOISIN G. (1976). Essais sur le pouvoir d'auto-épuration des eaux karstiques. *Stalactites*, 26(1): 13-28, 4 réf., 15 ill..
- MOESCHLER P., MULLER I., SCHOTTERER U., SIEGENTHALER U., (1982). Les organismes vivants, indicateurs naturels dans l'hydrodynamique du karst, confrontés aux données isotopiques, chimiques et bactériologiques, lors d'une crue de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois, Suisse). *Beitr. z. Geol. d. Schweiz-hydrologie*, 28: 213-224.
- POSTGATE J.R. (1967). Viability measurements and the survival of microbes under minimum stress. In *Advances in Microbial Physiology*. Ed. by AH ROSE and J.F. WILKINSON, vol. 1, Academic Press.
- RODIER J. (1978). L'analyse de l'eau. Dunod, 6ème éd., 1123 p..
- ROQUES H., (1972). Sur une nouvelle méthode graphique d'étude des eaux naturelles. *Ann. Spéléo.*, 27(1): 79-92.
- RUDOLF W. et al., (1951). Contamination of vegetables grown in polluted soils. I. Bacterial contamination. *Serv. Ind. Wastes*, 23: 253-268.
- SCHOELLER H. (1962). Les eaux souterraines. Masson et Cie éd., Paris, 642 p., 187 fig..
- UIL H. (1978). Application du carottage thermique et de l'hydrochimie à l'étude des circulations d'eau. Thèse Doc. Ing. Sciences de l'Eau, Montpellier, 110 p., 3 An..
- VAIL P.R., HARDENBOL J. (1979). Sea-level charges during the Tertiary. *Oceanus*, 22: 71-79.