

# Influence des événements hydroclimatologiques et du caractère lithologique sur la minéralisation des eaux karstiques. Exemple : plateau de Besançon (Jura externe, France)

Ahmed Abdelgader, Farid Achour et Jacques Mudry

C.R. Acad. Sci. Paris,  
t. 321, série II a,  
p. 129 à 135,  
1995

Laboratoire de Géologie Structurale et  
Appliquée,  
Université de Franche-Comté,  
1, place Leclerc,  
25030 Besançon Cedex, France.

**Résumé** L'analyse factorielle discriminante est un puissant moyen qui a permis de comparer deux paramètres qualitatifs influençant la minéralisation des eaux d'aquifères karstiques : les facteurs intrinsèques (lithologie, structure, unités hydrogéologiques...) et les événements hydroclimatologiques (épisodes pluvieux, saison...). Testée sur un ensemble de sources karstiques géographiquement dispersées et développées dans des séries stratigraphiques différentes, l'analyse discriminante révèle la prédominance du facteur systémique sur les phénomènes hydroclimatologiques dans l'acquisition de la minéralisation.

**Mots-clés** : Facteur prédominant, Climat, Jura, Karst, Minéralisation, Analyse discriminante.

**Abstract** **The influence of the hydroclimatological events and the lithological character on the mineralization of karstic waters. Example: the plateau of Besançon (outer Jura, France)**

Discriminant factorial analysis is a powerful means of comparing two qualitative parameters influencing the mineralization of waters of karstic aquifers: intrinsic factors (lithology, structure, hydrogeological units, etc.) and hydroclimatic events (rainy episodes, season, etc.). Tested on a set of karstic springs geographically dispersed and developed in different stratigraphical series, discriminant analysis reveals the predominance of the systemic factor over hydroclimatic phenomena in the acquisition of the mineralization.

**Keywords**: Prevailing factor, Climate, Jura, Karst, Mineralization, Discriminant analysis.

**Abridged  
English  
Version**

THE plateau of Besançon is situated at the rim of the first chain of the Jura (France). It spreads between the large valley of the Ognon to the north and the enclosed valley of the Doubs to the south. With monoclinical structure, it is marked by a brittle tectonic characterized by NE-SW faults, and consists mainly of network of Middle Jurassic limestones (fig. 1). The vegetation cover is largely forest and constitutes a zone of underground water. The morphology is varied and shows a concentration of dolines and lapiaz.

In this sector of even rain distribution, several karstic springs emerge whose physical

and chemical composition were followed for a cycle and half (of January 1991 to August 1992) with a weekly sampling, sometimes every ten days. Waters of these springs possess a mineralization linked generally to the media crossed to the time water stays in these environments and to hydroclimatological characteristics.

We attempted to answer the question of what factor dominates in the acquisition of mineralization: whether it is a character of the system (lithology, structure of the drainage, gradients) or the climatic influence (season, hydrometeorological episodes).

**Note**

présentée par  
Georges Pédro.

remise le 19 décembre 1994,  
acceptée après révision  
le 14 avril 1995.

The acquisition of much physical and chemical data on outlet waters allows the application of some multidimensional statistical tools. These methods consist in approaching the hydrochemical behaviour of the aquifers indirectly (Bakalowicz, 1977 and 1979; Mudry, 1986 and 1991). It is a powerful way of anticipating modes of the character on the basis of values taken, which shows the distinction from principal components analysis in processing only quantitative variables (Bouroche and Saporta, 1983).

The introduction of a qualitative factor within a population allows the division of this population into different groups and each individual to be assigned to one sole group.

The principle of the discriminant factorial analysis consists in calculating the principal components of the matrix of the centres of mass of definite groups *a priori*, that is to say seek axes onto which vector point-media (centres of mass of groups) project with the maximum of dispersion (to maximize the variance between centres of gravity of groups). Then one can clarify the properties that can distinguish the different groups.

Thus, the variance of a character breaks down into a sum of two terms:

- variance interclasses linked to the dispersion of gravity centres of classes around the origin;

- variance belonging to the class, linked to the dispersion of observations belonging to a class around their respective gravity centres. If the individual is close to the centre of mass of its group, it is "well classified". In the case where the distance to the centre of mass of its group is superior to that to the centre of mass of another group, it is "poorly classified" and it will be reassigned to this last group.

The cross of discriminant analysis of a population consists of comparison of the distribution of the different group according to different qualitative variables. This is performed by undertaking several treatments on the same data.

In our case one is attempting to study if the chemical water composition of springs is attributable to the character of the system (lithology, structure of the drainage, gradients) or to hydroclimatic phenomena (season, hydrometeorological episodes). Therefore one has crossed two qualitative factors "season" and "system" by undertaking two different analyses on the same series of data (Abdelgader, 1994).

The application to a karstic region such as the plateau of Besançon shows that the mineralization is conditioned more by the lithological and structural character (fig. 2, table I) than by the hydroclimatic factor (rainy episodes) (fig. 3, table II).

## I. INTRODUCTION

Les eaux provenant du milieu karstique acquièrent une composition chimique liée en grande partie aux milieux traversés et au temps de séjour des eaux dans ces milieux ; on note aussi l'influence de l'environnement et des activités anthropiques. La réponse physico-chimique de l'exutoire est influencée par la lithologie, l'unité de drainage et les événements pluvieux et hydroclimatiques. Notre but est de savoir si les variations physico-chimiques sont plus conditionnées par les facteurs environnementaux (externes, météoriques...) ou par les facteurs intrinsèques du système (lithologie, structure du drainage, gradients...). A cette fin,

nous avons utilisé les analyses discriminantes croisées qui permettent de tester de telles hypothèses, en comparant le rôle de variables qualitatives telles que la saison ou le système.

## II. PRINCIPE DE L'ANALYSE FACTORIELLE DISCRIMINANTE

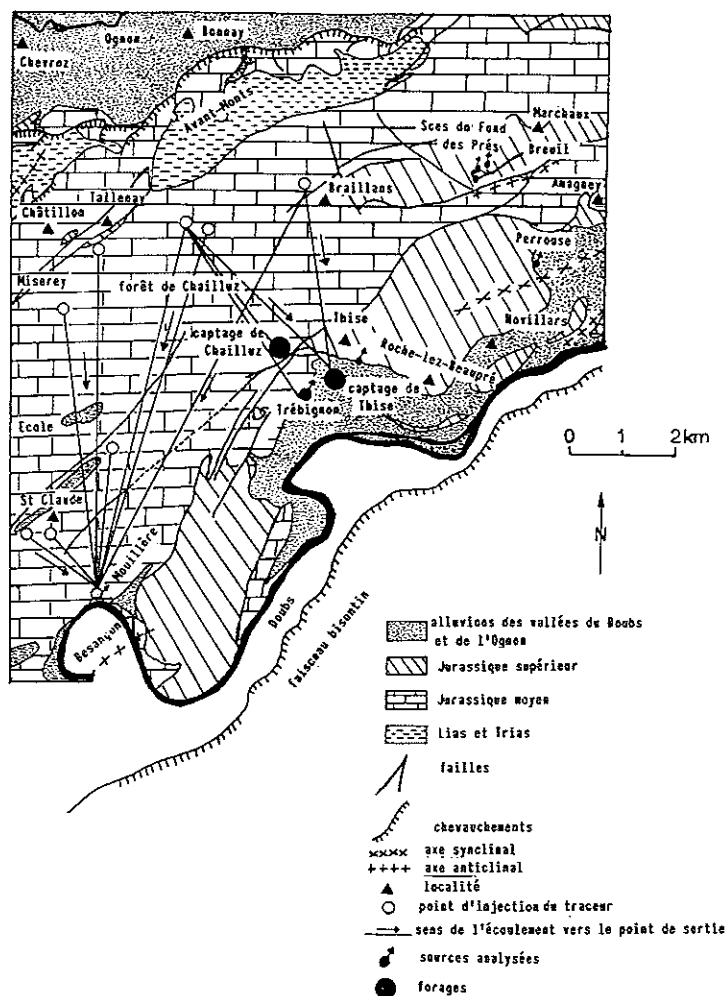
L'analyse factorielle est une méthode d'analyse statistique multidimensionnelle, dérivée directement de l'analyse en composantes principales. Comme toute analyse multidimensionnelle, elle traite des tableaux contenant  $m$  observations en lignes et  $n$  variables en colonnes, mais diffère des autres méthodes par une subdivision en  $g$  groupes.

Son but est d'étudier le rôle d'une variable qualitative (l'indice de groupe) en plus des variables quantitatives (Lefèvre, 1980 ; Bourroche et Saporta, 1983 ; Mudry, 1986 et 1991). L'introduction d'une variable qualitative au sein d'une population permet la division de cette population en différents groupes, chaque individu étant affecté à un seul ensemble (groupe). La discrimination des groupes consiste à maximiser la variance entre les barycentres et on peut mettre en évidence les propriétés qui les distinguent les uns des autres.

Le principe de la méthode consiste à chercher les axes sur lesquels les vecteurs point-moyen (barycentres des groupes définis *a priori*) se projettent avec le maximum de dispersion. Cela est obtenu par le calcul des composantes principales de la matrice des barycentres. Les valeurs propres de cette matrice caractérisent les axes discriminants, et les vecteurs propres représentent la part de chaque variable de départ dans la définition des axes. Si l'individu est plus proche du barycentre de son groupe d'appartenance, il est dit « bien classé ». Il est dit « mal classé » dans le cas où sa distance au barycentre de son groupe d'appartenance est supérieure à celle au barycentre d'un autre groupe ; ainsi il est réaffecté à ce dernier. L'analyse discriminante croisée permet donc à la fois des choix de partition d'une population statistique et l'utilisation de ces taxons comme classification. Ceci est réalisé en effectuant plusieurs traitements sur les mêmes données.

### III. APPLICATION ET RÉSULTATS

L'application est faite sur le secteur de Besançon (Doubs). Cette zone, limitée par la vallée du Doubs au Sud, est constituée par le plateau de Besançon dont la structure monoclinale est traversée par un réseau de failles orientées NE-SW (fig. 1). Les principales formations appartiennent au Jurassique moyen et supérieur. La couverture végétale est à dominance forestière, et la morphologie est variée et montre une concentration de dolines, lapiaz et vallées sèches. Il pleut en moyenne un jour sur trois. La lame moyenne



des précipitations enregistrées pendant 30 cycles est de 1 105 mm (elle a été de 1 144 mm au cours du cycle 1991/1992).

Dans cette zone, la composition physico-chimique de six sources a été suivie pendant un cycle et demi (de janvier 1991 à août 1992), avec un pas d'échantillonnage hebdomadaire, parfois décadaire :

– source du Trébignon : constituant l'un des exutoires de l'impluvium de Thise-Chailluz, elle émerge au contact des calcaires du Bathonien-alluvions du Doubs ; son débit moyen était de 108 ls<sup>-1</sup> en 1991/1992 ;

– source de Roche-lez-Beaupré : à débit très faible, elle émerge à la limite de captivité de la nappe au contact du Rauracien et des alluvions du Doubs ;

Fig. 1 Carte géologique et structurale du secteur étudié et la situation des sources surveillées.

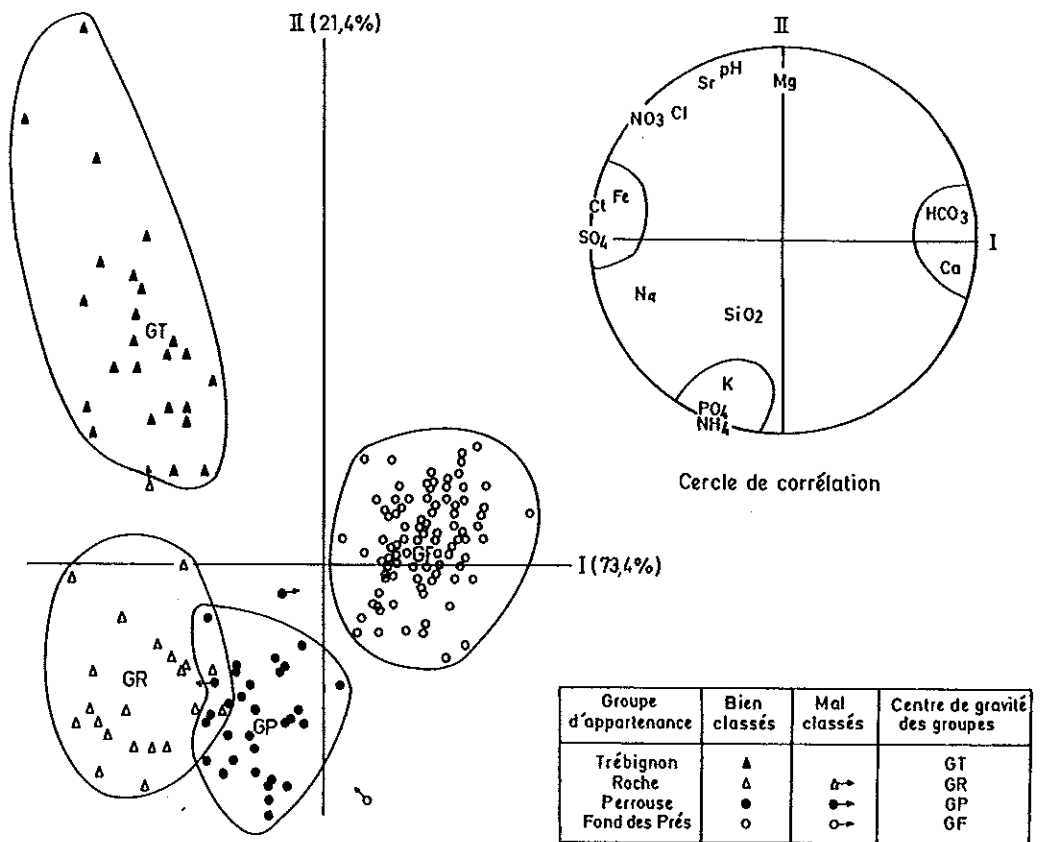
Geological and structural map, and location of monitored springs.

Fig. 2 Analyse discriminante des données des sources étudiées (plan I-II).

Classification par système.

Discriminant analysis of chemical data of studied springs (factor plan I-II).

Classification by system.



– source de la Perrouse : elle émerge, à faible débit, dans la plaine du Doubs au contact des marno-calcaires de l'Argovien et des alluvions anciennes ;

– sources du Fond des Prés : elles sont au nombre de trois, et constituent un système homogène dont le débit décroît de l'amont vers l'aval (Abdelgader, 1994) ; la source la plus occidentale représente 90 % du débit total mesuré à 8 l s<sup>-1</sup>.

Les fréquences d'échantillonnage : hebdomadaire, journalier ou horaire au cours du cycle hydrologique donnent les mêmes informations, en utilisant l'analyse statistique multidimensionnelle, sur le fonctionnement hydrocinématique et les phénomènes responsables des variations physico-chimiques des aquifères karstiques. Cela a été observé, sous des climats variables, sur des systèmes karstiques diffé-

rents (Bakalowicz, 1977 ; Blavoux et Mudry, 1986 et 1988). Donc la fréquence hebdomadaire du suivi physico-chimique est suffisante, pour cette étude statistique, tant que le nombre important de données couvre toutes les situations (hautes eaux, basses eaux, étiage...).

Dans le but de déterminer si la minéralisation de ces différentes sources est plus conditionnée par les événements hydroclimatiques (saison, épisodes hydrométéorologiques...) ou bien par le contexte hydrogéologique (lithologie, unités structurales, organisation du système de drainage...), nous avons croisé deux variables qualitatives en effectuant sur le même jeu de données deux analyses discriminantes, l'une avec un groupe « saison », l'autre avec un groupe « système ». La population est subdivisée dans l'espace en 4 groupes (système) : Trébi-

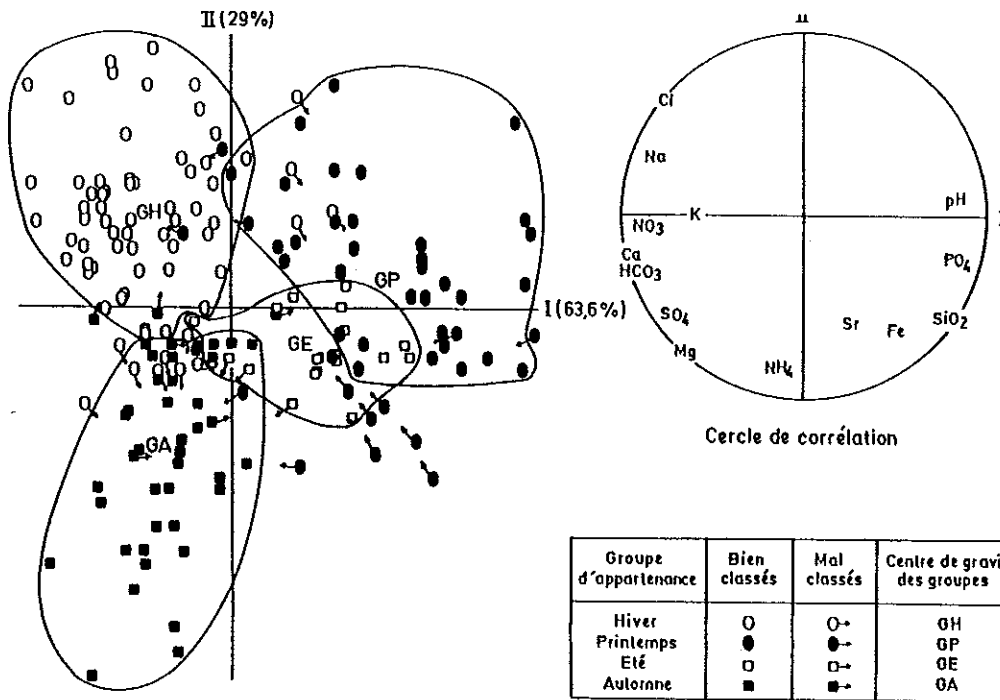


Fig. 3 Analyse discriminante des données des sources étudiées (plan I-II).

Classification par saison.

Discriminant analysis of chemical data of studied springs (factor plan I-II).

Classification by season.

**Tableau I** Classement par système des sources étudiées.

Classification of studied springs by system.

Groupe d'affectation	Groupe d'appartenance				Bien Classés %	% global de Bien classés
	Trébignon	Roche	Perrouse	Fonds des Prés		
Trébignon	24	0	0	0	100	
Roche	1	21	0	0	95,45	96,7
Perrouse	0	1	31	1	93,93	
Fonds des Prés	0	1	2	102	97,14	

**Tableau II** Classement par saison des sources étudiées.

Classification of studied springs by season.

Groupe d'affectation	Groupe d'appartenance				Bien Classés %	% global de Bien classés
	Hiver	Printemps	Été	Automne		
Hiver	57	3	2	8	81,42	
Printemps	4	32	9	2	68,08	79,3
Été	0	0	17	3	85	
Automne	3	1	3	40	85,1	

gnon, Roche, Perrouse et Fond-des-Prés [les sources du Fond-des-Prés constituent un même système homogène (Abdelgader, 1994)], et dans le temps en 4 groupes (saison) : hiver, printemps, été et automne. 184 observations et 16 variables ont été prises en compte.

### 1. Principe de classification

Les groupes ainsi déterminés sont appelés « groupes d'appartenance ». Grâce à la variance apportée par chacun des individus (prélèvements), l'algorithme réaffecte cet individu à l'un des groupes de départ ; les

individus sont alors reclassés dans ce que l'on appelle les « groupes d'affectation ». Si l'individu est réaffecté à son groupe d'appartenance, il est dit « bien classé », s'il est réaffecté à un autre groupe, il est dit « mal classé ». Cette méthode permet donc de vérifier l'adéquation des groupes déterminés *a priori* aux facteurs hydroclimatiques (saison) et hydrogéologiques (système).

## 2. Résultats

Selon la variable « système » (fig. 2 et tableau I), la projection des variables sur le plan factoriel I-II montre que l'axe I est déterminé par les éléments provenant de l'aquifère karstique ( $\text{HCO}_3$ , Ca) qui sont opposés aux traceurs (Fe,  $\text{SO}_4$ ). Il représente l'acquisition de la minéralisation. La projection des individus suit fidèlement celle des variables, l'axe I oppose les sources du Fond des Prés au reste des sources étudiées. Les sources du Fond des Prés sont très minéralisées en traceurs calco-carboniques et représentées, dans l'espace des variables, par le pôle ( $\text{HCO}_3$ , Ca). Par contre, le contenu chimique des sources du Trébignon, Roche et la Perrouse est riche en éléments d'infiltration et d'apports anthropiques. Elles présentent un poids important déterminé, dans l'espace des variables, par les pôles (Fe,  $\text{SO}_4$ ) et ( $\text{PO}_4$ , K,  $\text{NH}_4$ ).

L'axe II est caractérisé par les éléments chimiques issus de l'extérieur de l'aquifère (infiltration et pollution) tels que :  $\text{PO}_4$ , K,  $\text{NH}_4$ , Cl. Il représente l'origine spatiale du contenu chimique.

Dans l'espace des individus, et selon le principe de classification, on note que les individus sont le plus souvent réaffectés à leur groupe d'appartenance (96,7 % de bien classés). Toutes les sources sont autonomes, avec de très faibles échanges d'individus (3,3 % de mal classés). On remarque que la source du Trébignon est complètement distincte, (100 % de bien classés), ce qui démontre le rôle de la lithologie : cette source est la seule issue du Jurassique moyen. Le choix des groupes d'appartenan-

ce sur des critères géographiques ou géologiques était donc pertinent.

Selon la variable qualitative « saison » (fig. 3 et tableau II) : l'axe I représentant la minéralisation, oppose le printemps et l'été à l'automne et l'hiver. L'ensemble des groupes présente des réaffectations réciproques, avec un pourcentage global des individus bien classés de 79,3 % (20,7 % de mal classés). On remarque que le printemps possède le plus faible pourcentage de bien classés (68 %) ; cette saison est caractérisée par une variabilité chimique importante (lors des crues) traduisant l'écoulement des eaux diluées de l'infiltration et aussi celles des réserves.

A partir des deux classements, on note que la variabilité hydrochimique des différentes sources est davantage influencée par les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère que par la succession d'événements hydroclimatiques. Cette analyse met donc en évidence l'autonomie des différents systèmes aquifères.

## IV. CONCLUSION

L'analyse factorielle discriminante est une méthode décisionnelle qui permet de tester (en deux calculs sur le même jeu de données) deux paramètres qualitatifs et montre lequel est le principal responsable de la minéralisation des eaux des différents aquifères étudiés. Les différents systèmes sont autonomes et présentent des variations hydrochimiques dépendant plus des caractéristiques de l'aquifère (lithologie, unités hydrogéologiques...) que des événements pluvieux (saison), en d'autres termes que les facteurs hydroclimatiques ont un poids plus faible dans l'acquisition de la minéralisation que les facteurs intrinsèques. L'exemple traité montre l'adaptation de l'analyse discriminante croisée à la validation d'hypothèses de travail, et à la détermination du facteur présentant le meilleur pouvoir discriminant au sein des populations statistiques.

- ABDELGADER, A., 1994. Essai de caractérisation des bassins versants dans la zone des Avant-Monts (Doubs), *Thèse*, Université de Franche-Comté, Besançon, déposée au Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée de Besançon et à la bibliothèque de la faculté des Sciences de Besançon, 194 p.
- BAKALOWICZ, M., 1977. Étude du degré d'organisation des écoulements souterrains dans les aquifères carbonatés par une méthode hydrogéochimique nouvelle, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 284, série D, p. 2463-2466.
- BAKALOWICZ, M., 1979. Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification, *Thèse Sc.*, Université de Paris VI, en dépôt à la bibliothèque des Sciences de la Terre de l'université de Paris-VI, 269 p.
- BAKALOWICZ, M., 1982. La genèse de l'aquifère karstique vue par un géochimiste, *Actes « Reunion Monografica sobre el karst »*, Larra (Espagne), p. 159-174.
- BLAVOUX, B. et MUDRY, J., 1986. Influence des pluies estivales sur la qualité des réserves de l'aquifère karstique : le rôle du sol et de l'épikarst dans la concentration des chlorures, *Bull. Soc. géol. France*, 4, p. 667-674.
- BLAVOUX, B. et MUDRY, J., 1988. Importance of the sampling rhythm in the hydrochemical study and hydrokinematical knowledge of karstic aquifers, *Ass. Int. Hydrogéol.*, 10-15 oct., Guilin (Chine), 21, 2, p. 864-869.
- BOUROCHE, J. M. et SAPORTA, G., 1983. L'analyse des données. Que sais-je ? 2<sup>e</sup> édition, 125 p.
- LEFEBVRE, J., 1980. Introduction aux analyses statistiques multidimensionnelles, Masson, Paris, 2<sup>e</sup> éd., 259 p.
- MUDRY, J., 1986. Analyse discriminante des données hydrochimiques des aquifères karstiques. Colloque de Lille-CNRS-GRECO 35 (Hydrogéologie), *Ann. Scientif. Univ. Besançon, Géologie*, 4, 7, p. 122-123.
- MUDRY, J., 1991. L'analyse discriminante, un puissant moyen de validation des hypothèses hydrogéologiques, *Revue Sci. de l'eau*, 4, p. 19-37.

---

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES