

# L'analyse discriminante, un puissant moyen de validation des hypothèses hydrogéologiques

Discriminant analysis, an efficient means  
for the validation of geohydrological hypothesis

J. MUDRY<sup>1</sup>

Reçu le 20 juin 1989, accepté pour publication le 25 juin 1990\*

## RÉSUMÉ

L'étude des tableaux de données hydrochimiques acquises au cours de campagnes synchrones (« instantanés ») ou de suivis diachroniques à pas régulier (hebdomadaire, quotidien, horaire) s'opère généralement en résumant l'information par des méthodes statistiques. Ces méthodes descriptives, qui négligent nécessairement une partie de l'information initiale, permettent l'interprétation de la structure du tableau de données en termes de fonctionnement hydrocinématique (BAKALOWICZ, 1979, 1982, MUDRY et BLAVOUX, 1986, ROLET et SEGUIN, 1986 a et b).

Ces méthodes, fondées sur l'analyse d'une seule population statistique (bi ou multidimensionnelle) impliquent un mode de raisonnement déductif.

Leur application, ainsi que l'examen du tableau des données brutes (ou de ses représentations graphiques), peut mettre en évidence des sous-groupes fondés sur des critères hydrogéologiques. La réalité de ces sous-groupes peut être testée à l'aide de méthodes statistiques basées sur l'analyse de la variance. Certaines méthodes utilisent le rapport des variances qu'elles comparent à la distribution de Snedecor (analyse de la variance à une ou deux voies), d'autres comparent des variances multidimensionnelles intraclasse à la variance interclasses, c'est le cas de l'analyse discriminante. Les sous-groupes constituent une variable qualitative dont la pertinence peut être démontrée par le calcul. L'analyse discriminante apparaît donc comme un outil décisionnel. Le présent article présente brièvement la méthode du point de vue statistique et montre deux exemples d'application à des sources karstiques.

Le premier exemple traite de l'appartenance chimique d'une phase de basses eaux à la petite crue qui la précède et non à un tarissement au sens hydrocinématique. L'analyse discriminante permet d'affirmer qu'une recharge peu perceptible sur l'hydrogramme de la source amène une évolution chimique irréversible de l'eau de la réserve, responsable des phénomènes

1. Laboratoire d'Hydrogéologie, 33, rue Louis Pasteur, 84000 Avignon (F).

\* Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 octobre 1991.

d'hystérésis observés sur les courbes concentration – débit. Ce cas est celui de l'aquifère de la Fontaine de Vaucluse (Sud-Est de la France) pendant un suivi quotidien d'étiage.

Le second exemple permet de rattacher, par son comportement physico-chimique hebdomadaire, une émergence karstique à une autre et non à une troisième. Ce cas est celui du karst de la Rochefoucauld (Charente), avec les sources du Bouillant, de la Font de Lussac et de la Lèche. Les sources du Bouillant et de la Font de Lussac ont un comportement physico-chimique semblable, alors que la Lèche réagit de manière totalement indépendante. Elle constitue un système globalement distinct du point de vue hydrocinématique, ce qui permet de minimiser les relations mises en évidence par traçage artificiel entre les deux systèmes.

**Mots clés :** *Analyse discriminante, système karstique, hydrochimie, statistique décisionnelle.*

## SUMMARY

The study of the hydrochemical data tables obtained during synchronous sampling (weekly, daily or hourly) is generally carried out by resuming the information by statistical methods. These methods, that disregard part of the initial information, allow to explain the structure of the data table in terms of hydrokinematics (BAKALOWICZ, 1979, 1982 ; MUDRY et BLAVOUX, 1986 ; ROLET et SEGUIN, 1986 a et b).

These descriptive methods, based on the analysis of a single (bi or multi-variate) statistical population, imply deductive reasoning. Their application, as well as the study of the untreated data table (or of its scattergrams), can show the presence of sub-groups based on hydrogeological criteria. The existence of such sub-groups can be tested by statistical methods based on variance analysis. Several methods use the variance ratio and compare it to Snedecor's distribution (single or double path variance analysis), others compare multidimensional intragroup variances to intergroup variance. This is the case with discriminant analysis.

This paper describes the method from a point of view of statistics and presents two examples of application to karst springs.

The first study deals with the chemical relationship of a low-water period with the preceding period of small floods and not to a hydrokinematical water drying up. The discriminant analysis allows to say that a recharge less visible on the hydrograph of the spring induces a non reversible chemical evolution of the reserve water. This is the case of the Fontaine de Vaucluse karst spring (Southeastern France) during a daily low water sampling.

The second study allows to relate a karst spring to another one, thanks to its weekly physico-chemical behaviour, and not to a third one : this is the case of the La Rochefoucauld karst system (Charente, Western France) with the Bouillant, Font de Lussac and Lèche springs. The Bouillant and Font de Lussac springs behave in the same way hydrochemically, whereas the Lèche works independently. It is, hydrokinematically, a separate karst system, even if there is a certain relationship between all of them.

**Key-words :** *Discriminant analysis, karst system, hydrochemistry, decisional statistics.*

## 1 - INTRODUCTION

Les études hydrogéologiques entreprises à Avignon ont pour but commun la définition et l'explication du fonctionnement, en vue de la gestion et de la protection des aquifères – entre autres karstiques –, à partir de leur comportement physico-chimique dans le temps ou l'espace.

Déjà par leur nature numérique, les données hydrochimiques se prêtent à des études statistiques utilisant une métrique simple, euclidienne ou ordinale. La richesse du contenu des tableaux d'analyses physico-chimiques impose un recours aux méthodes d'analyse multidimensionnelle des données, et la disparité des gammes de concentrations, l'utilisation de données centrées réduites. L'analyse en composantes principales s'est donc révélée une méthode parfaitement adaptée à ce type de données. Cette méthode descriptive demande une interprétation déductive en termes de fonctionnement hydrocinématique.

L'analyse discriminante est une méthode d'analyse multidimensionnelle qui se propose de comparer, au sein d'une population statistique rangée dans des groupes définis *a priori*, la variance intergroupes à la variance intragroupes. L'originalité de la méthode par rapport aux autres analyses multidimensionnelles réside donc dans l'utilisation, en plus des variables quantitatives, d'une variable qualitative qui peut représenter le temps ou l'espace. Cette possibilité en fait un outil décisionnel capable de prévoir des modalités du caractère qualitatif à partir des variables quantitatives.

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 phénomènes hydrocinématiques.

Un autre intérêt de la méthode est de resituer des individus supplémentaires (dont la variance ne participe pas à la définition des groupes) par rapport aux groupes d'affectation, ce que permettent également d'autres méthodes d'analyse multidimensionnelles.

L'analyse discriminante permet donc à la fois de valider des choix de partition d'une population statistique et d'utiliser ces taxons comme classification. Elle permet, en hydrogéologie karstique, de valider des choix de classification fondés sur l'analyse des débits et des concentrations, ces taxons correspondant à des phases hydrocinématiques (variable temps) ou à des systèmes (variable géographique).

## 2 - FONDEMENTS STATISTIQUES DE L'ANALYSE DISCRIMINANTE

L'analyse discriminante traite de groupements déterminés *a priori* ou résultant d'une autre analyse multidimensionnelle (LEFEBVRE, 1980).

Le tableau à analyser contient, comme dans toute analyse multidimensionnelle,  $m$  observations en lignes sur  $n$  variables en colonnes, mais ce tableau, à la différence des méthodes descriptives, est subdivisé en  $g$  groupes. L'indice de groupe est, *de facto*, une variable qualitative dont on peut apprécier la pertinence.

La population statistique de départ sera analysée par rapport aux groupes prédéfinis, l'analyse factorielle discriminante étant une méthode décisionnelle en ce sens qu'elle permet de mesurer la séparation des groupes.

Chaque groupe peut être représenté par son barycentre ou point moyen, la matrice des points moyens permettant le calcul de la covariance interpopulations qui représente la dispersion des groupes les uns par rapport aux autres. Une matrice moyenne de covariance intrapopulations est calculée à partir de la dispersion des individus au sein-même de chacun des groupes.

L'analyse discriminante consiste à chercher les axes sur lesquels les vecteurs point-moyen (barycentres des populations) se projettent avec le maximum de dispersion. Cette recherche revient à calculer les composantes principales de la matrice des points moyens. Ces composantes principales sont distinctes de celles de la matrice des observations car la dispersion maximale des centres de gravité est différente de celle de la totalité du nuage de points.

Les valeurs propres de la matrice des points moyens des groupes caractérisent les axes discriminants sur lesquels les points moyens sont le mieux séparés. Les vecteurs propres représentent la part de chaque variable de départ dans la définition des axes.

Les nouvelles variables sont orthogonales et réduites. Les variances des projections des points moyens sont maximales.

La recherche des valeurs propres s'opère par pré- ou postmultiplication itérative de la matrice.

## 3 - APPLICATION À L'IDENTIFICATION DE PHASES HYDROCINÉMATIQUES AU COURS D'UN SUIVI HYDROCHIMIQUE QUOTIDIEN

Exemple de la Fontaine de Vaucluse (Sud-Est de la France)

La Fontaine de Vaucluse est la plus grande émergence karstique française (tableau 1).

Tableau 1 Les systèmes karstiques de la Fontaine de Vaucluse et de la Touvre.

Table 1 The karst systems of Fontaine de Vaucluse and Touvre.

	Vaucluse	Touvre
Localisation en France (départements)	Sud-Est (04, 26,84)	Ouest (16, 24, 87)
Climat	Méditerranéo-montagnard	Océanique
Stratigraphie	Calcaires du Crétacé inférieur	Calcaires du Jurassique moyen et supérieur
Surface de l'impluvium (km <sup>2</sup> )	1 100	500
Débit moyen m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	21	13
Débit minimal m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	4	5
Débit maximal m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	> 150	> 25
Alimentation par pertes de cours d'eau de surface	1%	56%
Bibliographie sommaire	MUDRY J., 1987 PUIG J.M., 1987	ROUILLER D., 1987

Pendant l'étiage centennal de 1981, la Fontaine de Vaucluse a fait l'objet d'un prélèvement quotidien pendant six mois et demi, ce qui représente 252 individus sur lesquels ont été dosées 9 substances dissoutes : sodium, potassium, strontium, magnésium, fer, manganèse, chlorures, sulfates, nitrates (MUDRY, 1986).

Cinq phases (décrue, tarissement, crue d'automne, basses eaux d'automne, crue d'hiver) ont été déterminées (*fig. 3a*) grâce à l'étude des débits et des teneurs en éléments majeurs.

Une analyse en composantes principales a montré (*fig. 1*) que l'axe I était un axe « minéralisation dans l'aquifère principal ». Du côté des abscisses positives, les eaux bien minéralisées en magnésium et sulfates, à faible débit, s'opposent aux eaux peu minéralisées en ces traceurs, à fort débit, du côté négatif. L'axe II en revanche est défini par les pics de chlorures et de nitrates provenant de l'infiltration des précipitations sur l'impluvium (BLAVOUX et MUDRY, 1986). L'indépendance des deux types de fonctionnement, l'un lié aux débits, l'autre aux épisodes pluvieux montre que l'infiltration immédiate, responsable des pics, très marquée par les phénomènes de surface, se fait à très faible débit (elle ne marque pas l'hydrogramme) et fort contraste de concentration avec le réservoir, alors que l'infiltration classiquement appelée « rapide », responsable de la dilution des teneurs, se fait à un débit mesurable.

Sur le diagramme des individus (*fig. 2*), la séquence montre plusieurs types de cheminements :

- parallèle à l'axe des abscisses : la décrue de début d'été apparaît comme un enrichissement progressif en traceurs du réservoir pérenne (zone noyée), corrélativement à la disparition progressive des eaux d'infiltration ;
- aléatoire au sein d'un ensemble homogène : le tarissement montre une stabilisation chimique, aux erreurs analytiques près, de tous les traceurs autour d'une moyenne ;

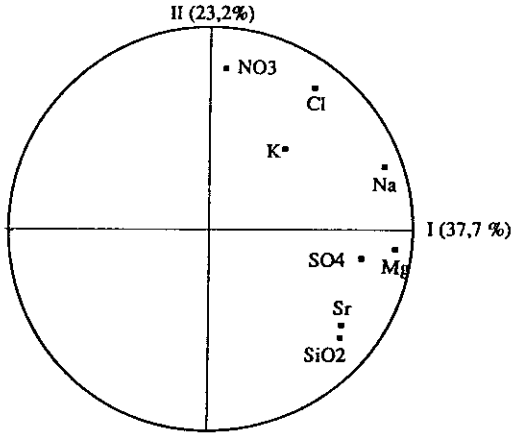


Figure 1 Vaucluse, suivi quotidien – Analyse en composantes principales, espace des variables, plan factoriel I x II.

*Vaucluse, daily sampling – Analysis into principal components, variable space, I x II factor plan.*

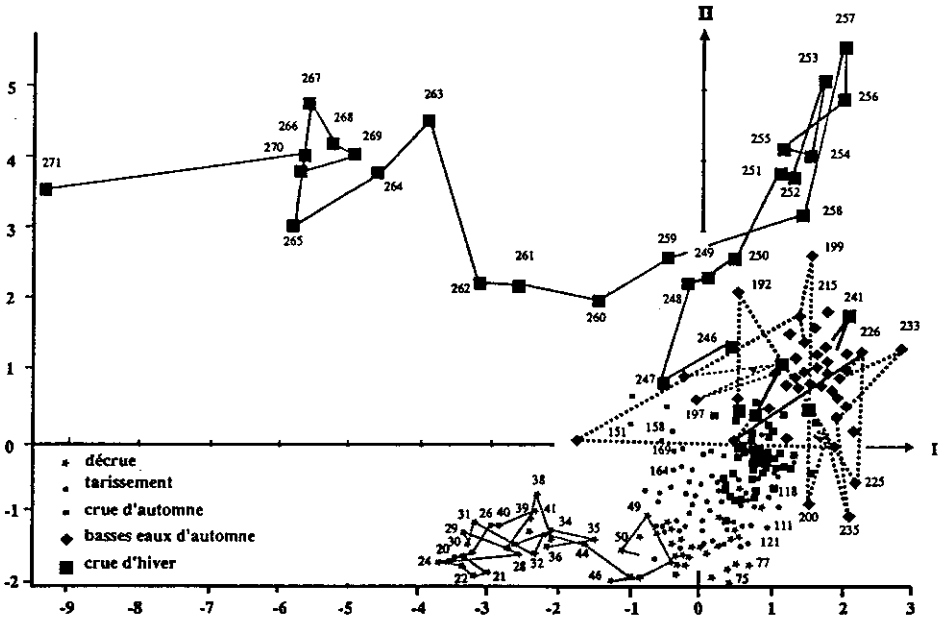


Figure 2 Vaucluse, suivi quotidien – Analyse en composantes principales, espace des individus, plan factoriel I x II (253 individus).

*Vaucluse, daily sampling – Analysis into principal components, individual space, I x II factor plan. (253 individuals).*

- les phases de crue d'automne et de basses eaux d'automne, très proches des points du tarissement, s'en distinguent par une plus grande variabilité et par une abscisse légèrement plus positive sur l'axe II ;
- le début de la crue d'hiver montre une grande influence de l'infiltration très marquée et peu abondante (croissance de l'abscisse sur l'axe II), puis une décroissance rapide de la minéralisation globale corrélativement à la croissance du débit.

Cette analyse fait donc clairement apparaître deux types d'infiltration, l'une à très faible débit et à forte concentration, survenant immédiatement après de très faibles épisodes pluvieux, l'autre plus massive, diluant les teneurs élevées caractéristiques de l'étiage.

Une phase telle que la petite crue d'automne est-elle juste une interruption momentanée du tarissement, ou bien fait-elle cesser ce phénomène en modifiant la composition chimique des eaux de la réserve ? L'analyse discriminante va permettre de répondre à cette question.

Les 252 prélèvements ont été séparés en individus principaux et supplémentaires. Pour que chacun des groupes d'appartenance ait le même poids, seuls les 41 premiers individus ont été analysés comme principaux. Les quatre groupes d'appartenance sont :

- 1 : décrue,
- 2 : tarissement,
- 3 : crue d'automne,
- 4 : crue d'hiver.

L'effectif des individus principaux est donc de  $4 \times 41 = 164$ . Les 88 autres prélèvements ont donc été portés en individus supplémentaires. La fin des phases de décrue, tarissement et basses eaux d'automne (fig. 3a), ainsi que l'intégralité des points de basses eaux d'automne ont été portées en individus supplémentaires, dans le double but de vérifier :

- l'appartenance des fins de phase à l'un ou aux deux groupes d'affectation mitoyens,
- la non-appartenance des individus de basses eaux d'automne au groupe du tarissement *sensu stricto*.

Les hypothèses à tester étant la continuité temporelle des phénomènes (explication du facteur implicite temporel) et le rôle de la recharge automnale.

Les résultats de cette analyse sont synthétisés sur la figure 3b et sur le tableau 2. On remarquera que :

- les individus sont le plus souvent réaffectés à leur groupe d'appartenance (90 % de bien classés) : le choix des groupes d'appartenance sur des critères de pluie, débit et concentration était donc pertinent de même que la variable qualitative temporelle.
- les individus supplémentaires de la fin des épisodes sont majoritairement réaffectés aux groupes mitoyens, ce qui démontre la continuité parfaite des phénomènes hydrocinématiques. On remarquera en particulier que la phase « crue d'automne » démarre dès les précipitations du mois de septembre et avant l'augmentation du débit, ce qui démontre un passage à l'exutoire d'une infiltration immédiate à très faible débit et forte concentration qui marque la chimie et non le débit (MUDRY, 1987),

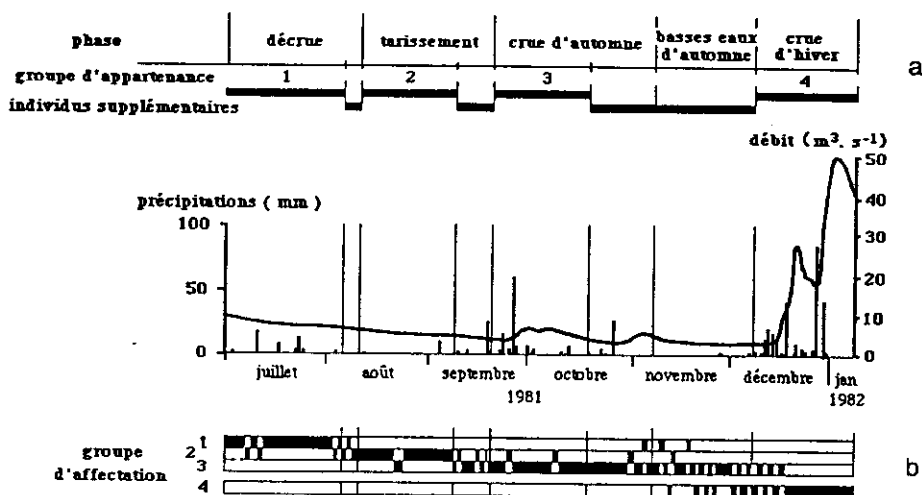


Figure 3 Vacluse, suivi quotidien – Analyse discriminante, affectation des individus aux groupes déterminés *a priori*.

*Vacluse, daily sampling – Discriminant analysis, assignment of the elements to a priori settled groups.*

a. Groupes d'appartenance  
*Belonging groups*

b. Affectation  
*Assignment*

Tableau 2 Réaffectation des individus principaux (A) et affectation des individus supplémentaires (B) – Fontaine de Vacluse, étiage 1981 ( $n = 4 \times 41$ , individus supplémentaires = 88).

Table 2 *Re-assignment of the main elements (A) and assignment of supplementary elements (B) – Fontaine de Vacluse, 1981 low water period ( $n = 4 \times 41$ , supplementary elements = 88).*

A – Groupe d'appartenance				
Groupe d'affectation	Décrue	Tarissement	Crue d'automne	Crue d'hiver
Effectifs total	41	41	41	41
Décrue	38	–	–	–
Tarissement	3	38	4	–
Crue d'automne	–	3	36	5
Crue d'hiver	–	–	1	36
Bien classés	93 %	93 %	88 %	88 %
			90 %	

B – Individus supplémentaires				
Groupe d'affectation	Fin de décrue	Fin de tarissement	Fin de crue d'automne	Fin de crue d'hiver
Effectifs total	8	16	27	37
Décrue	1	–	2	2
Tarissement	7	4	–	1
Crue d'automne	–	12	25	26
Crue d'hiver	–	–	–	8



– la phase de basses eaux d'automne est totalement distincte du tarissement *sensu stricto*, malgré la proximité spatiale du tarissement et de la crue d'automne en ACP : l'épisode de crue d'automne affecte la physico-chimie de la zone noyée en rechargeant les blocs capacitifs qui déstockent cette eau lors des basses eaux ultérieures.

La chimie de cette phase de basses eaux porte donc la marque indélébile de la recharge des réserves opérée par la petite crue d'automne, ces basses eaux ne peuvent dès lors plus être considérées comme une reprise de la phase de tarissement *sensu stricto*, malgré le très faible débit de la source.

#### 4 - APPLICATION A LA TYPOLOGIE D'AQUIFÈRES KARSTIQUES FONDÉE SUR LEUR CONTENU HYDROCHIMIQUE

Exemple des systèmes de la Touvre et de la Lèche (Charente)

Les sources de la Touvre et de la Lèche, près d'Angoulême constituent le deuxième groupe d'émergences karstiques de France (tableau 1).

L'ensemble comprend (fig. 4) les sources de la Touvre : Dormant (non échantillonnée, mais dont les galeries communiquent avec la suivante), Bouillant et Font de Lussac, et 500 mètres plus au SSE, la source de la Lèche.

Les traçages effectués sur les pertes de la Tardoire et du bas Bandiat (fig. 5) ne sont réapparus qu'aux sources de la Touvre, les traçages effectués aux pertes de Feuillade sur le haut Bandiat étant réapparus principalement à la Lèche, et secondairement à la Touvre. Dix-neuf paramètres physico-chimiques ont été utilisés, il s'agit de : température, conductivité, pH, densité optique (turbidité), calcium, magnésium, sodium, potassium, fer, manganèse, aluminium, chlorures, sulfates, bicarbonates, nitrates, silice, gaz carbonique dissous, pression partielle de gaz carbonique calculée, état de saturation vis-à-vis des carbonates.

Les sources de la Touvre se singularisent par leur mode d'alimentation à trois grandes composantes :

- eaux de la réserve des calcaires, conductrices et bien minéralisées en bicarbonates et calcium,
- eaux riches en nitrates, chlorures et sulfates, en provenance de la surface de l'impluvium carbonaté (infiltration locale diffuse),
- eaux sodiques, riches en fer, manganèse, aluminium et silice, provenant des hauts bassins cristallins des rivières Bandiat et Tardoire, issues du Limousin (infiltration par des pertes concentrées).

L'analyse en composantes principales des prélèvements hebdomadaires des rivières Bandiat, Tardoire et Echelle, et des sources du Bouillant, de la Font de Lussac et de la Lèche montre (ROUILLER, 1987 ; BLAVOUX *et al.*, 1988) un axe I (fig. 6) défini, du côté des abscisses positives, par les traceurs du milieu carbonaté (conductivité, calcium, bicarbonates) et du côté négatif par

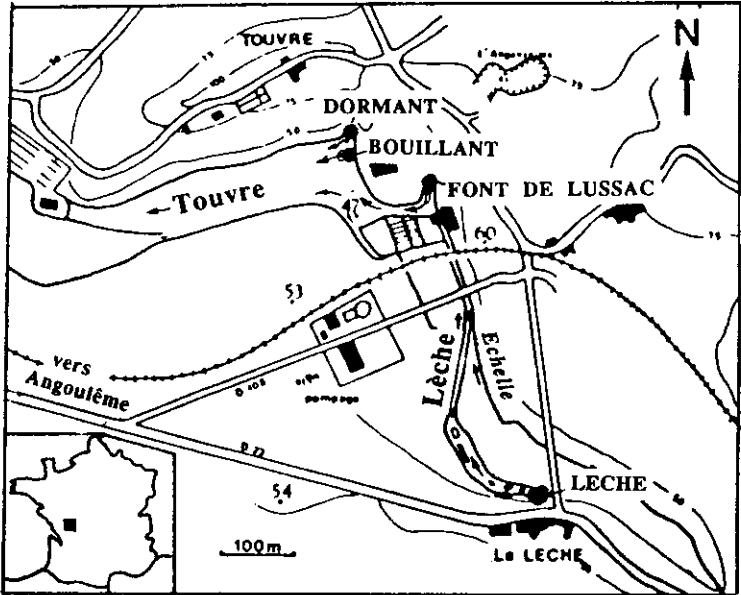


Figure 4 Situation géographique des sources de la Touvre et de la Lèche.  
Geographical location of the Touvre and Lèche springs.

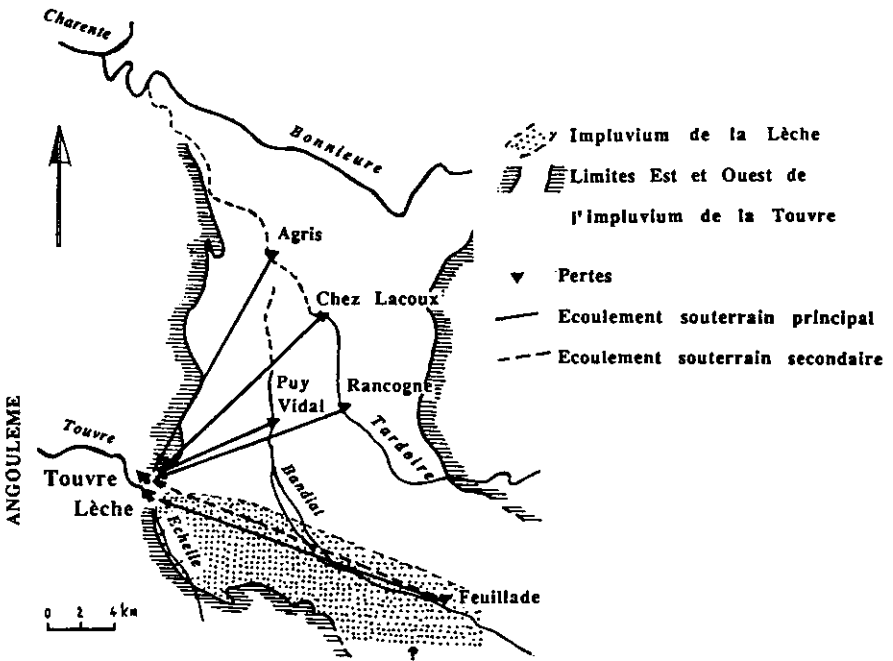
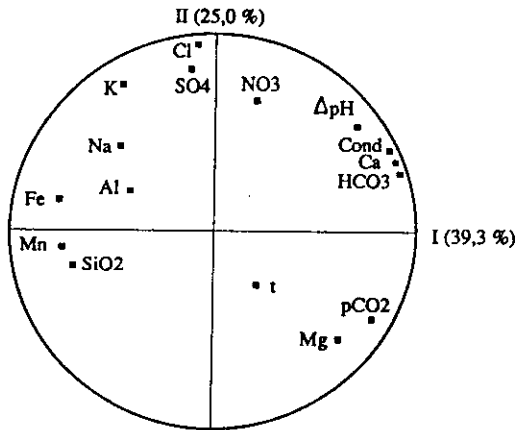


Figure 5 Traçages artificiels sur l'impluvium de la Touvre et de la Lèche.  
Dyings on the intake area of the Touvre and Lèche karst springs.



**Figure 6** Touvre et Lèche : suivi hebdomadaire 1985-86. Analyse en composantes principales, espace des variables, plan factoriel I x II.  
*Touvre et Lèche karst systems : 1985-86 weekly sampling.  
 Analysis into principal components, variables space, I x II factor plan.*

les traceurs de l'infiltration localisée (silice, fer, manganèse) qui apparaissent au cours des crues. Afin de ne traiter que des variables physico-chimiques, le débit n'a pas été analysé. L'axe factoriel II est caractérisé en revanche, du côté positif, par les traceurs de l'infiltration locale diffuse (nitrates, chlorures, sulfates). Le schéma, si l'on excepte l'eau des pertes, est donc tout à fait comparable à celui que l'on a observé à la Fontaine de Vaucluse : là aussi, le transit des eaux de l'infiltration diffuse est indépendant de l'axe lié au débit. Le diagramme des individus (*fig. 7*) montre que :

- les sources de la Touvre (Bouillant et Lussac) occupent la même aire du graphique, ce sont les exutoires d'un même système ;
- la minéralisation des eaux de l'Echelle n'influe pas sur la position des sources : cette rivière contribue peu (ou pas) à leur alimentation ;
- la Lèche est moins influencée par les rivières Bandiat et Tardoire que la Touvre.

Le problème soulevé par l'ACP est donc la séparation des groupes représentant chacune des sources : la physico-chimie des trois exutoires est-elle suffisamment contrastée pour que l'on puisse définir trois systèmes ? En particulier, la Font de Lussac, située entre la Touvre et la Lèche, montre-t-elle seulement des affinités avec la Touvre ? L'analyse discriminante a été utilisée pour répondre à ces questions.

Dans le but de mesurer l'autonomie de comportement des trois exutoires, les analyses chimiques des prélèvements synchrones ont été rangées dans 3 groupes d'appartenance. Dans ce cas, il n'y avait pas d'individus supplémentaires. La figure 8 montre le plan des axes discriminants I et II.

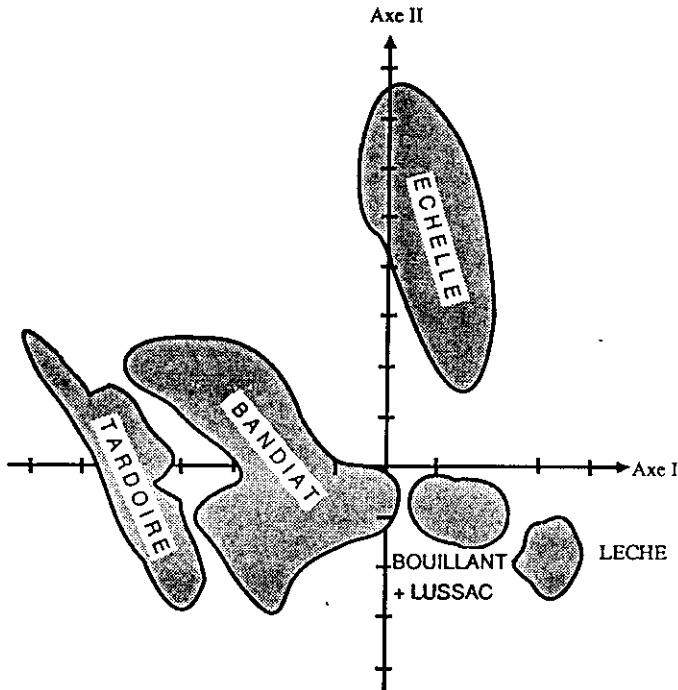


Figure 7 Touvre et Lèche : suivi hebdomadaire 1985-86. Analyse en composantes principales, espace des individus, plan factoriel I x II.

*Touvre and Lèche karst systems : 1985-86 weekly sampling.*

*Analysis into principal components, individuals space, I x II factor plan.*

L'axe I, expliqué par les variables représentant le milieu carbonaté (température, conductivité, bicarbonates, calcium, gaz carbonique) oppose la Lèche (abscisses positives) aux deux autres sources ; l'axe II, expliqué par le traçage des deux types d'infiltration (diffuse en positif, concentrée dans les pertes en négatif), oppose la Font de Lussac au Bouillant, cette dernière étant plus affectée par les pertes d'eaux tracées par le milieu cristallin. Nous avons étudié (ROUILLER, 1987) la réaffectation de ces individus dans les mêmes groupes, après calcul des distances multidimensionnelles. L'étude de la réaffectation des individus porte sur 3 modes de suivi :

- hebdomadaire en 1985-86 (3 x 47 individus),
- quotidien de la crue de l'automne 1985 (3 x 22 individus),
- quotidien de la crue de l'hiver 1985-86 (3 x 36 individus).

Le tableau 3 et les figures 9, 10, 11 montrent que les phénomènes observés sont perceptibles au cours des 3 modes de suivi. La source de la Lèche est totalement distincte de l'ensemble de la Touvre. Les individus du Bouillant et de la Font de Lussac sont globalement distincts, mais avec des mélanges entre les deux groupes. La diffluence Lèche-Touvre évoquée à propos des essais de traçage artificiels est donc un phénomène mineur en regard du

message physico-chimique global des deux systèmes. On a donc affaire à deux systèmes autonomes d'un point de vue chimique, donc peu connectés d'un point de vue hydrocinématique.

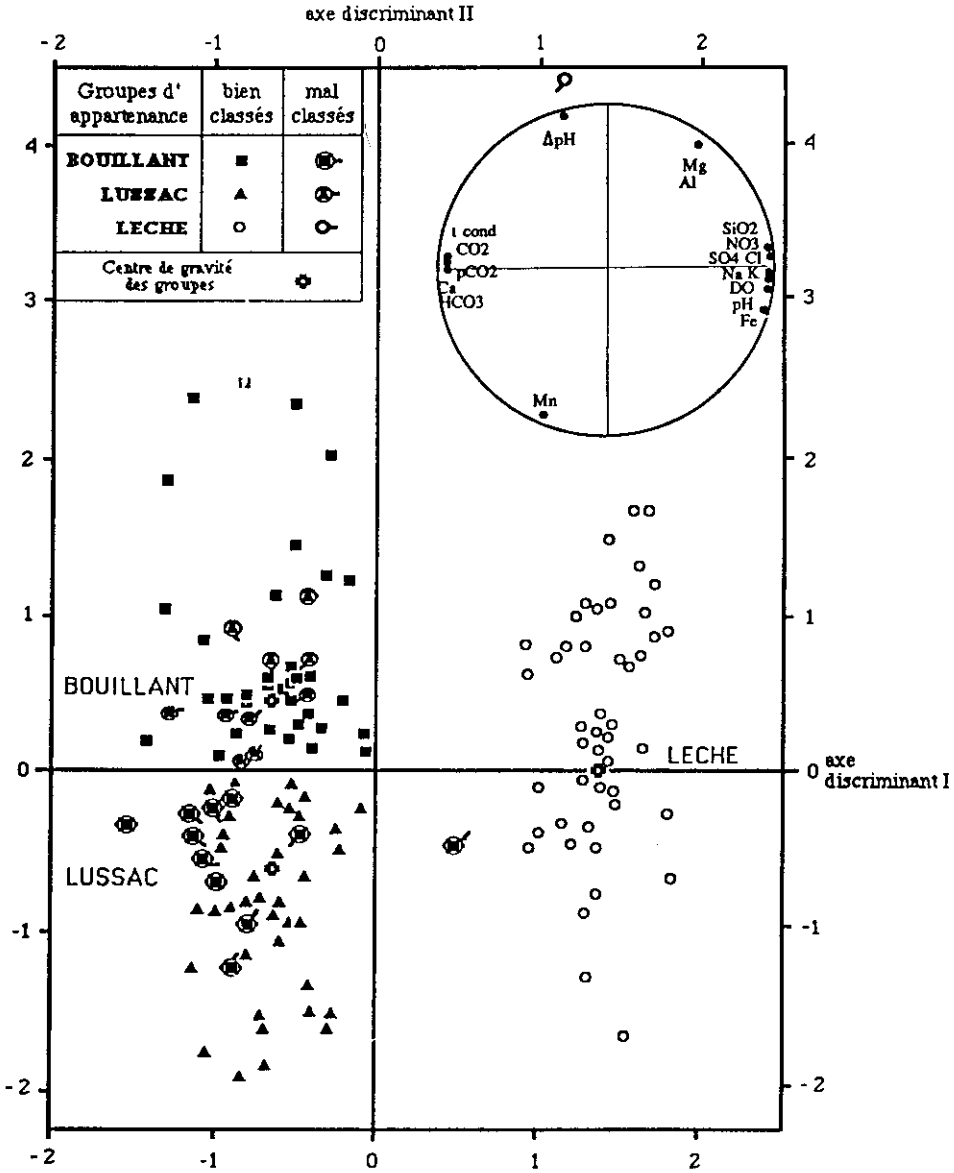


Figure 8 Touvre et Lèche : suivi hebdomadaire 1985-86. Analyse discriminante, axes discriminants I & II. *Touvre and Lèche karst systems : weekly sampling. Discriminant Analysis, discriminant axes I & II.*

**Tableau 3** Réaffectation des individus principaux.  
Sources de la Touvre et de la Lèche : suivi hebdomadaire,  
suivi journalier de la crue d'automne et de la crue d'hiver.

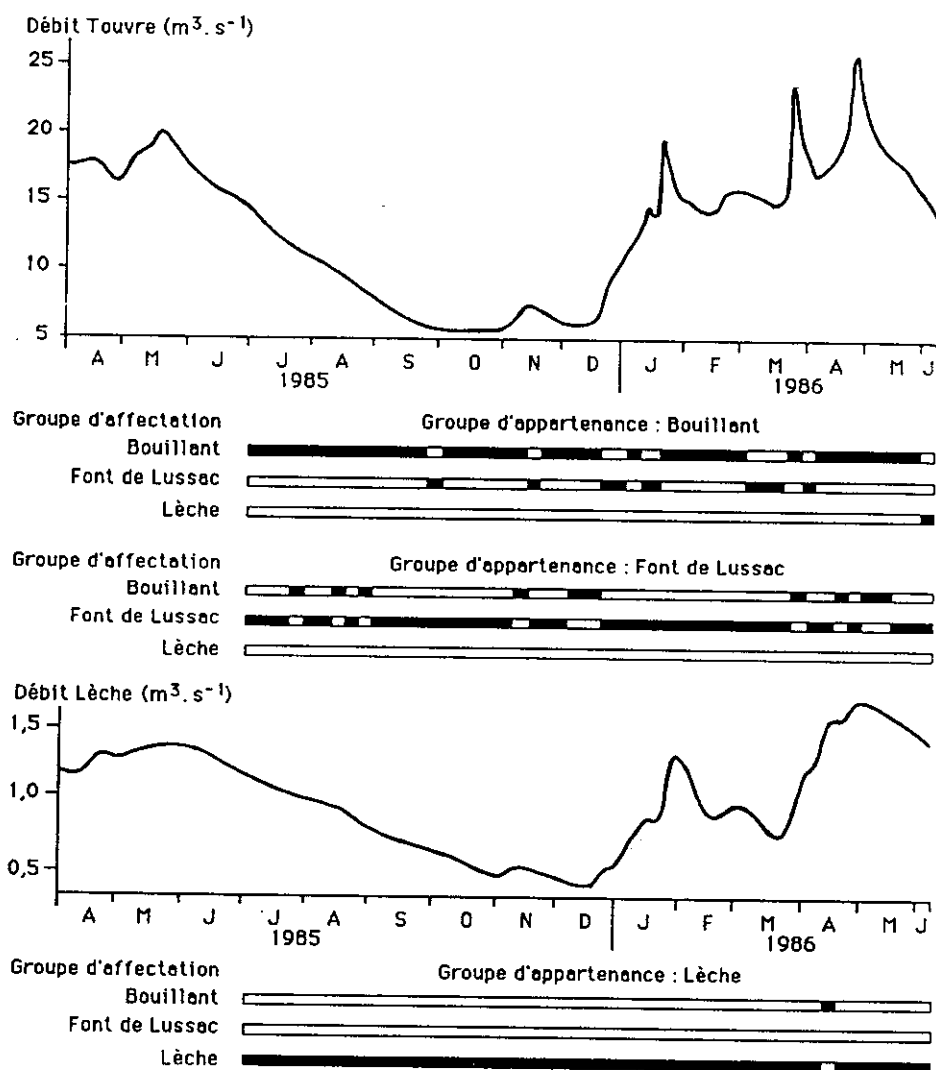
**Table 3** *Re-assignment of the main elements.*  
*Touvre and Lèche springs : weekly sampling,*  
*daily sampling of the autumn and winter floods.*

Groupe d'affectation	Groupe d'appartenance			
	Bouillant	Font de Lussac	Lèche	Bien classés
Cycle 1985-86 – effectif total	47	47	47	–
Bouillant	37	10	1	79 %
Lussac	9	37	–	79 %
Lèche	1	–	46	98 %
Crue automne 1985 – effectif total	22	22	22	–
Bouillant	21	5	–	95 %
Lussac	1	17	–	77 %
Lèche	–	–	22	100 %
Crue hiver 85-86 – effectif total	36	36	36	–
Bouillant	33	4	–	92 %
Lussac	3	32	–	89 %
Lèche	–	–	36	100 %
Bien classés	87 %	82 %	99 %	89 %

## 5 - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les deux exemples traités montrent la parfaite adaptation de l'analyse discriminante à la validation d'hypothèses de travail. Elle autorise la partition d'une population statistique en réajustant les différents groupes en fonction de la distance multidimensionnelle des individus aux centres de gravité des groupes.

Ainsi, après avoir séparé au mieux les centres de gravité, l'algorithme regroupe les points les plus proches de ces barycentres. L'exemple de la Charente démontre l'indépendance d'une source par rapport aux autres, et la dépendance hydrocinématique de ces dernières. L'analyse a donc permis, pour les trois modes de suivi (trois séquences différentes) d'établir que nous sommes en présence de deux systèmes hydrogéologiques juxtaposés, mais peu dépendants : l'ensemble Bouillant-Font de Lussac d'une part, la Lèche d'autre part.



**Figure 9** Touvre et Lèche : suivi hebdomadaire 1985-86.  
Réaffectation des individus.

*Touvre and Lèche karst systems. Weekly sampling, 1985-86.  
Re-assignment of the elements.*

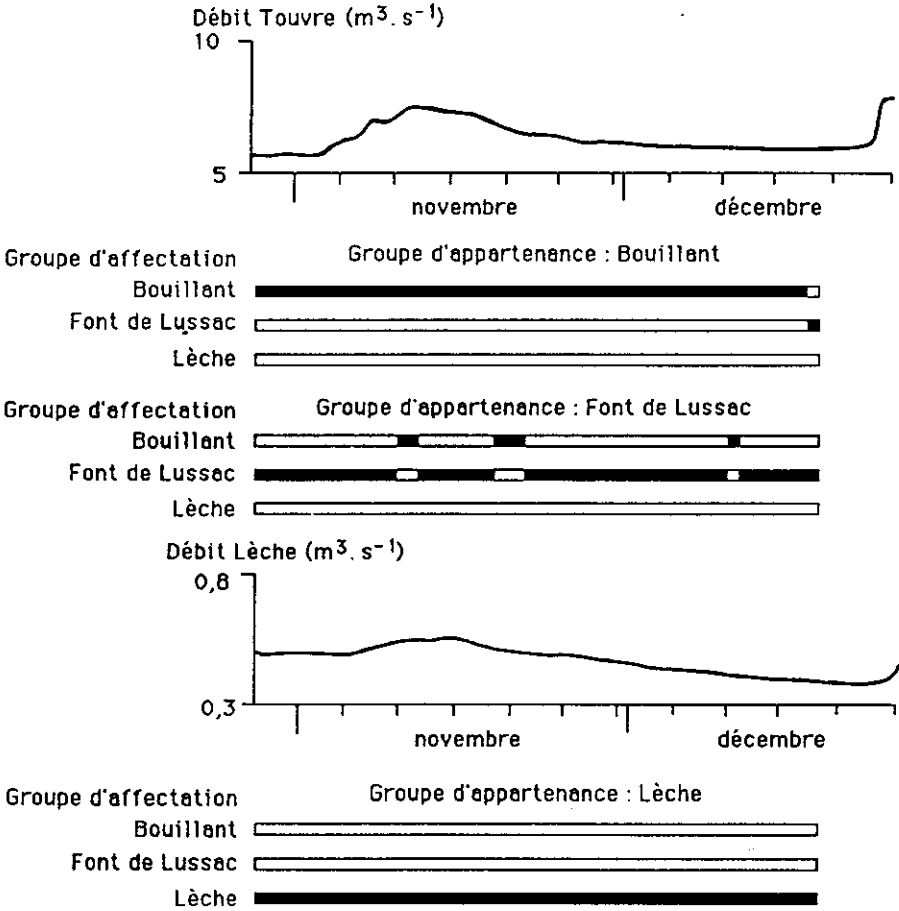


Figure 10 Touvre et Lèche : suivi quotidien de la crue de l'automne 1985. Réaffectation des individus.

*Touvre and Lèche karst systems : daily sampling of the 1985 autumn flood period. Re-assignment of the elements.*



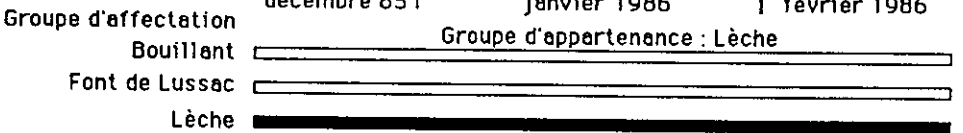
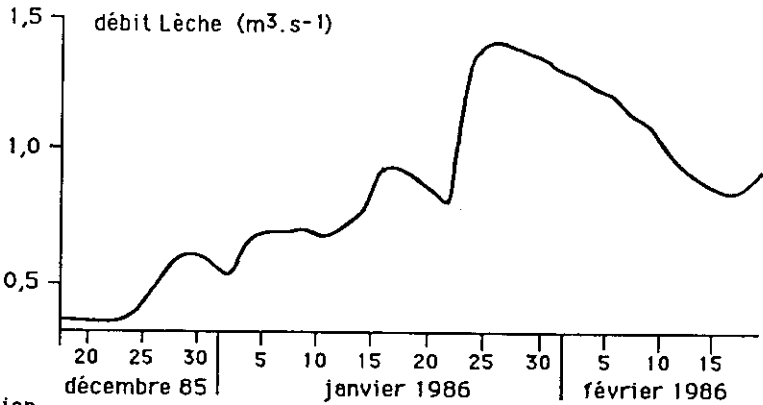
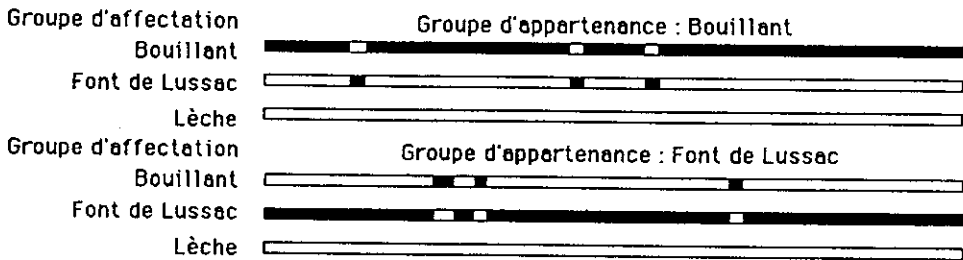
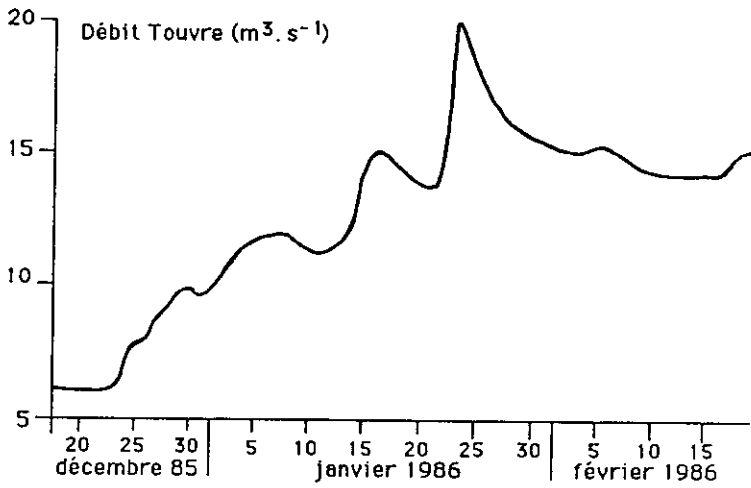


Figure 11 Touvre et Lèche : suivi quotidien de la crue de l'hiver 1985-86. Réaffectation des individus.

*Touvre and lèche karst systems : daily sampling of the 1985 winter flood period. Re-assignment of the elements.*

Pour l'exemple de Vaucluse, en plus de la pertinence des entités prédéterminées, l'analyse, utilisant les groupes réajustés comme taxons d'une classification, permet de tester l'affectation de nouveaux individus (individus supplémentaires).

Dans les deux exemples ci-avant présentés, l'analyse a porté sur un suivi chimique diachronique exigeant la lourde procédure d'échantillonnage à pas de temps fixe pendant une période d'une durée suffisante pour être représentative des phénomènes (BLAVOUX et MUDRY, 1988). On peut également user de cette méthode sur des instantanés synchrones, les groupes étant alors fondés sur des critères géographiques ou géologiques : unités structurales, appartenance stratigraphique : la méthode a été par exemple utilisée avec succès pour déterminer, dans un contexte d'émergence inconnu, la série servant de réservoir à un aquifère.

Le karst n'est bien sûr qu'un exemple d'application, tous les aquifères se prêtant à des études hydrocinématiques fondées sur leur contenu physico-chimique. On peut imaginer l'usage de l'analyse discriminante pour hiérarchiser les facteurs responsables du contenu physico-chimique de l'eau : facteur hydroclimatique (effet « campagne » ou période d'étude), facteur système (unités hydrogéologiques).

Par des analyses utilisant différentes variables qualitatives, on peut, en comparant les pourcentages d'individus bien classés, déterminer le facteur présentant le meilleur pouvoir discriminant au sein des populations statistiques, et ainsi expliciter les paramètres implicites que sont le temps ou la localisation géographique.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAKALOWICZ M., 1979. Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse Etat 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), 159-174.
- BLAVOUX B. et MUDRY J., 1986. Influence des pluies estivales sur la qualité des réserves de l'aquifère karstique sous climat méditerranéen : le rôle du sol et de l'épikarst dans la concentration des chlorures. *Bull. Soc. Géol. Fr.* (Paris), 1986, 8, 12, 667-674, 5 fig., 3 tabl.
- BLAVOUX B. et MUDRY J., 1988. Importance of the sampling rhythm in the hydrochemical study and hydrokinematical knowledge of karstic aquifers. *Ass. Int. Hydrogéol.*, Guilin (Chine), oct. 88, 21, 2, 864-869, 4 fig.
- BLAVOUX B., MUDRY J., ROUILLER D., 1988. Identification des eaux d'infiltration diffuse et concentrée dans l'écoulement d'une source karstique. Exemple de la Touvre et de la Lèche (Angoulême, Charente). 4<sup>e</sup> Coll. Hydrol. Pays Calc. Mil. Fiss. Besançon-Neuchâtel, sep 88, *Ann. Scientif. Univ. Besançon, Géologie*. Mémoire HS n° 6, 83-90, 7 fig.
- LEFEBVRE J., 1980. Introduction aux analyses statistiques multidimensionnelles 2<sup>e</sup> éd., 259 p., 70 fig. Masson et Cie, Paris.
- 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, 122-123, 1 fig.
- MUDRY J., 1987. Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés. Thèse Etat Besançon, *Ann. Scientif. Univ. Besançon, Géologie*. Mémoire HS n° 4, 381 p., 244 fig., 65 tab.
- MUDRY J. et BLAVOUX B., 1986. Le tarissement des aquifères karstiques : période non influencée ? Journées de printemps de l'Assoc. Internat. Hydrogéol. en hommage à Mr le Professeur A. BURGER (Neuchâtel). *Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel (Suisse)*, 7, 193-204, 6 fig. Peter Lang (Bern).
- PUIG J.M., 1987. Le système karstique de la Fontaine de Vaucluse. Thèse 3° cycle, Avignon, 208 p., 69 fig., 27 tabl.
- ROLET P. et SEGUIN J.J., 1986 a. Traitement des données multivariées (application aux sciences de la terre). Approche théorique. Rapport BRGM 86 DT 005 ISA, 58 p.
- ROLET P. et SEGUIN J.J., 1986 b. Traitement des données multivariées (application aux sciences de la terre). Aspects pratiques. Rapport BRGM 86 DT 006 ISA, 62 p.
- ROUILLER D., 1987. Etude des systèmes karstiques de la Touvre et de la Lèche. Angoulême, Charente. Géologie, hydrodynamique, hydrochimie. Thèse 3° cycle Avignon, 211 p., 109 fig., 20 tabl.