

# Rôle respectif des facteurs systémiques et externes dans la minéralisation des eaux du karst - exemple du Plateau de Besançon (Jura externe, France)

par Ahmed Abdelgader <sup>\*</sup>, Farid Achour <sup>\*\*</sup>, Jacques Mudry <sup>\*\*</sup>, Pierre Chauve <sup>\*\*</sup> et Jacky Mania <sup>\*\*</sup>

## RESUME

Dans une région karstique à distribution pluviométrique homogène, la variabilité de la chimie des eaux des exutoires est imputable à l'importance de la karstification, mais aussi aux caractéristiques de l'épisode pluvieux. La question est de savoir si, dans la réponse physico-chimique de l'exutoire, les phénomènes climatiques (saisons) ont plus d'importance que les caractéristiques internes de l'aquifère (lithologie, structure du drainage, gradients,...).

Les analyses discriminantes ont été croisées pour comparer le rôle des facteurs intrinsèques et climatiques. Testée sur trois sources voisines issues des mêmes calcaires, l'analyse discriminante révèle l'absence d'une prédominance du facteur systémique interne sur le facteur climatique (externe); alors que pour des sources géographiquement dispersées et drainant le Dogger et le Malm, le facteur intrinsèque prédomine dans l'acquisition de la minéralisation.

La méthode permet enfin de resituer des forages par rapport aux sources testées; l'association avec certaines sources est à relier avec des circulations rapides en zone libre, alors que d'autres forages sont groupés avec le fonctionnement de la nappe en zone captive.

## MOTS CLES

Karst, climat, système, analyse discriminante, hydrochimie, facteur prédominant, Jura

## ABSTRACT

In a homogeneously distributed rainfall karst region, the variability of water chemistry of outlets is due to importance of karstification, but also to characteristics of the rainfall episode. The problem is to know if the physical and chemical answer of the outlet, climatic phenomenons (seasons) take more importance than system characteristics itself (lithology, drainage pattern, gradients,...).

---

\* Laboratoire de Mécanique des Fluides et Génie Civil, Université du Havre, quai Frissard, B.P. 265, F - 76055 LE HAVRE cédex

\*\* Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée, Université de Franche-Comté, place Leclerc, F - 25030 BESANCON cédex

Discriminant analysis have been crossed in order to compare intrinsic and climatic factors tested on three neighbour springs that drain off the same Malm limestones, discriminant analyses discloses lack of prevalence of the internal systemic upon the climatic factor (external). For geographically scattered springs which are draining Dogger and Malm limestones, intrinsic factors predominates in mineralization acquisition.

On the other hand, this method enables to situate boreholes chemistry versus tested springs : the association with some springs can be related with quick circulations in the unconfined zone, whereas other boreholes are grouped with confined aquifer processes.

### KEY-WORDS

Karst, climate, system, discriminant analysis, hydrochemistry, prevailing factor, Jura mountains

## 1. Introduction

Le système karstique, ensemble au niveau duquel les écoulements souterrains de type karstique s'organisent pour constituer une unité de drainage (MANGIN 1975), est activé par les événements pluvieux. La réponse physico-chimique de son exutoire traduit le passage d'eaux à trajet et temps de séjour différents dans le système. Ainsi ces variations sont-elles utilisables pour déterminer l'origine des flux en transit dans le système. La question fondamentale est de savoir si, dans cette réponse physico-chimique, donc hydrodynamique, l'importance de la variation est principalement imputable à l'événement climatique ou bien au système lui-même (lithologie, structure du drainage, gradients,...), en d'autres termes si les facteurs environnementaux (externes, météoriques) ont une importance plus grande dans la réponse que les facteurs intrinsèques du système (facteurs internes caractérisant l'aquifère). 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. La méthode a été testée sur les systèmes karstiques du plateau de Besançon (Jura externe) où six sources karstiques ont fait l'objet de 37 analyses chimiques d'éléments majeurs chacune pendant un an et demi (ABDELGADER 1994).

## 2. Contexte géologique et hydrogéologique

Le secteur étudié est limité par les vallées de l'Ognon au nord et du Doubs au sud. Cette zone est recouverte en grande partie par la forêt de Chailluz, mais aussi par l'agglomération bisontine. Au point de vue stratigraphique, les principales formations appartiennent au Jurassique moyen et supérieur. La structure est variée; parmi les unités importantes, on note : les Avant-Monts, anticlinal dissymétrique chevauchant le flanc sud des synclinaux de l'Ognon; le plateau calcaire de Besançon-Thisse séparant les Avant-Monts au nord du faisceau bisontin au sud. Dans cette zone, les calcaires du Bajocien-Bathonien, constituent un réservoir karstique d'environ 200 m d'épaisseur, libre dans sa plus grande partie et devenant captif vers la vallée du Doubs sous les marnes oxfordiennes. Ce réservoir est drainé principalement par la source de la Mouillère à Besançon ( $Q_{moy.} = 0,69 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) et la source du Trébignon qui réagit comme un trop-plein à Thisse ( $Q_{moy.} = 0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Le plateau, structure monoclinale inclinée vers le SE. est traversé par des accidents de faible amplitude (figure 1).

La morphologie du secteur montre une grande concentration des dolines dans la forêt de Chailluz et aucun écoulement pérenne de surface, ce qui laisse présager de l'importance de l'infiltration diffuse.

Lors de la construction de l'autoroute A36, quelques expériences de traçages ont été effectuées et ont montré la liaison entre l'autoroute et les exutoires du massif forestier (sources et captages d'alimentation en eau de la ville de Beaçon) (TINETTE 1981, CHAUVE *et al.* 1987).

Le climat local est caractérisé par des pluies brèves et violentes observées en automne et au printemps. Les précipitations enregistrées au cours du cycle 1991-92 à Beaçon atteignent 1143,7 mm. L'évapotranspiration réelle est importante dans ce secteur (plus de 50 % des précipitations observées).

### 3. Principe de l'analyse factorielle discriminante

Contrairement aux statistiques descriptives (analyses en composantes principales, analyses factorielles des correspondances) qui résument l'information d'une matrice de données (BAKALOWICZ 1979 et 1982), l'analyse factorielle discriminante est une méthode d'analyse multivariées sur données continues, qui permet le test d'hypothèses (LEFEBVRE 1980, MUDRY 1987 et 1991). Elle appartient donc aux statistiques décisionnelles qui permettent de conclure sur la pertinence d'une hypothèse, donc dans notre cas d'analyses croisées, sur la prédominance d'une hypothèse sur l'autre.

La méthode consiste à faire une analyse en composantes principales (c'est-à-dire à déterminer les valeurs propres et vecteurs propres d'une matrice de données) sur la matrice des centres de gravité des groupes définis a priori. Ainsi, la mesure de la distance entre chacun des individus d'un groupe et les centres de gravité de tous les groupes définis a priori, permet de resituer chaque individu.

Si l'individu est effectivement plus proche du barycentre de son groupe d'appartenance, il est dit bien classé, dans le cas où sa distance au barycentre d'un autre groupe est inférieure à celle au barycentre de son groupe, il est dit mal classé et il est affecté à cet autre groupe (groupe d'affectation).

Les analyses discriminantes croisées consistent à effectuer plusieurs traitements sur le même jeu de données en choisissant pour chaque traitement une variable qualitative différente permettant de définir pour chacun un indice de groupe (groupe d'affectation).

L'analyse factorielle 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 correspondent à des phases hydrocinématiques (variable temps) ou à des systèmes (variable géographique). Par analyse 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 expliquer les paramètres implicites que sont le temps ou la localisation géographique (BOUROCHE & SAPORTA 1983, MUDRY 1991).

Dans notre cas, nous avons utilisé pour chaque jeu de données, deux variables qualitatives qui ont permis de faire deux analyses discriminantes :

- la variable saison, qui peut prendre la valeur "printemps", "été", "automne", "hiver",
- la variable système, qui peut prendre la valeur "Roche", "Trébignon"....

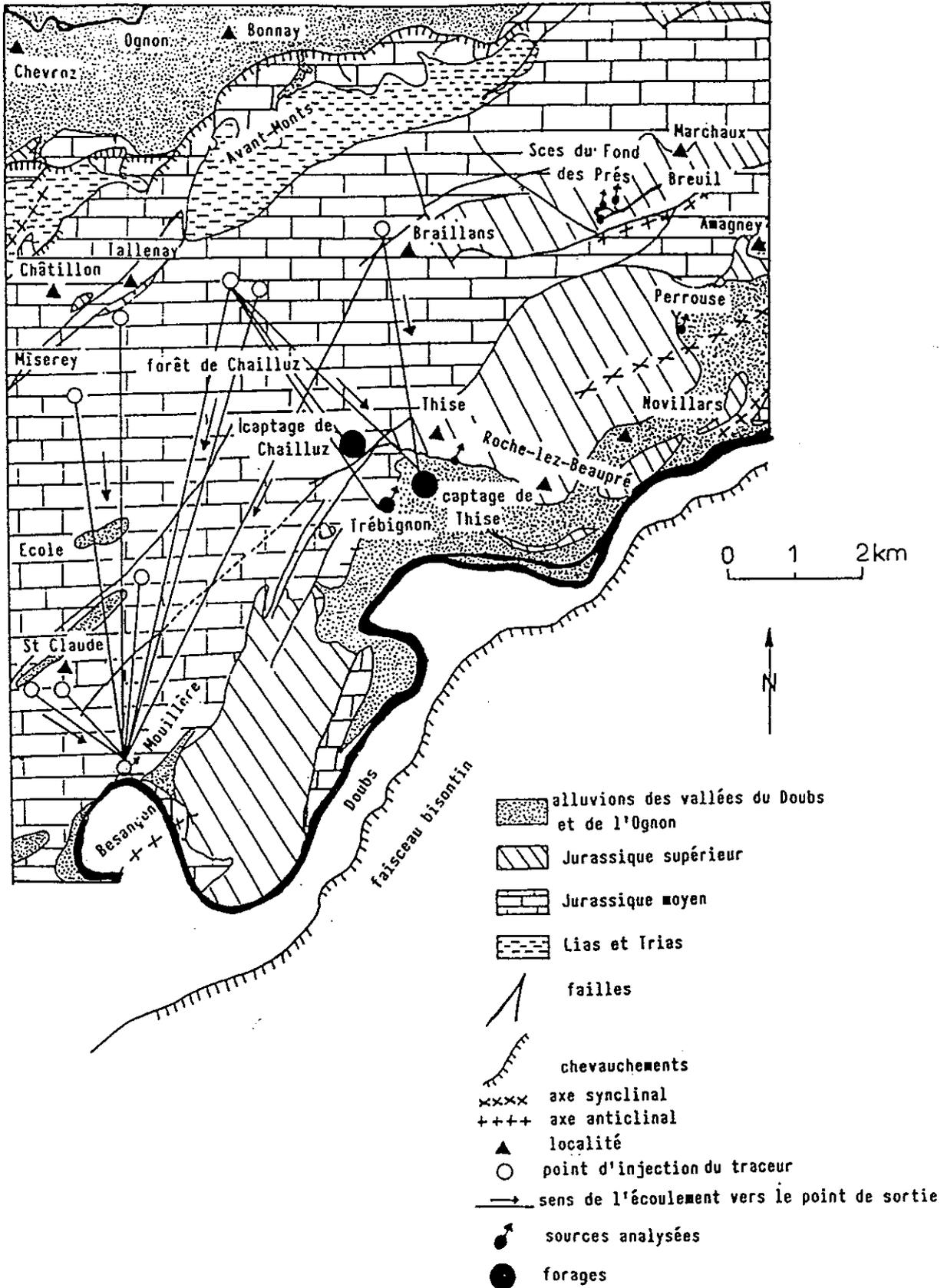


Figure 1 : Carte géologique et structurale et situation des sources surveillées.

#### **4. Echantillonnage et suivi chimique**

Le suivi chimique porte sur six sources (figure 1) de janvier 1991 à août 1992, le pas de temps d'échantillonnage est hebdomadaire, parfois décadaire :

- source du Trébignon : l'un des exutoires de l'impluvium de Thise-Chailluz, émerge au contact des calcaires du Bathonien-alluvions du Doubs; son impluvium couvert en grande partie de forêts est représenté par les calcaires du Jurassique moyen. Son débit moyen était de 108 l/s en 1991-92.
- source de Roche-lez-Beaupré : située à l'est du bassin de Thise-Chailluz, elle émerge à la limite de captivité de la nappe, au contact du Rauracien et des alluvions du Doubs et possède un très faible débit.
- source de la Perrouse : ancien captage à faible débit, qui émerge 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, drainent le bassin de Marchaux et donnent naissance au ruisseau du Breuil. La source la plus orientale a le débit le plus faible, la source centrale est intermédiaire, et la source ouest (ancien captage) représente 90 % du débit total mesuré à 8 l/s.

La minéralisation globale des différentes sources du plateau de Besançon montre des fluctuations liées à la lithologie de l'impluvium, aux débits et aux variations saisonnières (ABDELGADER 1994).

#### **5. Applications et résultats**

##### **5.1 Etude du comportement de trois sources voisines issues des mêmes calcaires : les sources du Fond-des-Prés**

Les sources du Fond-des-Prés sortent des mêmes calcaires argoviens et présentent une minéralisation différente. Le but de cette analyse est de déterminer si la variation chimique des sources est davantage conditionnée par les événements climatiques (c'est-à-dire l'influence saisonnière) ou par le contexte hydrogéologique (structure, lithologie, organisation de drainage,...) c'est-à-dire l'influence du système lui-même (facteurs internes caractérisant l'aquifère).

La population est subdivisée dans l'espace en trois groupes (système) : Fond-des-Prés est (source E), centre (source C) et ouest (source W), et dans le temps en quatre groupes (saisons) : hiver, printemps, été et automne. 105 observations et 17 variables ont été prises en compte, ce qui permet de comparer les deux variables qualitatives en effectuant deux analyses discriminantes sur les mêmes données mais avec une variable qualitative différente.

Selon le classement par système, on note un échange d'individus entre les trois sources avec 81,9 % de bien classés (tableau 1). L'axe I, caractérisé par les traceurs du milieu carbonaté, oppose la source E à la source W (figure 2), la source C présente le plus faible pourcentage de bien classés avec 77 %. Elle est située en position intermédiaire et échangeant des individus avec les deux groupes des autres sources. Cette position coïncide avec sa situation géographique et sa minéralisation moyenne.

Selon le regroupement par saison, les groupes sont globalement distincts avec un échange d'individus (81 % de bien classés, figure 3 et tableau 2). L'axe I est déterminé par les traceurs du milieu carbonaté (zone noyée) qui sont opposés aux éléments issus du lessivage (zone d'infiltration). L'axe II est caractérisé par les éléments du milieu externe à l'aquifère ou indicateurs de pollution (NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, K et Cl), il représente l'origine spatiale du contenu chimique.

Les deux variables qualitatives système ou saison donnent donc le même pourcentage de bien classés, les sources du Fond-des-Prés appartiennent à un système suffisamment homogène pour que la variable système ne prédomine pas sur la variable saison. La minéralisation, qui doit dépendre du temps de séjour, croit d'amont en aval, de la source W vers la source E.

Tableau 1 : Classement par système des sources du Fond-des-Prés.

Groupe d'affectation	Groupe d'appartenance			Bien classés %	% Bien classés global
	Source est	Source centre	Source ouest		
Source E	31	4	0	88,57	81,9
Source C	4	27	4	77,14	
Source W	1	6	28	80	

Tableau 2 : Classement par saison des sources du Fond-des-Prés.

Groupe d'affectation	Groupe d'appartenance				Bien classés %	% Bien classés global
	Hiver	Printemps	Eté	Automne		
Hiver	33	3	0	3	84,61	81
Printemps	3	21	3	0	77,77	
Eté	0	0	9	3	75	
Automne	1	1	2	22	81,48	

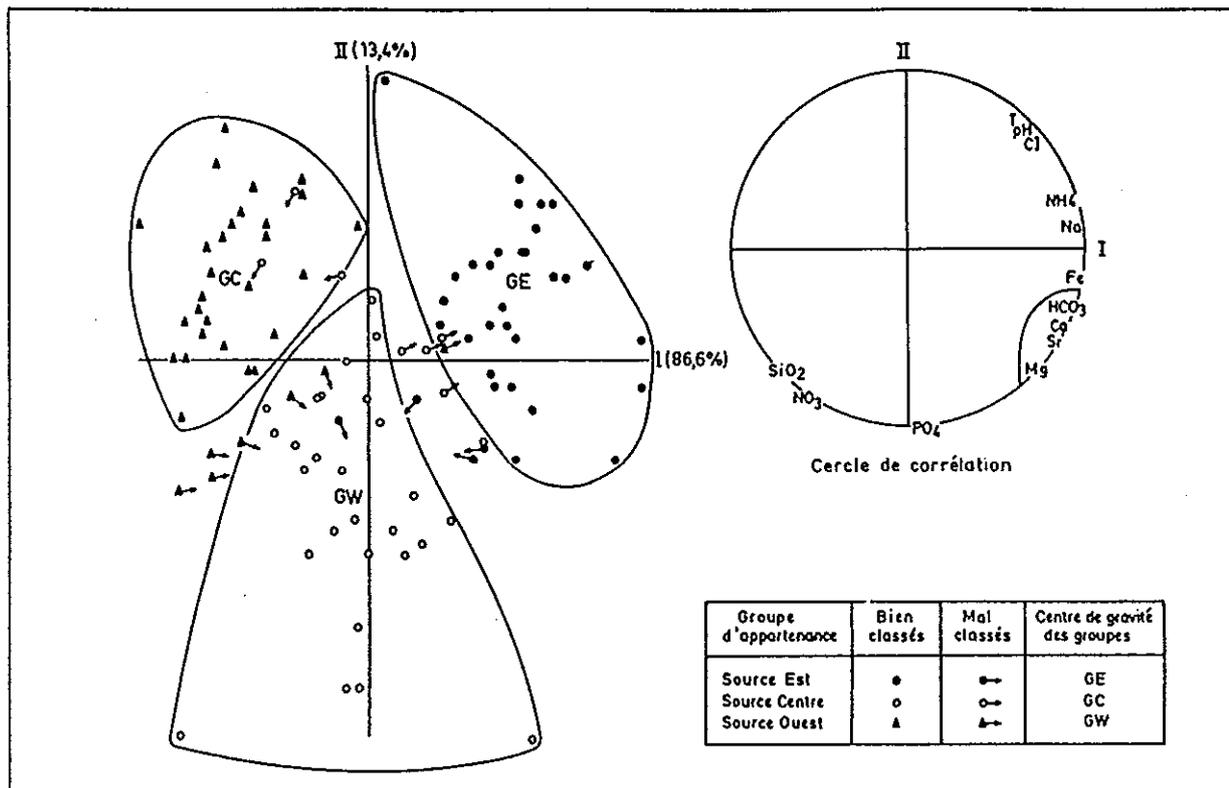


Figure 2 : Analyse discriminante : sources du Fond-des-Prés. Classification par système.

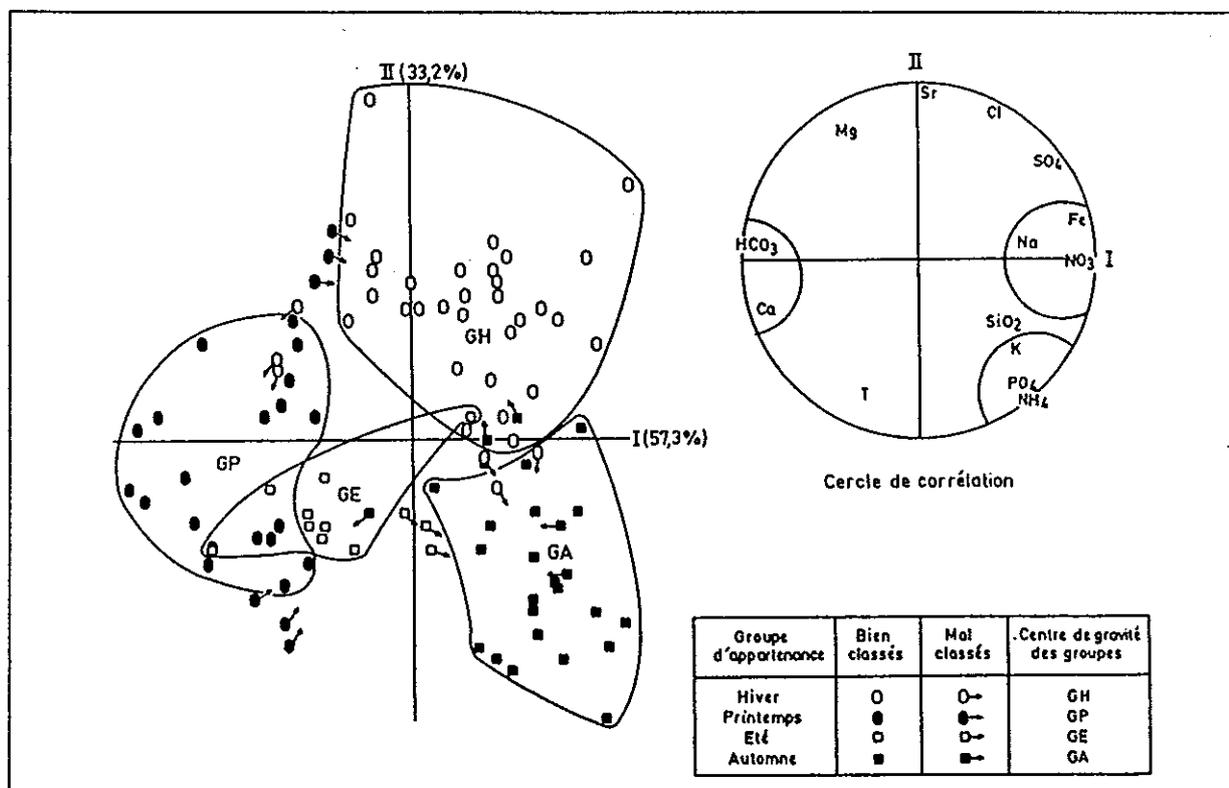


Figure 3 : Analyse discriminante : sources du Fond-des-Prés. Classification par saison.

### 5.2 L'influence des événements hydroclimatologiques et du contexte hydrogéologique de l'ensemble d'une zone karstique : le plateau de Besançon-Thise

A l'échelle de sources voisines drainant la même formation géologique, la variable système ne prédominant pas sur la variable saison, nous avons élargi notre test à l'ensemble de l'impluvium de Besançon-Thise et à six de ses exutoires. Comme pour l'analyse discriminante précédente nous avons croisé deux variables qualitatives : saison (hiver, printemps, été et automne), et système (Trébignon, Roche, Perrouse et Fond-des-Prés) en effectuant deux analyses discriminantes différentes sur les mêmes données (184 observations et 16 variables).

Selon la variable système (figure 4), l'axe I représente l'acquisition du chimisme, et oppose les éléments provenant de l'aquifère karstique ( $\text{HCO}_3$ , Ca) aux traceurs (Fe,  $\text{SO}_4$ ). Dans l'espace des individus, il oppose le Trébignon, Roche et la Perrouse aux sources du Fond-des-Prés, ces dernières ne sont pas beaucoup influencées par les éléments externes à l'aquifère. L'axe II est déterminé par les éléments présents de la surface ou indicateurs de pollution ( $\text{NH}_4$ ,  $\text{PO}_4$ , K), qui sont opposés aux éléments qui évoluent au sein de l'aquifère et dont les variations sont liées aux débits (Mg, Sr, pH). Il caractérise donc l'origine spatiale de l'évolution de la minéralisation.

Les résultats du traitement donnant 96,7 % de bien classés (tableau 3) avec de très faibles échanges d'individus. On remarque que le Trébignon est complètement distinct (100 % de bien classés), ce qui démontre le rôle de la lithologie : cette source est la seule issue du Jurassique moyen.

Selon la saison (figure 5 et tableau 4), l'axe I présente l'acquisition du chimisme. Il oppose le printemps et l'été (périodes caractérisées par une minéralisation variables) à l'automne et l'hiver (relativement, périodes de stabilité chimique). L'ensemble des groupes montre des réaffectations réciproques. Le pourcentage de bien classés est de 79,3 %. Il est minimal pendant le printemps (68 %); cette période est caractérisée par une variabilité chimique (lors des crues) traduisant l'écoulement des eaux diluées de l'infiltration et aussi celle des réserves.

A partir des deux classements, on note que les événements hydroclimatologiques ont un poids plus faible dans l'acquisition de la minéralisation que les systèmes eux mêmes.

Tableau 3 : Classement par système des sources étudiées.

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

Tableau 4 : Classement par saison des sources étudiées.

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

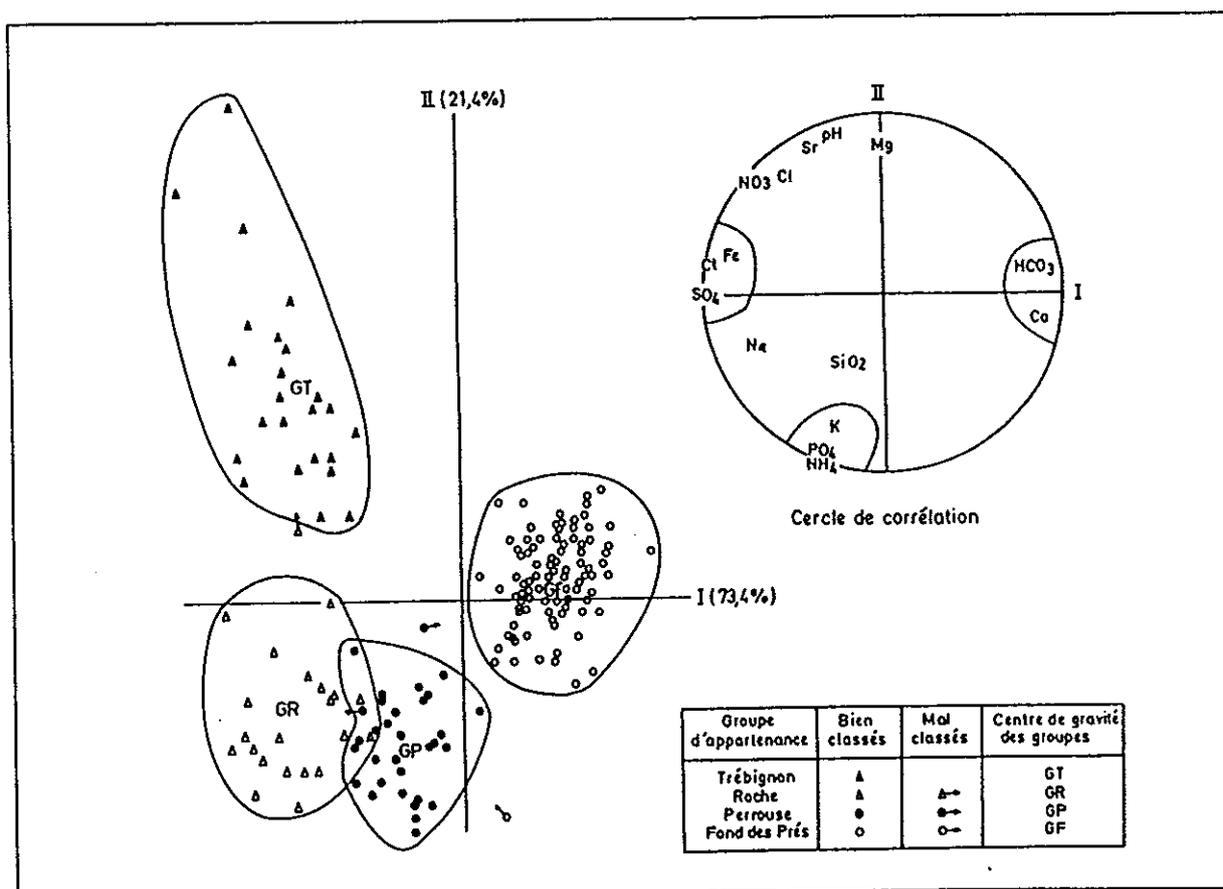


Figure 4 : Analyse discriminante des données des sources étudiées (plan I-II)  
Classification par système.

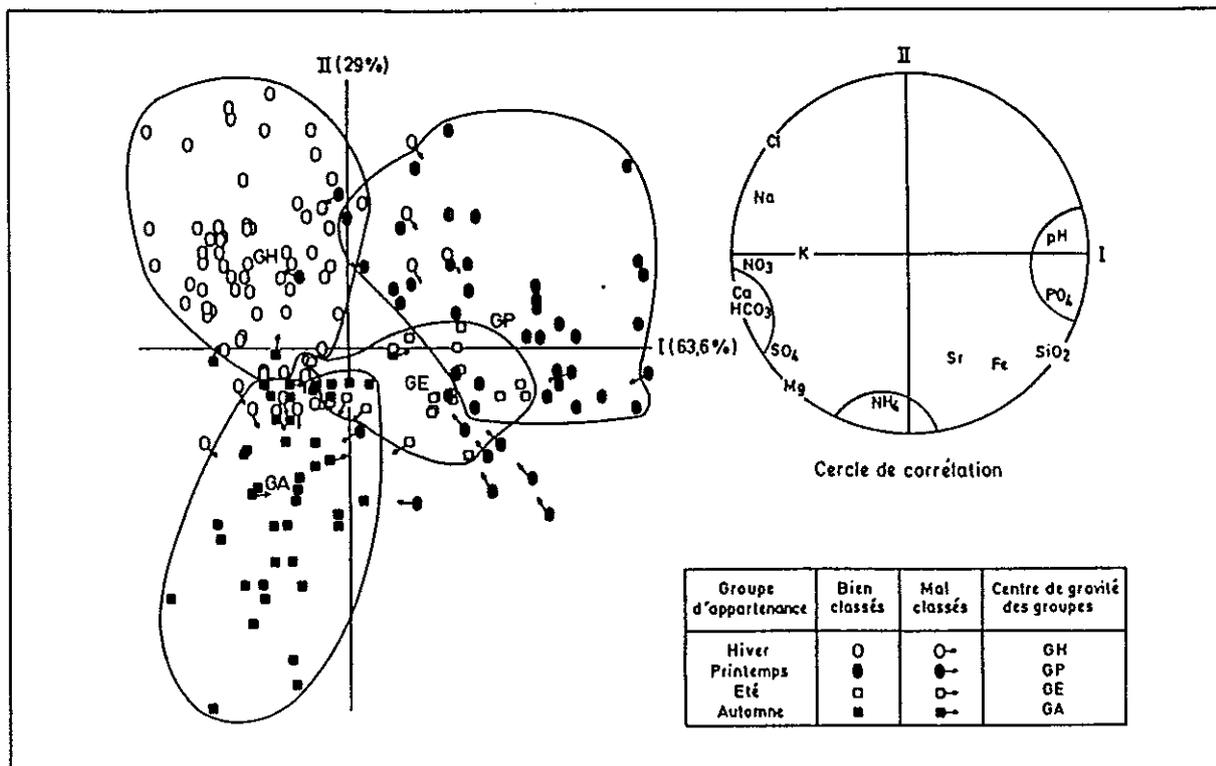


Figure 5 : Analyse discriminante des données des sources étudiées (plan I-II). Classification par saison.

### 5.3 L'affectation des forages dans le milieu karstique

L'objectif est de voir le classement des forages de Thise (TH4, TH3 et TH6, situés dans la partie captive de la nappe) et ceux de Chailluz (CZ2, CZ5, CZ6, CZ7 et CZ8, situés dans la partie libre de la nappe) afin de préciser l'existence des relations d'écoulements ou de drainage, entre les champs captants et les sources. Cette analyse a été appliquée sur les données des sources du Trébignon et de Roche avec les forages de Thise et Chailluz pris comme individus supplémentaires. Les individus supplémentaires, qui ne participent pas à la définition des groupes sont resitués par l'algorithme qui calcule leur distance aux différents centres de gravité. Comme précédemment, on a croisé deux variables qualitatives : système (Trébignon et Roche) et saison (hiver, printemps, été et automne) en effectuant deux analyses différentes.

On obtient 97,8 % de bien classés (tableau 5) comme dans l'analyse précédente, selon le regroupement par système. Les puits de Thise sont affectés au système de Roche et ceux de Chailluz sont classés dans le système du Trébignon (figure 6). Selon la saison l'ensemble des puits est réaffecté à l'hiver et au printemps (figure 7 et tableau 6), traduisant une relative homogénéité saisonnière de la minéralisation des eaux des forages qui n'échantillonnent pas les zones les plus karstifiées où (comme aux exutoires) la variabilité chimique est plus grande.

L'association du Trébignon et des puits de Chailluz met en évidence une circulation rapide en zone libre, c'est-à-dire un axe de drainage entre le captage de Chailluz et la source du Trébignon, phénomène déjà constaté par l'étude de la piézométrie (ABDELGADER 1994) et les traçages (TINETTE 1981). Le regroupement de Roche et les forages de Thise montre le rôle de la circulation de l'eau en zone captive.

Tableau 5 : Classement par système des sources du Trébignon et Roche-lez-Beaupré (les forages de Thise et de Chailluz sont portés en individus supplémentaires).

Groupe d'affectation	Groupe d'appartenance		Bien classés %	% Bien classés global
	Trébignon	Roche		
Trébignon	24 CZ2, CZ2, CZ7, CZ8, CZ6, CZ5	0	100	97,8
Roche	1	21 TH4, TH4, TH3, TH6, TH3	95,45	

Tableau 6 : Classement par saison des sources du Trébignon et Roche-lez-Beaupré (les forages de Thise et de Chailluz sont portés en individus supplémentaires).

Groupe d'affectation	Groupe d'appartenance				Bien classés %	% Bien classés global
	Hiver	Printemps	Eté	Automne		
Hiver	19 CZ2, CZ7, TH4, TH3, CZ5	0	0	0	100	93,4
Printemps	1	9 CZ2, TH4, TH3, CZ8, TH6, CZ6	1	0	81,81	
Eté	0	0	4	0	100	
Automne	1	0	0	11	91,66	



## 6. Conclusion

Dans le cas du plateau de Besançon, les analyses discriminantes croisées ont permis de démontrer que pour trois sources voisines et issues de la même formation, la variable qualitative "système" ne primait pas sur la variable "saison". La variabilité hydrochimique des exutoires n'est donc pas plus influencée par les caractéristiques de l'aquifère que par la succession d'événements pluvieux.

En revanche lorsque l'on compare le comportement de ce système, nettement différencié, développé dans des séries différentes, la variabilité chimique attribuable au système domine nettement celle attribuable à la saison. Le test de deux paramètres qualitatifs, système et saison sur l'ensemble des sources étudiées, met en évidence l'autonomie des différents systèmes, bien que ces systèmes présentent une situation géographique voisine.

Les forages exploités ont pu être rattachés à deux types d'aquifères, l'un libre (le Trébignon) avec des vitesses élevées de circulation, l'autre captif (Roche), avec de plus faibles vitesses. Les données supplémentaires issues des forages ne participent pas à la définition des axes discriminants, mais leur affectation aux groupes dont ils sont statistiquement les plus proches (possédant une chimie voisine), permet de mettre en évidence des relations entre les groupes d'appartenance (systèmes étudiés) et les individus supplémentaires (forages). Ces relations peuvent correspondre à des circulations communes en milieu karstique, à un drainage ou à un même milieu d'acquisition des paramètres physico-chimiques.

L'analyse factorielle discriminante est donc un moyen de séparation typologique qui a permis la comparaison de deux variables qualitatives différentes (système, saison) et a montré la prédominance d'un paramètre responsable de la minéralisation des eaux des différents aquifères étudiés (le système). Le caractère chimique dépend du facteur système (facteurs caractérisant l'aquifère : lithologie, unité hydrogéologique,...) plus que du contexte hydroclimatologique (saison), sauf dans le cas de sources voisines sortant de la même formation.

### Références

- ABDELGADER A. 1994. Essai de caractérisation des bassins versants dans la zone des Avant-Monts (Doubs). Thèse, Univ. Franche-Comté, Besançon, 194 pp.
- BAKALOWICZ M. 1979. Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse d'état, Univ. Paris VI, 269 pp.
- BAKALOWICZ M. 1982. La genèse de l'aquifère karstique vue par un géochimiste. Actes "Reunion Monografica sobre el Karst", Larra (Espagne) : 159-174.
- BOUROCHE J. & SAPORTA G. 1983. L'analyse des données. Ed. Que sais-je?, 125 pp.

- CHAUVE P., DUBREUCQ F., FRACHON J.-C., GAUTHIER A., METTETAL J.-P. & PEGUENET J. 1987. Inventaire des circulations souterraines reconnues par traçages en Franche-Comté. Ann. Univ. Besançon, Mém. h. s., 2.
- LEFEVRE J. 1980. Introduction aux analyses statistiques multidimensionnelles. Masson, Paris, 259 pp.
- MANGIN A. 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse d'état Univ. Dijon, 601 pp.
- MUDRY J. 1987. Apports du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés. Thèse d'état Univ. Franche-Comté, Besançon, 381 pp.
- MUDRY J. 1991. L'analyse discriminante, un puissant moyen de validation des hypothèses hydrogéologiques. Revue Sci. de l'eau, 4 : 19-37.
- TINETTE R. 1981. Etude de cheminement d'eau souterraine par traceurs. Mise en évidence de liaisons autoroute-captages à Besançon. Bull. Liaison Labo. P. et Ch. : 45-52.