

BULLETIN DU CENTRE D'HYDROGEOLOGIE No 3, 1979

ANALYSE MULTIVARIEE DU CHIMISME DE QUELQUES
SOURCES KARSTIQUES DU JURA SUISSE ET FRANC-COMTOIS

par Jacques MUDRY **

Laszlo KIRALY *

Imre MULLER *

INTRODUCTION

Dans le cadre de leurs recherches sur le karst, les laboratoires d'Hydrogéologie des Universités de Neuchâtel et de Besançon ont été amenés à étudier les réponses chimiques des sources en fonction de l'hydrodynamique, soit sur quelques crues isolées (Verneau, Lison, Sarrazine, Dard) soit en continu au cours du cycle hydrologique (Areuse, Uben).

De plus, à l'échelle du Jura, une prospection hydrogéologique par prélèvements instantanés a été effectuée grâce à la collaboration des Centres de Neuchâtel, de Thonon et de Besançon.

La présente note essaie de comparer les résultats des deux approches.

* Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, Rue Emile-Argand 11, 2000 Neuchâtel 7

** Laboratoire de Géologie-Structurale et Appliquée Université de Franche-Comté Place Leclerc F 25030 Besançon Cedex (RCP Hydrogéologie)

1. METHODES DE TRAITEMENT STATISTIQUE

Les méthodes d'analyse multivariées utilisées reposent toutes sur le calcul d'une distance dans un espace multidimensionnel.

L'analyse en composantes principales sur valeurs brutes (CPB) calcule des écarts à la moyenne grâce à une matrice des variances et covariances. Cette méthode, contrairement aux autres, tient beaucoup compte de la valeur absolue des variables.

L'analyse en composantes principales sur valeurs normées (CPN) calcule des écarts à la moyenne divisés par l'écart-type, c'est-à-dire qu'il admet comme entrée une matrice des coefficients de corrélation.

L'analyse factorielle des correspondances utilise la distance du χ^2 entre les profils des probabilités observées et le profil des probabilités marginales des variables ou des localités de mesures. Cette méthode montre la variabilité relative des paramètres.

L'analyse factorielle des correspondances a été appliquée sur les valeurs brutes d'analyse (FCB) ainsi que sur les valeurs classées (FCC).

Toutes ces méthodes déterminent, grâce à l'abscisse des points sur chaque variable, un nuage de points dans un espace multidimensionnel. Les axes factoriels, ou facteurs, correspondent aux directions d'allongement du nuage dans l'espace multidimensionnel.

Ainsi, le premier facteur est l'axe sur lequel le nuage est le plus allongé, le deuxième qui lui est perpendiculaire est celui qui admet la plus grande variabilité après le premier, etc....

Les résultats des différentes méthodes sont :

- Des graphiques qui sont la projection du nuage de points multidimensionnel dans le plan bidimensionnel engendré par 2 axes factoriels (=vecteurs propres des matrices de départ).
- Les composantes des variables, soit l'abscisse des variables de départ sur les axes factoriels.
- Les contributions des variables aux facteurs, part de chaque variable dans les facteurs.
- Les contributions des facteurs aux variables : part de chaque facteur dans les variables de départ.
- Les composantes des observations : abscisse des localités de mesure sur les axes factoriels.
- Les contributions des observations aux facteurs : part de chaque observations dans les facteurs.
- Les contributions des facteurs aux observations : part de chaque facteur dans les observations de départ.

2. METHODES D'ECHANTILLONNAGE

En 1977, les eaux de 35 sources karstiques du Jura suisse et franc-comtois ont été prélevées simultanément au cours de 3 campagnes (figure 1) : basses eaux d'hiver en janvier; une fonte de neige en février; étiage d'été en septembre.

Si les sources furent prélevées à peu près dans la même phase hydrodynamique lors des étiages d'hiver et d'été, en revanche, le prélèvement en crue n'a pu être calé avec précision sur l'hydrogramme, faute de limnigraphes.

La température et la conductivité ont été mesurées sur le terrain, les dosages chimiques et

isotopiques ont été effectués au CRG de Thonon, et les traitements statistiques des résultats aux centres de calcul de Neuchâtel et de Besançon.

Nous avons comparé les résultats de cette méthode instantannée avec ceux des prélèvements sériés au cours de diverses crues de la source de l'Areuse, où l'hydrogramme a été enregistré en continu (KIRALY et MULLER 1979).

3. RESULTATS DES ANALYSES MULTIVARIEES

Notre interprétation se limitera au commentaire de quelques diagrammes factoriels et de quelques matrices de sortie.

3a) Les diagrammes factoriels

Les figures 2,4,6,8 montrent la projection des nuages de points dans le plan factoriel 1-2; l'abscisse sur l'axe 3 est symbolisée par des cercles.

Ces diagrammes donnent une représentation tridimensionnelle: plus le cercle est noir, plus le point est proche du plan 1-2.

3a.1) Analyse en composantes principales sur valeurs brutes (CPB)

La figure 2 montre le déplacement du nuage de points entre les 3 campagnes.

- Le nuage de la 2^e campagne occupe le 1^o et le 4^o quadrant, celui de la 3^e campagne occupe principalement le 3^o quadrant et la 1^e campagne montre une position intermédiaire.

L'examen des composantes des variables révèle la signification des axes factoriels. Le facteur 1 représente les bicarbonates, le tritium et le calcium (positif); le facteur 2 oppose le tritium (positif) aux bicarbonates (négatif) et le facteur 3

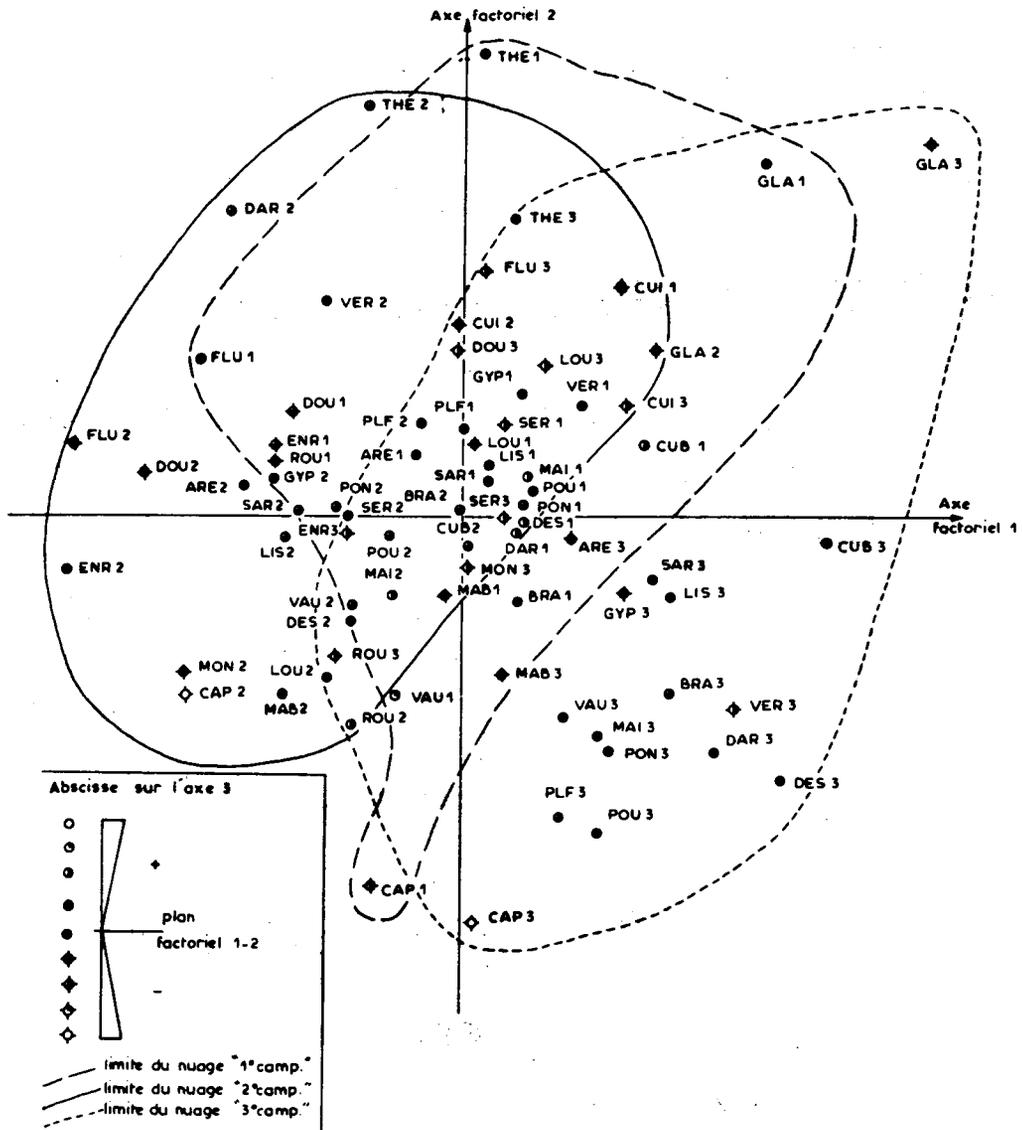


Figure 2 : Analyse en composantes principales, valeurs brutes (CPB), 77 points, 11 variables.

Projection des stations sur le plan factoriel 1 - 2

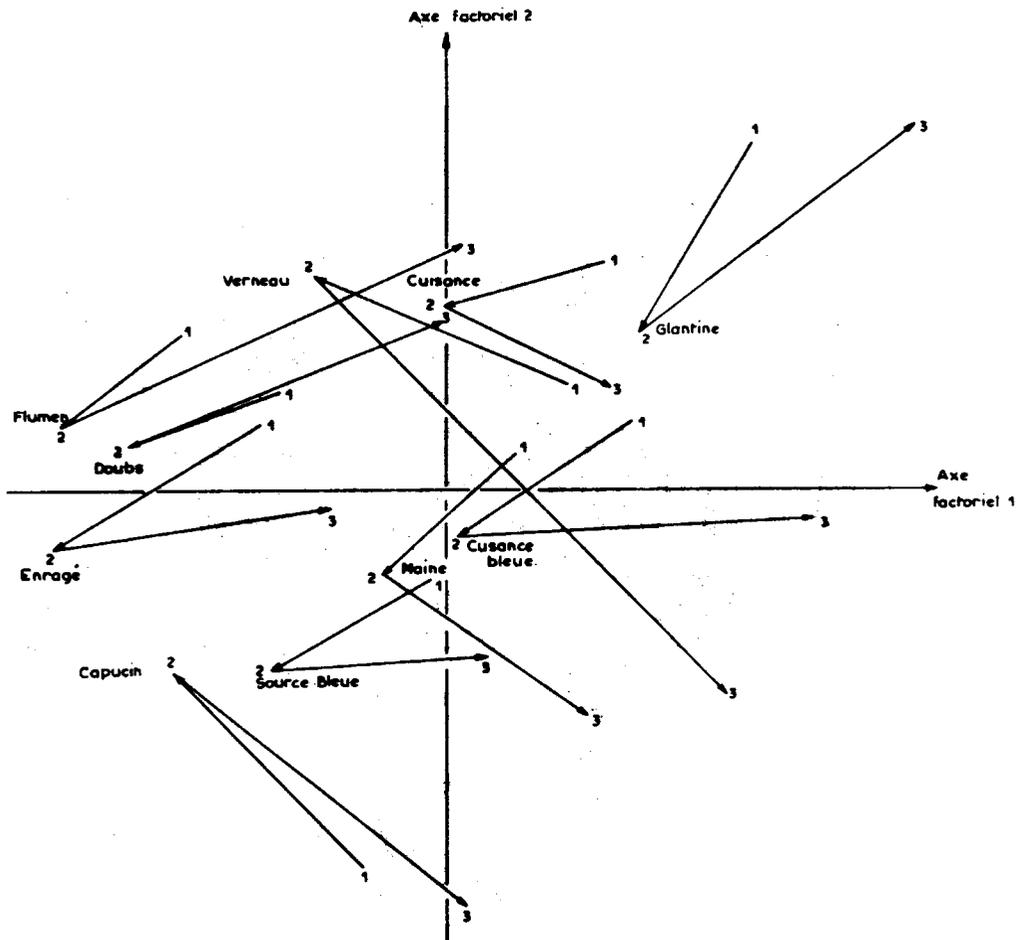
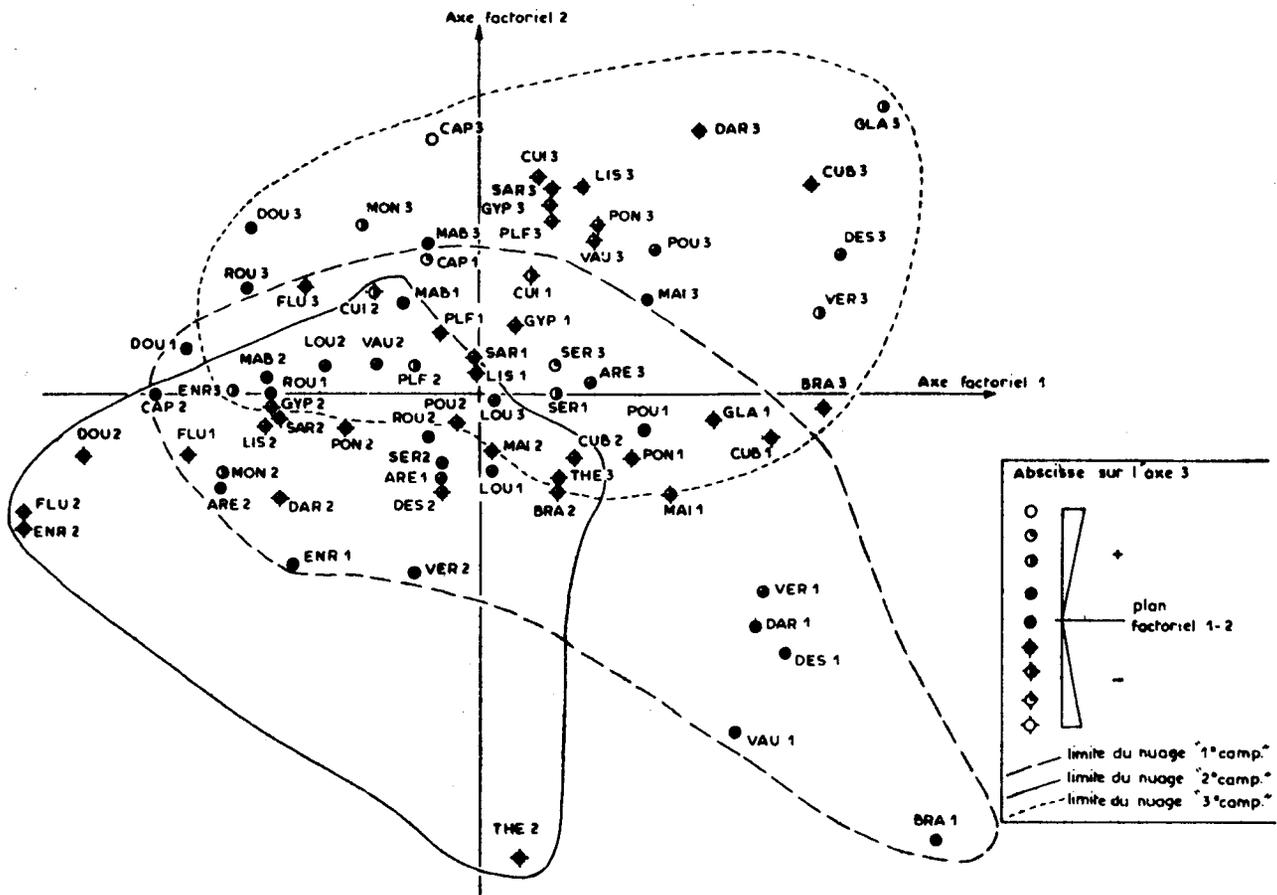


Figure 3 : Analyse en composantes principales, valeurs brutes (CPB). Plan factoriel 1-2. Evolution de quelques émergences au cours des 3 campagnes.

Figure 4 : Analyse en composantes principales leurs normées (CPN) 77 points, 11 variables. Projection des stations sur le plan factoriel 1 - 2



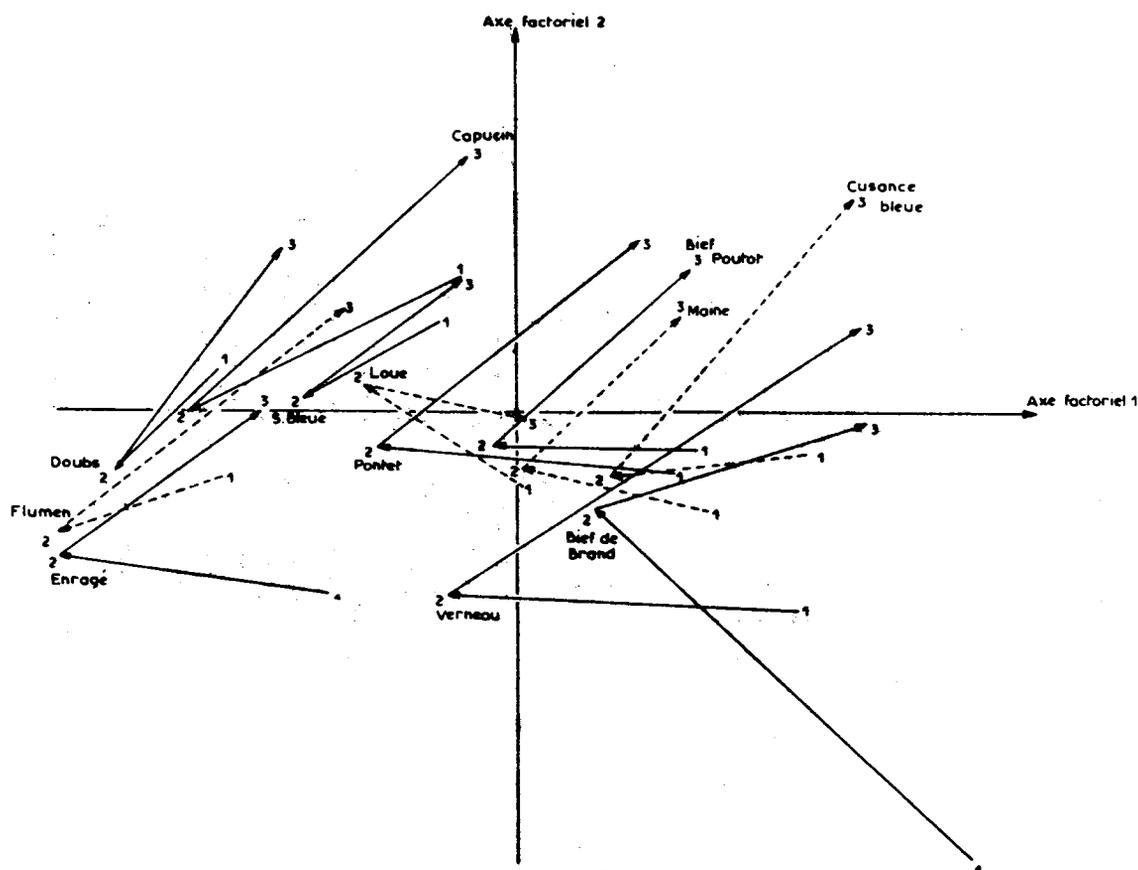


Figure 5 : Analyse en composantes principales valeurs normées (CPN). Plan factoriel 1-2 Evolution de quelques émergences au cours des 3 campagnes

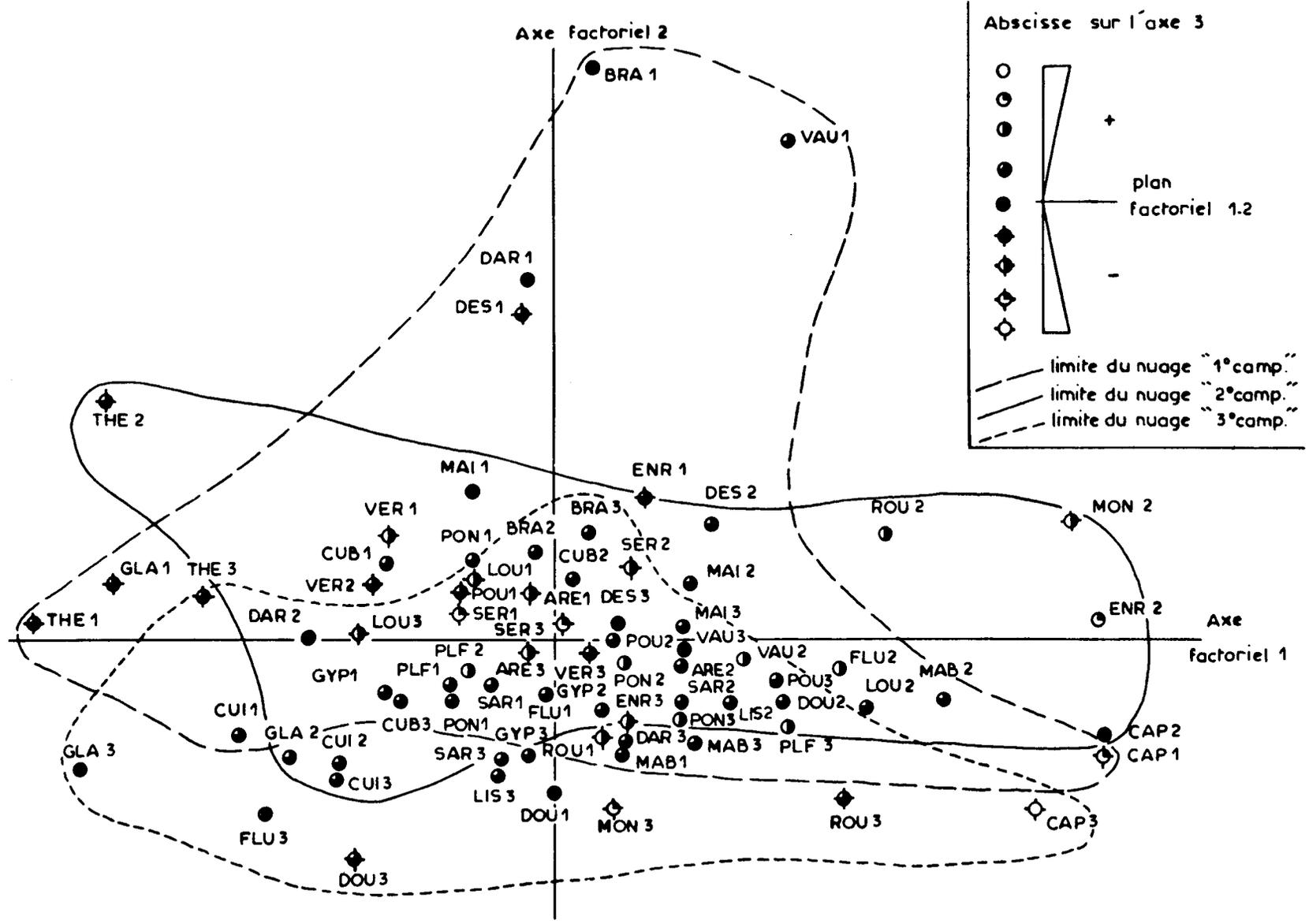


Figure 6 : Analyse factorielle des correspondances, valeurs brutes (FCB), 77 points, 11 variables. Projection des stations sur le plan factoriel 1 - 2

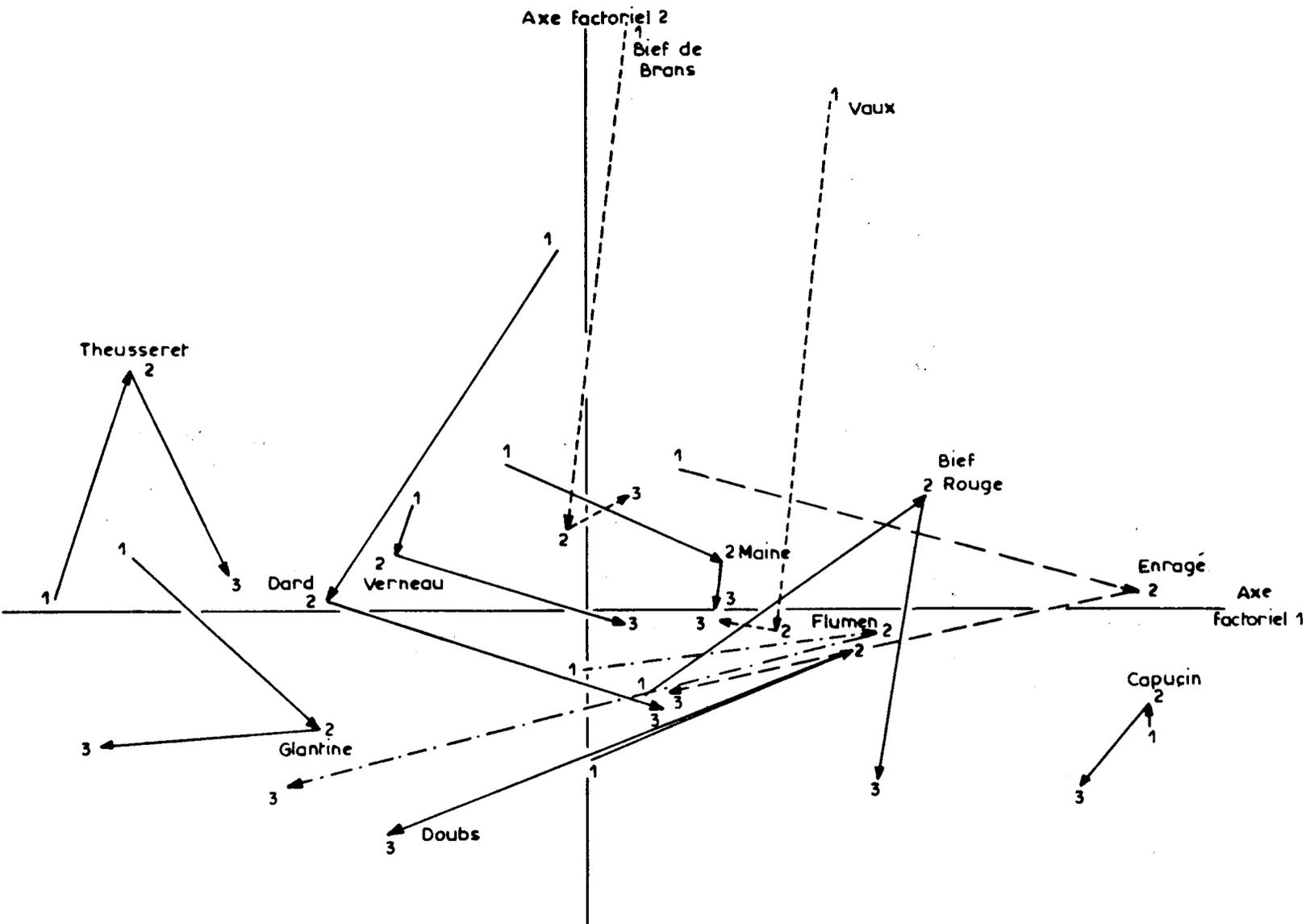


Figure 7 : Analyse factorielle des correspondances-
valeurs brutes (FCB). Plan factoriel 1-2.
Evolution de quelques émergences au cours
des 3 campagnes.

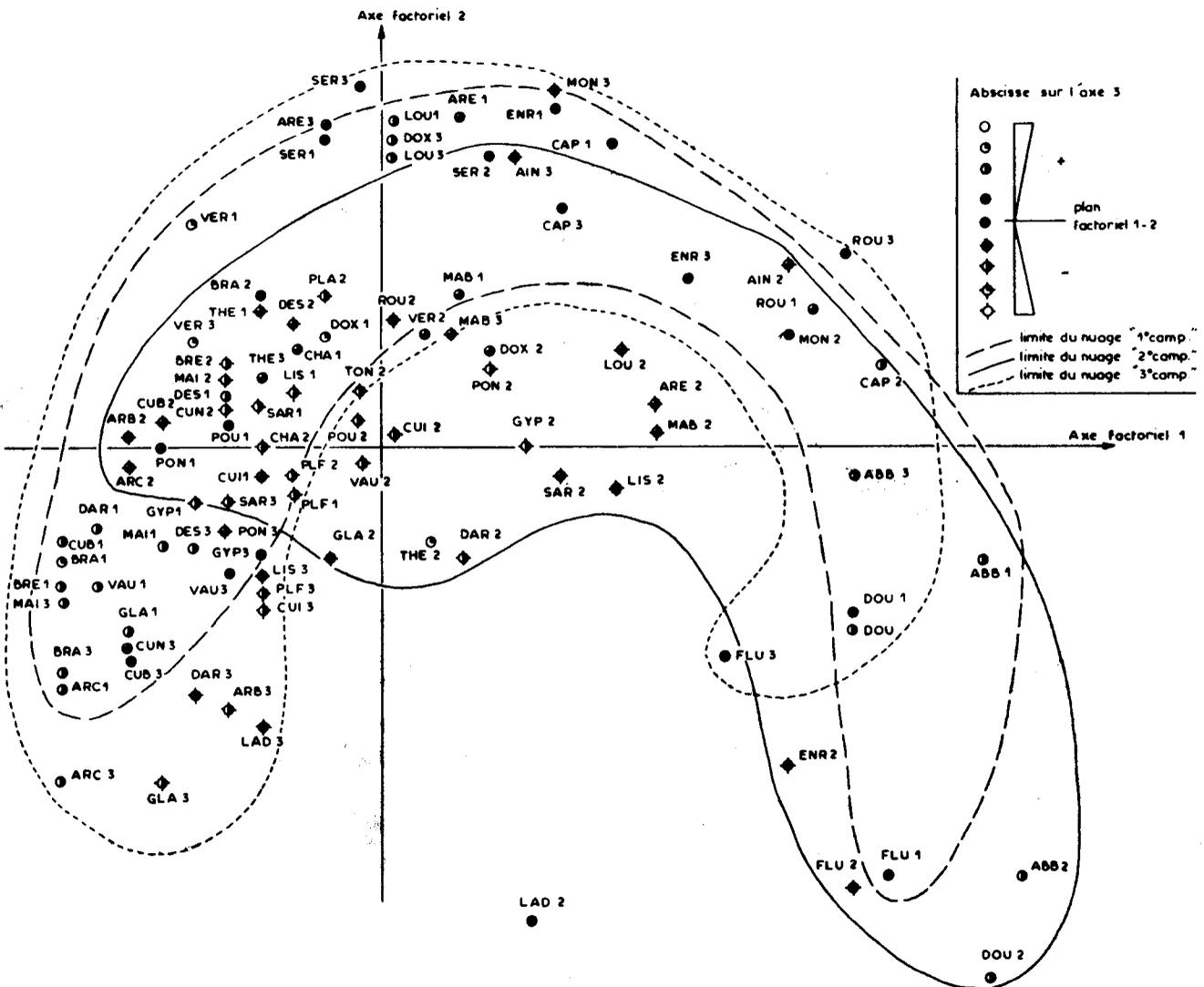


Figure 8 : Analyse factorielle des correspondances-valeurs classées (FCC) 100 points, 19 variables. Projection des stations sur le plan factoriel 1 - 2.

oppose le chlorure, le calcium et les sulfates (positif) au magnésium et au bicarbonate (négatif). Cf tableau 1.

La discrimination des stations est maximale sur les axes 1 et 2 et , dans chaque nuage, les sources de la Haute chaîne, en bas et à gauche, s'opposent géométriquement aux sources des Plateaux, en haut et à droite.

Cette discrimination se fait sur les critères de minéralisations et de temps de séjour. Le groupe "Haute chaîne" est caractérisé par une teneur faible en calcium, bicarbonate et tritium. Le groupe "Plateau" est riche en ces mêmes éléments.

Il faut remarquer que la position des points dans les nuages montre une répétitivité au cours des 3 campagnes, ce qui signifie que la discrimination se fait sur les mêmes critères au cours des 3 épisodes.

La figure 3 montre l'évolution de quelques points d'une campagne à l'autre. La plupart des trajets vont vers la gauche au cours de la 2^e campagne et reviennent vers la droite en un point distinct du premier. Etant donné la signification de l'axe factoriel 1, la crue correspond à une diminution de calcium, bicarbonate et tritium.

3a.2) Analyse en composantes principales sur valeurs normées

Ce traitement élimine le poids des éléments à grande valeur absolue (calcium, bicarbonate et tritium).

La figure 4 montre comme précédemment 3 nuages décalés, la 3^e campagne étant en haut à droite, la deuxième en bas à gauche, et la première entre les deux. L'examen du tableau 2 révèle que le premier facteur est composé de toutes les variables à l'exception du magnésium, le deuxième axe oppose le sodium,

Besançon - 3 séries - 11 variables (CPB)

| COMPOSANTES DES VARIABLES | | | | | | |
|---------------------------|------------------|---------|----------|---------|---------|---------|
| No | Nom | Fact. 1 | Fact. 2 | Fact. 3 | Fact. 4 | Fact. 5 |
| 1 | SiO ₂ | 0,6919 | -0,1649 | 0,2066 | -0,0501 | 0,0205 |
| 2 | Ca | 13,8559 | -3,8285 | 3,2623 | 0,6752 | -0,1193 |
| 3 | Mg | 0,1817 | -0,6087 | -1,2719 | -1,0282 | -0,2475 |
| 4 | Na | 0,2651 | 0,0568 | 0,6001 | -0,7932 | 0,2777 |
| 5 | K | 0,2314 | -0,0158 | 0,2192 | -0,3203 | -0,1315 |
| 6 | Cl | 0,7401 | -0,0919 | 1,2354 | -1,5564 | 0,8184 |
| 7 | SO ₄ | 0,5520 | 0,5816 | 0,9498 | -1,1565 | -1,1052 |
| 8 | HCO ₃ | 42,3472 | -17,1977 | -0,9211 | -0,1530 | 0,0205 |
| 9 | NO ₃ | 0,2688 | 0,0258 | 0,2740 | -0,1986 | -0,0128 |
| 10 | TRI | 37,4502 | 20,8824 | -0,2149 | -0,0086 | 0,0212 |
| 11 | Min. | 1,4549 | -0,5331 | 0,1518 | -0,1393 | -0,0122 |

Tableau 1

Besançon - 3 séries - 11 variables (CPN)

| COMPOSANTES DES VARIABLES | | | | | | |
|---------------------------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| No | Nom | Fact. 1 | Fact. 2 | Fact. 3 | Fact. 4 | Fact. 5 |
| 1 | SiO ₂ | 0,8376 | 0,2758 | -0,1004 | 0,1246 | 0,1697 |
| 2 | Ca | 0,8898 | 0,3975 | -0,1086 | 0,0598 | -0,0801 |
| 3 | Mg | 0,0745 | 0,1907 | 0,9520 | -0,1420 | 0,0290 |
| 4 | Na | 0,5920 | -0,6709 | 0,0556 | 0,2707 | -0,2238 |
| 5 | K | 0,6462 | -0,4641 | 0,1403 | -0,2479 | -0,1033 |
| 6 | Cl | 0,6823 | -0,5338 | 0,0854 | 0,3832 | -0,0704 |
| 7 | SO ₄ | 0,5522 | -0,5718 | -0,0425 | -0,4755 | -0,0555 |
| 8 | HCO ₃ | 0,8243 | 0,5199 | 0,1009 | 0,0598 | -0,1284 |
| 9 | NO ₃ | 0,7109 | -0,2605 | 0,0047 | 0,0034 | 0,6322 |
| 10 | TRI | 0,7040 | 0,2444 | -0,3008 | -0,3632 | -0,0939 |
| 11 | Min. | 0,8856 | 0,4095 | 0,0864 | 0,0652 | -0,0817 |

Tableau 2

les sulfates, les chlorures et le potassium (négatifs), aux bicarbonates et à la minéralisation totale. Le troisième axe est un axe magnésium (positif) opposé principalement au tritium (négatif).

Les nuages se chevauchent un peu moins que pour les CPB.

La figure 5 montre le cheminement des points entre les 3 campagnes.

Ces résultats sont comparables à ceux des CPB.

3a.3) Analyse factorielle des correspondances sur valeurs brutes

L'analyse F.C.B. est moins sélective que les analyses en composantes principales. La figure 6 est moins lisible que les figures 2 et 4.

Les composantes des variables (tableau 3) montrent un facteur 1 opposant le magnésium (positif) au tritium (négatif), un facteur 2 représentant surtout les chlorures et le sodium et un facteur 3 lié au magnésium (négatif). L'écrasement des points le long de l'axe 1 peut être dû aux eaux très influencées par le chlorure de sodium provenant du salage des routes sur l'impluvium des sources de Bief de Brans, de Vaux, du Doubs et du Dessoubre. (Campagne d'hiver).

Les cheminements, sur la figure 7, sont peu explicables du fait de la signification des axes 1 et 2.

3a.4) Analyse factorielle des correspondances sur valeurs classées

19 variables ont été rangées chacune en 5 classes et 100 points ont été traités. La classe 1 représente la valeur la plus basse, la classe 5, la plus haute.

Besançon - 3séries - 11 variables (CORR)

| COMPOSANTES DES VARIABLES | | | | | | |
|---------------------------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| No | Nom | Fact. 1 | Fact. 2 | Fact. 3 | Fact. 4 | Fact. 5 |
| 1 | SiO ₂ | 0,0179 | 0,0480 | 0,0396 | -0,0292 | 0,0036 |
| 2 | Ca | 0,0496 | 0,0076 | 0,0321 | 0,0071 | -0,0061 |
| 3 | Mg | 0,2556 | -0,0762 | -0,5304 | -0,0106 | -0,0113 |
| 4 | Na | -0,0385 | 0,5915 | -0,0386 | -0,0146 | 0,0995 |
| 5 | K | -0,0552 | 0,3806 | -0,0605 | 0,2045 | 0,3741 |
| 6 | Cl | -0,0078 | 0,5702 | -0,0348 | -0,1761 | -0,0726 |
| 7 | SO ₄ | -0,0182 | 0,1591 | -0,0303 | 0,2091 | -0,0700 |
| 8 | HCO ₃ | 0,0702 | -0,0128 | 0,0022 | -0,0043 | 0,0032 |
| 9 | NO ₃ | -0,0333 | 0,2195 | -0,0177 | 0,0408 | -0,0149 |
| 10 | TRI | -0,1817 | -0,0152 | -0,0100 | -0,0039 | 0,0001 |
| 11 | Min. | 0,0649 | 0,0074 | 0,0031 | 0,0020 | -0,0098 |

Tableau 3

Le tableau 4 montre les composantes des facteurs 1 à 3

Le facteur 1 signifie que la minéralisation de l'eau décroît avec l'altitude dans le Jura.

Le facteur 2 oppose, sur les impluviums d'altitude assez élevée, une teneur moyenne en calcium avec un fort pourcentage de magnésium dans la minéralisation (abscisses positives), à des eaux riches en tritium et en silice, mais pauvre en bicarbonate, nitrates et pourcentage de magnésium (abscisses négatives).

Le facteur 3 oppose des eaux riches en alcalins et en chlorures, avec un pourcentage de magnésium élevé, à des eaux fortement minéralisées en calcium mais pauvres en magnésium, sodium et potassium.

La figure 8 montre une image de points parabolique. Chacune des 3 campagnes décrit la parabole, mais les deux branches sont inégales :

- la deuxième campagne est décalée vers le bas à droite
- la troisième campagne vers le bas à gauche
- la première occupe une position intermédiaire

La figure 9 montre des trajets plus complexes qui pour les composantes principales, les angles $\bar{1}$ -2-3 se déplaçant dans le croissant, ce qui explique leur retournement progressif de gauche à droite.

3b.) Répartition spatiale de l'abscisse sur le premier axe factoriel

Le premier facteur est celui qui recueille la plus grande partie de l'inertie totale. Sa représentation géographique permet de délimiter des zones de réaction similaire.

3b.1) Analyse en composantes principales normées (CPN)

Les figures 10, 11 et 12 localisent la valeur du premier facteur au cours des 3 campagnes.

| FACTEUR | 1 | 2 | 3 |
|---------------------|---|---|---|
| Abscisses positives | tritium 1; sulfates 1 silice 1; alcalins 1 sodium 1; altitude: potassium 1; -source 5 calcium 1; -b. alim 5 chlorure 1 | magnésium 5 calcium 3 rMg/rCa 5 % rMg 5 % rCa 1 b. alim. 4 | sodium 5 potassium 5 chlorure 5 rMg/rCa 4 % rMg 4 alcalins 4 |
| Abscisses négatives | le reste | tritium 5 silice 5 calcium 1 bicarb. 1 nitrate 1 minér. tot 1 % rMg 1 | sodium 2 potassium 2 magnésium 1 % rMg 1 % rCa 5 alcalins 2 |

Tableau 4

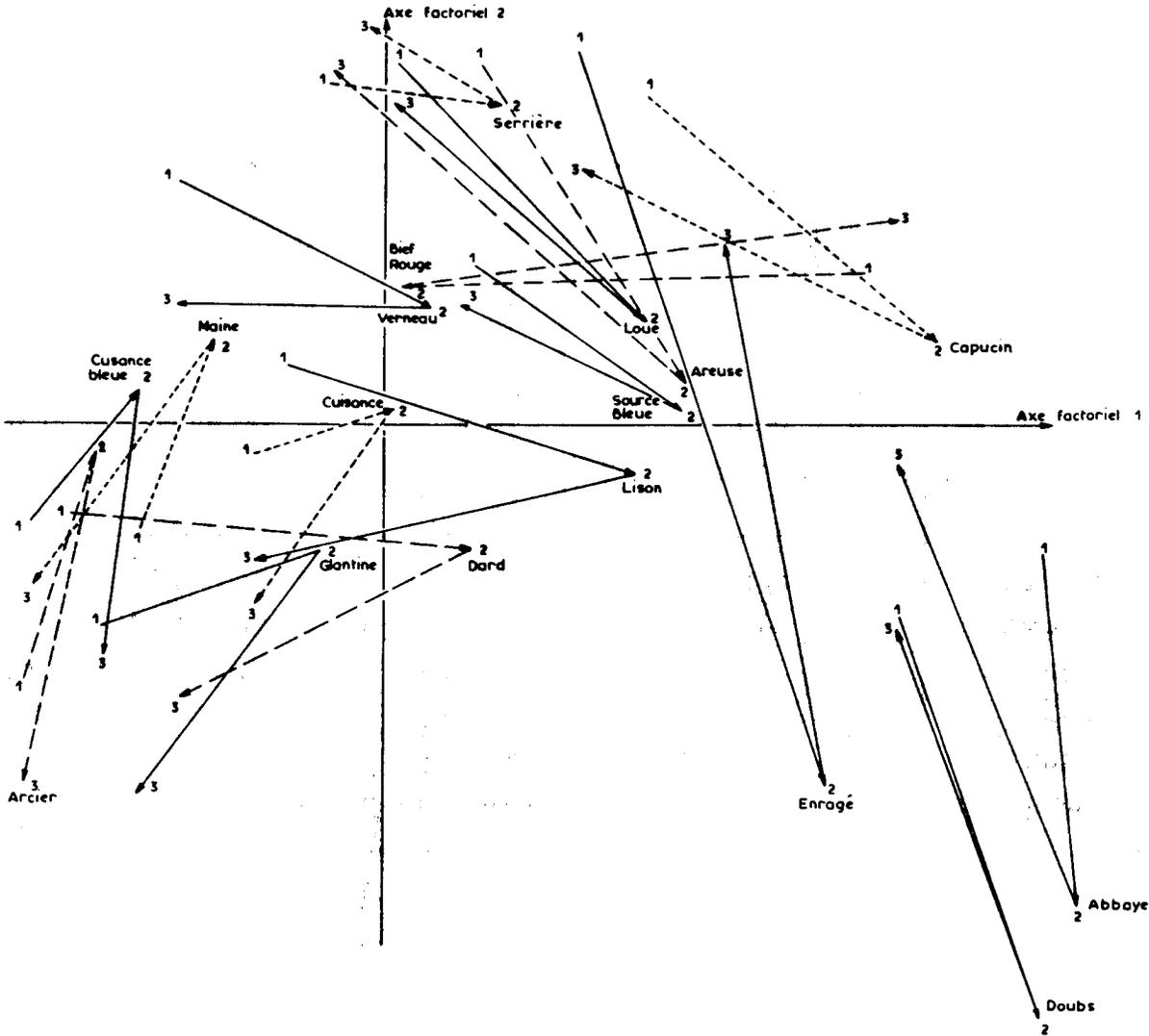


Figure 9 : Analyse factorielle des correspondances
valeurs classées (FCC). Plan factoriel 1-2
évolution de quelques émergences au cours
des 3 campagnes.

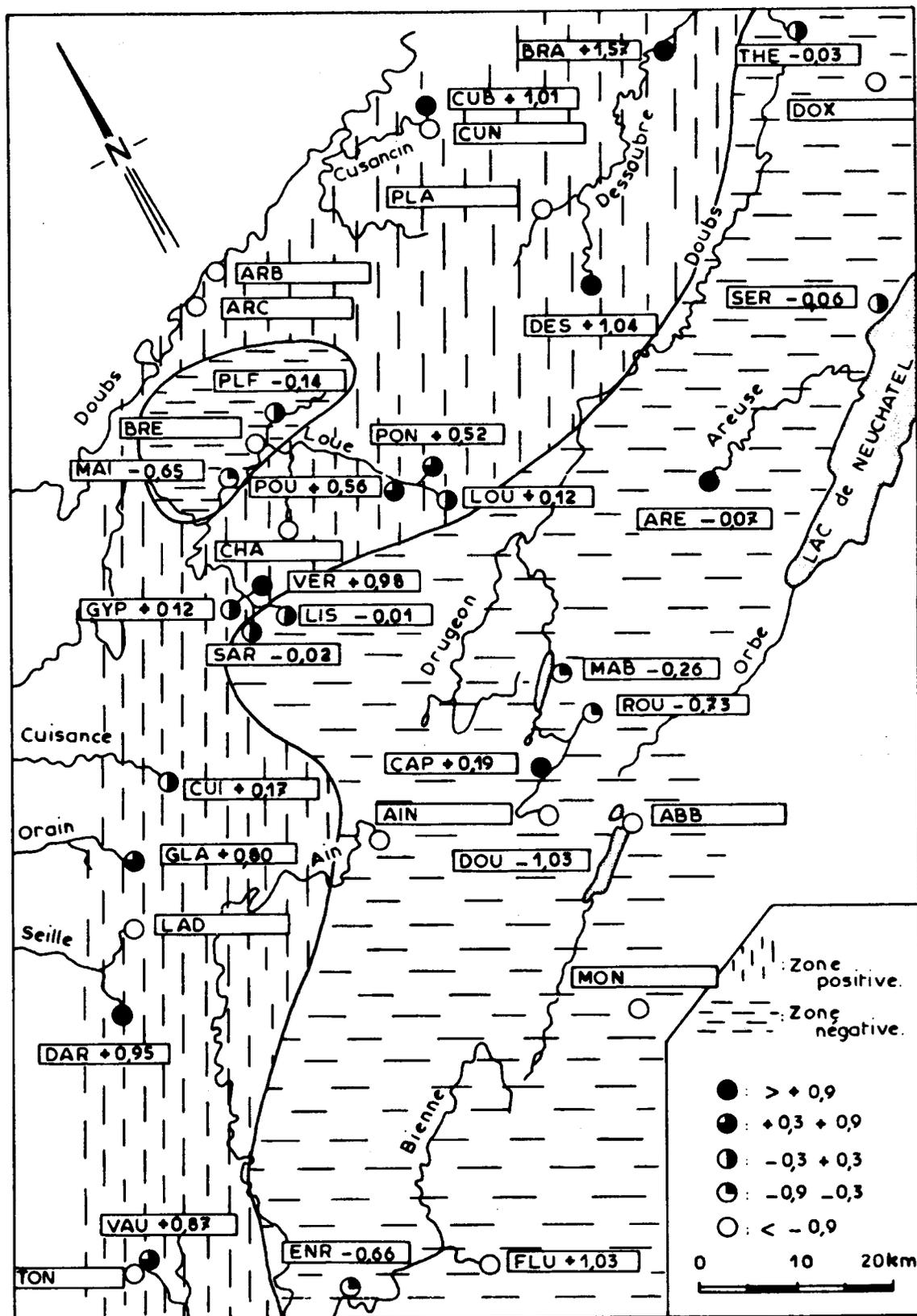


Figure 10 : Analyse en composantes principales, valeurs normées (CPN). 1ère campagne. Valeur du premier facteur aux différentes émergences.

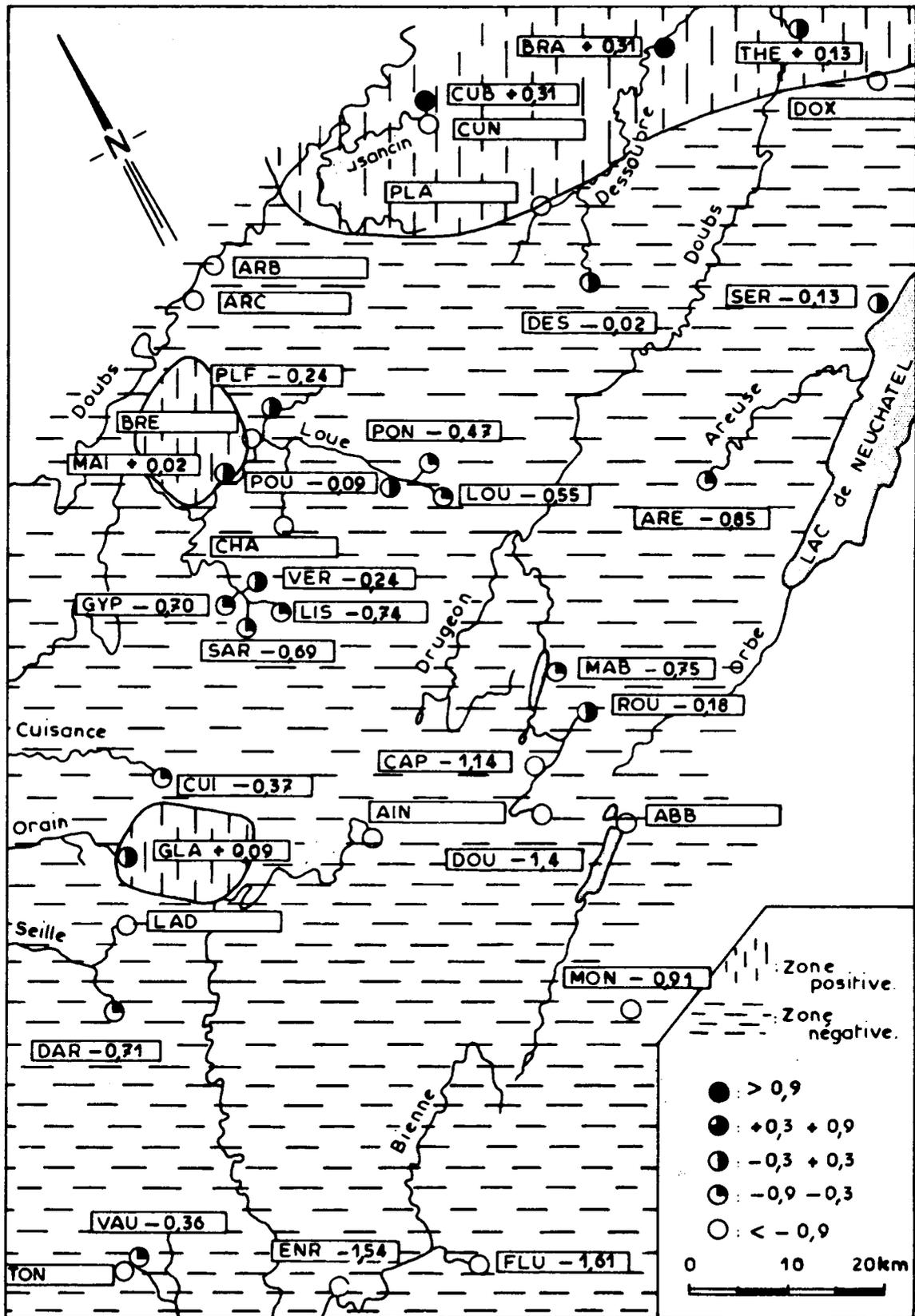


Figure 11 : Analyse en composantes principales, valeurs normées (CPN). 2ème campagne. Valeur du premier facteur aux différentes émergences.

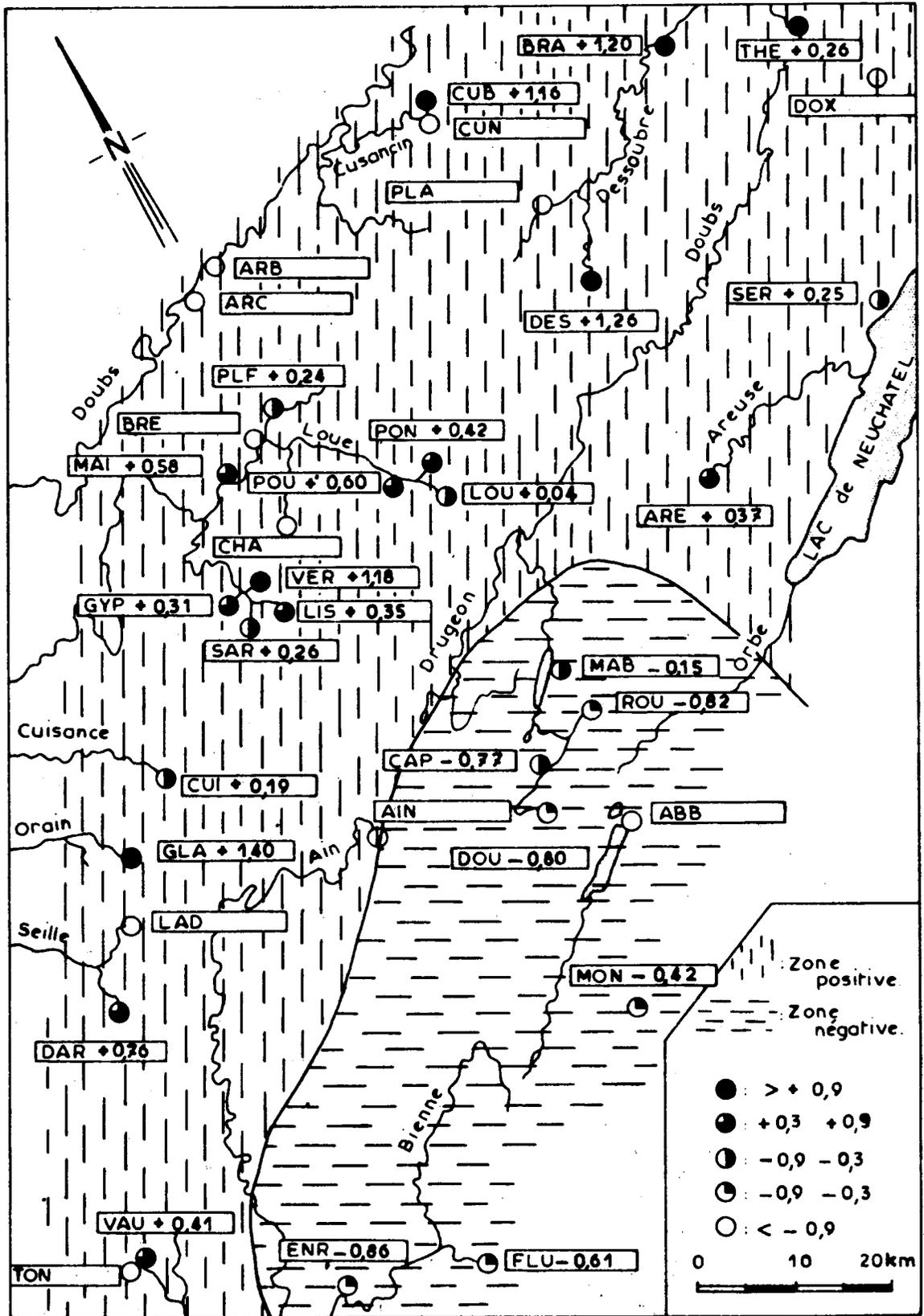


Figure 12 : Analyse en compantes principales, valeurs normées (CPN). 3ème campagne. Valeur du premier facteur aux différentes émergences.

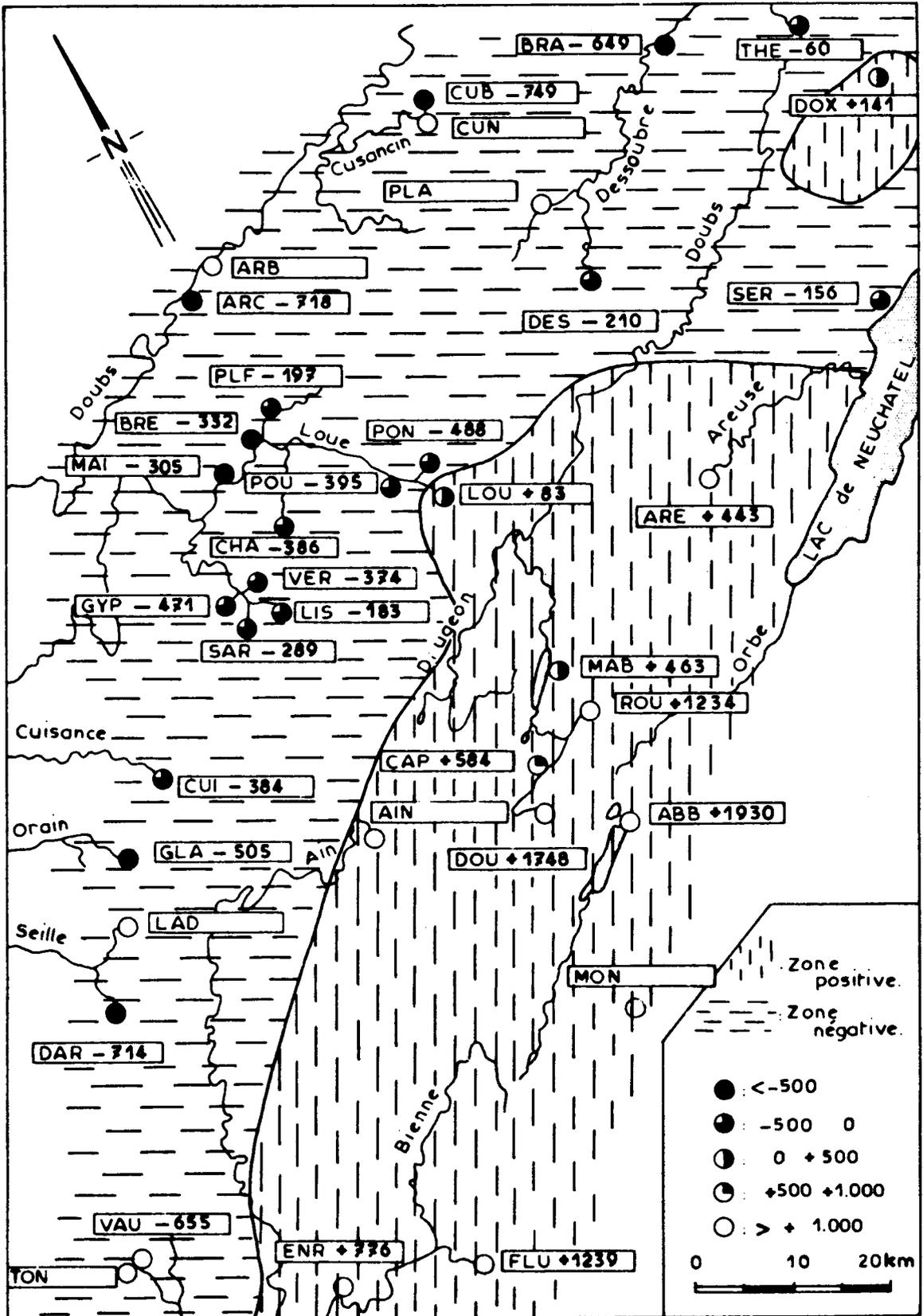


Figure 13 : Analyse factorielle des correspondances, valeurs classées (FCC). 1ère campagne. Valeur du premier facteur aux différentes émergences.

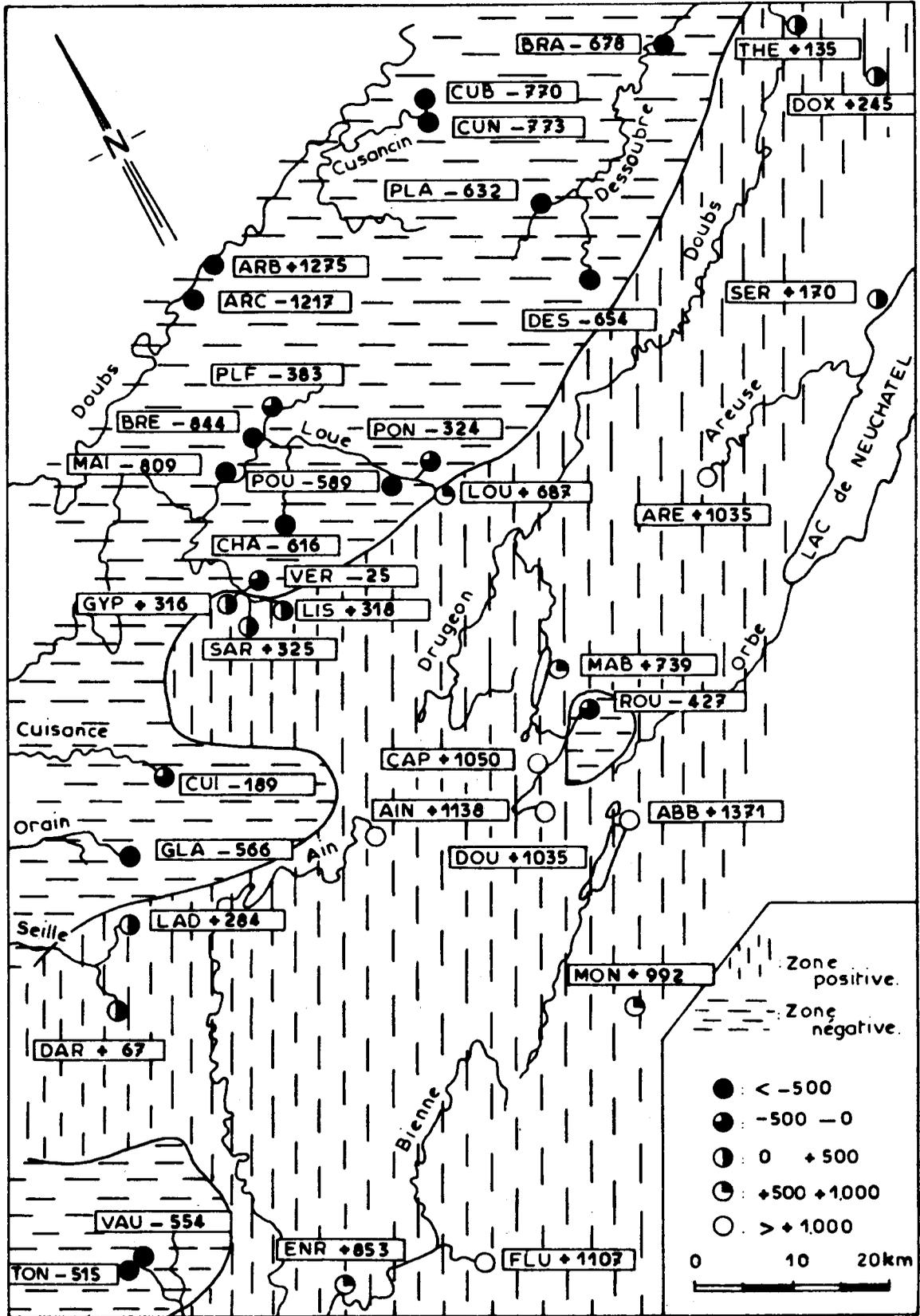


Figure 14 : Analyse factorielle des correspondances, valeurs classées (FCC) 2ème campagne. Valeur du premier facteur aux différentes émergences.

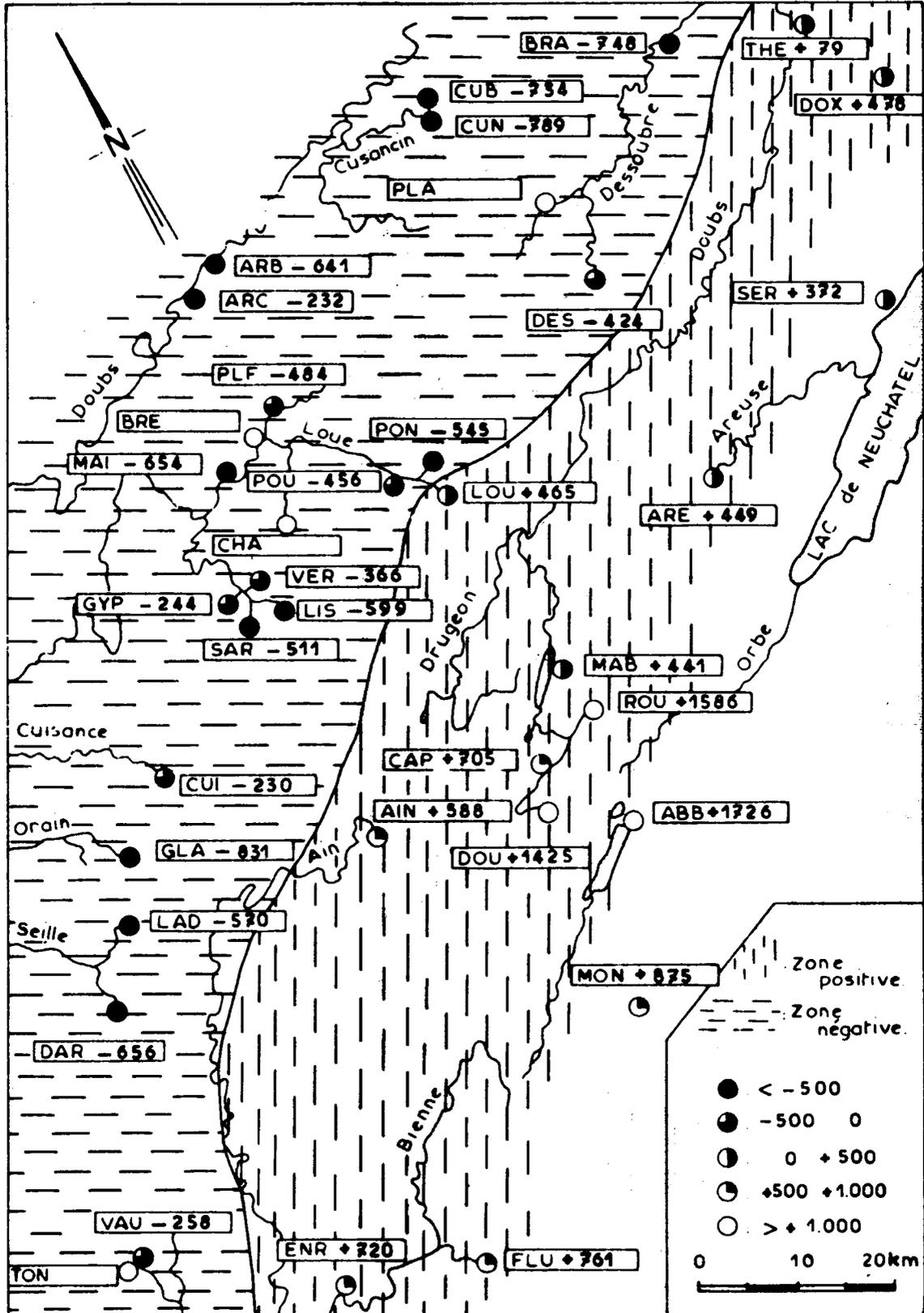


Figure 15 : Analyse factorielle des correspondances, valeurs classées (FCC), 3ème campagne. Valeur du premier facteur aux différentes émergences.

La figure 10 montre une zone négative avec, comme noyaux, le Flumen et le Doubs, et une zone positive avec, comme noyau, le Dard, le Verneau, le Dessoubre, le Cusancin et le Bief de Brans.

Le passage des valeurs positives aux valeurs négatives se fait sur le deuxième Plateau, dont toutes les émergences sont positives à l'exception du Lison et de la Sarrasine. A remarquer deux points négatifs isolés au milieu de la zone positive: Plaisir-Fontaine et le Maine, dont l'alimentation peut provenir proparte d'une zone plus interne.

La figure 11 (crue de fonte de neige) fait apparaître "l'invasion" des valeurs négatives sur les plateaux, à l'exception de la Glantine, du Maine, du Theusseret et, surtout, du Bief de Brans et du Cusancin.

La figure 12 (étiage d'été) montre une situation inverse: "invasion" d'une partie de la zone plissée par les valeurs positives, en particulier les émergences de la Serrières et de l'Areuse. Seule le Haut-Jura Sud demeure négatif.

Sur les trois figures, il apparaît que la source de la Loue subit l'influence du Haut-Doubs. Elle a toujours des valeurs plus négatives que le Pontet et le Bief Poutot.

3b.2) Analyse factorielle des correspondances sur valeurs classées (FCC)

Sur la figure 13, on découvre une limite assez similaire à celle de la figure 10: lors de la première campagne, les émergences de la Haute-chaîne (sauf le Theusseret et la Serrières) s'opposent à celles des Plateaux (excepté la Loue).

La figure 14 montre une limite nette des valeurs de la Haute-chaîne dans le Jura septentrional);

dans le Jura central et méridional, les valeurs du Haut-Jura envahissent les Plateaux, et seules deux zones demeurent avec des caractères du Plateau: les reculés du Nord (Cuisance et Glantine) et le bassin d'Orgelet.

Il faut remarquer une exception à ce schéma : le Bief Rouge qui, à cette campagne, a une valeur voisine du groupe Plateau.

A la fin de l'étiage d'été (3ème campagne -fig. 15), la limite entre valeurs positives et valeurs négatives du premier facteur est confondue avec le contact Haute-chaîne deuxième Plateau. Il convient de remarquer que les sources de l'Ain et de la Loue se rattachent au groupe Haut-Jura ce qui est connu, du point de vue hydrodynamique.

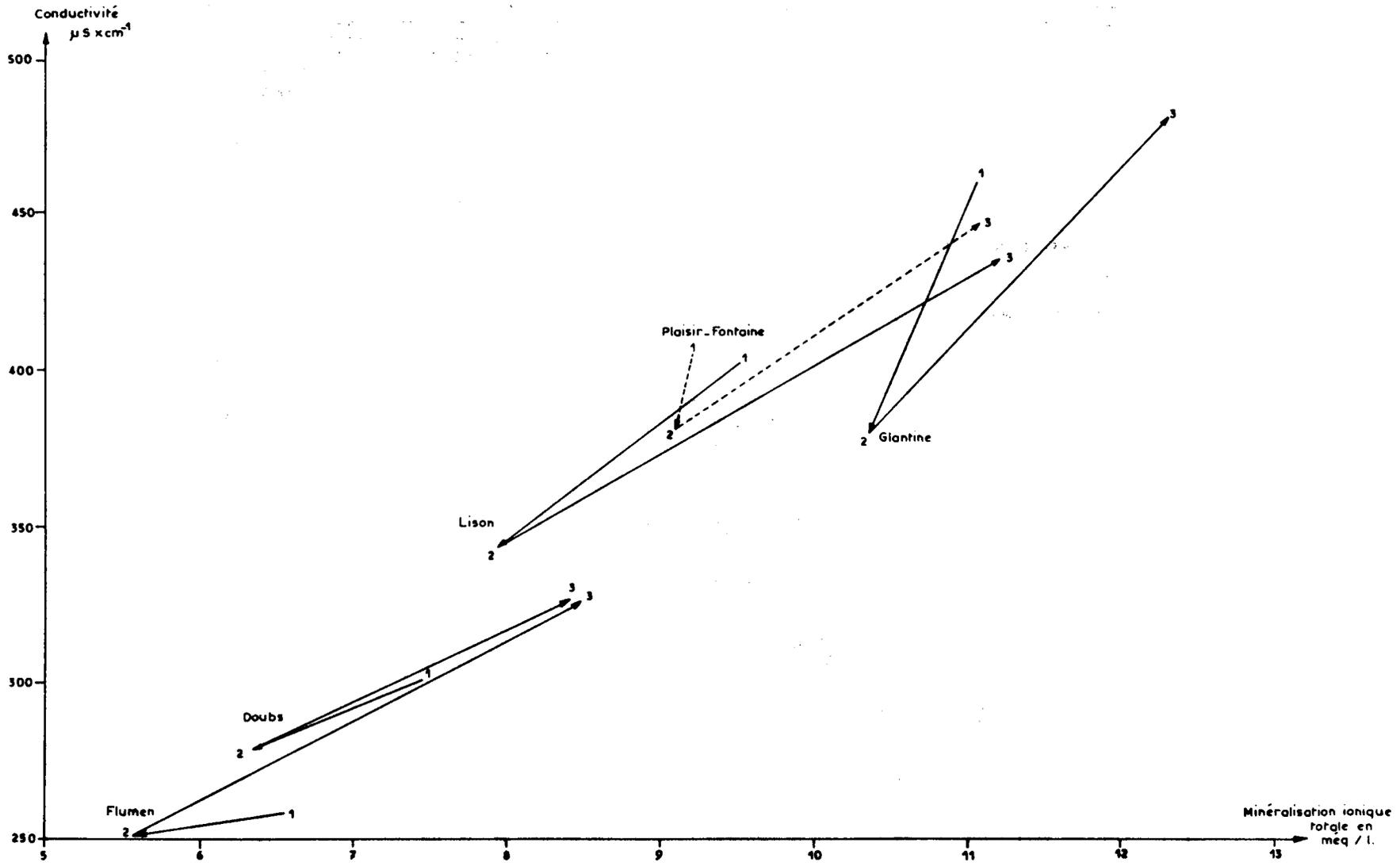
3c.) Relation conductivité - minéralisation

La figure 16 représente la distribution des sources du Jura au cours des trois campagnes, sur un diagramme bivarié conductivité - minéralisation. Ce diagramme, comme les diagrammes factoriels ci-dessus présentés, montre un décalage des enveloppes des nuages de point : la troisième campagne est en haut à droite, la seconde en bas à gauche et la première est intermédiaire.

Le meilleur alignement de points est obtenu au cours de la troisième campagne, les points les plus dispersés au cours de la deuxième.

La figure 17 montre l'évolution entre les trois campagnes pour quelques points. Certaines sources, quelle que soit la campagne, ont une minéralisation totale inférieure à 9 meq/l (Doubs, Flumen). D'autres demeurent au-dessus de 10 meq/l.

Figure 17 : Relation minéralisation ionique totale. Conductivité. Evolution de quelques émergences au cours des 3 campagnes.



4. ANALYSE MULTIVARIEE D'UNE CRUE ISOLEE DE LA SOURCE DE L'AREUSE

Les résultats décrits dans le chapitre précédent montrent la variation du chimisme de quelques sources karstiques pour trois états des aquifères : basses eaux d'hiver, hautes eaux dues à la fonte des neiges et basses eaux d'été. Il s'agit donc, de deux périodes de tarissement (ou de vidange) séparées par une période de recharge des réserves.

Les implications hydrodynamiques de l'hétérogénéité organisée des perméabilités et de l'hétérogénéité spatiale des alimentations dans le karst laissent supposer que les variations du chimisme observées aux exutoires sont dues, en grande partie, à l'évolution des systèmes d'écoulement karstiques dans le temps : "dilution" dans le réseau karstique et dans son voisinage en période de recharge, augmentation de la minéralisation en phase de tarissement des volumes peu perméables (KIRALY et MULLER, 1979; KIRALY et MOREL, 1976). Il va sans dire que le "contraste" entre phase de tarissement et phase de recharge dépendra non seulement du degré d'hétérogénéité de l'aquifère, mais aussi de l'importance des infiltrations dans chaque aquifère particulier et du "passé" hydrodynamique de la nappe (succession des épisodes d'alimentation dans le temps, durée des tarissements).

Pour mettre en évidence certaines analogies entre les résultats décrits dans le chapitre précédent (voir figures 5, 7 et 9) et la variation "continue" du chimisme lors d'un épisode de recharge, nous présentons, très brièvement, l'analyse multivariée d'une crue isolée de la source de l'Areuse (voir KIRALY et MULLER, 1979).

La figure 18 montre l'hydrogramme de la source de l'Areuse, la variation de la conductivité

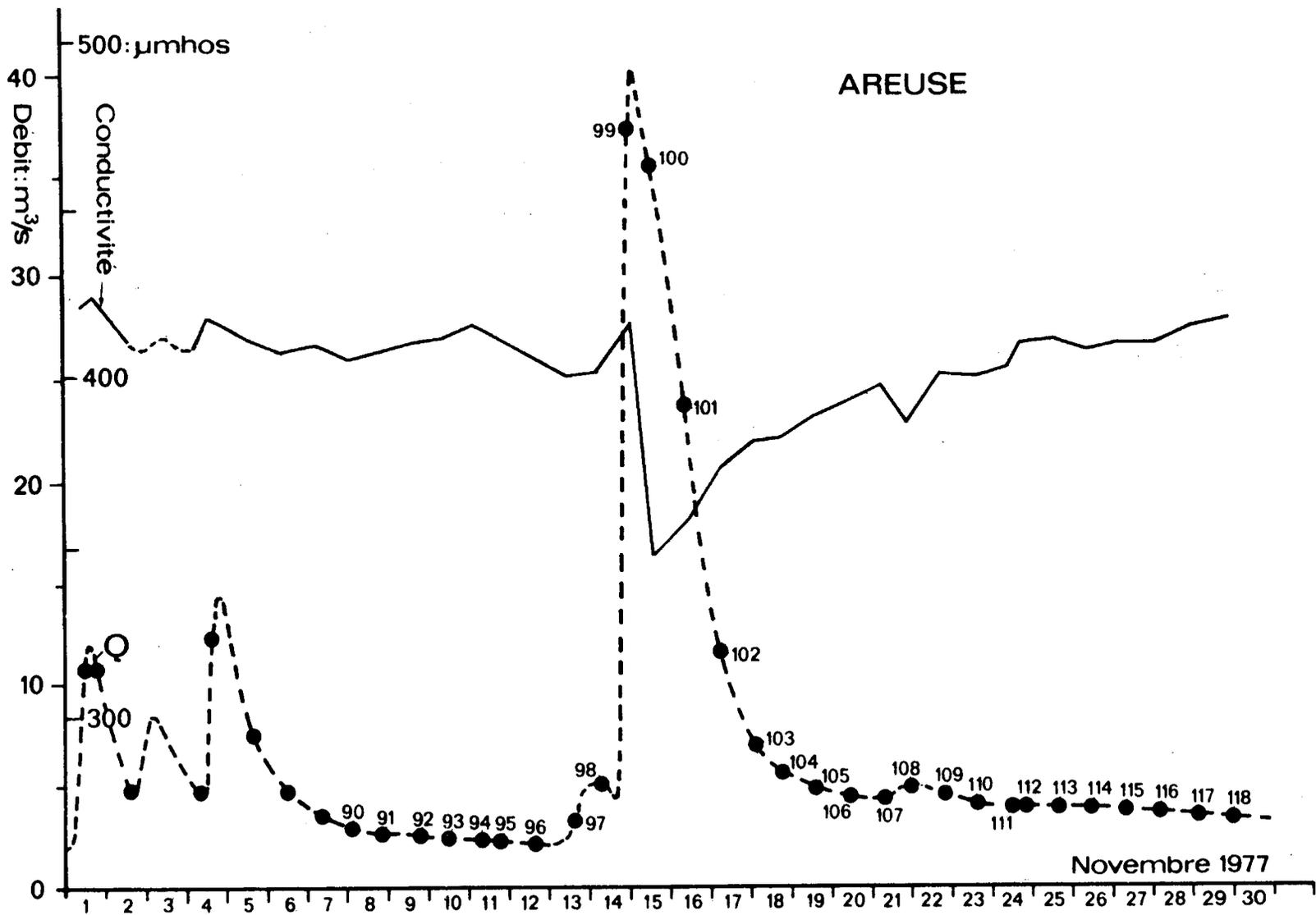
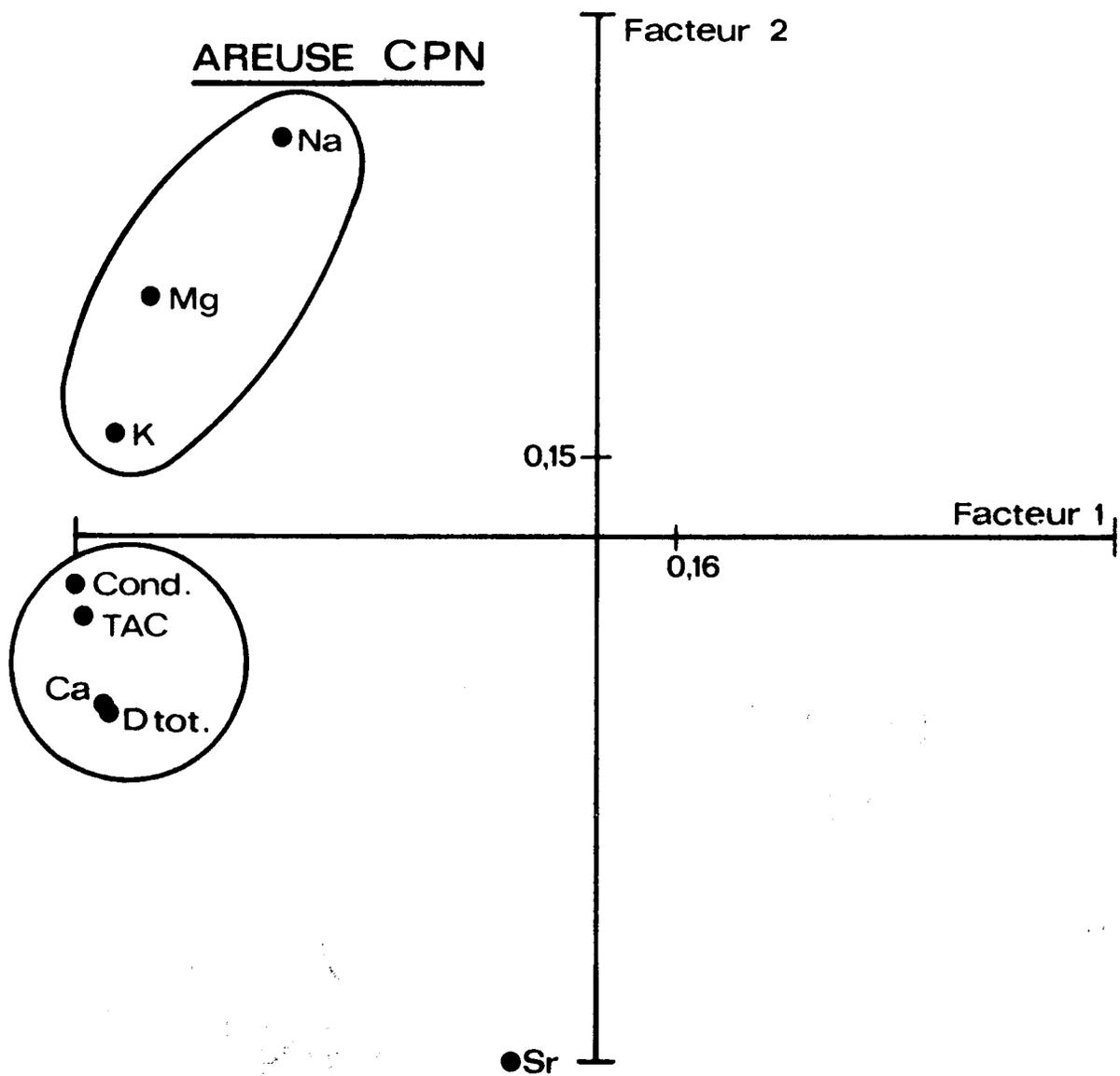


Figure 18 : Hydrogramme et conductivité de l'eau et position des échantillons de l'Areuse

Figure 19 : Projection des variables originelles de l'Areuse



électrique de l'eau et la position des échantillons (de 90 à 118) par rapport à l'hydrogramme. Pour visualiser l'évolution du chimisme dans le temps, nous avons utilisé la technique des composantes principales sur valeurs standardisées. Les variables originales et les échantillons sont représentés dans le plan factoriel 1 - 2 (figures 19 et 20) et le numéro des échantillons indique leur position "dans le temps". La phase de tarissement précédant la crue du 15 novembre 1977 est représentée par les échantillons qui forment le groupe 1 de la figure 20. (Numéros 90 à 99). La "dilution" arrive avec l'échantillon 100 (déjà sur la branche descendante de l'hydrogramme) et pendant la vidange du réseau on observe une augmentation progressive de la minéralisation ainsi qu'un changement "régulier" de la composition chimique globale (groupe 2 de la figure 20). A partir de l'échantillon 112 (environ 10 jours après le début de la crue) c'est la phase de tarissement des volumes peu perméables, cette phase étant représentée par le groupe 3 de la figure 20.

Il est intéressant de remarquer que les basses eaux précédant la crue n'ont pas la même composition chimique globale que les basses eaux succédant à la crue, la différence étant due surtout à l'influence du facteur 2 (Na, K, Mg et Sr). C'est pendant la vidange du réseau karstique que l'on observe les variations les plus importantes du chimisme de la source et les échantillons isolés, pris pendant la décroissance rapide, doivent être interprétés avec beaucoup de précautions. Si nous prenons un échantillon, au hasard, dans chacun des trois groupes de la figure 20 nous obtenons des trajectoires tout à fait semblables à celles qui sont représentées sur la figure 5 et que l'on a obtenues à partir d'échantillons isolés. Même si la position du "point" représentant la période de recharge est incertaine, l'analogie entre les figures et, probablement, entre les mécanismes

est frappante.

Nous pensons, par conséquent, que même des échantillons "isolés" peuvent donner des renseignements intéressants, à condition de les situer par rapport aux périodes de recharges, par rapport à la vidange du réseau et par rapport au tarissement des volumes peu perméables.

5. CONCLUSION

Les oppositions chimiques décelées entre les sources ne peuvent pas être le seul fait du régime thermique: par exemple, la température moyenne journalière en janvier et février sur l'impluvium de la Glantine est, sans conteste, bien inférieure à celle de septembre sur le bassin alimentaire du Doubs. Cependant, il existe 2,5 meq/l d'écart entre le Flumen ou le Doubs en septembre et la Glantine en février.

De même, campagne par campagne, ce ne sont pas les 4° C d'écart thermique moyen entre le Bas-Jura et la Haute-chaîne qui peuvent expliquer la gamme de minéralisation, allant du simple au double. En outre, on note des taux de tritium allant du simple au triple au cours d'une même campagne: ce phénomène n'est pas essentiellement lié au taux de saturation en bicarbonates.

La cause principale, commune à tous ces déplacements de teneurs, est hydrodynamique, les faibles teneurs étant liées à la dilution par les eaux de surface.

Il est remarquable que les phénomènes mis en évidence au cours d'une crue d'une source se retrouvent, à l'échelle du Jura, sur 3 échantillonnages répartis sur le cycle hydrologique.

L'examen des variations entre les 3 campagnes montre, tout comme l'analyse suivie d'une crue, que la dilution décale les points sur le diagramme, mais que le retour au flot de base amène les points à une position différente du départ. Cela indique que la crue a fait évoluer le chimisme de l'aquifère karstique en rechargeant les marges des blocs peu transmissifs avec une eau diluée, apportée rapidement de la surface. Cette eau est extraite du système karstique lors de la décrue, ses caractères chimiques sont différents de ceux de la décrue précédente.

Lors des décrues, l'augmentation de la minéralisation et tous les déplacements de teneurs peuvent être le fait :

- soit de l'augmentation de la surface de contact eau - roche,
- soit de l'augmentation du temps de séjour moyen de l'eau dans l'aquifère grâce à une diminution des vitesses de transit.

En fait, les deux possibilités sont liées car l'eau à temps de séjour long provient de zones peu transmissives où la surface de contact avec la roche est grande.

Le marquage chimique obtenu à la sortie des aquifères résulte de la distribution des temps de séjour à l'amont du milieu karstique, soit dans celui-ci.

Ainsi, pour la source de l'Areuse, la dilution (apport rapide et massif d'eau superficielle à l'exutoire) provient du signal-pluie sur le bassin d'alimentation. Pour les sources de l'ensemble du Jura, qui sont censées avoir été prélevées dans les mêmes conditions climatiques, la distribution des temps de séjour est fonction des vitesses, donc des gradients. Les gradients mis en évidence sont fonction des

isohypses du substratum imperméable, c'est-à-dire de la structure du Jura. Ainsi s'opposent, dans cette analyse multivariée, les sources des zones tabulaires externes, à faible gradient donc à forte minéralisation, forte teneur en tritium, aux émergences du Haut-Jura plissé, à fort gradient, donc à faible minéralisation et à taux de tritium comparable à celui des pluies actuelles.

BIBLIOGRAPHIE

- LEBART L. et FENELON J.-P. (1975) : Statistique et informatique appliquées (Dunod, Paris, 439 p.)
- BLAVOUX B., BURGER A., CHAUVE P. et MUDRY J. (1979) Utilisation des isotopes du milieu pour la prospection hydrogéologique d'une région karstique. Application à la chaîne du Jura Rev. Geogr.Phys. et Géol. Dyn. (à paraître)
- KIRALY L., et MULLER I., (1979): Hétérogénéité de la perméabilité et de l'alimentation dans le karst : effet sur la variation du chimisme des sources karstiques. (Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel, 1979).