**Zeitschrift:** Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles

**Herausgeber:** Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles

**Band:** 123 (2000)

**Artikel:** Dynamisme du fer depuis les marais et tourbes de la vallée des Ponts-de-Martel jusqu'à la résurgence de la Noiraigue (Jura neuchâtelois, Suisse). 2, Transit du fer de la pédosphère (Vallée des Ponts) à la résurgence karstique (source de la Noiraigue)

**Autor:** Bouyer, Yves

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-89542

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 14.12.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

# DYNAMISME DU FER DEPUIS LES MARAIS ET TOURBES DE LA VALLÉE DES PONTS-DE-MARTEL JUSQU'À LA RÉSURGENCE DE LA NOIRAIGUE (JURA NEUCHÂTELOIS, SUISSE)

## 2. TRANSIT DU FER DE LA PÉDOSPHÈRE (VALLÉE DES PONTS) À LA RÉSURGENCE KARSTIQUE (SOURCE DE LA NOIRAIGUE)[1]

YVES BOUYER

Laboratoire de Minéralogie, Pétrographie et Géochimie, Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel, 11, rue Emile-Argand, CH-2007 Neuchâtel, Suisse.

**Résumé**

Dans la pédosphère, le fer est libéré soit à partir des gleys en voie de décarbonatation dans le marais acide (sa concentration dans les eaux est alors corrélée à celle de la dureté), soit de ceux déjà décarbonatés dans le marais amendé (elle est alors corrélée à $SiO_2$ et Mg). Après son séjour dans les sols, il sort du marais, complexé par la matrice organique qui le maintient en solution. Dès que ces complexes rencontrent des roches ou des eaux calcaires, la matière organique flocule et le fer abandonné précipite soit en surface dans les cailloutis calcaires, soit dans les chenaux karstiques. Lors de fortes pluies, ce fer précipité est chassé par l'effet de la pression (effet piston) avant que la montée du débit à la source soit significative; il apparaît alors sans être accompagné des éléments chimiques ni de la matière organique de la surface du bassin. En revanche au maximum de la crue, la vitesse de transit est telle que le complexe matière organique-fer n'a pas le temps d'être influencé par le calcaire et arrive en même temps que les sulfates ainsi que le potassium lié au cortège argileux, dès la surface du bassin.

**Summary**

Within the pedosphere, the iron is released either from the "gleys" that are in the process of decarbonating in the acidic marshland (its concentration in the waters is then correlated to that the hardness of the water) or from those already decarbonated in the modified marshland (then closely related to $SiO_2$ and Mg). After laying in the soil, the iron is then released from the marshland, complexed with the organic substance that maintains it in solution.

As soon as these complexes are in contact with the calcareous rocks, the organic substance floculates, and the released iron is precipitated to the surface either in the calcareous gravel or in the karstic water-pipes.

During pouring rains, this released iron is expelled to the spring by pressure ("piston effect") before the flow of the spring becomes significant, it is then found without any chemical elements or organic substance of the surface of the reservoir. On the other hand, when swelling occurs, the

[1] Cet article est la seconde partie d'un condensé de la thèse soutenue à la Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel devant un jury composé de B. Kübler, directeur de thèse, J.J. Miserez et I. Müller, professeurs à l'Université de Neuchâtel (Suisse) et de B. Fritz, professeur, CNRS, Strasbourg (France).

transit is so fast that the complexes of the organic substance and the iron has no time to be influenced by the calcareous rocks and it then arrives to the spring coming from the surface of the reservoir at the same time as the sulfates and the potassium that is already blended to the clay.

## 1. INTRODUCTION

Les relations entre le contenu chimique des eaux disparaissant à l'emposieu (perte) et celui des eaux réapparaissant à l'exutoire (source) ne peuvent s'expliquer que si l'on procède à des analyses rapprochées dans le temps.

La composition de la charge dissoute indique par sa nature l'origine des eaux exportées du bassin et par sa quantité l'importance de l'érosion.

Le premier objectif est donc de différencier à la source les eaux venant de la pédosphère de celles, souterraines, venant des "blocs capacitifs" - peu perméables mais de volumes relativement importants (ces blocs pouvant contenir selon MANGIN (1975) des cavités karstiques[2] isolées) pour mieux comprendre localement d'abord et pour tout le bassin ensuite les mécanismes d'érosion aussi bien mécaniques que chimiques. Des précurseurs comme KIRALY & MÜLLER (1979) ont fort bien démontré déjà l'hétérogénéité de la perméabilité et de l'alimentation dans le karst. Par ailleurs, il a été démontré (BOUYER & KÜBLER, 1981) qu'en étiage, les eaux de la source étaient le mélange de celles venant des blocs capacitifs sur lequel viennent s'ajouter les eaux de surface.

Le deuxième objectif porte sur le suivi du fer arrivant avec les précipitations météoriques sur la partie supérieure du bassin, traversant la pédosphère puis le karst pour arriver à la source.

Le fer, s'il est représentatif de l'origine des eaux, pourra servir de traceur. On met en évidence également le rôle des conditions saisonnières sur le départ de cet élément du karst.

## 2. RÉSULTATS DÉJÀ ÉTABLIS

a) L'hétérogénéité chimique et hydrologique des eaux souterraines de ce karst (bassin de la Noiraigue) a été étudiée par BOUYER & KÜBLER (1981). Dans cet article, l'analyse des correspondances fait ressortir:

1. une parenté étroite entre les eaux de la Noiraigue (résurgence) et du Bied (perte ponctuelle, emposieu du Voisinage);
2. une grande différence entre les eaux des piézomètres et les eaux de surface aussi bien des marais acides que des marais élargis, amendés.

b) Données récentes sur la géologie de la vallée des Ponts-de-Martel

Sur les figures 1 et 2 de ATTEIA *et al.* (1996), on voit principalement deux systèmes de circulation d'eau: un système rapide dans les calcaires du Portlandien et Kimméridgien (bord de la vallée) et un système plus lent agissant comme une éponge (sols organiques des tourbières, niveaux argileux et molasse marine imperméables occupant le fond de la vallée, "blocs capacitifs" avec des petites fissures).

## 3. MÉTHODES

Les prélèvements des échantillons solides et liquides, l'analyse chimique des eaux et des sols, l'extraction et les propriétés de la matière organique, l'analyse mathématique des résultats (analyse des correspondances et factorielle par composantes principales) ont été décrits dans un article précédent (BOUYER, 1999). Les précipitations, les débits et les températures

[2] Karst: Relief particulier aux régions dans lesquelles les roches calcaires forment d'épaisses assises, et résultant de l'action, en grande partie souterraine, d'eaux dissolvant le carbonate de calcium.

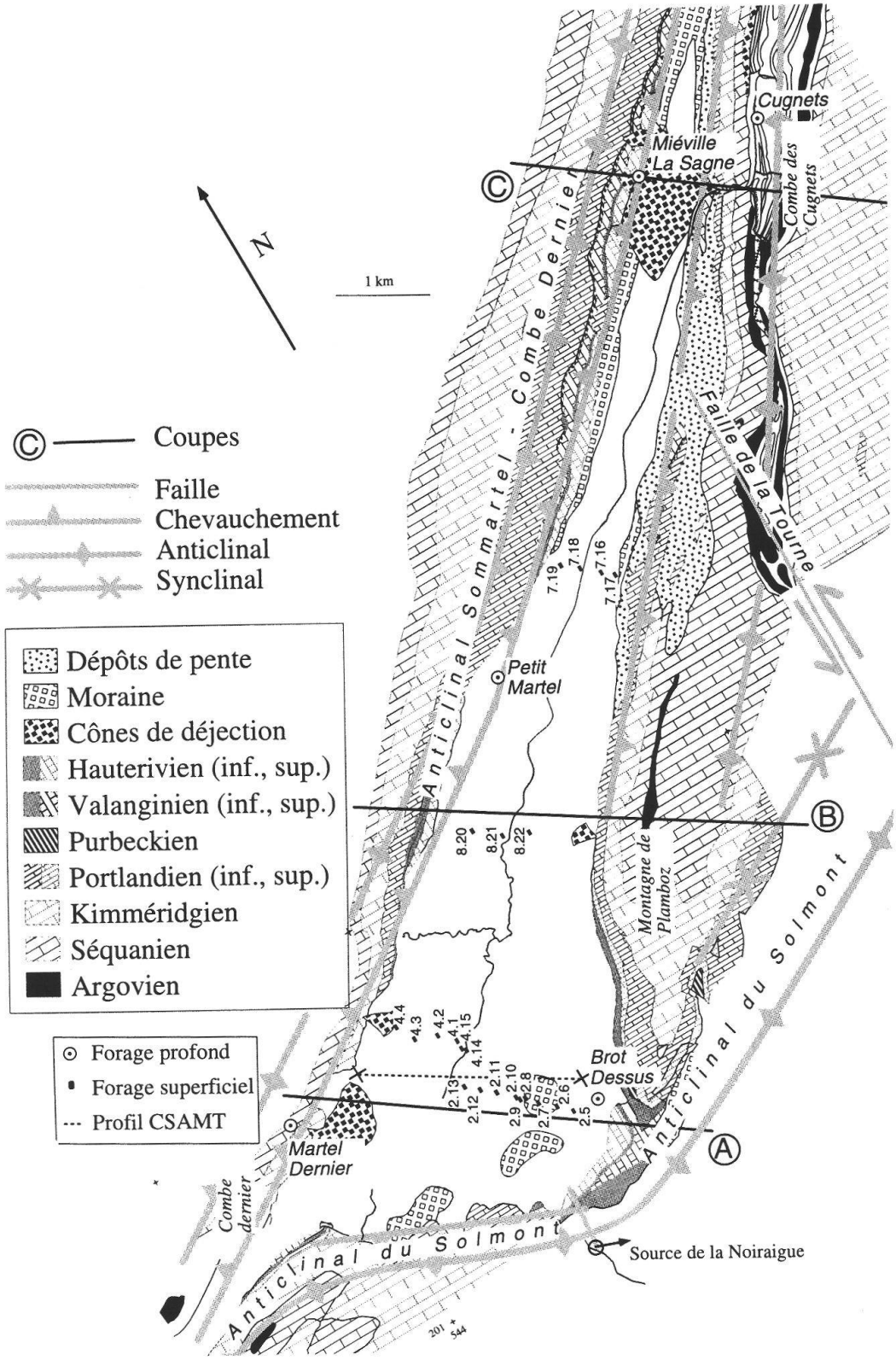



**Figure 1**: Esquisse géologique et structurale comprenant la localisation des forages superficiels et profonds, du profil CSAMT (Controlled Source Audio Magnetotellurics) et des coupes géologiques (représentées en figure 2), d'après ATTEIA *et al.* (1996).

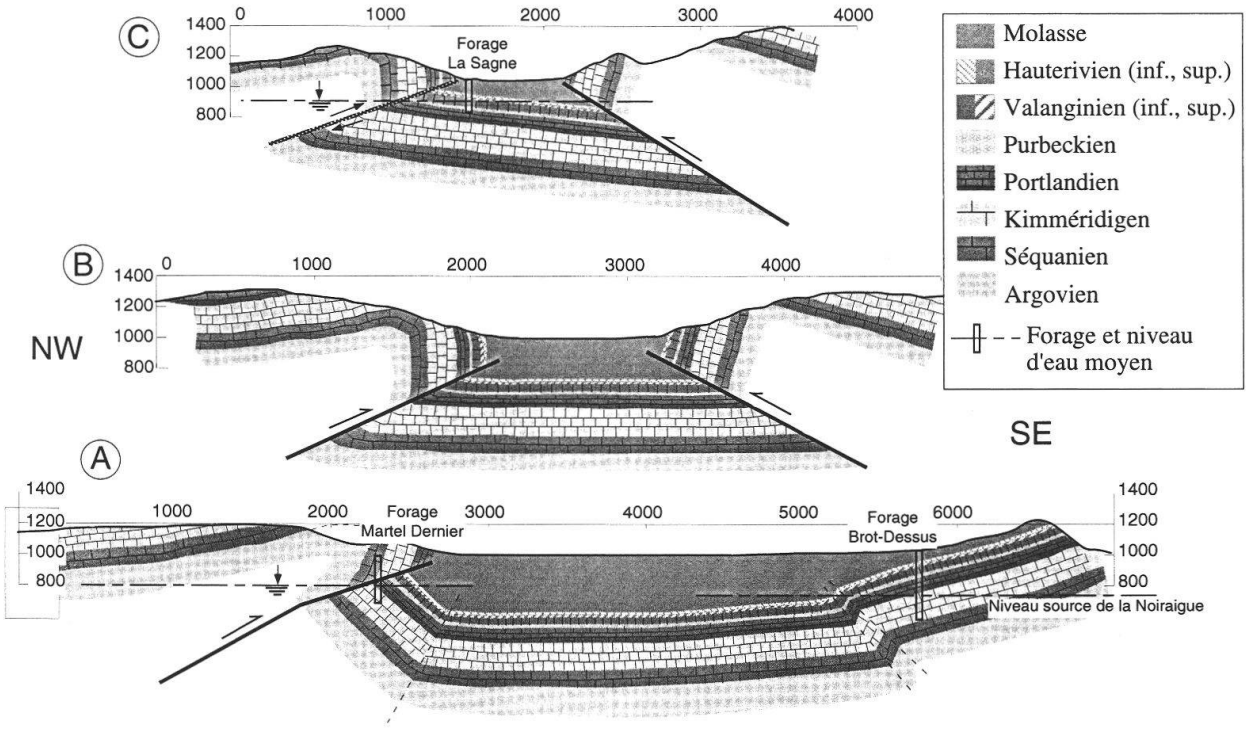



**Figure 2:** Coupes géologiques perpendiculaires à l'axe de la vallée des Ponts avec localisation des forages profonds et des niveaux de base dans ces forages. La trace des coupes est indiquée à la figure 1, d'après ATTEIA *et al.* (1996).

journalières ont été communiqués par l'Office fédéral de l'économie hydraulique. Des échantillons liquides ont été prélevés à la source automatiquement par aspiration toutes les deux heures pour une série de mesures, toutes les quatre heures pour l'autre.

Pendant les périodes d'étiage comme de crues, il a été installé, au milieu de la source de la Noiraigue, une roue à aubes entraînant une pompe péristaltique afin de prélever en continu de grandes quantités d'eau pour y déterminer les argiles.

## 4. SITES D'OBSERVATION (fig. 3)

Les points de prélèvements des eaux de surface (points 1 à 12), ainsi que les profils pédologiques ont été décrits précédemment ( BOUYER, 1999). S'ajoutent à l'étude des sols et des eaux de ces points d'observation celle du chimisme et de la mesure des niveaux piézométriques de la résurgence et de quatre forages; il s'agit de ceux des Cugnets (n° 14, aquifère dans le Dogger à 1140 m), de Martel-Dernier (no 15, aquifère dans le Malm à 840 m), de Brot-Dessus (no 16, aquifère dans l'Hauterivien à 741 m) et de Petit-Martel (no 17, aquifère dans la Molasse et dans le Malm à 749 m).

Les données géologiques concernant la situation, la climatologie, l'hydrogéologie du bassin, les résultats des concentrations chimiques prélevées dans les forages se trouvent dans BOUYER & KÜBLER (1981), BOUYER (1999), ATTEIA *et al.* (1996), BURKHARD *et al.* (1998), et GRETILLAT *et al.* (1986).

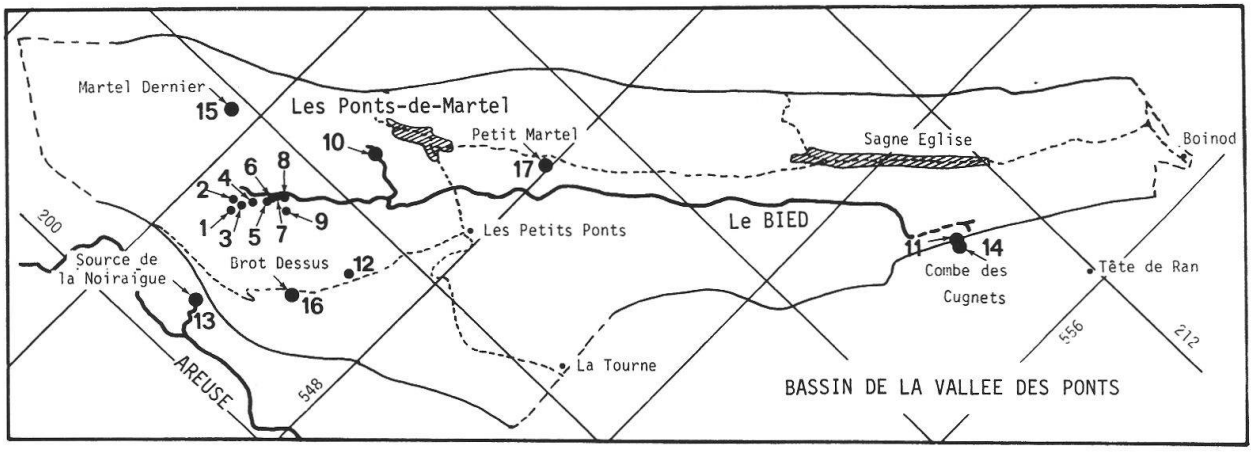



**Figure 3**: Position des piézomètres: 14 à 17; des points d'eau de surface: 1 à 12; de la perte principale du Bied au lieu-dit "Le Voisinage": 10, et de la résurgence de la Noiraigue: 13.

——— limite du bassin

## 5. RÉSULTATS

### *5.1. Analyse des eaux de l'emposieu (n° 10), de la résurgence (no 13), des forages (no 14, 15, 16, 17). (tab. 1)*

Le contenu chimique des eaux des forages reflète bien celui de la roche encaissante. Ces résultats mettent nettement en évidence l'hétérogénéité du karst étudié, eux-mêmes différents de ceux des eaux de l'emposieu et de la résurgence.

### *5.2. Débits aux points 10 et 13*

Emposieu: 1974
Débit moyen annuel=130,93 m³/an/seconde
1975
Débit moyen annuel=117,16 m³/an/seconde

Résurgence 1974
Débit moyen annuel=848,35 m³/an/seconde
1975
Débit moyen annuel=716,04 m³/an/seconde

(Période 1959-1975: Débit moyen annuel= 719,22 m³/an/seconde)

Les débits à l'emposieu au lieu-dit "Le Voisinage"(point 10) représentent 15,43% de ceux de la résurgence de la Noiraigue (point 13) en 1974 et 16,36% en 1975.

### *5.3 Masse du contenu chimique exportée en tonnes/an*

Cette masse est calculée de la façon suivante: masse exportée (en tonnes/an) = C • Q • 0,0864, où

C = concentration des espèces chimiques (mg/l), Q = débit annuel (= débit journalier • 365), 0,0864 = facteur tenant compte du changement d'unités (mg = $10^{-9}$ tonne) et du nombre de secondes par jour.

La masse exportée par an pour chaque élément est rapportée à la surface du bassin indiquant l'importance de l'érosion de ses niveaux supérieurs (tab. 2 et 3). La quantité de substances partant dans l'emposieu rapportée à celle de la résurgence est consignée dans le tableau 4.

### *5.4 Argiles en suspension dans les eaux de l'emposieu (n° 10) et de la résurgence (n° 13)*

Les argiles en suspension dans les eaux de la résurgence et dans celles du marais amendé présentent les mêmes associations, à savoir: quartz, feldspath potassique,

| Variables | *13* Noiraigue | | | *14* Cugnets | | | *15* Martel Dernier | | | *16* Brot-Dessus | | | *17* Petit-Martel | | | *10* Emposieu | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $S_\sigma$ | $N$ | | $S_\sigma$ | $N$ | | $S_\sigma$ | | | $S_\sigma$ | $N$ | | $S_\sigma$ | $N$ | | $S_\sigma$ | $N$ |
| *5* Profondeur (m) | 300 | 0 | 27 | 34 | 17 | 14 | 184 | 8,2 | 14 | 279 | 5,14 | 12 | 263 | 3,75 | 14 | 0 | 0 | 26 |
| *6* $Ca^{2+}$ (ppm) | 81,5 | 6,7 | 27 | 76,7 | 1,6 | 14 | 80,6 | 1,9 | 14 | 71,2 | 6,8 | 12 | 16,7 | 10,17 | 14 | 90,04 | 11,46 | 26 |
| *7* $Mg^{2+}$ (ppm) | 3,9 | 1,0 | 27 | 1,9 | 0,4 | 14 | 0,89 | 0,15 | 14 | 18,54 | 2,68 | 12 | 5,71 | 0,68 | 14 | 4,43 | 2,06 | 26 |
| *8* Fer total, $Fe_{tot}$(ppm) | 0,18 | 0,17 | 27 | 3,32 | 6,37 | 14 | 0,65 | 0,95 | 14 | 3,16 | 3,37 | 12 | 2,94 | 3,53 | 14 | 0,83 | 0,37 | 26 |
| *9* Fer filtré, $Fe_{FI}$ (ppm) | 0,06 | 0,06 | 25 | 0,09 | 0,13 | 12 | 0,14 | 0,11 | 12 | 0,25 | 0,54 | 12 | 0,10 | 0,12 | 12 | 0,40 | 0,13 | 23 |
| *10* $Sr^{2+}$ (ppm) | 0,23 | 0,12 | 27 | 0,18 | 0,04 | 14 | 0,08 | 0,05 | 14 | 0,73 | 0,53 | 12 | 0,10 | 0,05 | 14 | 0,43 | 0,24 | 26 |
| *11* $Na^{+}$ (ppm) | 1,23 | 0,23 | 27 | 0,58 | 0,15 | 14 | 0,81 | 0,14 | 14 | 2,35 | 3,46 | 12 | 2,14 | 0,79 | 14 | 3,16 | 1,81 | 26 |
| *12* $K^{+}$ (ppm) | 0,95 | 0,26 | 27 | 0,58 | 0,31 | 14 | 0,58 | 1,08 | 14 | 1,27 | 0,62 | 12 | 2,12 | 0,44 | 14 | 1,61 | 0,48 | 26 |
| *13* $SO_4^{2-}$ (ppm) | 4,56 | 3,25 | 27 | 5,52 | 1,96 | 14 | 14,50 | 6,81 | 14 | 11,12 | 8,09 | 12 | 1,28 | 1,10 | 14 | 7,53 | 1,90 | 26 |
| *14* $SiO_2$ (ppm) | 3,06 | 0,62 | 27 | 2,79 | 0,84 | 14 | 1,74 | 0,59 | 14 | 3,31 | 0,99 | 12 | 0,60 | 0,47 | 14 | 3,71 | 1,40 | 26 |
| *15* $NO_3^{-}$ (ppm) | 5,05 | 2,90 | 27 | 2,35 | 1,41 | 14 | 26,87 | 15,15 | 14 | 1,47 | 1,00 | 12 | 0,29 | 0,23 | 14 | 3,64 | 1,92 | 26 |
| *16* $Cl^{-}$ (ppm) | 3,05 | 1,17 | 27 | 1,05 | 0,65 | 14 | 2,89 | 1,48 | 14 | 8,31 | 10,7 | 12 | 5,53 | 1,58 | 14 | 6,62 | 8,72 | 26 |
| *17* Oxygène dissous (ppm) | 9,20 | 1,50 | 27 | 10,25 | 1,21 | 14 | 11,68 | 0,98 | 14 | 10,53 | 1,3 | 12 | 3,65 | 0,54 | 14 | 8,65 | 2,38 | 26 |
| *18* Conductibilité ($\mu$S) | 379,8 | 16,89 | 27 | 344,5 | 21,5 | 14 | 373,8 | 113,7 | 14 | 411,62 | 22,1 | 12 | 111,6 | 12,2 | 14 | 432,23 | 5,83 | 26 |
| *19* pH | 7,32 | 0,21 | 27 | 7,31 | 0,15 | 14 | 7,45 | 0,32 | 14 | 7,54 | 0,11 | 12 | 9,2 | 5,5 | 14 | 7,51 | 0,33 | 26 |
| *20* Température (°C) | 7,71 | 0,60 | 27 | 5,65 | 0,58 | 14 | 7,64 | 0,27 | 14 | 7,17 | 0,22 | 12 | 8,2 | 0,25 | 14 | 8,88 | 4,02 | 26 |
| *21* $PO_4^{3-}$(ppm) | 0,33 | 0,35 | 27 | 0,30 | 0,23 | 14 | 0,29 | 0,27 | 14 | 0,33 | 0,29 | 12 | 0,20 | 0,24 | 14 | 0,93 | 0,62 | 26 |
| *22* Dureté totale, DuTo (ppm) | 225,87 | 13,98 | 27 | 221,40 | 19,5 | 14 | 217,46 | 26,4 | 14 | 260,9 | 17 | 12 | 64,32 | 17,4 | 14 | 256,67 | 3,40 | 26 |
| *23* Dureté temporaire, DuTe (ppm) | 215,64 | 12,69 | 27 | 202,8 | 7,4 | 14 | 167,03 | 17,4 | 14 | 230,4 | 22,8 | 12 | 50,45 | 5,0 | 14 | 243,92 | 3,60 | 26 |
| *24* Matières organiques dissoutes, MO (ppm) | 6,22 | 0,14 | 27 | 5,2 | 0,22 | 14 | 5,6 | 3,8 | 14 | 5,0 | 0 | 12 | 5,07 | 2,16 | 14 | 10,95 | 2,81 | 26 |
| *39* $Fe_{FI}/Fe_{tot}$ (%) | 36,9 | 28,2 | 25 | 17,4 | 16,6 | 12 | 61,2 | 87,5 | 12 | 27,7 | 51,2 | 12 | | | 12 | 56,7 | | |

**Tableau 1**: Moyenne des valeurs chimiques et physiques des eaux de l'emposieu, de la résurgence et des nappes des forages; $S_\sigma$: estimée de l'écart-type. N: nombre de mesures. La période d'analyse se rapporte aux années 1974-1975.

albite, calcite, dolomite, chlorite, kaolinite, illite, illite-chlorite.

En revanche, les eaux des piézomètres ne contiennent pas ce genre d'argiles issues de matériau alpin, mais contiennent en suspension celles de dissolution de la roche encaissante.

### *5.5. Analyses factorielles des correspondances des résultats (fig. 4a, 4b, 5a, 5b, 6)*

Tout d'abord une définition simplifiée de l'analyse des correspondances tirée de CIBOIS (1987): "L'analyse factorielle traite des tableaux de nombres et elle remplace un tableau difficile à lire par un tableau plus facile à lire qui soit une bonne approximation de celui-ci ... Il faut oublier le contenu sémantique attaché dans le langage courant au terme de facteur (comme dans les phrases «le facteur temps» ou «le facteur origine sociale») et le remplacer par son sens mathématique tout à fait ordinaire de «mise en facteur». Par exemple, on met en facteur l'expression $a^2$-$b^2$ sous la forme de produit de facteurs (a+b) et (a-b); on se contente de représenter la même réalité sous une forme plus agréable (pour un calcul ultérieur)".

Dans ces analyses factorielles selon BENZECRI (1973), on retient les variables suivantes: $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, Fer total, $Sr^{2+}$, $Na^+$, $K^+$, $SO_4^{2-}$, $SiO_2$, $NO_3^-$, $Cl^-$, $O_2$, $H^+$, $PO_4^{3-}$, Dureté totale (Du To), Dureté temporaire (Du Te) et Matières organiques dissoutes (M.O.) Elles portent sur les 17 points d'eau de surface (points 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11 et 12), de l'emposieu (n° 10), de la

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ca | 90.8 | mg/l | 1027.6 | tonnes/an | 15.05 | tonnes/Km2 |
| Mg | 4.43 | mg/l | 50.11 | tonnes/an | 0.73 | tonnes/Km2 |
| Fer total | 0.83 | mg/l | 9.38 | tonnes/an | 0.13 | tonnes/Km2 |
| Fer filtré | 0.4 | mg/l | 4.524 | tonnes/an | 0.066 | tonnes/Km2 |
| Sr | 0.04 | mg/l | 0.4524 | tonnes/an | 0.0066 | tonnes/Km2 |
| Na | 3.16 | mg/l | 35.74 | tonnes/an | 0.5225 | tonnes/Km2 |
| K | 1.61 | mg/l | 18.21 | tonnes/an | 0.266 | tonnes/Km2 |
| $SO_4$ | 7.53 | mg/l | 85.18 | tonnes/an | 1.245 | tonnes/Km2 |
| $SiO_2$ | 3.71 | mg/l | 41.96 | tonnes/an | 0.613 | tonnes/Km2 |
| $NO_3$ | 3.64 | mg/l | 41.17 | tonnes/an | 0.6 | tonnes/Km2 |
| CL | 6.62 | mg/l | 74.88 | tonnes/an | 1.094 | tonnes/Km2 |
| $O_2$ | 8.65 | mg/l | 97.85 | tonnes/an | 1.43 | tonnes/Km2 |
| Cond. | 432.2 | mhos | 4889 | """mhos""/an" | | |
| pH | 7.51 | u.pH | | | | |
| T° C | 8.88 | °C | | | | |
| $PO_4$ | 0.93 | mg/l | 10.52 | tonnes/an | 0.153 | tonnes/Km2 |
| Du. tot | 256.6 | mg/l | 2902.74 | tonnes/an | 42.43 | tonnes/Km2 |
| Du. te. | 243.9 | mg/l | 2759.08 | tonnes/an | 40.33 | tonnes/Km2 |
| M.O. | 10.96 | mg/l | 123.98 | tonnes/an | 1.812 | tonnes/Km2 |
| Années | 74-75-76 | Bied des Ponts-de-Martel (emposieu) 27 Obs. | | | S bassin 68.4 Km2 | |

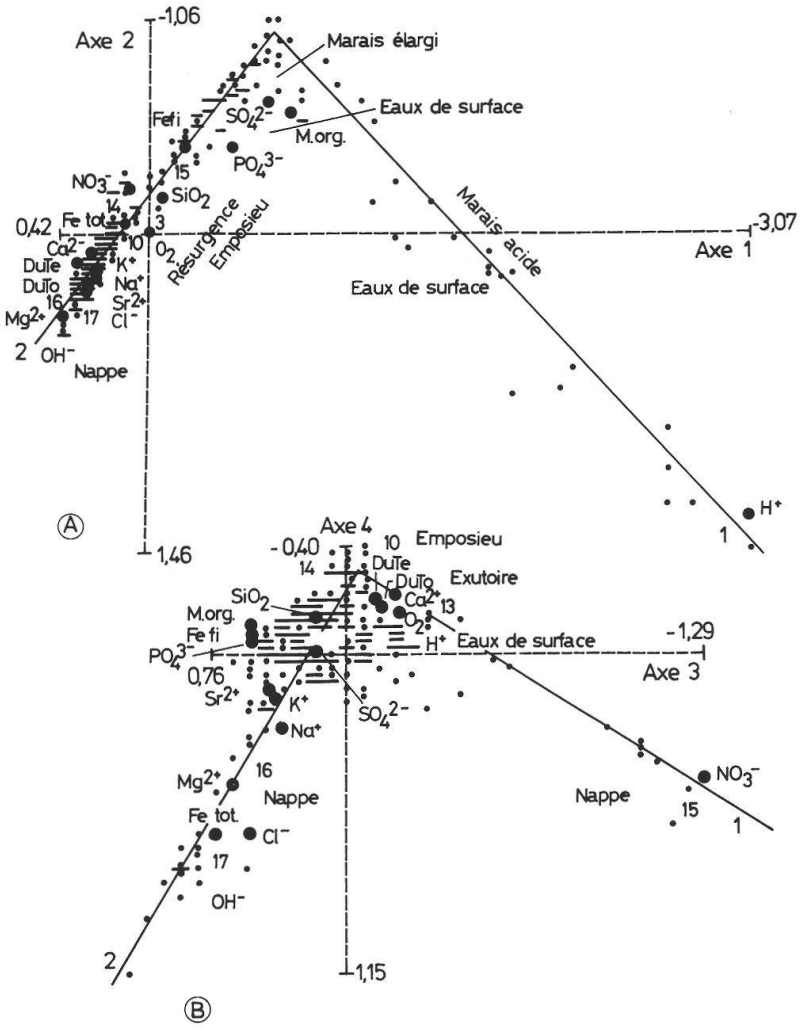
**Tableau 2**: Moyenne des masses des différents paramètres chimiques des eaux de l'emposieu (années 74-75-76). Nombre de mesures N = 27.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Ca | 81.5 | mg/l | 5973.74 | tonnes/an | 87.32 | tonnes/Km2 |
| Mg | 3.93 | mg/l | 288 | tonnes/an | 4.21 | tonnes/Km2 |
| Fer total | 0.18 | mg/l | 13.19 | tonnes/an | 0.192 | tonnes/Km2 |
| Fer filtré | 0.06 | mg/l | 4.39 | tonnes/an | 0.064 | tonnes/Km2 |
| Sr | 0.02 | mg/l | 1.46 | tonnes/an | 0.021 | tonnes/Km2 |
| Na | 1.23 | mg/l | 90.15 | tonnes/an | 1.317 | tonnes/Km2 |
| K | 0.95 | mg/l | 69.63 | tonnes/an | 1.017 | tonnes/Km2 |
| $SO_4$ | 4.56 | mg/l | 334.23 | tonnes/an | 4.88 | tonnes/Km2 |
| $SiO_2$ | 3.06 | mg/l | 224.29 | tonnes/an | 3.27 | tonnes/Km2 |
| $NO_3$ | 5.05 | mg/l | 370.15 | tonnes/an | 5.41 | tonnes/Km2 |
| CL | 3.05 | mg/l | 223.55 | tonnes/an | 3.26 | tonnes/Km2 |
| $O_2$ | 9.2 | mg/l | 674.33 | tonnes/an | 9.85 | tonnes/Km2 |
| Cond. | 379.8 | mhos | 27838.368 | """mhos""/an" | | |
| pH | 7.32 | u.pH | | | | |
| T° C | 7.71 | °C | | | | |
| $PO_4$ | 0.33 | mg/l | 24.18 | tonnes/an | 0.35 | tonnes/Km2 |
| Du. tot | 225.8 | mg/l | 16550.56 | tonnes/an | 241.96 | tonnes/Km2 |
| Du. te. | 215.6 | mg/l | 15802.92 | tonnes/an | 231.06 | tonnes/Km2 |
| M.O. | 6.26 | mg/l | 458.84 | tonnes/an | 6.7 | tonnes/Km2 |
| Années | 74-75-76 | Noiraigue (résurgence) | | | S. bassin: 68.4 $Km^2$ | |

**Tableau 3**: Moyenne des masses des différents paramètres chimiques des eaux de la résurgence (années 74-75-76). Nombre de mesures N = 27.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Ca | 111.4 | % | 17.19 | % |
| Mg | 112.7 | % | 17.39 | % |
| Fer total | 461.6 | % | 71.18 | % |
| Fer filtré | 666.6 | % | 103.0 | % |
| Sr | 200 | % | 30.9 | % |
| Na | 256.9 | % | 39.6 | % |
| K | 169.47 | % | 26.15 | % |
| $SO_4$ | 165.1 | % | 25.48 | % |
| $SiO_2$ | 121.2 | % | 18.7 | % |
| $NO_3$ | 72 | % | 11.12 | % |
| Cl | 217.0 | % | 33.49 | % |
| $O_2$ | 94 | % | 14.5 | % |
| Cond. | 113.7 | % | 17.56 | % |
| PH | | | | |
| T°C | 115.17 | % | | |
| $PO_4$ | 281.8 | % | 43.5 | % |
| Du. tot. | 113.64 | % | 17.5 | % |
| Du. te | 113.12 | % | 17.45 | % |
| M.O. | 175 | % | 27 | % |
| | [ ] Bied / [ ] Noiraigue 100 | | [ ] tonnes / an Bied / [ ] tonnes / an Noir. 100 | |

**Tableau 4**: Rapport des concentrations moyennes des paramètres chimiques des eaux de l'emposieu à celles des eaux de la résurgence (en %), ainsi que le rapport des masses des éléments analysés à l'emposieu à celles de ceux analysés à la résurgence (en %).




**Figures 4a et 4b**: Analyse factorielle des correspondances 4a: Plan 1x2 et 4b: Plan 3x4
Dans les plans des axes factoriels, contributions des observations (petits points) et des variables (gros points). Tous les paramètres et tous les points d'eau y sont représentés. Les eaux du marais naturel sont numérotées de 1 à 7, celles du marais amendé 8, 9, 12, de l'emposieu 10, de la résurgence 13, des différents piézomètres 14, 15, 16 et 17 (prélèvements des 17 points d'eau, années 1974 et 1975). N = 17 observations mensuelles pour chaque point d'eau.

résurgence (n° 13) et des quatre forages (n° 14, 15, 16 et 17). Dans chaque point d'eau, on a 15 observations mensuelles couvrant les quatre saisons. Trois analyses ont été faites:

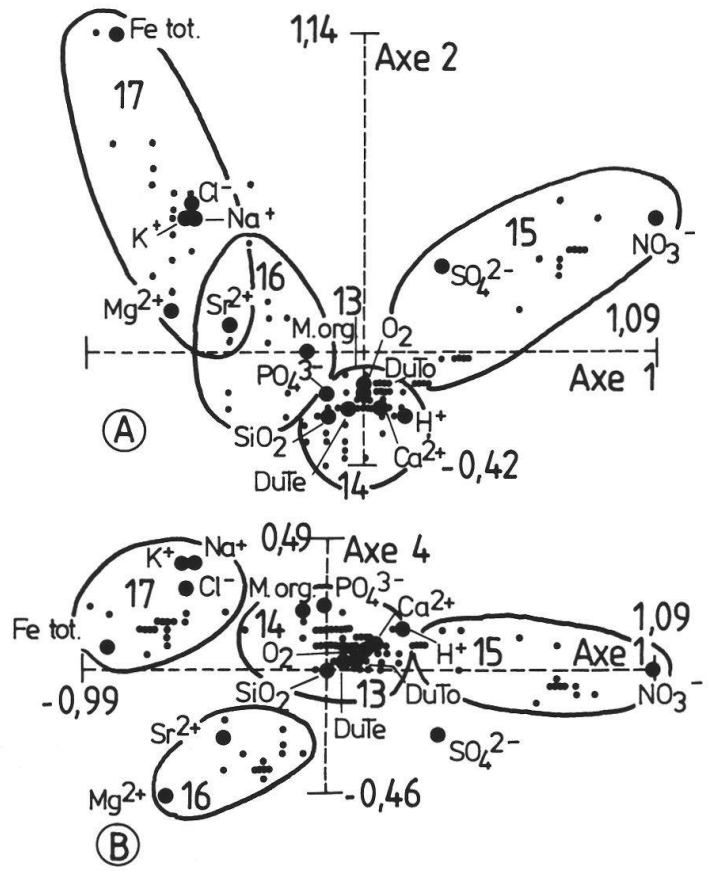
- la première prend en compte tous les points d'eau de surface, de l'emposieu, de la résurgence et des quatre piézomètres;
- la deuxième se rapporte aux eaux de la résurgence et des quatre piézomètres;
- la troisième ne retient que les résultats des eaux des piézomètres.

### *5.6. Coefficients de corrélation linéaire entre les concentrations des mêmes ions dans les eaux de l'emposieu (n° 10) et celles de la résurgence (n° 13)*

*(nombre de mesures = 27 pour chaque point d'observation)*

Les résultats sont les suivants:

r $[Ca^{2+}]$ exutoire - $[Ca^{2+}]$ emposieu = +0,66
r $[Mg^{2+}]$ exutoire - $[Mg^{2+}]$ emposieu = +0,70
r $[Na^+]$ exutoire - $[Na^+]$ emposieu = +0,50
r $[K^+]$ exutoire - $[K^+]$ emposieu = +0,14
r $[SO_4^{2-}]$ exutoire - $[SO_4^{2-}]$ emposieu = +0,78




**Figures 5**: Analyse factorielle des correspondances

**A**: Plan des axes 1x2: On ne conserve que les eaux des piézomètres et de la résurgence par rapport à la figure 4.

**B**: Plan des axes 1x4: On ne conserve que les eaux des piézomètres et de la résurgence par rapport à la figure 4.

(Prélèvements faits entre 1974 et 1975. Les petits points correspondent aux observations, les gros points aux variables).

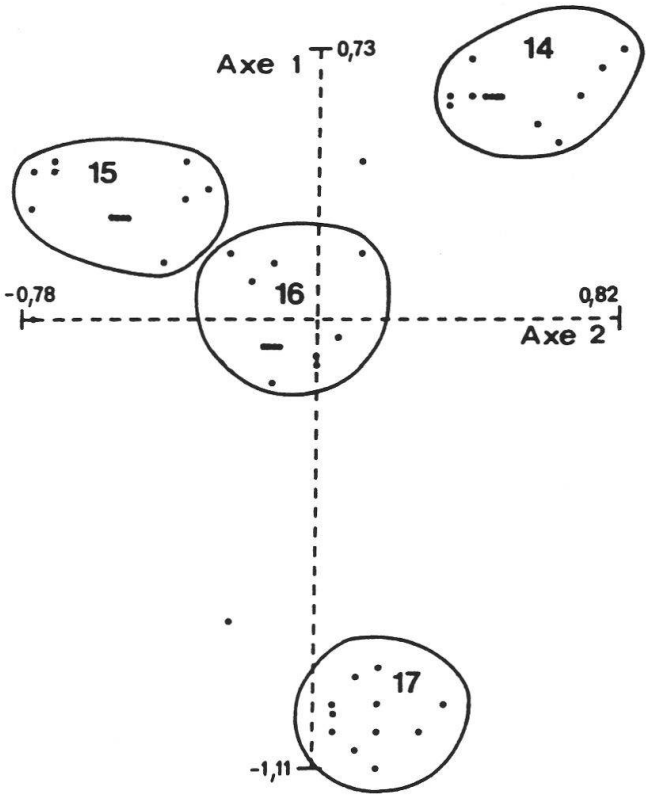



**Figure 6**: Analyse factorielle des correspondances. Plan des axes 1x2 des observations des eaux des piézomètres uniquement; chaque piézomètre, d'après sa composition chimique, occupe une aire distincte et non sécante (observations uniquement).

r [$SiO_2$] exutoire - [$SiO_2$] emposieu = +0,70

r [$NO_3^-$] exutoire - [$NO_3^-$] emposieu = +0,60

r [$Cl^-$] exutoire - [$Cl^-$] emposieu = +0,80

r [$O_2$] exutoire - [$O_2$] emposieu = +0,80

r conductivité exutoire - conductivité emposieu = +0,45

r [Mat. org.] exutoire - [Mat. org.] emposieu = +0,80

Pour 27 échantillons, avec un seuil de signification de 0,05, le coefficient de corrélation linéaire diffère significativement de 0 au-dessus de r = +0.32, et pour un seuil de signification de 0,01 au-dessus de r = +0,45.

En revanche, aucune corrélation linéaire significative n'existe entre le contenu chimique des eaux de forage et celui de la résurgence. Il n'y a pas non plus de corrélation entre le fer de l'emposieu et celui de la résurgence, pour des raisons indiquées plus loin, mais il sera exporté en grande quantité vers la résurgence pendant les crues.

### *5.7. Variations du contenu chimique des eaux de l'emposieu et de la résurgence en fonction des saisons et des précipitations*

Nous avons relevé les maxima et les minima des concentrations des éléments pour les deux points d'eau et nous y avons fait correspondre les précipitations $P_1$ (jour après le prélèvement), $P_2$ (jour du prélèvement), $P_3$ (jour avant le prélèvement), $P_4$ (moyenne des précipitations des 2e et 3e jours précédant le prélèvement), $P_5$ (moyenne des précipitations de la semaine précédant le prélèvement).

Voici les éléments pour lesquels le maximum se situe:

*au printemps*: $Mg^{2+}$, Fer total, Fer filtré (seulement à l'emposieu), $Na^+$, $NO_3^-$, $Cl^-$, pH (fin du printemps)
*en été*: $SiO_2$, dureté totale et matière organique; leurs concentrations maximales correspondent aussi à de fortes précipitations.
*en automne*: $Ca^{2+}$
*en hiver*: $K^+$ et $SO_4^{2-}$
et pour lesquels le minimum se situe:

*au printemps*: $Ca^{2+}$, $K^+$, $SO_4^{2-}$, $O_2$, $PO_4^{3-}$, dureté totale, dureté temporaire, matière organique, accompagnés de fortes pluies
*en été:* aucun paramètre minimum
*en automne*: Fer total, $NO_3^-$ et pH
*en hiver*: $Mg^{2+}$, $Cl^-$ et conductivité

### *5.8. Etude de quelques crues de la résurgence de la Noiraigue*

#### *5.8.1. Echantillonnage - Rythme des prélèvements*

Après être passés successivement de prélèvements mensuels à des prélèvements hebdomadaires puis journaliers, nous sommes passés à des prélèvements plus rapprochés (toutes les 2, 4 ou 8 heures) pour sérier d'une façon encore plus fine les phénomènes exceptionnels qui peuvent avoir lieu lors de crues, de décrues ou d'étiages, et nous assurer que les conclusions faites à propos des échantillonnages mensuels ou hebdomadaires quant aux fluctuations saisonnières, n'étaient pas erronées. Les prélèvements recouvrent l'hiver (10.2.77) jusqu'à la fin du printemps (25.6.77) et l'automne (du 11.10.79 au 20.11.79).

En 1977 (1er groupe), les prélèvements à la source de la Noiraigue ont été effectués:

- toutes les 2 heures pour les séries C (du 10.2 au 12.2), D (du 13.2 au 15.2), E (du 15.2 au 17.2), K (du 23.6 au 25.6);
- toutes les 8 heures pour les séries F (du 9.3 au 16.3), série J (du 13.6 au 21.6).

En 1979 (2e groupe), ils ont été faits toutes les 4 heures pour les séries AC (du 11.10 au 15.10), AD (du 22.10 au 26.10), AE (du 29.10 au 2.11), AF (du 2.11 au

6.11), AG (du 6.11 au 10.11), AH (du 11.11 au 15.11), AI (du 16.11 au 20.11).

Dans chaque groupe, les séries comportent 24 prélèvements, donc nous avons N = 144 observations pour le premier groupe et N = 168 observations pour le second groupe.

*5.8.2. Analyses factorielles par composantes principales portant sur les deux séries de mesures des paramètres chimiques enregistrés à la Noiraigue*

a) Analyses factorielles portant sur les séries C, D, E, J, K

Pour chaque série, on tire trois graphes; sur le premier sont disposées les variables (paramètres chimiques et débit dans le plan 1x2, sur le deuxième les observations et sur le troisième à la fois les observations et les variables).

Ensuite, on projette dans un premier graphe toutes les observations des cinq séries dans le plan 1x2, dans un deuxième toutes les variables des cinq séries et enfin dans un troisième à la fois toutes les variables et toutes les observations des cinq séries.

b) Analyses factorielles portant sur les séries AC, AD, AE, AF, AG, AH, ET AI

On procède de la même façon que pour les séries C, D, E, J, K.

## 6. DISCUSSION

### *6.1. Groupement de toutes les eaux: surface, piézomètres et exutoires par analyse des correspondances (fig. 4a et 4b)*

De ce premier traitement des résultats, il ressort:

a) une parenté étroite entre les eaux de la Noiraigue (résurgence no 13) et du Bied (perte ponctuelle à l'emposieu no 10);

b) une grande différence entre les eaux des piézomètres et les eaux de surface aussi bien des marais acides que des marais élargis;

c) une même tendance pour les eaux des piézomètres, de la résurgence et de la perte;

d) une séparation en deux groupes pour les piézomètres, d'une part celui de Martel-Dernier (15), d'autre part celui de Petit-Martel (17), les eaux de Brot-Dessus étant intermédiaires entre 17 et le groupe perte-résurgence.

### *6.2. Groupement par analyse des correspondances des eaux souterraines: résurgence (source de la Noiraigue) et piézomètres (fig. 5A et 5B)*

L'analyse factorielle (plan 1x2, puis 1x4) fait ressortir que les groupes d'eau sont assez indépendants les uns des autres, à savoir que:

- le point 15 (forage de Martel-Dernier) est influencé surtout par $NO_3^-$ et $SO_4^{2-}$;

- les points 16 (Brot-Desus) et 17 (Petit-Martel) ont en commun les paramètres $Mg^{2+}$ et $Sr^{2+}$, mais Petit-Martel a en plus le facteur Fer total (= Fe tot) qui le sépare du point 16 (Brot-Dessus);

- la résurgence (no 13) et le forage des Cugnets (14) sont proches l'un de l'autre et de l'intersection des axes où nous trouvons également Dureté totale (Du To), Dureté temporaire (Du Te), $Ca^{2+}$, $SiO_2$, $PO_4^{3-}$, $H^+$ et $O_2$. Ce groupe est homogène dans le plan des axes 1x2 et 1x4, mais dans le plan 1x3, ces deux eaux s'opposent surtout par le fer total (Fe tot). Cela reflète fidèlement l'observation que les concentrations en Fer total sont toujours plus grandes dans les eaux du Dogger (Cugnets, 14) que dans celles de la résurgence (13).

Les petites différences entre les eaux de Petit-Martel (17) et Brot-Dessus (16) sont explicitées par l'axe 4 dans le plan des axes 1 et 4 (fig. 5b). Les eaux de Petit-Martel se distinguent par de faibles

concentrations $Ca^{2+}$, dureté totale (Du To), dureté temporaire (Du Te), $SiO_2$ et $H^+$, et un enrichissement relatif en $K^+$, $Na^+$ et $Cl^-$, celles de Brot-Dessus par un enrichissement relatif en $Mg^{2+}$, $Sr^{2+}$, et $SO_4^{2-}$. Les données de la résurgence (13) placent ces eaux au milieu de ces oppositions.

La distinction entre les eaux de la résurgence et des piézomètres étant opérée, il s'agit dès lors d'exclure du traitement des données les eaux de la résurgence.

### *6.3. Groupement par analyse des correspondances des observations des eaux des piézomètres uniquement (fig. 6)*

Les eaux des quatre piézomètres se distribuent en quatre groupes bien séparés:

1) Les eaux des Cugnets (14) aquifère du Dogger par: $Sr^{2+}$ (moyen) profondeur faible à moyenne, $Mg^{2+}$ moyen, T (°C) moyen et $NO_3^-$ moyen.

2) Les eaux de Martel-Dernier (15) par: le rapport Fer filtré/Fer total élevé, Dureté temporaire moyenne, $SO_4^{2-}$ moyen, $Mg^{2+}$ faible, mais surtout $NO_3^-$ et $O_2$ élevés.

3) Les eaux de Petit-Martel (17) par: une Dureté totale (Du To), $O_2$, $Ca^{2+}$, conductibilité et $SiO_2$ faibles, $Cl^-$ et $K^+$ moyens et surtout $Na^+$ et $Mg^{2+}$ élevés.

4) Les eaux de Brot-Dessus (16) forment en quelque sorte le centre de gravité des trois autres groupes.

### *6.4. Commentaire sur les analyses des correspondances portant sur toutes les eaux, sur les eaux souterraines (résurgence et piézomètres) et sur les eaux des piézomètres uniquement*

Le chimisme global et moyen (sur deux ans) des eaux de la résurgence de la Noiraigue est très proche de celui du Bied, confluent de tous les bieds de surface: groupe quaternaire de surface.

Le chimisme des eaux de surface accuse de grandes différences (pH, dureté, etc.). Des marais acides aux marais élargis[3] et aux anciens marais drainés et cultivés, ce chimisme converge vers celui du Bied et vers celui de la résurgence.

Les eaux des piézomètres s'écartent notablement de celles de surface et de celles de la résurgence. Cependant, fait plus important, chaque piézomètre se distingue par le chimisme différent de ses eaux. Cela confirme l'hétérogénéité du chimisme des blocs capacitifs à faible perméabilité. Dans le cas du bassin de la Noiraigue, parmi les très nombreux blocs potentiels, quatre piézomètres ont permis d'en individualiser quatre.

### *6.5. Résultats des analyses d'eau mensuelles prélevées parallèlement à l'emposieu et à l'exutoire (tab. 4)*

Il faut rapprocher certains pourcentages de matière exportée (rapport de la teneur chimique des eaux de l'emposieu à celui de la résurgence) aux pourcentages des débits. Les mesures des débits du bied de l'emposieu des Ponts-de-Martel et de ceux de la résurgence (Noiraigue) ont donné un rapport de 15,43% (1974) et de 16,36% (1975).

Le rapport des masses chimiques de l'emposieu aux masses exportées à la résurgence se rapprochant de 15,43% et 16,36% concerne:

- Ca, Mg, $SiO_2$, conductivité, dureté totale, $O_2$, et dureté temporaire;
- les taux de K, matière organique et $SO_4^{2-}$ sont d'environ 25%;
- les taux nettement au-dessus de 16% concernent Fer total, Fer filtré, $PO_4^{3-}$, $Cl^-$ et $Na^+$: Ce même groupe de paramètres associés apparaît à l'analyse factorielle de toutes

[3] Ces zones sont définies *in:* BOUYER & POCHON (1980)

les eaux analysées (cf. fig. 4a, 4b) et correspond aux eaux du bord du marais acide.

Pour le groupe $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$ et $SiO_2$, conductivité, dureté totale, $O_2$, dureté temporaire, lors du transit de l'emposieu à la résurgence, ces paramètres n'ont pas subi de grands changements.

Lorsque le système passe de l'état ouvert (production de $CO_2$) à l'état fermé (consommation de $CO_2$), respectivement de l'emposieu à la résurgence, on se rapproche des courbes de saturation pour les ions du premier groupe, sans pour autant qu'elles soient atteintes: calcite, dolomite, quartz et silice sont en sous-saturation; les équilibres n'y sont pas atteints à cause de la grosseur des chenaux, et donc de la vitesse de transit.

Dans le groupe Fer total, Fer filtré, $PO_4^{3-}$, $Cl^-$ et $Na^+$, il y a une diminution des concentrations de ces paramètres lors du transit emposieu-exutoire; le fer est maintenu en solution dans les eaux de surface grâce à la matière organique complexante, mais dans les chenaux karstiques, la matière organique du complexe matière organique-fer flocule au contact du calcaire, perd son pouvoir complexant vis-à-vis du fer qui alors seul précipite.

Les corrélations entre $[Ca^{2+}]$ emposieu et $[Ca^{2+}]$ résurgence, $pCO_2$ emposieu et $pCO_2$ résurgence, $[Mg^{2+}]$ emposieu et $[Mg^{2+}]$ résurgence pour ne citer qu'elles sont remarquablement élevées (voir § 5.6). Des graphes débits-concentrations des ions des eaux de la résurgence mettent en évidence deux familles de points. Il faut alors décomposer les concentrations observées à la résurgence comme suit:

- une concentration à peu près constante de ces éléments venant des blocs capacitifs; dans ces blocs, l'écoulement étant lent, on se trouve près de la courbe de saturation (milieu fermé);
- une concentration beaucoup plus fluctuante et plus élevée se superposant à la première des eaux venant de la surface (milieu ouvert).

### *6.6. Influence des saisons sur les minima et maxima des concentrations ioniques des eaux de l'emposieu et de la résurgence*

#### *6.6.1. Au printemps*

Aux gros débits printaniers souvent constatés, à une activité biologique minimale des sols, correspondent une dureté temporaire et une concentration en $Ca^{2+}$ également minimales (peu de $CO_2$ produit). En revanche, nous avons un maximum de $Mg^{2+}$, Fer total, Fer filtré appartenant en partie à la phase silicatée et aux dolomites.

#### *6.6.2. En été*

L'activité biologique bat son plein, dureté totale et matière organique fraîche sont maximales.

#### *6.6.3. En automne*

Un maximum de $CO_2$, plus utilisé par les plantes, est relâché au niveau des horizons carbonatés et les agresse; il s'ensuit un départ maximal de $Ca^{2+}$. Le largage du $CO_2$ attaque les silicates.

#### *6.6.4. En hiver*

Après la forte saison des pluies (fin novembre en général) et donc après le départ de $CO_2$ des sols, nous avons un maximum de $K^+$ (effet piston); celui-ci est lié à la matière organique (décomposition des végétaux), alors que $Mg^{2+}$ est à son minimum (effet de dilution).

### *6.7. Evénements exceptionnels: crues et décrues*

On distingue les crues d'hiver des crues d'automne. Avec les mêmes débits, les

eaux des crues d'hiver ont une charge dissoute inférieure à celle des crues d'automne pour différentes raisons:

*En hiver*: D'une part avec la couverture neigeuse, on a des eaux de ruissellement qui n'atteignent qu'en partie les sols: d'où peu d'entraînement mécanique des sols qui contiennent du fer, calcium, etc. D'autre part, il n'y a plus de production de $CO_2$ (milieu fermé) et donc peu d'attaque des carbonates des gleys d'où sont issus les ions dissous dans les eaux.

*En automne*: Lors des pluies abondantes, les particules solides (hydroxydes de fer, carbonates de fer, calcium, magnésium, les argiles) sont entraînées jusqu'à la source. Le $CO_2$ attaque la partie carbonatée des gleys et les silicates avec une plus grande libération d'ions dissous dans les eaux, mais aussi plus de fer entraîné par la matière organique fraîche produite dans les sols par activité biologique.

### *6.7.1. Comparaison de la concentration de calcium pendant le fort de la crue et pendant la décrue suivant les saisons*

a) Crue et décrue hivernales (du 10.2 au 15.2.77). Pendant la crue, le maximum de $[Ca^{2+}] = 90$ mg/l est inférieur au maximum du calcium de la décrue (100 mg/l).

b) Crue et décrue automnales (du 6.11.79 au 20.11.79). Ici le maximum du débit correspond au maximum de la concentration calcique, teneur plus élevée que la teneur maximale observée pendant la décrue.

En comparant ces deux crues, de débits de même importance, mais de saisons différentes, on a encore la preuve que pendant la crue, le calcium est apporté des niveaux superficiels du bassin et est accompagné de matière organique; or en hiver, le taux de matière organique et de $CO_2$ étant amoindri par cessation de l'activité biologique, le taux de calcium libéré des niveaux carbonatés est lui-même diminué.

Pendant la décrue (vidange des blocs peu perméables), les taux de Ca sont à peu près identiques dans les deux cas.

c) Comportement du fer (fig. 7 et 8). Avant la montée des eaux, le fer subit un effet piston; il s'agit alors de fer précipité dans les chenaux lorsque le débit est bas. Nous avons expliqué pourquoi ce fer issu du complexe fer-matière organique soluble dans les eaux de surface s'était séparé après floculation de la matière organique (série AH, échantillon 11). La montée de fer n'est pas accompagnée de celle de la matière organique. En revanche au plus fort de la crue, on voit que matière organique et fer arrivent pratiquement en même temps (série AG, échantillon AG 7). Ce fer vient alors des horizons pédologiques de la partie supérieure du bassin. Tous ces indices nous permettent de mieux sérier les différentes phases et les origines des eaux de la résurgence, et sont autant de traceurs pour comprendre le fonctionnement du réseau hydraulique.

### *6.7.2. Exemple du suivi d'une crue par analyse factorielle en composantes principales*

Dans le plan 1x2 (fig. 9)

A partir de l'échantillon AF 19 (prélèvements toutes les 4 heures) jusqu'à AF 24, les observations se déplacent un peu du calcium vers le magnésium, le débit commence à monter (influence directe des eaux de l'emposieu sur celle de la résurgence). Les observations se trouvent toujours dans le quadrant 3.

Le débit passe doucement de 0,687 m3/s pour AF 19 à 3,14 $m^3/s$ pour AF 24 (20 heures plus tard): 10 heures après AF 24 pour AG1, le débit atteint 10,306 m3/s pour atteindre son paroxysme à AG 6 et AG 7 (12,563 et 12,564 $m^3/s$). Les associa-

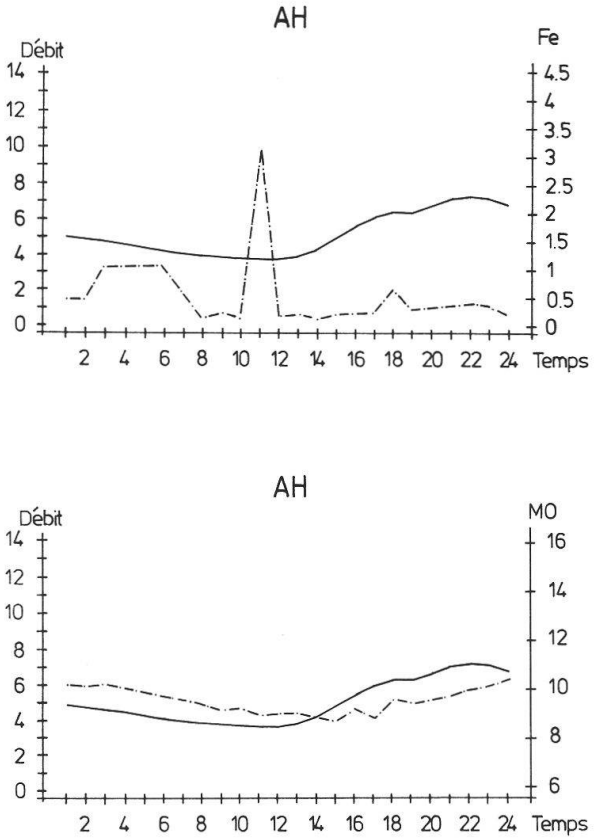



**Figure 7**: Série AH:
Prélèvements automatiques (toutes les 4 heures) à la source de la Noiraigue (du 11.11 au 15.11.1979).
On remarque un maximum de fer en AH 11, alors que le taux de matière organique est bas; ce fer arrivant par effet "piston" à la source avant la montée des eaux, vient des chenaux karstiques où il se dépose après floculation de la matière organique lors de débits faibles.

- Les débits (Q) sont représentés en traits pleins; ils s'expriment en $m^3/s$.
- La concentration de la matière organique [MO] est exprimée en mg/l de $CaCO_3$ complexé (cf. MISEREZ, 1973).

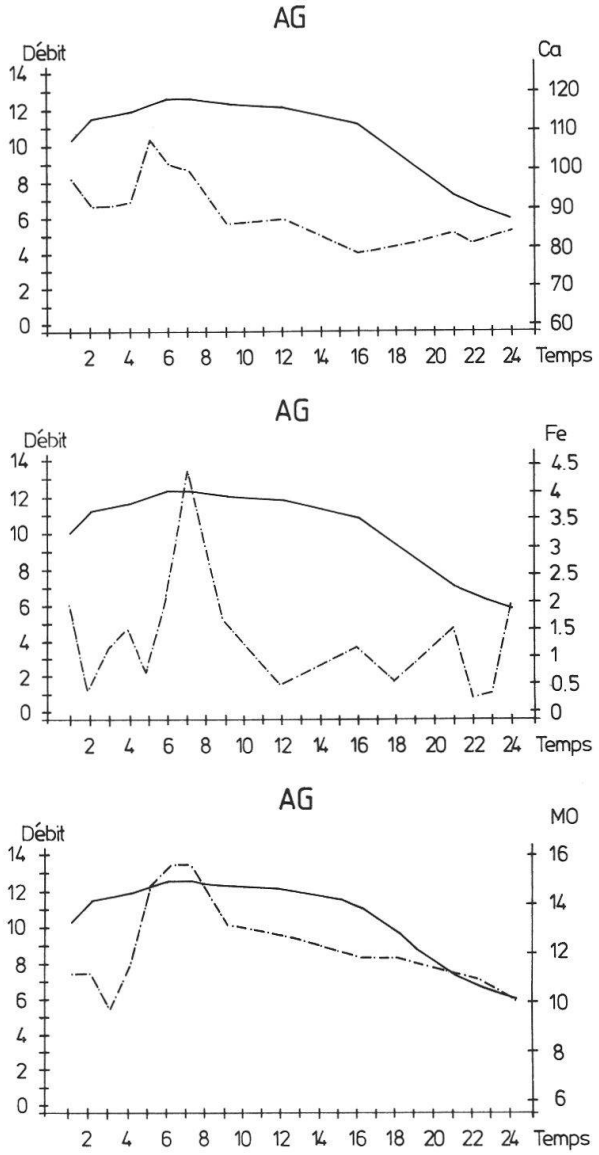



**Figure 8**: Série AG:
Prélèvements automatiques (toutes les 4 heures) à la source de la Noiraigue (du 06.11 au 10.11.1979).
Le calcium, le fer et la matière organique arrivent par effet "piston" à la résurgence à peu près en même temps, de la surface du bassin au maximum de la crue. La matière organique entraîne le fer de l'emposieu à l'exutoire, sans avoir le temps de floculer au contact du calcaire des chenaux karstiques à cause de la vitesse de l'écoulement.

- Les débits (Q) sont représentés en traits pleins; ils s'expriment en $m^3/s$.
- La concentration de la matière organique [MO] est exprimée en mg/l de $CaCO_3$ complexé (cf. MISEREZ, 1973).

tions chronologiques des observations et des variables sont les suivantes:

On va de AF 24 (Mg, Sr) à AG1 (Ca) puis on trouve AG 2 (Fe, $PO_4$, $NO_3$, Cl, K, pH) (eaux provenant du marais amendé et de la molasse), AG 3 entre Ca et Na (calcaires dénoyés), AG 5, AG 6 (maximum de la crue) sont proches de $SO_4$, UV (UV = ultraviolets qui caractérisent la concentration de la matière organique dans l'eau): Ce sont les eaux à caractère superficiel venant des tourbes acides; AG 5 et AG 6 participent beaucoup à l'axe 2 (négativement). De AG 7 à AG 24, on remonte dans le quadrant 2, les échantillons devenant satellites du groupe Fe, $NO_3$, $PO_4$, K (influence des marais acides et cultivés, et de leurs gleys sous-jacents). La décrue continue, et à partir de AG 24 (AH 1 et suivants), on passe dans le quadrant 1 pour y rester. (Ces dernières observations étant proches de $SiO_2$ correspondent aux eaux des blocs capacitifs qui s'écoulent).

Dans le plan 2x3 (fig. 10)

Les échantillons AF 21, AF 22, AF 23, AF 24 sont de plus en plus influencés par le groupe Mg, NO3, PO4, Sr, Fe venant du marais amendé et de la molasse marine (la montée des eaux commence).

On passe du quadrant 3 (AF 24) au quadrant 4 avec AG 1, AG 2 qui sont situés entre les groupes UV (matière organique), $PO_4$, K et pH, Ca, Cl. AG 6 participe au maximum à l'axe 2 (négativement), et est donc marqué par le groupe K, $SO_4$, matière organique (la crue est à son maximum) caractérisant les eaux du marais acide. Après AG 6 (commencement de la décrue), on repasse dans le quadrant 3 en se rapprochant à nouveau du groupe Mg, $NO_3$, $PO_4$, Sr, Fe, association rencontrée dans les eaux du marais amendé, pour se rapprocher de plus en plus du groupe conductibilité, dureté totale, $SiO_2$ (vidange des blocs capacitifs et aussi des calcaires dénoyés).

Après ce long suivi dans le temps de ces différents étiages, crues et décrues, on comprend mieux l'organisation de l'écoulement des eaux à travers ce karst bien particulier à cause de l'importance de sa couverture quaternaire.

## 7. CONCLUSIONS

### *7.1. Hétérogénéité de la nappe; relation emposieu-résurgence*

Dans le bassin étudié dont l'originalité consiste en la présence d'un marais tourbeux important, on note que:

a) L'effet de dilution par l'augmentation du débit est le mieux illustré par [$Mg^{2+}$] comme l'avait noté MISEREZ (1973). Pour 82 observations, tous régimes confondus (étiages, crues, décrues), on a r [$Mg^{2+}$] - débit = -0,80.

b) L'effet piston localisé aux eaux de surface, au niveau des sols organiques et des tourbes, se fait sentir à la résurgence:

pour la *matière organique:* (r MO - débit = +0,56, pour N = 27);

le *potassium*: (r [K] - débit = +0,84, pour N = 82);

et le *fer*: (r [$Fe^{2+}$] - débit = +0,70, pour N = 82).

c) L'hétérogénéité chimique des eaux de surface, leur groupement par rapport aux eaux de la perte et de la résurgence est bien mise en évidence par l'analyse des correspondances selon BENZECRI *et al.* (1973).

d) L'individualité des eaux de chaque piézomètre, déjà notée dans la comparaison du chimisme moyen, est clairement démontrée par l'analyse factorielle des correspondances.

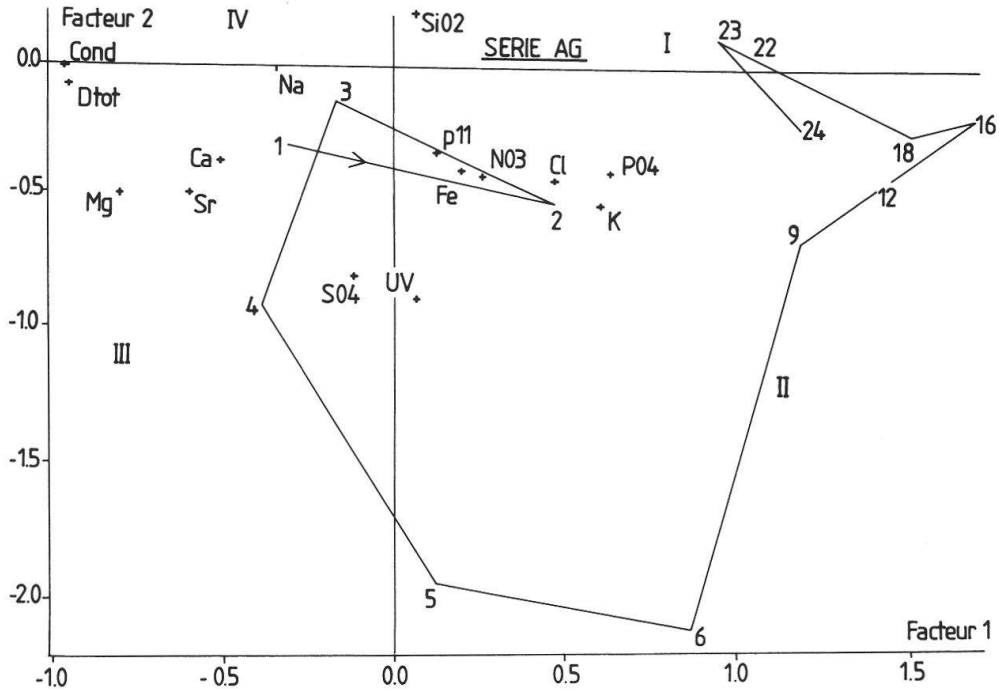



**Figure 9**: Série AG: Analyse factorielle par composantes principales
Les observations (toutes les 4 heures), numérotées de 1 à 24, et les variables des eaux de la résurgence sont reportées dans le plan 1x2. De AG 01 à AG 18, le débit est exceptionnel (Q > 12 m³/s) puis redescend lentement jusqu'à AG 24 (Q > 5,87 m³/s). Pour les débits (série AG), se reporter à la figure 8.

e) Par le calcul des coefficients de corrélation sur chaque groupe d'eau, l'étroite relation eaux de la perte-eaux de la résurgence est quantifiée, l'indépendance des eaux des piézomètres, donc des blocs capacitifs, est confirmée, les relations précipitations, débits, chimisme sont établies, précisant le déphasage de la vague hydraulique et des divers déphasages de la vague chimique.

f) Dans le bassin de la Noiraigue, les excellentes corrélations perte-résurgence, les mauvaises corrélations blocs capacitifs entre eux-mêmes et la résurgence, indiquent que les forages d'exploration n'ont pas rencontré le réseau des grands chenaux et que par comparaison avec d'autres karsts plus méridionaux, le karst étudié doit être en partie colmaté.

### *7.2. Abondance et origine du fer*

a) Abondance du fer

- En surface. Ce sont des eaux recueillies dans le marais amendé qui ont la teneur en fer la plus élevée ($[Fe^{2+}]$ = 2,3 mg/l en moyenne), puis les eaux du bord du marais naturel acide ($[Fe^{2+}]$ = 1,2 mg/l en moyenne); viennent ensuite les eaux du coeur du marais acide (0,50 mg/l) et les eaux de pluie (0,14 mg/l).

- Dans les piézomètres, les teneurs sont à peu près de 3 mg/l, sauf pour le forage de Martel-Dernier influencé par les eaux du marais acide à cause d'une grande perméabilité, qui n'en a que 0,50 mg/l et des nitrates qui oxydant le $Fe^{2+}$ en $Fe^{3+}$ le précipitent. Il faut cependant remarquer que la teneur en fer de 3,0 mg/l n'est qu'une moyenne et que seuls quelques prélèvements étaient riches en fer.

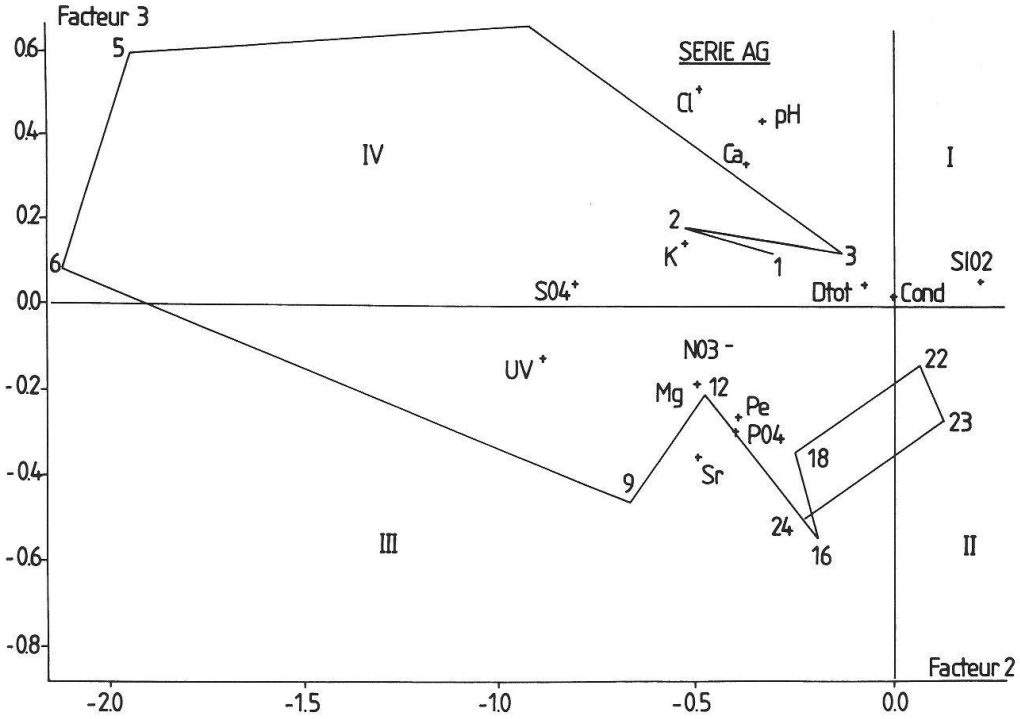



**Figure 10**: Série AG: Analyse factorielle par composantes principales
Les observations (toutes les 4 heures), numérotées de 1 à 24, et les variables des eaux de la résurgence sont reportées dans le plan 2x3. De AG 01 à AG 16, le débit est exceptionnel (Q > 12 m3/s) puis redescend lentement jusqu'à AG 24 (Q > 5,87 m3/s). Pour les débits (série AG), se reporter à la figure 8.

- A la résurgence et à l'emposieu. A la source de la Noiraigue, [$Fe^{2+}$] = 0,18 mg/l contre 0,83 mg/l à l'emposieu; là encore il faut remarquer que pendant les crues, le taux peut monter jusqu'à 4,5 mg/l à l'exutoire.

b) Origine du fer

Le fer est présent dans les précipitations, dans les sols (aux 3/4 éoliens), les roches et les eaux traversant les sols et les roches. Le fer dans les sols est soit sous forme cristalline (surtout sous forme d'oxydes-hydroxydes tels que goethite et même lépidocrocite), soit engagé dans les réseaux de silicates (smectites et chlorites), soit sous forme d'hydroxydes amorphes ou de dolomite ferrifère, puisque dans les eaux souvent accompagné de Ca et de Mg. Les eaux à la résurgence contiennent, comme les eaux du marais amendé, des sidérobactéries qui ont été comptées; précipitant le fer sous forme de $Fe^{3+}$ dans leurs gaines, elles sont également responsables du transit emposieu-exutoire de cet élément.

### *7.3. Nature et rôle de la matière organique*

En arrivant à l'emposieu, le fer est maintenu en solution complexé par la matière organique (r Fe - matière organique = +0,50, N= 25). Si le débit est faible, la matière organique flocule dans les chenaux, abandonnant le fer qui précipite alors, comme on le remarque à l'air libre dans le marais amendé lorsque l'eau coule sur le cailloutis calcaire. Lors de crues, la vitesse de transit est telle que la matière organique n'a pas le temps d'être dégradée, le fer demeure complexé alors jusqu'à la résurgence avec une concentration qu'on lui connaît dans les eaux de surface.

### *7.4. Les crues: le fer, traceur du transit des eaux*

Lors des crues à la résurgence, le fer déposé dans les chenaux karstiques, apparaît par effet "piston" avant la montée des eaux; il n'est alors pas accompagné de matière organique et sa concentration retombe avant la montée des eaux. Puis lorsque le débit augmente au maximum de la crue, sa concentration est maximale et il est associé alors à la matière organique et aux paramètres chimiques de la couverture tourbeuse. De plus, nous avons vérifié que le cortège des phyllosilicates d'apport éolien était présent dans les eaux de la résurgence dans cette phase hydraulique.

### *7.5. Remarques finales*

Les questions posées au début de cette thèse ont été résolues. D'autres rencontrées en cours de route ne l'ont pas été, ou n'ont été que partiellement élucidées. Par exemple, pourquoi un pH constant, résolument basique et égal à 9,25 dans le forage de Petit-Martel, alors qu'on s'était assuré que lors du forage, on n'avait pas utilisé de substances basiques; aucune trace de matière organique n'a été non plus trouvée dans ces eaux.

Il a fallu de nombreuses années de travail dans l'étude du fer dans un milieu naturel, pour tenir compte de tous les paramètres organiques, inorganiques et des conditions climatiques. Il faut ajouter à cela un très grand nombre d'observations pour que les résultats soient statistiquement valides.

REMERCIEMENTS

Ils vont encore à B. Kübler, J.- J. Miserez, et I. Müller, professeurs à l'Institut de Géologie de Neuchâtel (Suisse) et à B. Fritz, directeur du Centre de Géochimie de la Surface à Strasbourg (France). Ils ont relu et corrigé judicieusement ma thèse.

A ces remerciements s'ajoutent ceux adressés à J. Moret, statisticienne-conseil, Centre de calcul de l'Université de Neuchâtel, qui s'est chargée de l'analyse factorielle des résultats.

BIBLIOGRAPHIE

ATTEIA, O., GOGNIAT, S. & KOZEL, R. 1996. Apport de l'hydrologie, de la géophysique et des essais de traçage à la connaissance de l'aquifère karstique de la Noiraigue (Jura neuchâtelois, Suisse). *Bull. Hydrogéol. CHYN, Univ. Neuchâtel* 15: 33-61.

BENZECRI, J.P. 1973. L'analyse des données, tome 2. L'analyse des correspondances. *Dunod, Paris.*

BOUYER, Y. 1999. Dynamisme du fer depuis les marais et tourbes de la vallée des Ponts-de-Martel jusqu'à la résurgence de la Noiraigue. 1. Mobilisation et immobilisation du fer dans la pédogenèse de la vallée des Ponts. *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat.* 122: 113-144.

BOUYER, Y. & KÜBLER, B. 1981. Hétérogénéité chimique et hydrologique des eaux souterraines d'un karst du Haut-Jura neuchâtelois (Suisse). *J. of Hydrol.* 54: 315-339.

BOUYER, Y. & POCHON, M. 1980. La migration du fer en milieu marécageux (cas du Haut-Jura et du Plateau molassique suisse). *Soc. Suisse de Pédologie* 4: 42-48.

BURKHARD, M., ATTEIA, O., SOMMARUGA, A., GOGNIAT, S. & EVARD, D. 1998. Tectonique et hydrogéologie dans le Jura neuchâtelois. *Eclogae geol. Helv.* 91: 177-183.

CIBOIS, P. 1987. L'analyse factorielle. Coll. Que sais-je, *Presses Univ. de France. Paris.*

GRETILLAT, P.A., BOUYER, Y. & MÜLLER, I. 1986. Un exemple d'utilisation de la géophysique électromagnétique (VLF-R et Bipôle) pour l'étude de la fracturation au Nord de la source karstique de la Noiraigue (Jura neuchâtelois, Suisse). *Bull. Hydrogéol. CHYN, Univ. Neuchâtel* 7: 335-346.

KIRALY, L. & MÜLLER, I. 1979. Hétérogénéité de la perméabilité et de l'alimentation dans le karst: effet sur la variation du chimisme des sources karstiques. *Bull. Hydrogéol. CHYN, Univ. Neuchâtel* 3: 237-285.

MANGIN, A. 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. *Thèse de doctorat, Laboratoire Souterrain du CNRS, Moulis.*

MISEREZ, J.J. 1973. Géochimie des eaux du karst jurassien. Contribution physico-chimique à l'étude des altérations. *Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel.*

**N.B**. On peut consulter la thèse de doctorat complète de Y. Bouyer à la Bibliothèque centrale de l'Université de Neuchâtel, Av. du 1er Mars 26, 2000 Neuchâtel, Suisse, ainsi qu'à la bibliothèque de l'Institut de Géologie, rue Emile-Argand 11, 2007 Neuchâtel, Suisse. On y trouvera en particulier le détail des résultats d'analyse concernant les crues décrites dans le présent article.