

# **AQUIFERES KARSTIQUES ET POREUX DE L'AJOIE (JURA, SUISSE)**

**Eléments pour la carte hydrogéologique au 1: 25'000**



## **THESE**

***Volume 1 : Texte et annexes***

***Volume 2 : Notice explicative de la carte hydrogéologique***

Présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel  
pour obtenir le titre de Docteur ès Sciences  
par

**Pierre-Alain GRETILLAT**  
Géologue et hydrogéologue

Soutenue le 27 mars 1996 devant le Jury d'Examen composé de Messieurs:

|                         |                                                        |                       |
|-------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------|
| <b>L. Kiraly</b>        | Professeur, Université de Neuchâtel                    | Président du Jury     |
| <b>F. Zwahlen</b>       | Professeur, Université de Neuchâtel                    | Directeur de thèse    |
| <b>M. Bouzelboudjen</b> | Dr ès Sc., chargé d'enseignement, Université Neuchâtel | Co-Directeur de thèse |
| <b>J.-C. Bouvier</b>    | Dr ès Sc., ancien chef de l'OEPN, Canton du Jura       | Examineur             |
| <b>J. Mania</b>         | Professeur, Université de Franche-Comté, Besançon      | Examineur             |
| <b>H.-U. Schweizer</b>  | Dr ès Sc., chef de division à l'OFEFP/BUWAL, Berne     | Examineur             |

# IMPRIMATUR POUR LA THÈSE

**Systèmes aquifères de l'Ajoie (Jura, Suisse)  
Éléments pour la carte hydrogéologique de l'Ajoie  
au 1:25'000**

de M. Pierre-Alain Gretillat

---

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

FACULTÉ DES SCIENCES

La Faculté des sciences de l'Université de  
Neuchâtel sur le rapport des membres du jury,

MM. F. Zwahlen (directeur de thèse), M. Bouzelboudjen,  
H.-U. Schweizer (Berne), J. Mania (Besançon) et  
J.-C. Bouvier (St. Ursanne)

autorise l'impression de la présente thèse.

Neuchâtel, le 14 décembre 1998

Le doyen:

*F. Stoeckli*

F. Stoeckli

# AQUIFERES KARSTIQUES ET POREUX DE L'AJOIE (JURA, SUISSE)

Eléments pour la carte hydrogéologique au 1: 25'000

## THESE

### VOLUME 1 : TEXTE ET ANNEXES

| <i>Table des matières</i>                                                                                                             | <i>page</i>   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Liste des tableaux.....                                                                                                               | III           |
| Liste des figures.....                                                                                                                | IV            |
| Liste des annexes.....                                                                                                                | VII           |
| Abréviations.....                                                                                                                     | VIII          |
| Avant-propos et remerciements.....                                                                                                    | IX            |
| Résumé.....                                                                                                                           | XI            |
| <br><b>PARTIE A: INTRODUCTION GENERALE</b> .....                                                                                      | <br><b>1</b>  |
| <b>1. LES SYSTEMES AQUIFERES</b> .....                                                                                                | <b>3</b>      |
| 1.1 Caractérisation des systèmes aquifères.....                                                                                       | 3             |
| 1.2 Méthodes d'approche.....                                                                                                          | 5             |
| 1.3 Recherche et pratique, combat ou échanges?.....                                                                                   | 9             |
| 1.4 Utilisation des méthodes et exemples pratiques.....                                                                               | 10            |
| <br><b>2. CAS DE L'AJOIE : BUTS POUR LE PROJET CANTONAL</b><br>AJOIE (1988-1993) ET POUR LA THESE .....                               | <br><b>11</b> |
| 2.1 Problèmes de pollution.....                                                                                                       | 11            |
| 2.2 Projet d'étude et buts poursuivis.....                                                                                            | 11            |
| 2.3 Moyens utilisés.....                                                                                                              | 12            |
| 2.4 Note technique.....                                                                                                               | 13            |
| <br><b>3. PRESENTATION DES THEMES TRAITES DANS LES PARTIES B, C ET D</b> .....                                                        | <br><b>14</b> |
| 3.1 Partie B: Cadre géologique, morphologique et hydrologique du bassin versant de<br>l'Allaine à Boncourt, Ajoie.....                | <br>14        |
| 3.2 Partie C: Interprétation et fonctionnement des systèmes étudiés. ....                                                             | 15            |
| 3.3 Partie D: Conclusions et recommandations                                                                                          |               |
| <br><b>PARTIE B: CADRE GEOLOGIQUE, MORPHOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE</b><br><b>DU BASSIN VERSANT DE L'ALLAINE A BONCOURT, AJOIE</b> ..... | <br><b>17</b> |
| <br><b>1. CADRE MORPHOLOGIQUE ET GEOLOGIQUE</b> .....                                                                                 | <br><b>19</b> |
| 1.1 Géographie et réseau hydrographique.....                                                                                          | 19            |
| 1.2 Géologie.....                                                                                                                     | 24            |
| 1.3 Discontinuités géologiques: apport de la géophysique.....                                                                         | 27            |
| <br><b>2. DELIMITATION DU BASSIN VERSANT DE L'ALLAINE A BONCOURT</b> .....                                                            | <br><b>31</b> |
| 2.1 Critères de délimitation.....                                                                                                     | 31            |
| 2.2 Les essais de traçages.....                                                                                                       | 31            |
| 2.3 Géologie des principaux exutoires.....                                                                                            | 33            |
| 2.4 Description des limites du bassin de l'Allaine.....                                                                               | 35            |
| 2.5 Hypsométrie.....                                                                                                                  | 38            |
| <br><b>3. BILANS HYDROLOGIQUES</b> .....                                                                                              | <br><b>41</b> |
| 3.1 Entrées.....                                                                                                                      | 41            |
| 3.2 Sorties.....                                                                                                                      | 53            |
| 3.3 Synthèse.....                                                                                                                     | 61            |

|                                                                                        | <i>page</i> |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>PARTIE C: INTERPRETATION ET FONCTIONNEMENT DES AQUIFERES ETUDIES.</b>               | <b>65</b>   |
| 1. AQUIFERES KARSTIQUES SANS RELATION AVEC UN COURS D'EAU PERENNE. ....                | 67          |
| 1.1 Caractéristique des systèmes, points communs et divergences.....                   | 67          |
| 1.2 Interprétation des débits.....                                                     | 69          |
| 1.3 Apport de la physico-chimie à la compréhension du fonctionnement.....              | 77          |
| 2. SPECIFICITE DES AQUIFERES KARSTIQUES EN RELATION AVEC UNE RIVIERE.....              | 103         |
| 2.1 Caractéristiques particulières des systèmes.....                                   | 103         |
| 2.2 Influence de la rivière sur les débits de la source.....                           | 107         |
| 2.3 Apport de la physico-chimie à la compréhension du fonctionnement.....              | 108         |
| 3. AQUIFERES ALLUVIAUX ALIMENTES PAR LE KARST ET UNE RIVIERE.....                      | 112         |
| 3.1 Caractéristique des systèmes, points communs et divergences.....                   | 112         |
| 3.2 Interprétation des cartes piézométriques.....                                      | 116         |
| 3.3 Interprétation des cartes des paramètres physico-chimiques.....                    | 119         |
| 3.4 Analyse des réactions rapides et lentes par la température et la conductivité..... | 132         |
| 3.5 Ressources.....                                                                    | 136         |
| 3.6 Synthèse.....                                                                      | 137         |
| 4. SYNTHESE .....                                                                      | 141         |
| 4.1 Principaux enseignements.....                                                      | 141         |
| 4.2 Apport des essais de traçage dans la délimitation des systèmes karstiques.....     | 143         |
| 4.3 Vulnérabilité et ressources des principaux aquifères.....                          | 144         |
| 4.4 Réflexions sur quelques directions d'écoulements.....                              | 145         |
| 5. LA CARTE HYDROGEOLOGIQUE DE L'AJOIE.....                                            | 146         |
| <b>PARTIE D: CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>                                      | <b>149</b>  |
| 1. FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE.....                                                    | 151         |
| 1.1 Entrées (pluies, pollutions, traçages).....                                        | 151         |
| 1.2 Sorties (karst, alluvions).....                                                    | 152         |
| 2. GESTION DES RESSOURCES EN EAU ET CARTE HYDROGEOLOGIQUE .....                        | 154         |
| 3. SYNTHESE = CARTE HYDROGEOLOGIQUE .....                                              | 154         |
| 4. PERSPECTIVES.....                                                                   | 154         |
| <b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>                                                              | <b>157</b>  |
| <b>ANNEXES.....</b>                                                                    | <b>171</b>  |

*Photo de la page de couverture : aperçu du synclinal de Damvant-Réclère en direction de l'ouest*

# LISTE DES TABLEAUX

## PARTIE B

1. Caractéristiques géographiques de quelques sous-bassins de l'Allaine
2. Caractéristiques hypsométriques de quelques sous-bassins de l'Allaine
3. Moyennes des précipitations pluriannuelles des stations pluviométriques d'Ajoie
4. Stations pluviométriques sur le bassin de l'Allaine. Précipitations pour les années hydrologiques 1989-1990 et 1990-1991; lame d'eau calculée sur l'ensemble du bassin versant de l'Allaine.
5. Evapotranspiration et pluies efficaces à Fahy
6. Station de Fahy: températures moyennes annuelles et saisonnières, comparées aux précipitations annuelles.
7. Station de Fahy: températures moyennes annuelles de l'air et du sol
8. Synthèse des débits de l'Allaine à Alle et Courchavon, comparés à ceux de Boncourt.
9. Distribution des débits de l'Allaine à Boncourt entre 1984 et 1991.
10. Synthèse des débits moyens et extrêmes des principales sources ajoulotes.
11. Bilan des écoulements sur le bassin de l'Allaine (année hydrologique)

## PARTIE C

1. Présentation des coefficients de tarissement calculés pour quelques crues de 1989 à 1991 pour les systèmes de La Beuchire et de La Doue.
2. Comparaison des volumes écoulés dans les réservoirs lents et rapides des La Beuchire et de La Doue, lors de la crue du 27 juin 1990. Les volumes sont exprimés en millions de mètres cube.
3. Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources karstiques ajoulotes (moyennes de l'année 1988-1989, 10 analyses).
4. Comparaison des valeurs de solvants chlorés volatils (moyennes annuelles) et de deux campagnes d'analyses de tritium dans quelques sources karstiques et dans les nappes alluviales (valeurs en italique) de Porrentruy (Pont d'Able) et Courtemaîche.
5. Synthèse des températures (°C) et conductivités ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) des sources ajoulotes (sur enregistrements en continu). Les moyennes calculées sur des mesures ponctuelles sont indiquées entre parenthèses.
6. Temps d'arrivée de la vague principale d'eau fraîchement infiltrée dans les principales sources karstiques et amplitude de l'effet de dilution, lors de la crue de février 1990.
7. Synthèse des relations démontrées par traçage entre les aquifères karstiques et l'Allaine, en amont de Porrentruy
8. Températures moyennes de l'air et de l'eau en Ajoie pour le cycle 1989-90.
9. Synthèse des variations piézométriques, thermiques et de conductivité des nappes alluviales de la Basse-Allaine
10. Distance entre l'Allaine et les puits des nappes alluviales
11. Physico-chimie des nappes alluviales du Pont d'Able et de Courtemaîche. Moyennes de l'année 1988-89 (10 à 11 analyses).
12. Micropolluants dans les nappes alluviales (1988-1990)
13. Aperçu synthétique des principaux systèmes karstiques d'Ajoie

# LISTE DES FIGURES

## **PARTIE B**

1. Situation géographique de l'Ajoie et délimitation du bassin versant de l'Allaine.
2. Situation du bassin versant supérieur, moyen et inférieur de l'Allaine.
3. Schéma des principaux affluents de l'Allaine et de leurs bassins versants, par rapport au Doubs.
4. Situation tectonique du Jura tabulaire d'Ajoie et des principaux cours d'eau régionaux.
5. Profil en long de l'Allaine avec le substratum géologique et la position des aquifères alluviaux.
6. Log lithostratigraphique de l'Ajoie basé sur les cartes géologiques suisses (Bonfol et St-Ursanne) et française (Delle). Essai de synthèse.
7. Profils hydrogéologiques schématisés:
  - le long de l'Allaine: A) de Charmoille à Porrentruy, B) de Porrentruy à Boncourt (situation en fig.B.2)
  - à travers les systèmes de la Beuchire (C) et du Saïvu (D).
8. Représentation des surfaces des bassins versants étudiés en rectangles équivalents.
9. Hypsométrie du bassin de l'Allaine, histogramme et courbe cumulée.
10. Courbes hypsométriques des principaux sous-bassins karstiques de l'Allaine.
11. Carte hypsographique du bassin versant de l'Allaine.
12. Précipitations et température de l'air à Fahy. Evolution des moyennes annuelles par moyennes mobiles sur 12 mois.
13. Répartition annuelle des précipitations en Ajoie, en fonction de l'altitude, pour l'année hydrologique 1989-1990 (14 stations pluviométriques). Les anciennes stations sont mises en évidence.
14. Précipitations annuelles en Ajoie pour l'année hydrologique 1989-1990. Courbes isohyètes.
15. Précipitations annuelles en Ajoie pour l'année hydrologique 1990-1991. Courbes isohyètes.
16. Température moyenne mensuelle en Ajoie, décembre 1990. Courbes isothermiques.
17. Température moyenne mensuelle en Ajoie, août 1990. Courbes isothermiques.
18. Allaine à Boncourt: évolution des débits journaliers de 1984 à 1991.
19. Allaine à Boncourt: évolution des débits mensuels comparés aux précipitations mensuelles de Fahy, de 1984 à 1991.
20. Allaine à Boncourt. Débits classés de 1984 à 1991 ainsi que pour l'année hydrologique 1990-91. Le débits moyen atteint  $3.04 \text{ m}^3/\text{s}$ .
21. La Beuchire - Porrentruy. Evolution des débits de 1989 à 1991.
22. Débits classés de la Beuchire, du Betteraz et de la Doue en 1989-90, comparés à ceux de l'Allaine.
23. Bilan des entrées (pluies Fahy) et des sorties (débit Allaine Boncourt).
24. Bilan hydrologique du bassin de l'Allaine pour les années 1988-89, 1989-90 et 1990-91.

## **PARTIE C**

1. Situation des sources karstiques étudiées avec leurs bassins versants.
2. Courbe des débits classés de la source de La Beuchire, pour la période 1990-1993 (tiré de MFR SA., 1994).
3. Hydrogrammes de crue (8 et 27 juin 1990) pour les systèmes Beuchire - Bonne-Fontaine, avec Le Creugenat (débordement, 8 juin seulement) et son arrivée à Porrentruy.
4. Comparaison des hydrogrammes de crue de La Beuchire, de la Bonne-Fontaine, du Voyeboeuf et du Betteraz, les 8 et 27 juin 1990. Retards des sources du Voyeboeuf et du Betteraz.
5. Répartition des pluies en Ajoie lors de l'orage du 27 juin 1990 de 16 h à 18 h.
6. Chimie des principales sources karstiques d'Ajoie. Comparaison de quelques valeurs physico-chimiques moyennes.
7. Sources de la Beuchire et du Betteraz. Comportement différent des solvants au cours d'une crue.
8. Source de la Beuchire, Porrentruy. Evolution hebdomadaire de l'hydrochimie d'octobre 1989 à décembre 1990.
9. Source de la Beuchire, Porrentruy. Relation des flux de calcium et de magnésium en fonction du débit (1989-90).
10. Sources de la Beuchire et du Betteraz, Porrentruy. Evolution des concentrations en nitrates et en chlorures de 1984 à 1990.
11. Source de la Beuchire. Evolution des hauteurs d'eau, des températures et des conductivités entre 1989 et 1991.
12. Sources karstiques de la Beuchire et du Saivu. Distribution fréquentielle (histogrammes) des températures moyennes journalières (1989-1991).
13. Sources karstiques du Betteraz et de la Fontaine. Distribution fréquentielle (histogrammes) des températures moyennes journalières (1989-1991).
14. Sources karstiques d'Ajoie. Evolution des températures moyennes mensuelles entre 1989 et 1991.
15. Evolution des températures moyennes mensuelles de L'Allaine, de l'air à Fahy et de la source de La Beuchire de 1989 à 1991.
16. Evolution de la température de l'air et du sol à Fahy ainsi que celle de l'eau à La Beuchire: anomalie thermique chaude par un signal d'entrée "froid" (crue de novembre 1989).
17. Evolution de la minéralisation et de la température de La Beuchire pendant les crues de juin 1990.
18. Evaluation qualitative de l'état des réserves en fonction de l'évolution de la minéralisation après une ou plusieurs crues. Comparaison de 2 périodes: hiver 93-94 et été 90 à La Beuchire.
19. Relation cherchée entre la température moyenne annuelle des sources karstiques et leur altitude ainsi que l'altitude moyenne et médiane de leur bassin.
20. Evolution de l'isotope Oxygène-18 au cours d'une crue, fonte de neige de février 1991, pour les sources karstiques de La Beuchire et de La Fontaine.
21. Schéma des principales directions d'écoulement dans le bassin versant du Betteraz (Adatte, 1993)
22. Schéma des relations du système du Pâquis avec les systèmes adjacents.
23. Source du Betteraz. Evolution temporelle de la température et de la conductivité comparées à l'Allaine, en août 1990.
24. Source de la Fontaine. Evolution temporelle de la température et de la conductivité comparées à l'Allaine, en juillet 1990.

25. Evolution de la température au cours de la crue du 13 août 1990 au Betteraz. Effet piston important (0.4°C) avant un rapide refroidissement.
26. Evolution des paramètres physiques (niveaux relatifs, conductivité et température) des sources karstiques du Betteraz et de La Fontaine de 1989 à 1990 (1991).
27. Situation des principaux aquifères alluviaux d'Ajoie, dans la Basse-Allaine, au nord de Porrentruy.
28. Aquifère alluvial du Pont d'Able (Porrentruy). Carte du substratum calcaire sous les alluvions.
29. Aquifère alluvial de Courtemaîche. Carte du substratum calcaire sous les alluvions.
30. Nappe alluviale du Pont d'Able (Porrentruy). Niveaux piézométriques moyens et extrêmes dans l'ensemble des puits et piézomètres.
31. Nappe alluviale de Courtemaîche. Niveaux piézométriques moyens et extrêmes dans l'ensemble des puits et piézomètres.
32. Nappe alluviale du Pont d'Able (Porrentruy) en situation de basses eaux (7.9.1989). Courbes isopièzes (équidistance 0.2 m). La rivière est perchée au dessus de la nappe.
33. Nappe alluviale du Pont d'Able (Porrentruy) en situation de hautes eaux (16.12.1990). Courbes isopièzes (équidistance 0.2 m).
34. Nappe alluviale de Courtemaîche en situation de basses eaux (7.9.1989). Courbes isopièzes (équidistance 0.2 m). La rivière est perchée au dessus de la nappe. Pompage dans P4 et absence d'alimentation artificielle.
35. Nappe alluviale de Courtemaîche en situation de hautes eaux (6.7.1990). Courbes isopièzes (équidistance 0.2 m). Pompage dans P4.
36. Nappe alluviale de Courtemaîche. Profil piézométrique W-E (amont de La Fontaine), montrant des venues d'eaux souterraines à partir du versant oriental de la vallée.
37. Nappes alluviales du Pont d'Able (Porrentruy) et de Courtemaîche. Valeurs moyennes et extrêmes des températures et conductivités (situées dans le temps), comparées aux valeurs des systèmes karstiques correspondant.
38. Nappe alluviale de Courtemaîche. Evolution des températures moyennes mensuelles dans les puits.
39. Evolution saisonnière des conductivités à Courtemaîche de 1989 à 1991
40. Nappe alluviale du Pont d'Able (Porrentruy). Courbes isothermes (équidistance 0.5°C en été, basses eaux du 27 juillet 1990.
41. Nappe alluviale du Pont d'Able (Porrentruy). Courbes isothermes (équidistance 0.5°C) en hiver, moyennes eaux du 25 avril 1990.
42. Nappe alluviale de Courtemaîche. Courbes isothermes (équidistance 0.5°C).
43. Nappe alluviale de Courtemaîche. Courbes isothermes (équidistance 0.5°C) en été. Basses eaux du 27 juillet 1990.
44. Nappe alluviale de Courtemaîche. Répartition de l'oxygène dissous dans la nappe.
45. Nappe alluviale du Pont d'Able (Porrentruy). Distribution (histogrammes) des conductivités moyennes journalières dans les puits (1989-1991).
46. Courtemaîche. Distribution (points) des conductivités moyennes journalières dans la nappe alluviale (puits), l'Allaine et la source de la Fontaine (1989-1991).
47. Nappe de Courtemaîche. Variation de la turbidité et des concentrations de sodium dans les puits lors de la crue de février 1989.
48. Nappe alluviale du Pont d'Able (Porrentruy). Evolution des niveaux piézométriques, des températures et des conductivités dans les puits central et sud, entre 1989 et 1991.

49. Nappe alluviale de Courtemaîche. Evolution des niveaux piézométriques, des températures et des conductivités dans les puits communal, central (SEHA2) et sud (SEHA3) entre 1989 et 1991.
50. Schéma des relations entre l'Allaine, le karst (système de La Fontaine) et la nappe alluviale de Courtemaîche.
51. Sources karstiques du Betteraz et de la Beuchire. Distribution fréquentielle (histogrammes) des conductivités moyennes journalières.
52. Sources karstiques de la Beuchire. Distribution fréquentielle (histogrammes) des conductivités moyennes journalières en 1989-90 et en 1990-91.

## **LISTE DES ANNEXES:**

### **1. Description des méthodes utilisées en Ajoie**

- 1.1 Méthodes géophysiques
- 1.2 Acquisiteurs de données Madd
- 1.3 Jaugeages
- 1.4 Interprétation des hydrogrammes
- 1.5 Principes des méthodes isotopiques
- 1.6 Interprétation des paramètres physiques
- 1.7 Interprétation des essais de traçage

### **2. Présentation des résultats géophysiques et isotopiques**

- 2.1 Présentation des résultats des mesures géophysiques
- 2.2 Présentation des résultats des mesures isotopiques

### **3. Listes descriptives des réseaux d'observation hydrologiques :**

- 3.1 Réseau d'observation hydrométéorologique d'Ajoie (état 1.12.98)
- 3.2 Réseau d'observation piézométrique de Courtemaîche (1989-1991)
- 3.3 Réseau d'observation piézométrique de Porrentruy (1989-1991)

### **4. Annuaire des débits journaliers de trois sources karstiques de 1989 à 1991:**

- 4.1 Source de la Beuchire
- 4.2 Source du Betteraz
- 4.3 Source de la Bonne-Fontaine

## LISTE DES ABREVIATIONS:

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A16:     | Route nationale 16: N16 (A16 dès 1996) = Transjurane                                                                                                                                                                                                             |
| ADIJ:    | Association de développement des intérêts jurassiens                                                                                                                                                                                                             |
| ANETZ:   | Réseau automatique de plus de 72 stations de mesures météorologiques (ISM)                                                                                                                                                                                       |
| BRGM:    | Bureau des recherches géologiques et minières (Paris)                                                                                                                                                                                                            |
| BUWAL:   | Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern (OFEFP)                                                                                                                                                                                                          |
| CHYN:    | Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel                                                                                                                                                                                                              |
| COST 65: | Programme de recherches européen sur les "Aspects hydrogéologiques de la protection des eaux souterraines en région karstiques" impliquant la Suisse notamment.                                                                                                  |
| CSD:     | Bureau Colombi, Schmutz, Dorthe SA, Berne-Porrentruy                                                                                                                                                                                                             |
| EIE N16: | Etude d'impact sur les eaux souterraines, route nationale N16 (transjurane), effectuée conjointement par les bureaux MFR et RWB.                                                                                                                                 |
| EPIK:    | Epikarst, couverture Protectrice, conditions d'Infiltration et développement du réseau Karstique (Méthode générale de cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques, servant de base à l'établissement des zones de protection en milieu karstique). |
| F:       | France                                                                                                                                                                                                                                                           |
| FN:      | Fonds National suisse pour la recherche scientifique.                                                                                                                                                                                                            |
| ISM:     | Institut Suisse de Météorologie, Zurich                                                                                                                                                                                                                          |
| MFR:     | Géologie et Géotechnique SA. Bureau d'ingénieurs Meury, Flury, Rieben, Delémont (JU)                                                                                                                                                                             |
| N16:     | Route nationale 16: N16 (A16 dès 1996) = Transjurane                                                                                                                                                                                                             |
| OEHE:    | Office de l'économie hydraulique et énergétique du canton de Berne (WEA)                                                                                                                                                                                         |
| OEPN:    | Office des Eaux et de la Protection de la Nature, St-Ursanne (JU)                                                                                                                                                                                                |
| OFEFP:   | Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne (BUWAL)                                                                                                                                                                                       |
| RWB:     | Bureau d'ingénieurs SIA/ASIC Robadey, Walther, Beuchat, Porrentruy (JU)                                                                                                                                                                                          |
| SEBA:    | Syndicat d'épuration des eaux usées de la Basse-Allaine                                                                                                                                                                                                          |
| SEHA:    | Syndicat pour l'alimentation en eau de la Haute-Ajoie                                                                                                                                                                                                            |
| SEV:     | Syndicat des Eaux de la Vendline                                                                                                                                                                                                                                 |
| SHGN:    | Service Hydrologique et Géologique National (OFEFP-BUWAL)                                                                                                                                                                                                        |
| s.l.:    | Sens large                                                                                                                                                                                                                                                       |
| s.str.   | Sens strict                                                                                                                                                                                                                                                      |
| SRAE:    | Service Régional d'Aménagement des Eaux (Besançon)                                                                                                                                                                                                               |
| TJ:      | Transjurane (cf. A16 ou N16)                                                                                                                                                                                                                                     |
| WEA:     | Wasser und Energiewirtschaftsamt (Office des eaux et de l'énergie du canton de Berne)                                                                                                                                                                            |

L'Eternel sera toujours ton guide, Il rassasiera ton âme dans les lieux arides, et il redonnera de la vigueur à tes membres, tu seras comme un jardin arrosé, comme une source dont les eaux ne tarissent pas.

LA BIBLE - Esaïe 58:11

## AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS

Ce travail est le prolongement d'une étude consacrée aux eaux souterraines du Jura tabulaire d'Ajoie. Entre 1988 et 1992, le Laboratoire cantonal des eaux du Jura (LCE, rattaché à l'OEPN) et le CHYN ont élaboré un rapport commun destiné à la République et Canton du Jura (OEPN) et à l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP-BUWAL). Cette étude a été abordée par deux aspects principaux: hydrogéologique (CHYN) et chimique (LCE). Nous avons rédigé la première partie du rapport (chapitres 2 à 7 - météorologie, hydrologie et hydrogéologie). Les aspects plus spécifiquement chimiques ont essentiellement été développés par MM. Ami Lièvre et Jean Fernex dans la seconde partie du rapport; cela concernait:

- l'évaluation de la pollution des eaux superficielles et souterraines,
- la mise en évidence de l'autoépuration des matières organiques biodégradables
- le comportement des micropolluants dans le karst.

Je ne vais pas reprendre l'ensemble de ces résultats, mais uniquement ceux indispensables à la compréhension du fonctionnement des aquifères, notamment dans la vérification de certaines hypothèses. Toutes les données acquises au cours de cette étude ont été mises à notre disposition par les responsables de l'OEPN et du LCE (MM. Bouvier et Lièvre) à St-Ursanne. Nous avons bénéficié de l'infrastructure mise en place dans le cadre de l'étude d'impact de la route nationale A16 (Transjurane). Nous avons également pu utiliser les résultats des nombreux essais de traçage liés à la Transjurane. Enfin, avec l'ensemble des données acquises dans le Jura, nous avons élaboré à Neuchâtel la carte hydrogéologique de l'Ajoie au 1:25'000, qui illustre le fruit de la collaboration LCE-CHYN (rapport final) et les résultats de la présente thèse.

Je souhaite dédier ce travail à mon épouse et à mes trois enfants pour qui la vie n'a pas été facile au cours de cette longue étude. Je remercie plus particulièrement mon épouse pour son soutien, ses encouragements et son immense patience.

Je tiens ici à remercier en particulier:

- le Dr. **M. Bouzelboudjen** pour son aide très appréciable tout au long de ce travail et particulièrement dans les moments difficiles
- le Professeur **F. Zwahlen**, directeur de thèse, pour son appui ainsi que la lecture très attentive du travail et ses suggestions.
- le Professeur **L. Kiraly** pour les discussions enrichissantes et les conseils donnés pour la conception de la carte hydrogéologique.
- le Professeur **J. Mania** pour la lecture approfondie de ce travail et ses remarques constructives.
- le CHYN qui m'a permis, grâce à son soutien financier, de terminer ma thèse après une interruption de plus de 2 ans, due à des raisons professionnelles.

J'aimerais encore remercier bien sincèrement toutes les personnes/institutions qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail:

- **le canton du Jura** qui portait un grand intérêt pour protéger ses ressources en eau et qui, avec l'**OFEFP** a assuré le financement de l'ensemble de l'étude de 1988 à 1992.
- **le LCE et l'OEPN** pour son accueil et son soutien:  
Mme Häsler, MM. B. Allemann, A. Barthe, J.-C. Bouvier, J. Fernex, O. Graf, Y.-A. Hammel, A. Lièvre.
- **les Ponts et Chaussées du Canton du Jura**, en particulier M. A. Voutat qui a soutenu la mise en place du réseau d'observation.
- **la commission scientifique** chargée du suivi de l'étude et composée de:  
MM. H.U. Schweizer et D. Hartmann (OFEFP); A. Burger, I. Müller et F. Zwahlen, (CHYN); P. Zahner (Bureau Zahner, Fribourg).
- **les collaborateurs du CHYN** à Neuchâtel:  
Mlle N. Doerfliger, MM. L. Eisenlohr, P.-Y. Jeannin, A. Mdagri Aloui, L. Perritaz, D. Simic, L. Tacher, J. Thierrin, P. Türlberg et tous les autres, dont les étudiants ayant participé aux camps de terrain du CHYN de 1990 à 1992.
- **le bureau MFR Géologie Géotechnique SA à Delémont**:  
Mlle R. Allemann, MM. D. Beuret, R. Christe, F. Flury, M. Hessenauer, P. Meury et C. Rieben
- **le bureau RWB SA, Ingénieurs SIA/ASIC à Porrentruy**:  
Mme F. Boesch, MM. R. Boesch, J. Frossard, D. Gretilat, E. Lawitschka et J.-L. Walther
- **le bureau Schindler à Prêles**:  
MM. C. Boss, Y.-A. Brechtbühler, J.-F. Comte, P. Dauwalder, della Valle, J.-F. Mages, B. Schindler, F. Schütz et C. Racine
- **le bureau CSD à Porrentruy**:  
MM. J.-A. Jossen et V. Schouwey

Ainsi que:

- les spéléologues/préleveurs: MM. D. Cailhol, G. Voisard, J.-P. Schlüchter
- le SEHA: MM. A. Juillard et C. Vallat
- la commune de Courtemaîche: M. J. Maillard
- les responsables de la station ISM de Mormont: M. et Mme Amstutz
- l'Office cantonal du Patrimoine historique: MM. B. Hiltbold et M. Guélat.
- le SRAE: M. J.-P. Mettetal
- l'ancien chef de gare de Boncourt : M. G. Bregnard
- les responsables des communes ajoulotes concernées et toutes les personnes (agriculteurs et employés communaux) qui ont contribué à la réussite des essais de traçages.

**Je ne terminerai pas ces remerciements sans relever encore les personnes/institutions qui, par leur soutien financier ont permis d'imprimer cette thèse. Qu'elles trouvent ici toute ma gratitude:**

- **L'Université de Neuchâtel**
- **L'OFEFP**
- **MFR, Géologie et Géotechnique SA., Delémont**
- **RWB SA, Ingénieurs-conseils SIA/ASIC, Porrentruy**

## RESUME

L'Ajoie est située dans le prolongement méridional du Fossé Rhénan, au pied de la dernière chaîne du Jura plissé et à l'extrémité orientale du Jura tabulaire français. Les terrains ajoulots sont essentiellement karstiques. L'aquifère principal, celui du Malm (30 à 250 m d'épaisseur) a comme substratum de base les marnes très peu perméables de l'Oxfordien (80 m environ). Dans cet environnement karstique, les aquifères alluviaux ont cependant une importance primordiale, malgré leur extension limitée, dans l'exploitation des ressources en eau potable de l'Ajoie.

Les cours d'eau qui drainent l'Ajoie, en particulier l'Allaine, se jettent dans le Doubs, qui appartient au bassin du Rhône. Le cours d'eau principal, l'Allaine s'étend sur une longueur d'environ 30 km de sa source à sa sortie de Suisse (limnigraphe fédéral de Boncourt). La surface du bassin correspondant atteint 182 km<sup>2</sup>, inférieure à celle du bassin topographique (215 km<sup>2</sup>). Avec une altitude moyenne de 550 m d'altitude et environ 90% du bassin situé à moins de 650 m, le bassin de l'Allaine est considéré comme un bassin de relativement basse altitude. Les écoulements sont à la fois superficiels (forte densité de drainage dans la partie orientale couverte de Tertiaire) et souterrains (partie occidentale et septentrionale). Les principaux exutoires du Malm (Beuchire, Betteraz, La Fontaine) ont été étudiés.

On observe une mauvaise corrélation précipitations-altitude pour 4 cycles hydrologiques. Les méthodes de Thiessen et des isohyètes se sont révélées très utiles pour le calcul de la lame d'eau annuelle. La répartition spatiale des précipitations montrent pour les 4 cycles étudiés une représentation similaire, pour des valeurs annuelles variant de 826 à 1182 mm. Des précipitations nettement plus faibles (20 à 30% de moins) ont été systématiquement mesurées au N-E de Porrentruy.

Les principales sources karstiques ont des débits moyens de 800 l/s (La Beuchire) à 200 l/s (Le Betteraz, Le Voyeboeuf, La Bonne-Fontaine), pour un débit moyen total de 3100 l/s (Allaine à Boncourt) et un débit spécifique moyen de 17 l/s.km<sup>2</sup>. Les exutoires étudiés réagissent très rapidement aux précipitations (pics des hydrogrammes atteints en quelques heures). Les vitesses d'écoulement des eaux souterraines, déterminées par des essais de traçages, peuvent passer de 10-20 à 300-400 m/h voire même 1000 m/h.

L'apport des traçages a été considérable pour délimiter les bassins versants des principales sources mais aussi pour définir l'origine des différentes pollutions (décharges avec solvants, rejets d'eaux usées) dans les sources, élément essentiel à une gestion des eaux optimale.

Pour leur part, les aquifères alluviaux sont des systèmes complexes. Les apports allochtones constituent ainsi la plus grande part de l'eau exploitée des nappes de Courtemaîche et du Pont d'Able (Porrentruy). L'Allaine, le karst et la réalimentation des nappes alluviales (d'origine karstique) constituent la majorité de ces apports dans des proportions variant selon l'état hydrologique. Ces apports sont peu rapides étant donné une amplitude saisonnière élevée de la température (3 à 5 °C).

La mise en service de la STEP de Porrentruy en 1987 et du captage de la source du Betteraz (1992) sont les événements majeurs survenus dans la gestion des eaux en Ajoie. La qualité des eaux superficielles (surtout l'Allaine) s'est nettement améliorée et la plupart des rejets d'eaux usées dans le karst ou dans un cours d'eau ont été supprimés. Avant 1992, la proportion d'eau alluviale et d'eau karstique exploitée pour l'eau potable était équivalente. Après 1992, la proportion a passé à 1/3 pour l'eau alluviale et à 2/3 pour l'eau karstique.

Point culminant de cette thèse, la carte hydrogéologique de l'Ajoie au 1:25'000 est incluse dans le volume II intitulé : « Notice explicative ». Par une lecture sur plusieurs niveaux, la carte est un outil précieux qui permet notamment d'obtenir une vision synthétique des caractéristiques des différents aquifères et des problèmes liés à la gestion des eaux (pollutions multiples). Des tableaux synthétiques regroupent les caractéristiques de 92 sources/puits, de 88 forages et de 112 essais de traçage.

### **Mots-clés**

Acquisition des données - Allaine - Carte hydrogéologique - Gestion des eaux - Hétérogénéité des précipitations - Système karstique - Système alluvial - Traçages.

# **PARTIE A: INTRODUCTION GENERALE:**

*Page*

|    |                                                                                                                 |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3  | <b>1. LES SYSTEMES AQUIFERES</b>                                                                                |
| 3  | 1.1 Caractérisation des systèmes aquifères                                                                      |
|    | 1.1.1 Systèmes karstiques                                                                                       |
|    | 1.1.2 Systèmes alluviaux                                                                                        |
|    | 1.1.3 Systèmes mixtes/complexes                                                                                 |
| 5  | 1.2 Méthodes d'approche                                                                                         |
| 5  | 1.2.1 Méthodes géophysiques                                                                                     |
| 6  | 1.2.2 Essais de traçage                                                                                         |
| 6  | 1.2.3 Hydrogrammes de récession                                                                                 |
| 7  | 1.2.4 Distribution des débits classés                                                                           |
| 8  | 1.2.5 Bilan hydrologique d'un système                                                                           |
| 8  | 1.2.6 Méthodes chimiques                                                                                        |
| 9  | 1.2.7 Autres méthodes                                                                                           |
| 9  | 1.3 Recherche et pratique, combat ou échanges?                                                                  |
| 10 | 1.4 Utilisation des méthodes et exemples pratiques                                                              |
| 11 | <b>2. CAS DE L'AJOIE: BUTS POUR LE PROJET CANTONAL AJOIE (1988-1993) ET POUR LA THESE</b>                       |
| 11 | 2.1 Problèmes de pollution                                                                                      |
| 11 | 2.2 Projet d'étude et buts poursuivis                                                                           |
|    | 2.2.1 Rapport commun du LCE et du CHYN                                                                          |
|    | 2.2.2 Thèmes développés dans la thèse                                                                           |
| 12 | 2.3 Moyens utilisés                                                                                             |
| 13 | 2.4 Note technique                                                                                              |
| 14 | <b>3. PRESENTATION DES THEMES TRAITES DANS LES PARTIES B, C ET D</b>                                            |
| 14 | 3.1 Partie B: Cadre géologique, morphologique et hydrologique du bassin versant de l'Allaine à Boncourt, Ajoie. |
| 14 | 3.2 Partie C: Interprétation et fonctionnement des systèmes étudiés.                                            |
| 15 | 3.3 Partie D: Conclusions et recommandations                                                                    |

# **PARTIE A: INTRODUCTION GENERALE:**

## **1. LES SYSTEMES AQUIFERES**

### **1.1 Caractérisation des système aquifères**

#### ***Définitions***

On définit par système karstique un système aquifère hétérogène qui comporte des conduits de forte conductivité (hydraulique), plus ou moins bien interconnectés, situés dans une matrice de roches en général carbonatée pouvant présenter elle-même des propriétés conductrices et capacitives. Tous les points d'un réseau karstique sont relié à un même exutoire (ou une zone d'exutoires) qui peut se dédoubler en un exutoire pérenne et un exutoire de crue.

En surface, le système karstique correspond à un karst (au sens du concept géomorphologique) plus ou moins bien évolué, caractérisé par l'absence ou la dégradation d'un réseau hydrographique continu en surface et par la prédominance de l'écoulement souterrain sur l'écoulement total (Király, 1976; Bonnet et al. 1976).

#### ***Caractéristiques générales des systèmes karstiques***

Le système karstique est caractérisé par les principaux éléments suivants:

- a) Limites du système
- b) Structure du système
- c) Conditions aux limites

#### **a) Limites du système**

Les limites du système peuvent être internes ou externes. Si elles sont internes, elles compartimentent le système en plusieurs sous-systèmes relativement indépendants, mais avec un ou des exutoires commun(s). Si elles sont externes, les limites séparent des systèmes d'écoulement (zone à flux "nul") comportant des exutoires distincts, sans cependant exclure des diffusions vers l'un ou l'autre système. Les limites sont de nature géologique (accident tectonique, zone peu perméable d'origine sédimentaire) ou hydrauliques. Elles peuvent se déplacer selon les conditions hydrologiques de l'aquifère.

#### **b) Structure du système**

Les systèmes réels peuvent présenter plusieurs types de structure:

- structure monocouche, avec une matrice perméable ("isotrope") et un réseau de conduits de forte conductivité, drainant ou infiltrant, mais faiblement capacitif;
- structure bicouche ou multicouche; superposition d'au moins deux monocouches dont la couche supérieure n'est dotée que d'une capacité et d'une perméabilité négligeables;
- structure en compartiments; existence de discontinuités importantes (accidents tectoniques, rivière souterraine,...) dans l'une des deux structures précédentes; relative indépendance des compartiments;

#### **c) Conditions aux limites**

Ces conditions correspondent aux caractéristiques hydrauliques et hydrologiques le long des limites; elles comportent des entrées (alimentation) et des sorties (exutoires). Les entrées sont caractérisées par des signaux de nature différente. Nous définissons le terme de signal d'entrée comme tout élément n'appartenant pas à un système aquifère (karstique) et qui modifie la réponse (caractéristique = signal de

sortie) de l'exutoire de ce système. Les signaux d'entrée comprennent: les précipitations (quantité et qualité physico-chimique), le climat (température, humidité de l'air, pression, etc.), les infiltrations des cours d'eau (pertes en qualité et en quantité) et les rejets de polluants de manière concentrée ou dispersée (égouts, décharges).

Ainsi, le comportement des écoulements dans les structures dépend du mode d'alimentation qui se fait par:

- l'infiltration efficace à travers une zone non-saturée;
- l'infiltration ponctuelle d'une rivière rechargeant la zone saturée par des conduits;

L'alimentation du système peut être approchée par:

- la connaissance de la lame d'eau infiltrée, moyennant l'existence d'un réseau pluviométrique représentatif de l'ensemble du système (modèle global pluies/débits); l'acquisition des données est cependant difficile du fait de l'hétérogénéité spatiale des précipitations;
- la mesure directe des pertes identifiées d'une rivière; la localisation et la quantification des pertes n'est pas toujours évidente, d'autant plus qu'elles peuvent fortement varier quantitativement selon la situation hydrologique;

Les débits sortant aux exutoires sont aussi en général bien connus. Par contre, les paramètres structuraux du réservoir (transmissivité, emmagasinement de la matrice - géométrie, conductivité et capacité des réseaux) ne sont pas forcément mesurés. Il en est de même avec la distribution des potentiels dans le réservoir. Le plus souvent, seules des mesures ponctuelles existent.

*Pratiquement*, un système karstique possède une région alimentaire et une région d'exutoire(s). Les zones les plus karstifiées jouent généralement le rôle de drains voire ponctuellement celui d'exutoires locaux (en crue par exemple) par rapport aux parties restées moins perméables. La direction d'écoulement dans les blocs à perméabilité plus faible peut s'inverser en période de recharge lors de fortes précipitations. La concurrence entre zones fortement karstifiées va aboutir à des captures: une zone évoluant rapidement drainera les autres zones perméables, contribuant ainsi à l'unification du réseau karstique et à la concentration des exutoires de l'aquifère. On aura schématiquement un réseau très perméable, de faible volume, drainant des blocs peu perméables, de volumes très importants. L'alimentation d'un système karstique est hétérogène (même si la répartition des précipitations est homogène), car elle s'opère simultanément d'une manière dispersée et d'une manière concentrée (soit par drainage de la zone non saturée, soit par des conduits subverticaux traversant la zone non saturée, révélés en surface par la présence de dolines).

### **Approche systémique**

Le système karstique peut être abordé de deux manières, complémentaires:

- **modèles globaux** ("boîtes noires), basés sur les relations entrée/sortie (pluies efficace/débits exutoires); analyse du système dans ses effets aboutissant à la connaissance des fonctions de transfert; les différents mécanismes qui conditionnent le transfert ne sont pas pris en considération;
- **modèles déterministes** (simulations hydrodynamiques représentatives des conditions physiques réelles); étude des mécanismes de transfert. Seule cette approche permet d'optimiser les interventions artificielles sur le système et d'en simuler les effets.

### **Modèle déterministe**

La mise en oeuvre d'un modèle déterministe doit s'appuyer sur les résultats d'approche par modèles globaux, ce qui illustre bien la complémentarité des deux types de modèles.

Dans la pratique, on cherche à déterminer, par une fonction de transfert, la relation (parfois complexe) entre une fonction "entrée" et une fonction "sortie", c'est-à-dire en reconstituant les variations du débit à la source à partir des valeurs de la pluie efficace (hydrogramme unitaire obtenu par déconvolution).

Le modèle déterministe doit donc être essentiellement basé sur deux éléments:

- structure et limites du domaine
- débit de la source en relation avec la pluie sur le bassin d'alimentation;

L'identification des paramètres de structure de l'aquifère sera obtenue par tâtonnement en l'absence de données suffisantes. Nous verrons dans quelle mesure il sera difficile de construire un tel modèle pour les aquifères étudiés, le principal obstacle étant l'obtention correcte des débits.

Les méthodes quantitatives utilisées pour la détermination des divers paramètres hydrodynamiques (K, T, S) des aquifères sont basées sur l'homogénéité et l'isotropie géométrique du milieu considéré. Dans les aquifères karstiques, les collecteurs locaux représentent des directions d'écoulement et de drainage privilégiés. Les discontinuités engendrées excluent théoriquement les extrapolations et les généralisations. On ne connaît jamais complètement la répartition des propriétés hydrauliques dans un aquifère, mais seulement quelques valeurs dans des forages isolés. Aussi, dans la pratique et sur une petite échelle, les valeurs doivent être interpolées entre les forages et extrapolées vers les limites de l'aquifère. En principe, l'interprétation classique des pompages d'essai dans le karst ne permet pas de déterminer les paramètres hydrodynamiques. Cependant, la liaison fonctionnelle entre ces paramètres et la courbe de tarissement des aquifères karstiques permet non seulement l'étude de la géométrie des collecteurs karstiques et des caractéristiques de nappes aquifères, mais aussi une évaluation plus ou moins satisfaisante des paramètres T et S. La méthode d'approximation logarithmique de Theis et Jacob est alors utilisée. Les valeurs ainsi calculées reflètent l'évolution de l'ensemble de l'aquifère karstique au cours de l'étiage, où chaque partie du système karstique contribue au débit de base de l'exutoire (Mijatovic, 1974). Pour les aquifères karstiques, S correspond à la porosité efficace.

La connaissance des aquifères est toujours plus ou moins hypothétique (Kiraly, 1993). Des hypothèses (modèle ou schéma) doivent être formulées afin qu'elles puissent être vérifiées par des observations. La vérification de la réponse du modèle avec le comportement réel de la nappe permettra de décider si les hypothèses sont satisfaisantes.

## 1.2 Méthodes d'approche

Les méthodes abordées ci-dessous, utilisées au cours de cette étude, sont décrites de manière plus détaillée en annexe 1.

### 1.2.1 Méthodes géophysiques

Pour caractériser les systèmes karstiques étudiés, il importe d'en connaître la structure. Mais, vu les difficultés rencontrées pour connaître la structure des aquifères par des mesures directes (relevés de fissuration, forages, cavités souterraines), on doit avoir recours à des méthodes indirectes d'investigation qui permettent notamment de localiser les discontinuités d'un réservoir.

Dans l'éventail assez large de ces méthodes, les méthodes électromagnétiques (Very Low Frequency Resistivity/VLF-R ou radio-magnéto-tellurique) permettent d'obtenir de bons résultats. Mais, elles doivent être appliquées systématiquement et lorsque les surfaces à étudier sont vastes, cela devient difficile à mettre en oeuvre du fait des moyens financiers nécessaires. Elles sont alors utilisées pour résoudre des problèmes bien localisés, en complément d'autres méthodes. Le domaine d'étude étant vaste et les crédits

limités, ces méthodes ont été utilisées de manière assez ponctuelle dans le cadre de notre étude, afin de résoudre des problèmes particuliers. Des accidents tectoniques majeurs à l'échelle d'un système karstique ont été mis en évidence dans des secteurs clés. L'anisotropie directionnelle des calcaires permet ainsi d'être décelée par cette méthode très sensible, trop sensible parfois lorsqu'on s'approche des régions urbanisées. Dans certaines zones, à Courtemaîche notamment, nous nous sommes heurtés à de gros problèmes d'interprétation des mesures, causés en partie par des perturbations physiques (conduites en tout genre), générant des réponses similaires à celles des accidents tectoniques. Le faible contraste électrique entre les alluvions graveleuses et les calcaires sous-jacents ne nous a guère aidé non plus. Les profils de mesures systématiques effectués dans le cadre des travaux de reconnaissance géologique pour la Transjurane ont révélé les zones les plus karstifiées, mais uniquement sur le futur tracé de l'autoroute...

Les méthodes électromagnétiques sont de bonnes méthodes pour mettre en évidence les anisotropies du sous-sol, mais il est pratiquement impossible de vouloir quadriller systématiquement le bassin versant d'une source karstique suivant sa taille et l'occupation du territoire. Seules, des zones si possible représentatives de l'ensemble du bassin ou particulièrement délicates peuvent faire l'objet de mesures systématiques. Les autres méthodes géophysiques, plus lourdes à mettre en œuvre, ne permettent pas de couvrir d'aussi grandes zones que les méthodes électromagnétiques. Elles sont donc utilisées pour les compléter ou les remplacer lorsque certaines perturbations sont trop importantes ou lorsqu'il y a des équivalences électriques. Ainsi, les méthodes microsismiques (réfraction) ont été utilisées avec succès dans la plaine de Courtemaîche lorsqu'il a fallu dresser une carte du substratum des alluvions. Les grands écarts entre les vitesses mesurées indiquent également l'importance de la fracturation des calcaires sous-jacents

*La description sommaire des méthodes géophysiques est donnée en annexe 1. Etant donné qu'ils n'apportent pas d'éléments déterminants par rapport aux objectifs fixés, les principaux résultats géophysiques électromagnétiques utilisés en Ajoie ont été reportés dans l'annexe 2.1. Bien que faisant l'objet d'un article publié dans le bulletin du CHYN (Gretillat, 1990), les résultats des mesures microsismiques sont repris sous forme condensée en annexe 2.1..*

### 1.2.2 Essais de traçage

L'essai de traçage est probablement l'un des outils les plus employés en hydrogéologie et particulièrement en Ajoie ces dernières années! Les essais de traçages sont habituellement analysés d'un point de vue qualitatif. L'injection puis la réapparition d'un traceur permet de mettre en évidence des connexions souterraines et de délimiter les bassins versants d'un exutoire donné. Un des problèmes réside dans la réalisation d'essai dans des conditions hydrologiques comparables pour un même bassin, car un essai ne fournit un résultat qui n'est en principe valable que pour des conditions hydrologiques précises. Les résultats d'un essai réalisé en basses eaux ne sont ainsi pas identiques à ceux d'un essai réalisé en moyennes ou hautes eaux.

Il est nécessaire d'appliquer des méthodes permettant une approche quantitative du problème. Cette approche devrait permettre une meilleure estimation des conséquences de l'introduction de polluants dans un système karstique, ceci dans le cadre d'étude d'impact d'un projet, de délimitation d'une zone de protection ou, après un accident, lorsque des mesures visant à en limiter les effets doivent être prises. Les modèles déterministes à éléments finis sont à la base de l'étude théorique, mais dans la pratique, on ne connaît jamais la géométrie et la densité du réseau karstique dans les aquifères réels. L'élaboration d'un modèle "boîte noire" doit donc être considérée, avec une entrée et une sortie. La fonction de transfert qui les relie sera déterminée sur la base d'essais de traçage. Elle va permettre d'évaluer les caractéristiques d'un aquifère et de comparer plusieurs aquifères, ainsi que de prévoir, le cas échéant, la restitution d'un polluant à la sortie du système. Dans ce type de modèle, seules les données concernant la fonction d'entrée, c'est-à-dire les flux massiques d'injection de traceur et la fonction de sortie, c'est-à-dire la courbe

de restitution (complète), sont prises en considération. La fonction de transfert prend en compte tous les paramètres de l'aquifère karstique.

Pour un emploi adéquat de la méthode en fonction des objectifs énumérés, l'organisation d'un essai de traçage, déjà délicate, nécessite un certain nombre de précautions supplémentaires (stabilité météorologique, échantillonnage serré du point d'apparition). Une bonne connaissance préalable du système à étudier est nécessaire, ce qui n'était guère le cas au début de notre étude. L'essai de traçage est souvent réalisé dans un but bien particulier, qui peut en limiter les moyens donc compromettre une interprétation ultérieure de résultats partiels. Dans la pratique, on se satisfait souvent de savoir si un résultat est positif ou négatif entre deux points. Cela suffit même à lever des litiges entre propriétaires de terrains et de captages, par exemple.

### 1.2.3 Hydrogrammes de récession

L'obtention du débit à l'exutoire du système étudié est l'une des conditions essentielles de départ: mesure de la hauteur d'eau par un limnigraphe, jaugeages et courbe(s) de tarage. En pratique et nous l'avons hélas constaté, les débits sont parfois très difficiles à déterminer. La configuration de l'exutoire est l'un des principaux obstacles et son réaménagement peut s'avérer très coûteux, voire hors de proportion avec les résultats que l'on veut obtenir. Une fois les débits précisés, on peut commencer à observer les hydrogrammes, et en particulier la courbe de récession. Contrairement aux autres types d'aquifères qui ne possèdent pas de conduits transmissifs, le débit aux exutoires des systèmes karstiques est la superposition de deux composantes d'écoulement, l'une rapide (débit de crue ou "conduit flow"), l'autre lente (débit de base ou "diffuse flow"). L'hydrogramme de crue est divisé en:

- montée de la crue
- récession de la crue, elle-même divisée en:
  - décru (influence persistante de l'infiltration rapide)
  - tarissement (vidange des réserves)

L'hydrogramme de décroissance du débit  $Q$  exprime l'hétérogénéité de l'alimentation et l'effet des réservoirs. D'après Kiraly (1976b), la décroissance d'un aquifère (=bloc peu perméable + réseau de fractures conductrices) se traduit par 3 exponentielles successives de pente décroissante:

- 1) vidange rapide du réseau
- 2) phénomènes d'échanges transitoires
- 3) vidange lente des blocs

Le débit total est la somme des débits partiels donnés par chacune des exponentielles.

En pratique, on ne peut pas dissocier l'écoulement du réseau de celui des blocs.

La forme de l'hydrogramme varie d'une crue à une autre en fonction de l'impulsion et de l'état des réserves.

Pour la courbe de tarissement, le modèle de Maillet fonctionne très bien pour les aquifères karstiques:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

L'avantage de la courbe de tarissement est l'obtention d'un coefficient qui est certes une constante, mais qui varie pour une même source, en fonction des réserves (selon Mangin, 1975). Le modèle de Maillet est mis à profit dans le calcul du volume des réserves en eau de l'aquifère, en intégrant l'expression ci-dessus depuis le début du tarissement jusqu'à l'infini. Cette méthode nécessite l'obtention de débits fiables et en particulier pour l'étiage. Cette condition n'est pas évidente à remplir et nous en avons fait l'expérience en Ajoie. Il faudrait d'abord être sûr de mesurer la plus grande partie des débits à l'exutoire (problème des zones d'exutoires multiples ou diffus) et ensuite d'avoir des courbes de tarage univoques dans les basses

eaux. Les résultats présentés dans cette thèse sont succincts et concernent essentiellement la source de la Beuchire. De plus, ils sont à prendre avec réserve, les bas débits ne pouvant être certifiés.

#### 1.2.4 Distribution des débits classés

Considérant comme acquis les débits au cours d'un cycle hydrologique au moins, on peut les classer par ordre décroissant avec deux types d'échelle en ordonnée:

- linéaire (interprétation limitée, comparaison entre plusieurs exutoires)
- probabiliste (Loi de Laplace, interprétation de Mangin)

La distribution des débits classés renseigne sur le mode de décharge des eaux souterraines aux exutoires. L'utilisation des courbes de débits classés (Mangin, 1975) permet de discerner notamment la présence de trop-pleins ou d'apports par des pertes de cours d'eau: ces phénomènes se signalent au niveau de la courbe par une rupture de pente. Pour obtenir ce mode de représentation, on reporte les débits classés en abscisse (échelle logarithmique ou linéaire) et la fréquence de ces débits en ordonnée, d'après une loi probabiliste tirée de Laplace; les points s'alignent théoriquement sur une droite, si aucune perte ou aucun autre exutoire n'entre en fonction. Il faut cependant rester très prudent avec cette méthode. En travaillant sur des cycles isolés, des situations particulières (tarissement marqué, piégeage momentané de réserves) peuvent se produire et créer des discontinuités sur la courbe qui ne reflètent pas le fonctionnement du système sur plusieurs cycles. Seules les observations directes ou indirectes peuvent venir confirmer ou non l'interprétation de ces courbes.

#### 1.2.5 Bilan hydrologique d'un système

La connaissance des entrées et des sorties d'un système sont les conditions essentielles à l'établissement d'un bilan hydrologique. Celui-ci représente l'équilibre entre les entrées (apports) et les sorties (débits aux exutoires) d'un système donné pour une période précise (cycle hydrologique par exemple). Dans ce bilan on tient également compte de la variation des réserves (positive ou négative). Chaque composante du bilan est exprimée en terme de débits ou de volumes. Le bilan est le moyen de contrôle de la cohérence des données, évaluées de manière indépendante, relatives à l'alimentation et aux écoulements des systèmes hydrologiques. Dans le calcul du bilan, les apports sont fournis par les précipitations efficaces  $P_e$  et les sorties par le débit de l'écoulement total,  $Q_t$ . Les précipitations efficaces représentent la fraction de la lame d'eau des précipitations totales ( $P_t$ ) qui s'infiltré dans le sol et parvient au système d'écoulement:

$$P_e = P_t - ETR \quad \text{où ETR représente l'évapotranspiration.}$$

A long terme,  $P_e = Q_t$ . Sur de courtes périodes, l'égalité ne peut être maintenue qu'en y incluant la différence de réserve  $\Delta W$ :

$$P_e = Q_t + \Delta W$$

En présence d'apports autres que les précipitations efficaces (infiltrations de cours d'eau, alimentation artificielle) ou de prélèvements influençant le débit de l'écoulements total (pompages), le bilan est plus complexe. La méthode du bilan est très utilisée dès que l'on peut évaluer le débit moyen d'une source et que l'on peut disposer des mesures d'une station pluviométrique située dans la même région. Dans la pratique (zones de protection par exemple), un calcul rapide suffit souvent et sert à estimer grossièrement la surface de l'imluvium du système à étudier.

Comme pour les méthodes précédentes, il est encore question de la fiabilité des débits obtenus. Une marge d'erreur élevée ne donnent évidemment plus grand sens au calcul du bilan.

### 1.2.6 Méthodes chimiques

Une étude hydrogéologique ne peut se faire sans connaître la qualité des eaux souterraines:

- les caractéristiques naturelles (minéralisation, température)
- les éléments artificiels correspondant à diverses pollutions anthropogènes et qui peuvent être multiples:
  - chimiques (pesticides, désherbants, solvants, engrais, métaux lourds. etc...)
  - bactériologique

Une ou mieux plusieurs analyses complètes (mais coûteuses!) donnent des informations précieuses pour l'interprétation et la vérification des hypothèses sur le fonctionnement du système étudié. L'évolution et la variabilité des paramètres physico-chimiques et bactériologiques mesurées en fonction de l'hydrodynamique permettent d'observer la vulnérabilité d'une nappe et la nature de ses connexions avec la surface. Des paramètres stables indiquent de faibles mélanges avec les eaux de surfaces et des temps de séjour élevés dans l'aquifère. On rencontre généralement des eaux correspondant à ce type d'aquifère dans le Dogger (aquifères du Callovien et du Bajocien sur la rive gauche des Gorges de l'Areuse, dans le Jura neuchâtelois par exemple). En Ajoie, aucun exutoire spécifique du Dogger n'est digne d'être signalé.

### 1.2.7 Autres méthodes

D'autres méthodes relatives aux traitements des données peuvent être utilisées en hydrogéologie, mais elles n'ont pas été abordées dans le cadre de cette étude:

- analyses de régression;
- hydrogramme unitaire;
- méthodes statistiques et stochastiques (distribution probabiliste-régression, fonctions de convolution-variogrammes et krigeage-modèles stochastiques;
- modèles numériques(éléments finis et différences finies).

## **1.3 Recherche et pratique, combat ou échanges?**

On peut répartir les différentes méthodes d'approche que nous venons de voir en deux catégories, selon leur aspect pragmatique:

- la première catégorie regroupe celles d'utilisation courante, dans le travail quotidien correspondant aux mandats d'étude visant à résoudre des problèmes très concrets, avec relativement peu de moyens. Dans la pratique d'un bureau d'ingénieurs, il y a peu de temps à disposition pour résoudre les problèmes; seules des méthodes qui ont fait leurs preuves et d'un bon rapport qualité/prix peuvent être utilisées pour satisfaire le mandant. L'effet de la concurrence oblige les bureaux à fournir des prestations optimales pour un prix raisonnable. Il en va de leur survie.

- utilisation plus spécifique par des instituts spécialisés et qui s'appliquent à des problèmes particuliers ou délicats, avec un côté plus académique (recherche); cet aspect est très important pour développer des méthodes qui pourront ensuite être utilisées dans la première catégorie, après simplification, faute de mieux).

### ***Interactions entre la recherche et la pratique***

Les deux catégories d'utilisation peuvent se rejoindre et travailler en collaboration. Des problèmes qui ne peuvent être résolus dans la première catégorie seront étudiés dans la seconde, avec des moyens supplémentaires, par des crédits alloués à la recherche. C'est le cas qui se présente le plus fréquemment dans la recherche. Inversement, la seconde catégorie peut se greffer sur des problèmes pratiques pour

vérifier des hypothèses ou pour acquérir des données nécessaires à la poursuite de la recherche. Si on prend un exemple que nous connaissons bien, celui d'une carte hydrogéologique, un ensemble de données acquises par de nombreuses études d'importances diverses vont permettre d'élaborer une carte. Cette carte ne peut être réalisée par un bureau privé, les moyens devant être mis à disposition en étant trop élevés. Mais grâce à la collaboration de tels bureau ainsi que de celle des propriétaires des données, il devient possible de construire quelque chose (une carte) utile à tous et d'éviter une perte de temps et d'argent pour parvenir à des connaissances qui existent déjà, quelque part...

### ***Mise en commun des moyens***

Un autre aspect de collaboration entre les deux catégories précitées peut être concrétisé par la mise en commun de moyens pour étudier une même région. Le premier multitraçage effectué en Ajoie (mai 1988) est le fruit d'une collaboration entre un bureau d'ingénieurs et le CHYN'. Grâce à la mise en commun des moyens respectifs, ce travail a permis d'obtenir d'excellents résultats qui ont ensuite pu être publiés dans les bulletins du CHYN' et de l'ADIJ'.

Dans le cadre des travaux de construction de la N16 - Transjurane, entre Courgenay et Boncourt, des études d'impact sur les eaux souterraines ont été exigées et des moyens importants ont été mis à disposition des mandataires. Les bureaux mandatés pour ce travail de relativement longue durée ont favorisé une excellente collaboration avec le CHYN. Nous avons ainsi pu tenir compte des objectifs de chacun de nos projets pour implanter conjointement un important réseau d'observation (40 appareils de mesures) et ainsi bénéficier d'une excellente infrastructure. Cette dernière est aussi une arme à double tranchant: problèmes d'installation, maintenance et traitement d'une avalanche de mesures! Ce n'est qu'en 1996 qu'une correction et une validation systématique des mesures acquise depuis 1989 peut être effectuée par un logiciel adapté à la hauteur de la tâche. Certaines données utilisées dans ce travail, et en particulier les données limnimétriques sur l'Allaine sont fournies sous toute réserve.

## **1.4 Utilisation des méthodes et exemples pratiques**

Dans le cadre de l'établissement des zones de protection de captages, on utilise un certain nombre de méthodes de base qui peuvent être complétées en fonction des besoins particuliers de l'étude concernée. Nous allons prendre deux exemples de délimitations de zones de protection en milieu karstique. Le premier exemple est une étude concernant une source appartenant à une commune de petite taille (débit moyen capté: 2 l/s), le second est une importante étude comportant de nombreuses sources appartenant à plusieurs communes qui se sont unies pour grouper leurs moyens financiers.

### **1) Source de La Prévôtée (Cornaux, NE)**

Pour la délimitation des zones de protection de ce captage, les principaux travaux effectués ont été:

- compilation des données existantes (géologie, études ultérieures)
- des essais de traçage pour délimiter le bassin versant de la source
- des mesures de débit et la reprise de données météorologiques de la station de Neuchâtel (méthode des bilans hydrologiques);
- des analyses chimiques pour caractériser la source et son degré de pollution anthropogène;

### **2) Captages des Gorges de l'Areuse (Val-de-Travers, NE)**

Pour la délimitation de ces captages, les principaux travaux effectués ont été:

- compilation des données existantes (géologie, études ultérieures)
- de nombreux essais de traçage (multitraçages) pour délimiter les bassins versants des différentes sources et déterminer les relations entre la rivière et les aquifères karstiques;
- utilisation de mesures existantes de débits hebdomadaires et des données météorologiques (Combe-Garot), méthode des bilans hydrologiques;

- Analyses systématiques de l'ensemble des captages (analyses physico-chimiques et bactériologiques courantes et analyses d'éléments trace et de métaux lourds, pour caractériser et classer les captages (analyses statistiques multivariées);
- Prospection géophysique (sondages électriques) pour évaluer la qualité et l'épaisseur de la couverture quaternaire comme protection de l'aquifère karstique;
- Sondages de reconnaissance et implantation de piézomètres dans un aquifère alluvial;

Des moyens beaucoup plus importants ont pu être mis en oeuvre pour cette étude. Des intérêts économiques et politiques nettement supérieurs étaient en jeu avec la cohabitation dans la même zone de projets d'agrandissement des installations hydroélectriques et l'alimentation en eau potable de plus de la moitié de la population du canton de Neuchâtel. Dans le premier exemple par contre, il s'agissait de la sauvegarde d'une ressource en eau communale, menacée du point de vue quantitatif surtout. Une diminution progressive et prévisible de l'impluvium pèse en effet sur la source suite à l'exploitation massive d'une carrière.

## **2. CAS DE L'AJOIE: BUTS POUR LE PROJET CANTONAL AJOIE (1988-1993) ET POUR LA THESE**

### **2.1 Problèmes de pollution**

Les problèmes de gestion des eaux en Ajoie se posent depuis des lustres. De nombreuses communes ont dû se regrouper en syndicats d'alimentation en eaux pour unir leurs faibles moyens afin de distribuer de l'eau potable sur de grandes distances parfois. Fortement industrialisée et sans station d'épuration jusqu'en 1987, cette région connaissait de graves problèmes de pollutions multiples des eaux souterraines. Parmi les polluants les plus importants, on citera les solvants chlorés déversés dans les égouts ou déposés dans des décharges sauvages durant de nombreuses années. La mise en place de systèmes de traitement des eaux de boisson, d'épuration des eaux usées domestiques a fait l'objet d'investissements considérables pour cette région.

### **2.2 Projet d'étude et buts poursuivis**

#### **2.2.1 Rapport commun du LCE et du CHYN**

Une étude devait être réalisée pour s'assurer que les efforts déjà consentis et ceux à venir allaient dans la bonne direction et permettaient d'améliorer la situation des eaux tant superficielles que souterraines. C'est la raison qui a poussé le parlement jurassien à voter en 1987 les crédits nécessaires pour mener à bien une étude sur les eaux souterraines du Jura tabulaire d'Ajoie. Les principaux buts étaient les suivants:

- meilleure connaissance des circulations d'eaux souterraines et du fonctionnement des aquifères (karstiques et alluviaux) dont les exutoires/captages étaient situés entre Porrentruy et Courtemaîche; délimitation optimale des bassins versants d'alimentation des sources;
- évaluation des ressources potentiellement exploitables des systèmes karstiques et alluviaux étudiés;
- évaluation de la pollution des eaux de surface et des eaux souterraines; appréciation de l'effet des assainissements réalisés;
- importance de l'autoépuration des matières organiques biodégradables dans les circulations karstiques;

- meilleure connaissance du comportement des micropolluants dans les eaux souterraines, évaluation des assainissements potentiels.

La réponse à ces questions doit permettre de fournir les outils indispensables aux pouvoirs publics pour prendre les décisions qui s'imposent pour une gestion optimale des eaux et des déchets en Ajoie et, par analogie, à d'autres régions karstiques. Un rapport final a clos cette étude en 1993.

### **2.2.2 Thèmes développés dans la thèse**

Dans le cadre de cette thèse, nous avons choisi de présenter trois thèmes importants tirés des cinq buts énumérés au paragraphe précédant.

1. La connaissance du fonctionnement des principaux aquifères karstiques et alluviaux, ainsi que d'éventuelles relations entre eux et/ou avec un cours d'eau
2. Gestion des eaux du point de vue des ressources utilisable pour l'alimentation en eau potable
3. Gestion des eaux du point de vue de leur qualité, en particulier des pollutions dont l'origine est:
  - le rejet, sans traitement, des eaux usées dans un cours d'eau ou dans le karst
  - les décharges en tout genre
  - l'agriculture (herbicides, pesticides, engrais)

## **2.3 Moyens utilisés**

La thèse s'articule sur trois axes principaux:

- 1) délimitation du bassin versant des exutoires connus (synthèse hydrogéologique antérieure complétée par des essais de traçage);
- 2) Ressources des différents aquifères, aspect quantitatif des mesures (bilans)
- 3) Fonctionnement des aquifères, aspect qualitatif des mesures (interprétation du type de réponse)

L'acquisition systématique de données sur les entrées (précipitations, température) et les sorties (exutoires) des systèmes d'écoulement permet de répondre aux aspects quantitatif et qualitatif des points 2 et 3.

A cet effet, un important réseau d'observation hydrométéorologique a été mis en place sur toute la région, grâce à une collaboration étroite avec tous les intervenants de l'étude d'impact sur les eaux souterraines N16. Ce réseau comporte notamment 11 pluviographes, 10 limnigraphes sur l'Allaine ainsi que 7 enregistreurs automatiques dans les principales sources karstiques et 8 dans les différents puits exploitant les aquifères alluviaux.

Ces acquiesseurs de données, de type Madd, enregistrent:

- pour les précipitations chaque événement de 2/10 mm;
- pour les eaux souterraines le niveau, la température et la conductivité à une fréquence de 4 mesures par heure;
- pour les cours d'eau, la même fréquence de mesure a été utilisée pour enregistrer le niveau; sur deux sites la température et la conductivité ont été mesurées en plus du niveau.

Ces mesures faites en continu complètent les analyses chimiques effectuées sur les sources, les aquifères alluviaux (puits et piézomètres) et les cours d'eau. Les analyses chimiques sont généralement réalisées mensuellement, à l'exception de deux sources échantillonnées avec une fréquence hebdomadaire pendant une année (Beuchire et Domont)

## 2.4 Note technique

La conductivité est mesurée à 20°C dans les bureaux d'ingénieurs et au CHYN (alors que dans les laboratoires cantonaux elle est mesurée à 25°C!). Nous considérons des écarts de plus de 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  comme significatifs pour comparer les conductivité des différents points d'eau entre eux. L'erreur sur la valeur relative est bien plus faible et des fluctuations de l'ordre de 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  sont significatives. Sur une longue période et après des crues, les dérives des acqui-siteurs de données sont possibles mais difficiles à mettre en évidence. Les appareils servant à la vérification des données Madd (conductivimètres WTW LF91) sont aussi sujets à des imprécisions et dérives, malgré des étalonnages réguliers. Ce n'est pas toujours la même personne qui a effectué les tournées, ni le même appareil qui a été utilisé.

Les mêmes remarques sont aussi valables pour la température: erreur absolue 0.1-0.2°C et erreur relative 0.05°C.

Les mesures de niveau donnent une marge d'erreur d'environ 1 cm. L'imprécision des sondes pression est comparable à celle des mesures manuelles (niveau d'eau sujet aux turbulences).

## 3. PRESENTATION DES THÈMES TRAITES DANS LES PARTIES B, C ET D

### 3.1 Partie B: Cadre géologique, morphologique et hydrologique du bassin versant de l'Allaine à Boncourt, Ajoie.

Dans cette partie nous aborderons la région par une description générale du bassin de l'Allaine à Boncourt, avec situation géographique et tectonique. Située entre le Jura plissé au sud et le Fossé rhénan au nord, l'Ajoie est en grande partie drainée par l'Allaine. Le Gland et la Vendline constituent les deux autres drains.

Le bassin de l'Allaine est subdivisé en trois secteurs, ayant leurs propres caractéristiques, d'amont (Nord) en aval (Sud-Est):

1. écoulements sur le Tertiaire drainant la Baroche et le Jura plissé;
2. apports importants des principales sources (convergence des écoulements sur Porrentruy);
3. écoulements sur les calcaires rauraciens en passant par les principaux aquifères alluviaux.

Un aperçu géologique illustrés par des profils sera donné pour les principales formations ainsi que pour les systèmes étudiés. Les discontinuités géologiques sont caractérisées par deux directions dominantes, NS et EW.

L'apport de la géophysique (électromagnétique et télédétection) dans l'étude de la fissuration n'est pas déterminant, aussi nous avons développé cet aspect dans l'annexe 2.

Les principaux résultats des essais de traçages effectués seront rapidement présentés. Ils ont permis de délimiter le bassin versant de l'Allaine et les principaux bassins karstiques. Les bassins seront ensuite

caractérisés selon des critères géographiques (hypsométrie). En fonction de ces critères, les bassins seront classés d'après leur altitude moyenne: bassins de basse, moyenne et haute altitude.

Un deuxième volet important sera abordé avec l'évaluation des bilans hydrologiques. Au niveau des entrées, la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin de l'Allaine sera approchée à l'aide de plusieurs méthodes, en fonction des stations disponibles pour la période d'observation: 1984-90 pour l'ensemble des débits de l'Allaine et 1989-91 pour les débits des sources étudiées. Nous examinerons aussi la répartition des pluies et des températures sur la région en considérant les effets d'éventuels microclimats. La qualité de la pluie peut avoir un impact sensible sur la qualité des eaux souterraines (micropolluants). L'estimation des pluies efficaces est délicate. L'évapotranspiration sera évaluée selon les méthodes de Turc pour l'évapotranspiration réelle et de Thornthwaite pour l'évapotranspiration potentielle. Les débits de l'Allaine et des principales sources étudiées seront présentés, essentiellement pour la période 1989-1990. Certains débits obtenus posent cependant des problèmes de fiabilité, surtout dans les basses eaux.

Enfin, un essai de synthèse sera réalisé pour vérifier l'équilibre des entrées-sorties des différents systèmes (Allaine, Beuchire).

## **3.2 Partie C: Interprétation et fonctionnement des systèmes étudiés.**

Dans cette partie, nous allons aborder en détail les caractéristiques générales des systèmes karstiques étudiés et en particulier celui de La Beuchire. Les hydrogrammes seront interprétés pour comparer les différentes sources karstiques entre elles et montrer la rapidité de la transmission du signal d'entrée. Les crues de juin 1990 seront prises comme exemple. L'étude du tarissement permettra une évaluation des réserves écoulables dans le système de La Beuchire.

Nous passerons en revue les différents éléments qui vont marquer le chimisme des principales sources karstiques et en particulier les problèmes d'infiltrations de polluants par les égouts, les décharges et l'agriculture. Nous essaierons de voir si ces problèmes touchent davantage un système que les autres. Nous nous tournerons ensuite vers les paramètres physiques enregistrés en continu pour développer notre interprétation des écoulements. L'analyse des fluctuations saisonnières et "événementielles" de la température et de la conductivité permettra de reconnaître les différentes influences extérieures (signaux d'entrée) et leur atténuation.

Au chapitre 2, nous examinerons les particularités des systèmes karstiques en relation avec un cours d'eau permanent, de quelle manière les signaux de sortie étudiés dans le premier chapitre sont modifiés par un signal d'entrée supplémentaire. A cet effet, nous passerons d'abord en revue les essais de traçage significatifs pour les systèmes du Betteraz et de La Fontaine. Les débits spécifiques et les débits classés nous permettront de mettre en évidence l'ampleur de l'influence de l'Allaine sur les exutoires de ces systèmes. Cette influence se révèle également sur les paramètres physiques et nous pourrons ainsi notamment expliquer les variations rapides de la température de l'eau de ces sources.

Au chapitre 3, nous étudierons les relations complexes entre les systèmes alluviaux de La Basse-Allaine, la rivière et les systèmes karstiques adjacents. Une rapide caractérisation des systèmes alluviaux nous montrera leurs similitudes. L'analyse de chaque système (en particulier ceux du Pont d'Able (Porrentruy) et de Courtemaîche permettra de considérer un mode de fonctionnement très différent d'un système à l'autre, grâce à certains paramètres chimiques, notamment des polluants, ainsi qu'aux enregistrements en continu des paramètres physiques dans les puits exploités des nappes alluviales. Une rapide évaluation des ressources précédera une petite synthèse des systèmes alluviaux et de leurs apports extérieurs.

Au chapitre 4 seront résumés les principaux résultats obtenus sur les systèmes karstiques essentiellement. Une comparaison des différents systèmes sera donnée. Une analyse fréquentielle des conductivités complétera cette comparaison, notamment entre les deux systèmes du Betteraz et de La Beuchire. Nous tenterons ensuite une interprétation générale des essais de traçage, sur la base de ceux effectués dans les conditions les moins perturbées.

Le bouquet final de la thèse prend place au chapitre 5. La carte nous paraît suffisamment parlante pour ne pas gonfler ce chapitre par de longues explications. Nous nous contenterons de situer l'élaboration de la **carte hydrogéologique de l'Ajoie au 1:25'000** dans le contexte de l'évolution des cartes entre passé et futur. Nous nous attarderons un peu sur nos intentions et la manière dont a été construite la carte, **avec sa base de données** (chap. 5, vol 2). De quelle manière, cette synthèse s'est imposée à nous comme le meilleur moyen de communiquer nos résultats à nos successeurs dans des études de portée peut-être plus limitée dans l'espace. Nous en relèverons également les applications les plus pratiques pour les collectivités, notamment avec les éléments utiles à la gestion des eaux que la carte et la notice contiennent (**volume 2 de la thèse**).

### 3.3 Partie D: Conclusions et perspectives

Cette dernière partie comportera une synthèse générale des principaux résultats de ce travail, d'une part avec les différents aspects des signaux d'entrée dans les systèmes karstiques et d'autre part avec les réponses observées dans les principaux exutoires. Après cela, nous ferons une évaluation du déroulement de l'étude, des problèmes rencontrés et des améliorations qui auraient pu être apportées. Nous terminerons enfin par quelques mots sur les perspectives qu'ouvrent l'étude et la protection des eaux souterraines karstiques.

# **PARTIE B:**

## **CADRE GEOLOGIQUE, MORPHOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'ALLAINE A BONCOURT, AJOIE.**

*Page*

|           |                                                                                            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>19</b> | <b>1. CADRE MORPHOLOGIQUE ET GEOLOGIQUE</b>                                                |
| 19        | 1.1 Géographie et réseau hydrographique                                                    |
| 19        | 1.1.1 Situation générale                                                                   |
| 21        | 1.1.2 Réseau hydrographique                                                                |
| 24        | 1.2 Géologie                                                                               |
| 24        | 1.2.1 Aspect structural                                                                    |
| 25        | 1.2.2 Principales formations hydrogéologiques                                              |
| 27        | 1.3 Discontinuités géologiques: apport de la géophysique                                   |
| 27        | 1.3.1 Introduction                                                                         |
| 29        | 1.3.2 Fissures métriques                                                                   |
| 29        | 1.3.3 Failles et accidents majeurs                                                         |
| <br>      |                                                                                            |
| <b>31</b> | <b>2. DELIMITATION DU BASSIN VERSANT DE L'ALLAINE A BONCOURT</b>                           |
| 31        | 2.1 Critères de délimitation                                                               |
| 31        | 2.2 Les essais de traçages                                                                 |
| 31        | 2.2.1 Types d'interprétation possible des essais                                           |
| 31        | 2.2.2 Inventaire des essais                                                                |
| 32        | 2.2.3 Appréciation des différents traceurs                                                 |
| 32        | 2.2.4 Principaux résultats des essais effectués en Ajoie                                   |
| 33        | 2.3 Géologie des principaux exutoires                                                      |
| 35        | 2.4 Description des limites du bassin de l'Allaine                                         |
| 35        | 2.4.1 Bassin versant de l'Allaine                                                          |
| 36        | 2.4.2 Bassins versant des principales sources karstiques                                   |
| 37        | 2.4.3 Caractérisation du bassin de l'Allaine et de ses principaux sous-bassins karstiques. |
| 38        | 2.5 Hypsométrie                                                                            |

|    |                                                 |
|----|-------------------------------------------------|
| 41 | <b>3. BILANS HYDROLOGIQUES</b>                  |
| 41 | 3.1 Entrées                                     |
| 41 | 3.1.1 Stations météorologiques                  |
| 42 | 3.1.2 Précipitations                            |
| 48 | 3.1.3 Pluies efficaces                          |
| 49 | 3.1.4 Qualité des apports atmosphériques        |
| 53 | 3.2 Sorties                                     |
| 53 | 3.2.1 Débits de l'Allaine à Boncourt            |
| 56 | 3.2.2 Débits des principales sources karstiques |
| 61 | 3.3 Synthèse                                    |
| 61 | 3.3.1 Bassin versant de l'Allaine à Boncourt    |
| 63 | 3.3.2 Sources karstiques                        |

# **PARTIE B**

## **CADRE GEOLOGIQUE, MORPHOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'ALLAINE A BONCOURT, AJOIE**

### **1. CADRE MORPHOLOGIQUE ET GEOLOGIQUE**

#### **1.1 Géographie et réseau hydrographique**

##### 1.1.1 Situation générale

Située au NW de la Suisse, l'Ajoie appartient au district de Porrentruy dans le canton du Jura (fig. B.1). Elle est principalement drainée par un cours d'eau, l'Allaine, d'une longueur de 29.35 km de sa source à la frontière franco-suisse de Delle - Boncourt. L'Allaine appartient au bassin du Rhône. La source de L'Allaine est située en-dessus de Charmoille (extrémité orientale de l'Ajoie), à quelques centaines de mètres de la ligne de partage des eaux avec le bassin du Rhin. Dans cette étude, nous nous intéresserons au bassin hydrogéologique de l'Allaine (s.str.) jusqu'à la station limnigraphique du SHGN de Boncourt; ce bassin possède une aire d'alimentation de 182 km<sup>2</sup>. Au-delà de la frontière, l'Allaine va se jeter dans le Doubs à Montbéliard, après avoir pris le nom d'Allan entre Delle et Montbéliard (fig. B.1 et B.3).

Les systèmes d'écoulement appartenant au bassin versant hydrogéologique de l'Allaine se sont développés dans la série des calcaires du Malm, limitée à la base par un **aquiclude régional, les marnes de l'Oxfordien** et, plus bas, dans les calcaires aquifères du Dogger.

Le bassin de l'Allaine est situé sur deux domaines très différents: le Jura plissé (partie septentrionale) et le Jura tabulaire d'Ajoie.

a) L'anticlinal du Mont-Terri forme la dernière chaîne du Jura plissé. Ses structures sont caractérisées par un découpage morphologique important: le Doubs a en effet entaillé profondément cette chaîne d'Est en Ouest, lors du rehaussement général du secteur plissé (Bailly, 1979).

b) Le domaine subtabulaire de l'Ajoie est également entaillé par deux rivières importantes: le Gland (à l'Ouest) et l'Allaine, ainsi que deux cours d'eau secondaires: la Coeuvalte et la Vendline, dans la partie orientale. Une importante vallée sèche, de direction Ouest-Est relie, à l'ouest de Porrentruy, les vallées du Gland et de l'Allaine. Plus au nord, une autre vallée sèche de direction SSW-NNE, la Grande Vallée, entaille le plateau de Bure entre Bure et Buix.

Les vallées principales, à fond plat, sont larges (200 à 500 m en moyenne). La différence d'altitude entre le fond et les plateaux est faible, de l'ordre de 60 à 150 m.

Le relief ajolot est relativement émoissé, avec une morphologie karstique prépondérante. La région est riche en vallées sèches, bassins fermés (Bure, Fahy, Réclère), ainsi qu'en dolines et en gouffres (aven). Des seuils se sont mis en place à la confluence des combes latérales et de la vallée principale (Rocourt, Chevenez, Mavalau). L'écoulement souterrain a pris une place dominante en Haute-Ajoie et sur le plateau de Bure - Fahy (réseau spéléologique parcouru par des rivières souterraines).

- PARTIE B: Cadre géologique, morphologique et hydrologique du bassin versant de l'Allaine -

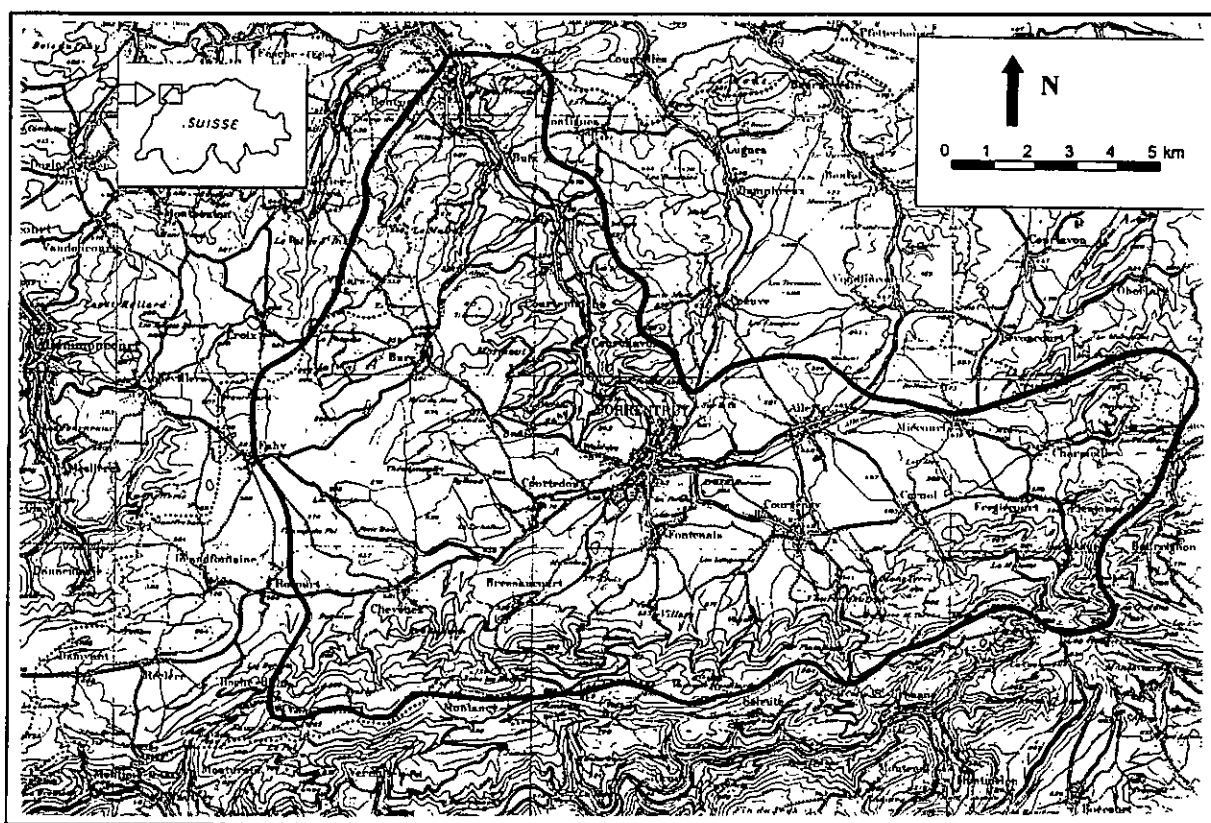


Figure B.1

Situation géographique de l'Ajoie et délimitation du bassin versant de l'Allaine

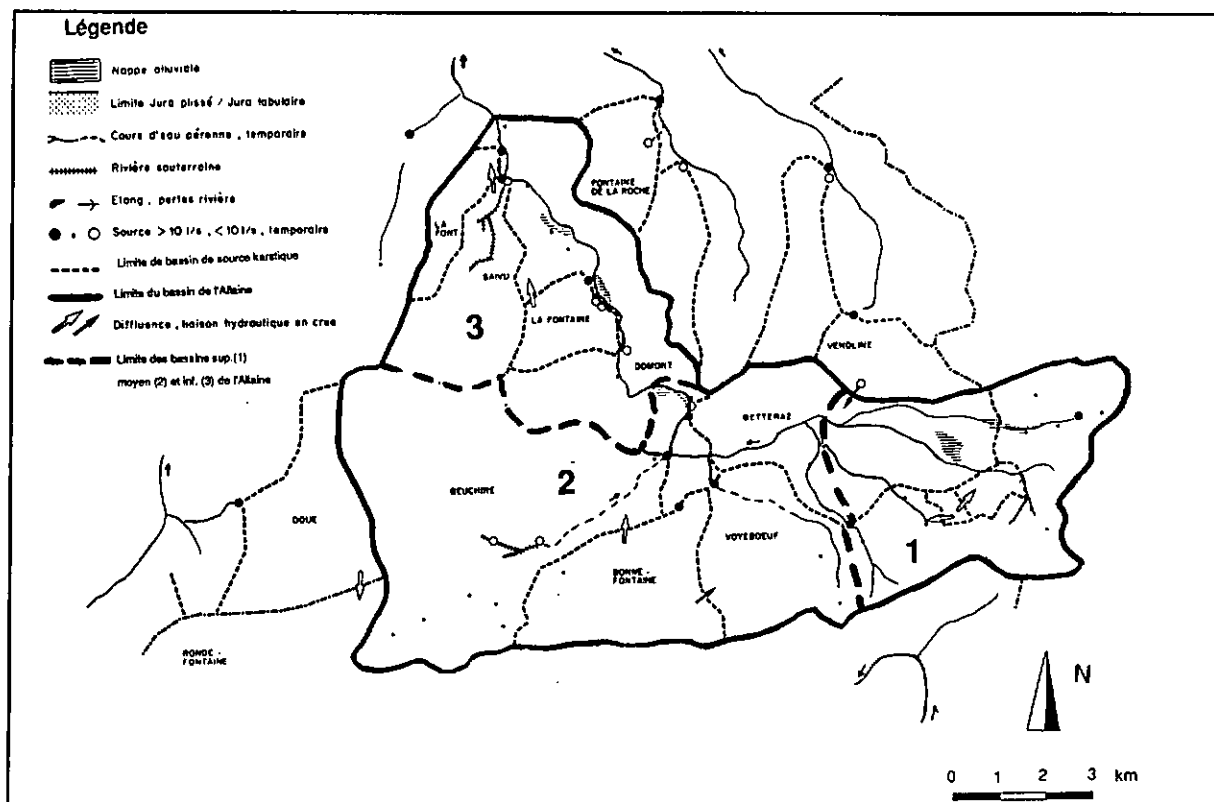


Figure B.2

Situation du bassin versant supérieur, moyen et inférieur de l'Allaine

L'Ajoie est restée à l'abri des glaciations. Aucune trace de passage d'un glacier allochtone n'a été décelée sur l'ensemble de la région. Seules quelques indices, déjà relevés par Lièvre (1940), sont visibles dans la cluse reliant Réclère à Rocourt (stries), indiquant probablement la présence d'un petit glacier local issu de la chaîne du Lomont. Cette chaîne est la succession occidentale de la chaîne du Mont-Terri.

### 1.1.2 Réseau hydrographique

L'Allaine traverse le bassin d'est en ouest de Charmoille à Porrentruy avant de prendre une direction générale NW-SE entre Porrentruy et Boncourt (fig. B.2 et B.3). Elle peut être divisée en trois secteurs (fig. B.2) assez bien caractérisés:

- 1. Le secteur supérieur, en amont de Alle (7.5 km), draine la Baroche et le versant nord du Mont-Terri (Jura plissé), soit près du quart du bassin versant; écoulements sur le Tertiaire; forte densité de drainage superficiel;*
- 2. Le secteur médian Alle - Porrentruy (9 km) voit la convergence des écoulements venant de l'Est (Betteraz), du Sud (Voyeboeuf) et de l'Ouest (Bonne-Fontaine et Beuchire), représentant la moitié du bassin versant; écoulement de l'Allaine sur les calcaires du Kimméridgien (Malm sup.); faible densité de drainage superficiel;*
- 3. Le secteur inférieur (13 km), de Porrentruy à Boncourt, draine le dernier quart du bassin versant de l'Allaine; écoulements sur les calcaires rauraciens (Basse-Allaine, Milandre) et traversée des principaux aquifères alluviaux; faible densité de drainage superficiel.*

#### 1. Secteur supérieur (amont de Alle)

La rivière traverse la partie basse d'un relief peu marqué où le réseau hydrographique est bien développé, essentiellement sur un soubassement tertiaire de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Dans la partie haute (versant nord de l'anticlinal du Mont-Terri), le relief est plus important et l'érosion y a atteint le Keuper.

##### **Source de l'Allaine**

La source de l'Allaine (585.0/282.8) se situe à la limite orientale du Jura tabulaire, entre la chaîne du Mont-Terri et le Jura de Ferrette, dans la continuité de l'accident de la Caquerelle (Laubscher, 1966). Un certain nombre d'autres sources, dont celles de l'Ante et de Nods, jaillissent dans la même région, en amont de Charmoille, à la faveur des failles subméridiennes ou au contact des calcaires rauraciens avec les dépôts tertiaires du Pliocène (Vogesenschotter et Vogesensand) et de l'Oligocène (Molasse alsacienne).

L'Allaine va donc s'écouler jusqu'à Alle sur un soubassement tertiaire. Sur son tracé, elle reçoit plusieurs affluents issus du Jura plissé, au Sud.

##### **Ruisseau de Fréglécourt ou Erveratte**

Parmi les affluents de l'Allaine, le ruisseau de Fréglécourt possède le débit le plus important, du même ordre de grandeur que celui de l'Allaine. Ce ruisseau draine essentiellement les sources d'Asuel (cœur du Jura plissé avec des aquifères du Dogger et un niveau de base dans le Lias), de Fréglécourt et de la Valletaine (aquifères du Dogger et du Malm en communication). Ces deux dernières sources sont situées en bordure du bassin tertiaire, circonscrit par les villages de Charmoille, Fréglécourt, Cornol, Courgenay, Alle, Miécourt et Charmoille (env. 14 km<sup>2</sup>). Ce soubassement tertiaire atteint probablement 100-200 m d'épaisseur (d'après Parriaux, 1973 et Müller, 1990).

### ***Ruisseau de Cornol ou Cornoline***

Le ruisseau de Cornol rejoint l'Allaine dans le village d'Alle. Il draine une grande part des eaux de Cornol, issues de l'anticlinal du Mont-Terri. L'érosion y a atteint le Trias (Keuper) au sud du village. Cette zone a retenu l'attention de nos prédécesseurs pour ses schistes bitumineux du Lias (Lièvre, 1946) et son gypse. Les sources de Cornol sont nombreuses, mais possèdent de faibles débits. Le chimisme très variable est dû à la présence de niveaux évaporitiques.

### ***Ruisseau du Jonc***

Le ruisseau du Jonc draine également une zone importante de l'anticlinal du Mont-Terri qui est érodé jusqu'au Keuper (Derrière Mont-Terri). Le ruisseau s'écoule sur les calcaires du Dogger puis du Malm recouvert de dépôts tertiaires peu importants, disparaissant à l'est de Courgenay. Ainsi, le ruisseau connaît des pertes très importantes par endroits, entre Paplemont et Courgenay, puis de Courgenay à Alle, où il se jette dans l'Allaine.

Ces affluents de l'Allaine ont formé d'importants cônes de déjection au débouché des combes dans la plaine de Cornol - Courgenay.

## **2. Secteur médian (Alle-Porrentruy)**

Cette zone se caractérise par l'apparition d'un relief un peu plus marqué, déterminé par l'Allaine sur le versant nord de l'anticlinal de la Perche et par les cluses du Voyeboeuf et de Fontenais traversant ce même anticlinal. Un grand nombre de dolines actives et de vallées sèches parsèment cette zone, tant au nord qu'au sud de l'Allaine.

### ***Pertes de l'Allaine***

En aval d'Alle, l'Allaine s'écoule sur les calcaires de la partie supérieure du Malm (Kimméridgien sup.). Des pertes importantes, parfois totales (septembre 1991), ont été observées sur ce tronçon, essentiellement à la hauteur de la Combe Vaumacon (faille N-S).

### ***Convergence des écoulements à Porrentruy***

Porrentruy est un site privilégié dans les écoulements souterrains de l'Ajoie. Sur quelques km<sup>2</sup> seulement, nous observons une convergence de ces écoulements par la présence de plusieurs sources karstiques importantes (fig. B.3): Le Voyeboeuf, La Bonne-Fontaine, La Beuchire, Le Betteraz et Le Pâquis. Plusieurs de ces sources s'écoulent superficiellement avant de se jeter dans l'Allaine. Il s'agit de:

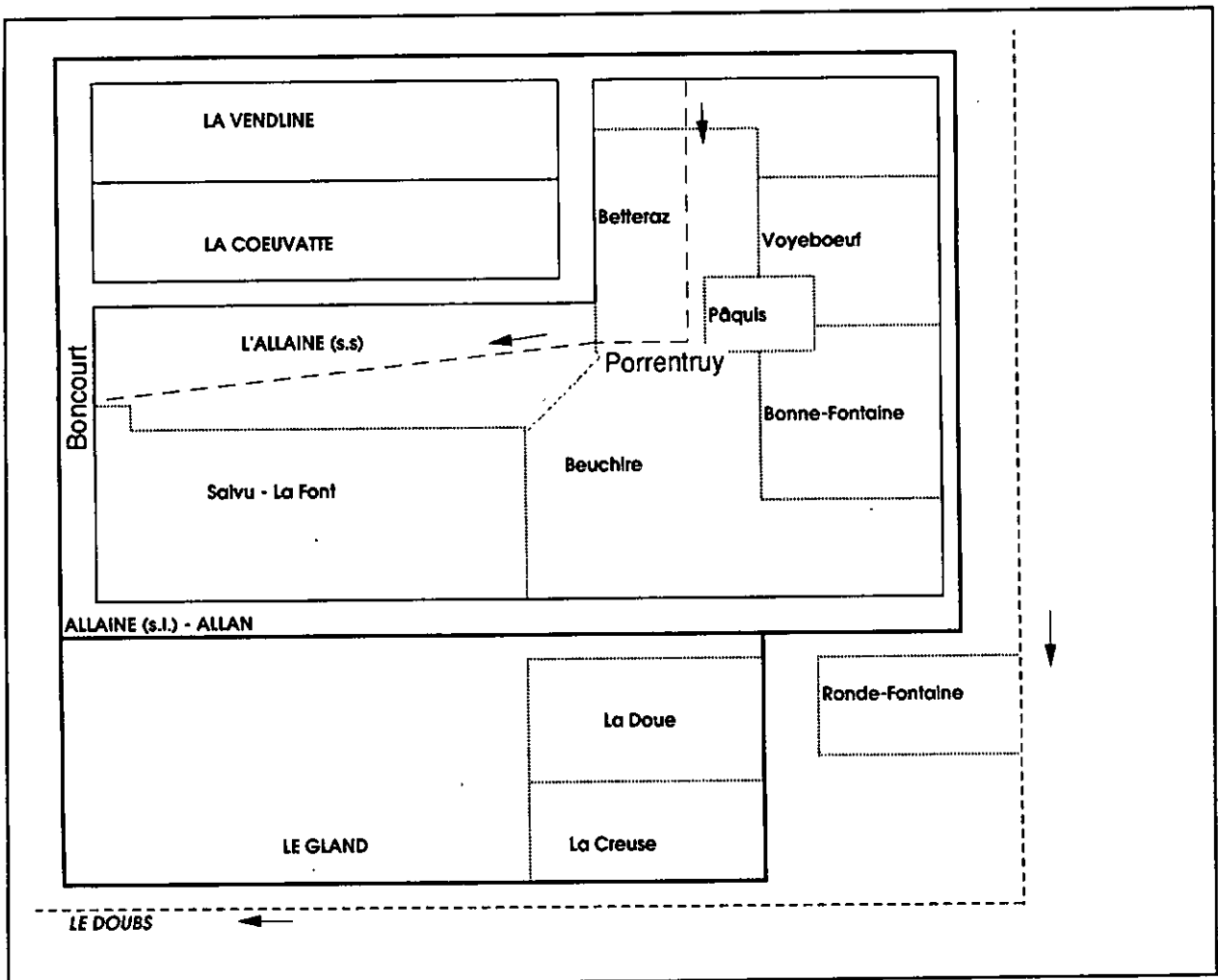
#### ***Le Voyeboeuf***

Le Voyeboeuf draine une zone mixte Jura plissé Jura tabulaire, entre Courgenay ouest et Fontenais est. Des cours d'eau superficiels (pérennes et temporaires) s'écoulent le long de combes transversales, de direction S-N environ et se perdent avant d'atteindre Courgenay (Le Pichou) ou le pied du versant. Un ruisseau venant de Courgenay s'écoule temporairement en amont de la source, mais se perd également, sauf lors des crues. Certaines vallées sèches ont une morphologie particulière, en terrasses ("minicuestas" de la Combe Vatelin, cf. Masserey et al., 1990).

#### ***La Bonne-Fontaine***

La Bonne-Fontaine draine la plus grande partie de ses eaux dans le Jura plissé (au sud). Cette zone d'alimentation est adjacente à celle du Voyeboeuf, située à l'Est. La source donne naissance au ruisseau du Bacavoine qui se jette dans l'Allaine au centre de Porrentruy.

Les autres sources rejoignent l'Allaine à quelques dizaines de mètres de leur exutoire: *Le Betteraz*, *La Beuchire*, *Le Pâquis*. Pour La Beuchire, un cours d'eau s'écoule temporairement sur 4.4 km, lorsque Le



**Figure B.3**

*Schéma des principaux affluents de L'Allaine et de leurs bassins versants, par rapport au Doubs.*

Creugenat, son exutoire de crue, déborde dans la plaine. A l'ouest, la région de Haute-Ajoie ne possède aucun cours d'eau permanent et sa morphologie karstique est prédominante, avec de nombreuses dolines et une rivière souterraine en partie visitable. Le versant nord de La Haute-Ajoie abrite des sources peu importantes, celles de Chevenez, Rocourt et Bressaucourt (alimentation en eau potable). Il est ainsi entaillé profondément par des ruz, surtout dans sa partie supérieure, où se sont formés de magnifiques cirques (Sous-les-Roches, p.ex.). Les ruisseaux pérennes issus de cette région s'infiltrent totalement avant d'atteindre la vallée sèche principale.

### 3. Secteur inférieur (Porrentruy-Boncourt)

#### **Systèmes alluviaux**

A l'aval de Porrentruy, l'Allaine s'écoule sur des calcaires rauraciens jusqu'à Boncourt (fig. B.5). En chemin, elle traverse 4 systèmes alluviaux. Les principales sources karstiques sont concentrées entre Courtemaître et Boncourt: *La Fontaine*, *La Favergeatte*, *Cotai-Hügli*, les *Cotais*, la *Marmitaine*, *Le Saivu* et *La Font*. Ces deux dernières sont des exutoires du réseau de Milandre, parcouru par une rivière souterraine drainant le NW du plateau de Bure. Plusieurs petits bassins fermés (Bure, Fahy), de nombreuses dolines (E de Fahy), parfois de grandes dimensions (Maira - Bure), des gouffres et des vallées sèches caractérisent fort bien ce plateau dépourvu de cours d'eau superficiels.

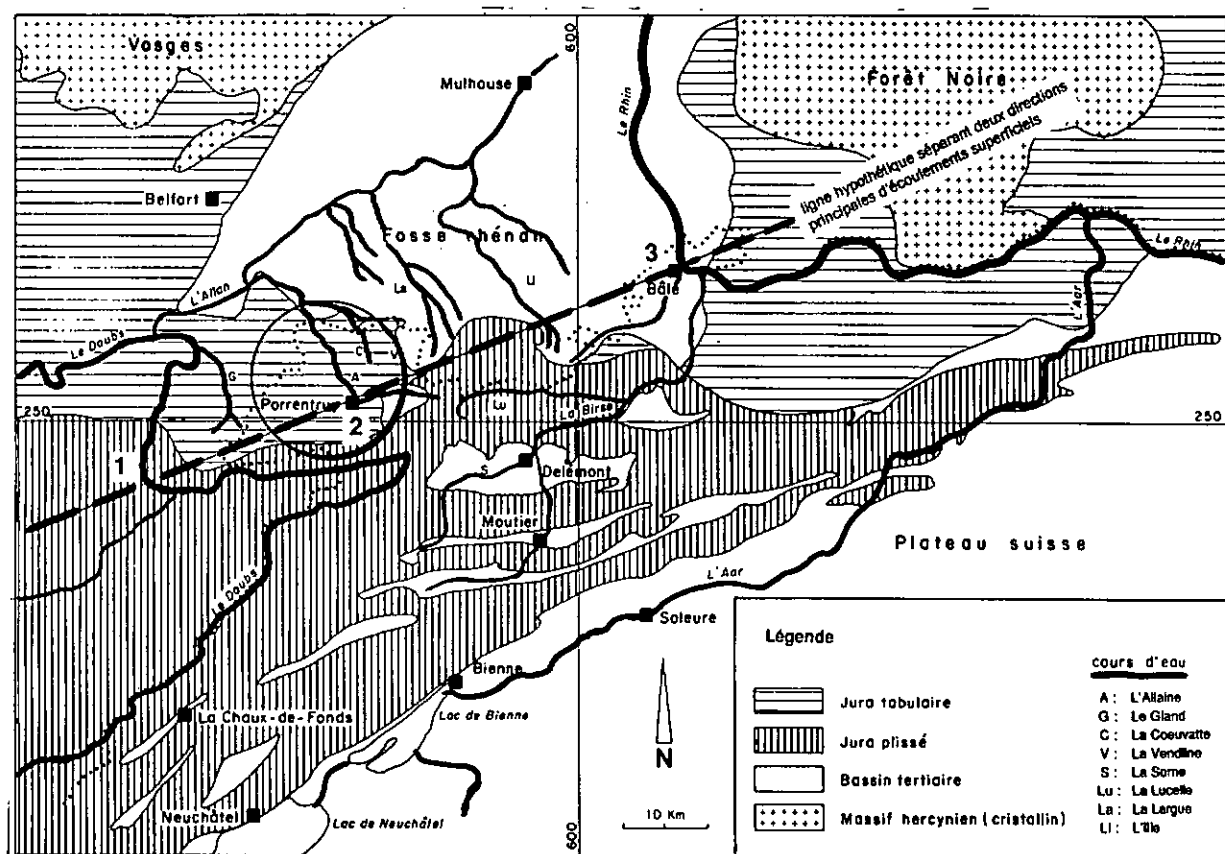


Figure B.4

Situation tectonique du Jura tabulaire d'Ajoie et des principaux cours d'eau régionaux

## 1.2 Géologie

### 1.2.1 Aspect structural

Le Jura tabulaire d'Ajoie se situe entre le Jura plissé au sud et le Fossé Rhénan au nord (fig. B.4). Le plateau d'Ajoie est incliné vers le nord où il s'enfonce sous le recouvrement tertiaire du Golfe de Montbéliard et du Sundgau, prolongation méridionale du Fossé Rhénan. La partie méridionale du plateau est chevauchée par la chaîne du Lomont - Mont-Terri de direction générale EW. A l'est, le Jura tabulaire fait place au Jura de Ferrette (chaîne plissée de direction SW-NE).

L'Ajoie est parcourue par un réseau de failles de directions moyennes NS et ENE-WSW. Les accidents verticaux d'orientation subméridienne (rhénane) prédominent, surtout vers l'ouest. Dans cette zone occidentale comprenant le plateau de Bure, ces failles ont modelé une succession de horsts et de grabens très allongés (horst de Montbouton). Un horst de 16 X 8 km comprend les villages de Fahy, Abbévillers, Bure, Croix, St-Dizier, Montignez et Coeuve.

Quelques plis de faible amplitude se sont développés dans les régions de Porrentruy (anticlinaux du Banné - Cras d'Hermont et du Pont d'Able), de Vendincourt, Bonfol (anticlinal de Réchésy) et de Damvant (anticlinal du Perchet). La carte structurale du toit des marnes oxfordiennes (fig. 13, vol.2) permet de visualiser les grandes structures régionales de l'aquifère karstiques du Malm. Par exemple, ces marnes forment, dans la région de Porrentruy, une cuvette qui trouve son prolongement en direction de Alle.

La convergence des écoulements observée ci-dessus a son origine dans la structure même de l'imperméable régional. Les divers exutoires de Porrentruy sont cependant situés dans la partie supérieure de l'aquifère du Malm. La position de ces sources est donc dictée par le niveau de base régional donné par l'Allaine, à une altitude d'environ 400-440 m. Cette tranche d'altitude correspond également à d'autres sources importantes, situées à l'extérieur du bassin de l'Allaine à Boncourt (fig. B.3): La Vendline et Ledermann (à l'E), Fontaine de la Roche (au N), Ronde Fontaine (au SW), La Creuse et La Doue (à l'W). Toutes ces sources dépendent du Doubs, qui donne le niveau de base principal, à partir duquel les affluents établissent leur profil d'équilibre.

Au nord de Porrentruy, la zone comprise entre Bure et Coeuve (avec la Basse-Allaine) constitue la partie haute de des marnes oxfordiennes (horst).

Les calcaires rauraciens forment un aquifère karstique peu épais, sur lequel se trouve chacun des aquifères alluviaux jalonnant la vallée de la Basse-Allaine. La remontée des marnes oxfordiennes en aval de Porrentruy explique la faible épaisseur de l'aquifère karstique, surtout entre Courtemaîche et Buix (forage profond, cf. Schmidt et al., 1924). Le niveau de base des écoulements souterrains du bassin de l'Allaine apparaît à Porrentruy, pour se poursuivre le long de la Basse-Allaine.

## 1.2.2 Principales formations hydrogéologiques

### **Formations quaternaires**

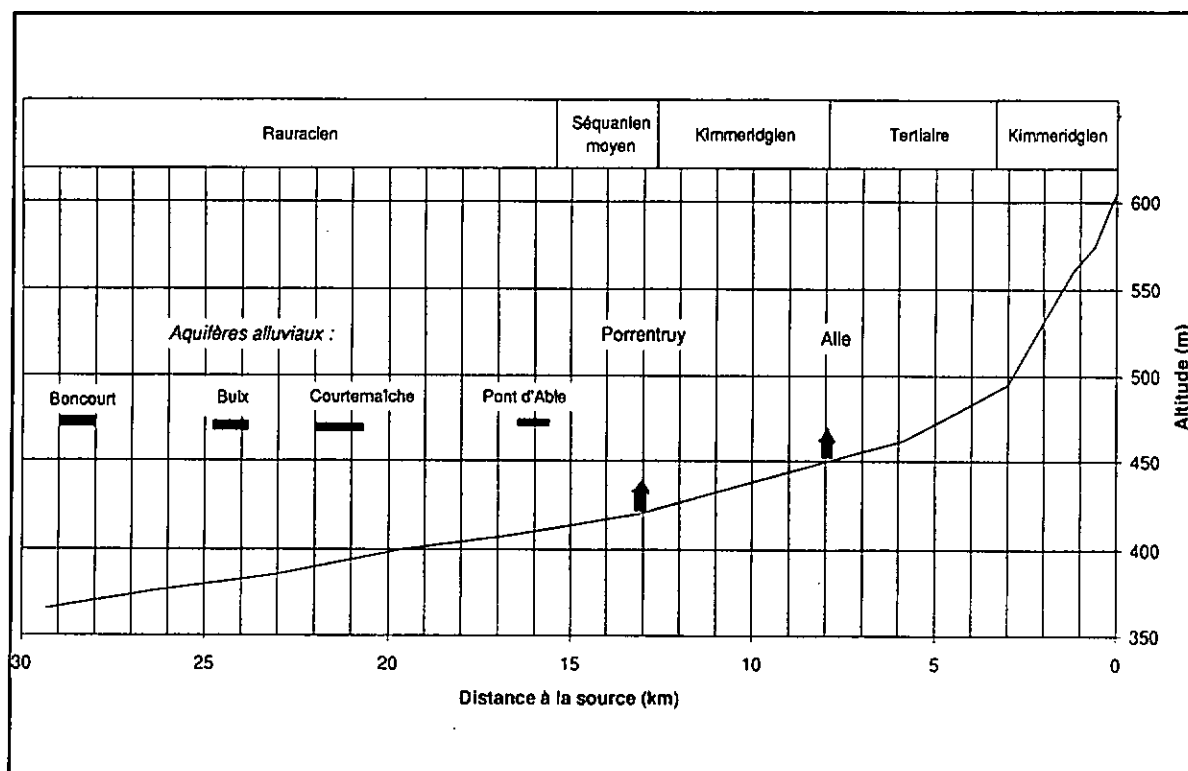
Les dépôts alluviaux du Quaternaire constituent de relativement bons aquifères le long de l'Allaine, essentiellement entre Porrentruy et Boncourt (fig. B.5). Les quatre aquifères alluviaux qui jalonnent la Basse-Allaine sont vitaux pour l'alimentation en eau d'une quinzaine de communes ajolotes. Dix d'entre elles (en Haute Ajoie surtout) sont groupées en syndicat: le SEHA (Gunziger, 1953). Ce dernier exploite la nappe alluviale de Courtemaîche avec trois puits à drains horizontaux. Les communes de Boncourt (2 puits; Schindler, 1977a et 1984c), Buix (1 puits; OEHE, 1978) et Courtemaîche (1 puits; Lévy, 1934) utilisent leur propre nappe alluviale. Les communes de Porrentruy et Courgenay gardent en réserve celle du Pont d'Able (3 puits; CSD, 1973a). Cette dernière n'est plus exploitée depuis la mise en service, en été 1992, de la station de traitement utilisant la source du Betteraz comme unique apport. Au cours de chaque été, l'exploitation des nappes de Courtemaîche et de Boncourt dépasse leur capacité naturelle d'alimentation et les installations provisoires d'alimentation artificielle sont mises en marche.

Les dépôts alluviaux sont généralement graveleux, avec une proportion parfois importante de limons. D'épaisseur parfois très variable mais relativement faible en moyenne, ces dépôts sont peu étendus et reposent directement sur les calcaires rauraciens saturés. Ils sont recouverts de dépôts limoneux peu perméables d'environ 0.5 à 2 m.

A l'ouest de Porrentruy, l'épaisseur des dépôts quaternaires est plus importante (jusqu'à 20 m), leur substratum est également calcaire (Kimmeridgien inf.-Séquanien sup.), mais ils sont situés dans la partie supérieure de la zone de battement de l'eau souterraine. Ils sont donc la plupart du temps dénoyés.

### **Formations tertiaires**

Les dépôts tertiaires d'Ajoie sont généralement de perméabilité très faible. Seuls les niveaux des conglomérats de Porrentruy et de la gompholite d'Ajoie, bien consolidés, auraient une perméabilité de fissure qui resterait faible (peu d'observations). Ces dépôts, situés entre Courgenay et Charmoille constituent un aquiclude puissant. A Alle, des sondages électromagnétiques ont détecté plus de 80 à 100 mètres de terrains très conducteurs, voir jusqu'à 200 m (Parriaux, 1973). Ceux-ci sont surmontés de dépôts alluviaux peu épais (3-5 m), peu perméables (limons et argiles graveleux) et difficilement exploitables du point de vue des ressources en eau (Schindler, 1974). Cependant, il s'y est développé un réseau de drainage naturel et artificiel, dans la tranche d'altération. Seuls quelques sillons, plaquages ou poches sablo-limoneux présentent quelque intérêt du point de vue perméabilité ( $10^{-6}$  à  $10^{-8}$  m/s d'après Müller, 1989).



**Figure B.5**

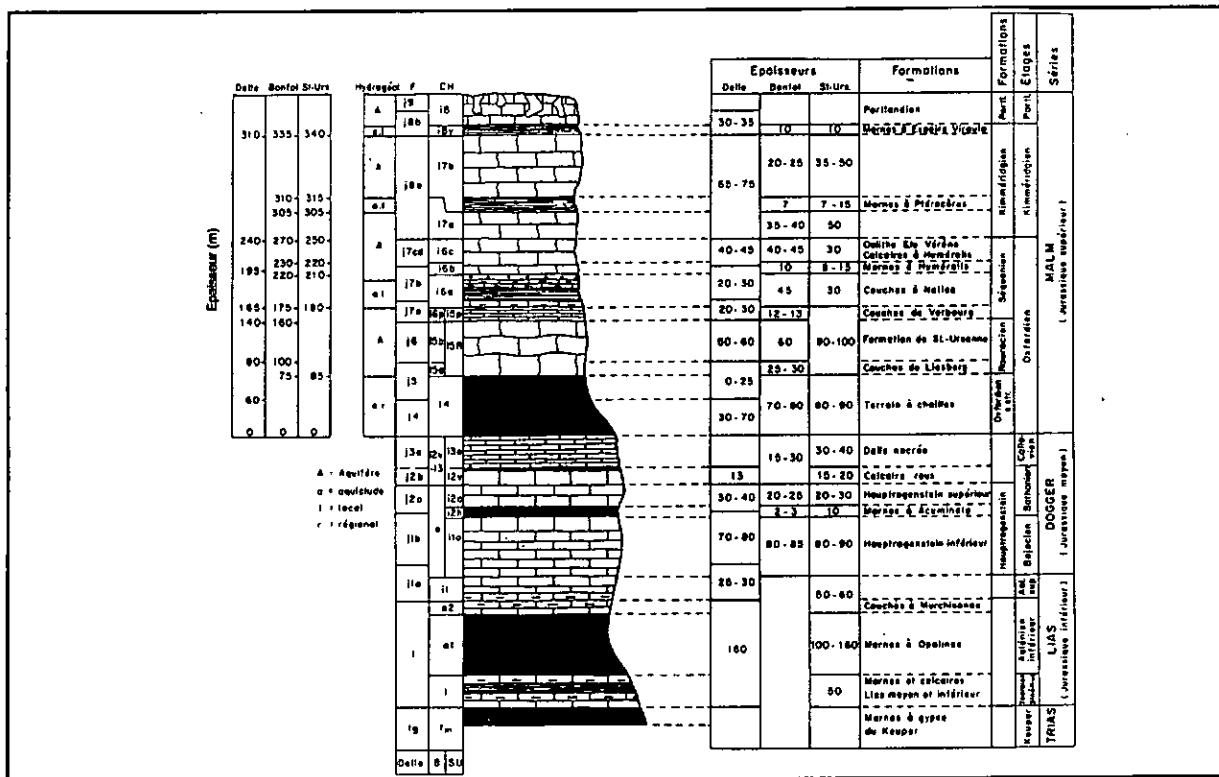
*Profil en long de l'Allaine avec le substratum géologique et la position des aquifères alluviaux*

### **Formations du Malm et du Dogger**

Dans son ensemble, le **Malm** peut être considéré comme un **aquifère multicouche**, avec des intercalations de niveaux semi-perméables ou aquitards (fig. B.6). Il repose sur le substratum des marnes de l'Oxfordien (aquiclude régional). Le Dogger constitue l'aquifère situé au-dessous de cet aquiclude et à ce titre devrait être considéré comme indépendant. Ces deux aquifères peuvent cependant communiquer entre eux dans des zones fortement tectonisées (chevauchements, failles à rejet vertical important). Cette situation est due au contact Jura plissé-Jura tabulaire (profils de la figure B.7).

Les bassins hydrogéologiques de la Beuchire, de la Bonne-Fontaine et du Voyeboeuf comprennent ainsi des systèmes d'écoulement situés dans le Malm et le Dogger. Les eaux souterraines s'écoulent à travers des aquifères très différents, situés entre le Hauptrogenstein (Dogger) et le Portlandien (Malm). Les trois bassins sus-nommés possèdent en outre des niveaux tertiaires (Oligocène) de faible extension (conglomérat de Porrentruy pour la Beuchire ainsi que la gompholite d'Ajoie pour la Bonne-Fontaine et Molasse alsacienne pour le Voyeboeuf). Les eaux s'infiltrent cependant dans les calcaires du Kimmeridgien supérieur sur une partie importante du bassin de la Beuchire, plus faible pour la Bonne-Fontaine et le Voyeboeuf (Kimmeridgien inf. et Séquanien sup. essentiellement).

Les autres systèmes étudiés n'appartiennent qu'au Jura tabulaire. Ils se développent essentiellement dans le Malm. L'influence du Portlandien est la plus grande pour le bassin hydrogéologique du Betteraz, il couvre près de la moitié de sa surface. Les calcaires du Séquanien constituent pour les bassins du Saivu et de La Font une zone d'infiltration bien plus importante que pour celui de La Fontaine. Sur l'ensemble du bassin de l'Allaine, l'aquifère du Malm atteint sa puissance minimale dans la région de Buix, où les marnes de l'Oxfordien ont été trouvée sous une faible couverture, au nord du village.



**Figure B.6**  
Log stratigraphique de l'Ajoie basé sur les cartes géologiques suisses (Bonfol et St-Ursanne) et française (Delle). Essai de synthèse.

### 1.3 Discontinuités géologiques: apport de la géophysique

### 1.3.1 Introduction

**L'étude des discontinuités est abordée à deux niveaux:**

1. fissures métriques;
2. failles ou décrochements kilométriques;

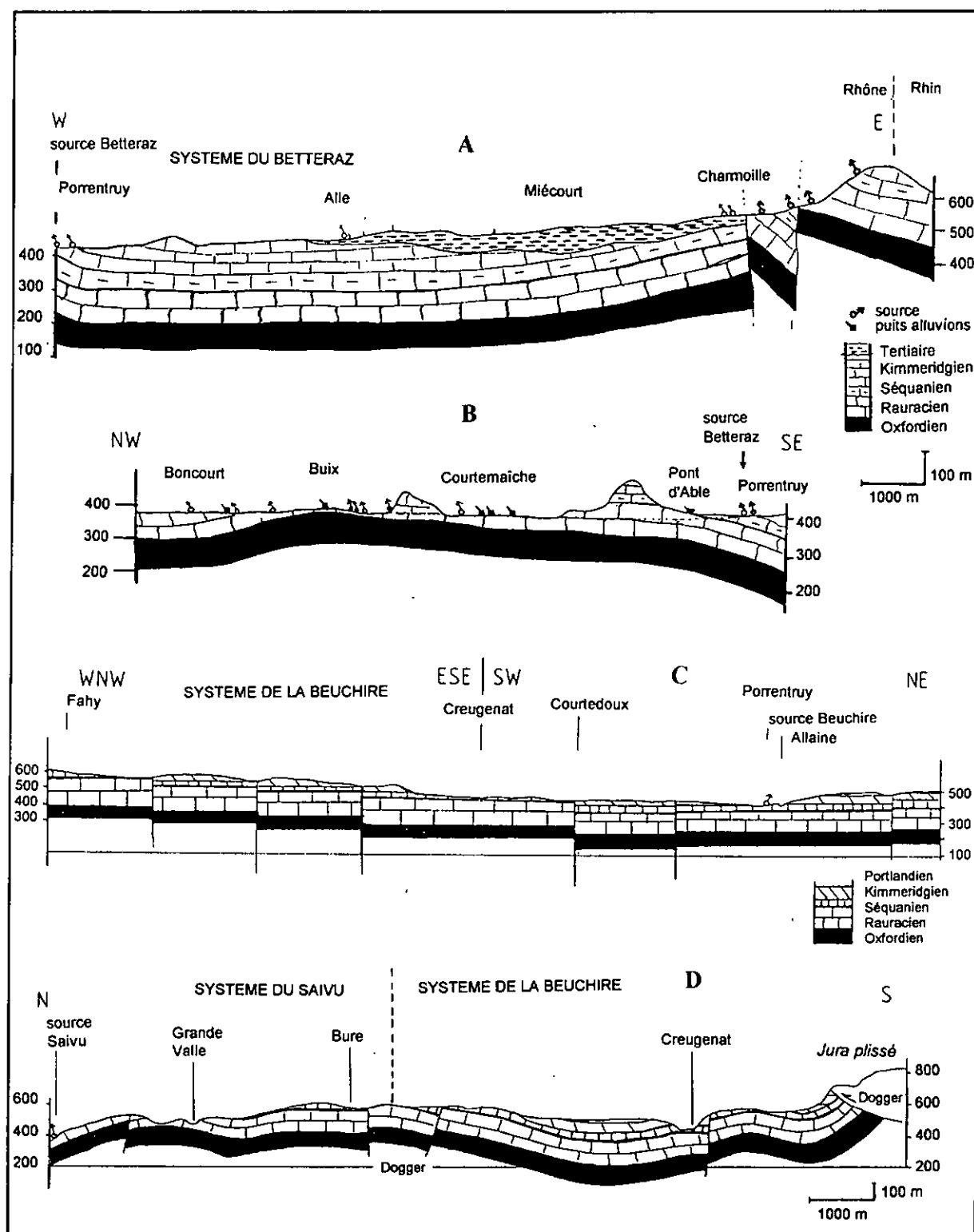
Relevons cependant que les discontinuités d'ordre de grandeur différents coexistent dans le terrain depuis les fissures métriques jusqu'aux failles hectométriques ou kilométriques. L'approche que nous avons choisie s'est faite sur deux plans différents.

1. A l'échelle métrique, il s'agit de mesurer systématiquement toutes les discontinuités observées, selon une méthode normalisée par Kiraly (1969). Deux sites ont été retenus:

- site principal sur le plateau de Bure, près du Maira (Király, 1971);
- site secondaire à proximité de Porrentruy (camp de terrain du CHYN, 1990).

2. A l'échelle kilométrique, on repère les accidents majeurs à partir des cartes géologiques ou topographiques et de photos aériennes. Les failles ont été recensées, de même que les vallées (sèches ou parcourues d'un cours d'eau). Au niveau de l'ensemble du bassin de l'Allaine, nous avons effectué une approche par photos satellite, afin de déterminer, si possible, des grandes structures de drainage karstique.

Les méthodes indirectes peuvent être utilisées pour acquérir une image relativement bonne du milieu fissuré karstique. Les méthodes électromagnétiques en particulier sont adaptées aux milieux très



**Figure B.7**

Profils hydrogéologiques schématiques:

- le long de l'Allaine: A) de Charmoille à Porrentruy, B) de Porrentruy à Boncourt (situation en fig.B.2)
- à travers les systèmes de la Beuchire (C) et du Saïvu (D)

hétérogènes et anisotropes comme le karst. L'utilisation du VLF-R (Very low Frequency Resistivity) en milieu fissuré permet la localisation des structures géologiques ainsi que l'anisotropie électromagnétique du sous-sol en chaque point de mesure. En milieu karstique, le degré d'anisotropie électromagnétique est évalué par le degré d'anisotropie électromagnétique et peut être comparé à la fissuration relevée sur affleurement (Gretillat et Müller, 1990).

Ainsi, pour avoir une vue plus régionale de la fissuration, nous avons l'intention d'utiliser très largement ces méthodes. Ce but était par trop ambitieux vu l'étendue du terrain d'étude et les premiers résultats obtenus. La mise en oeuvre et l'interprétation des mesures géophysiques s'est révélée plus délicate que prévu et nécessite des recherches plus approfondies. Le secteur du plateau de Bure a d'ailleurs fait l'objet d'un projet de recherche FN, intitulé "GEOFISS" et effectué par Turberg (1993). Pour notre étude, nous nous sommes limités à quelques secteurs pour résoudre des problèmes locaux, avec la méthode VLF-R. De manière générale, les résultats n'ont fait que confirmer les données existantes et n'ont pas apporté d'éléments véritablement nouveaux dans l'optique des 3 objectifs fixés au départ. Les principaux résultats ainsi que la description des méthodes figurent cependant dans les annexes 2 respectivement 1. Les mesures brutes et leur localisation sont présentées en annexe 3.

### 1.3.2. Fissures métriques

Des mesures de fissuration ponctuelles ont été effectuées par Kiraly et al. (1971). Deux types de mesures ont été réalisés: dans un réseau karstique et en surface. L'étude de la fracturation a été faite uniquement en surface.

- a) Les axes des galeries des grottes de Milandre ont révélé trois directions principales: **NS, N50° et EW**.
- b) Neuf zones entourant le Maira ont fait l'objet de relevés détaillés de la fissuration. La fréquence des fissures varie passablement d'une zone à l'autre. Sur l'ensemble, la fréquence moyenne des plans de fissures (par 10 m) est la plus élevée dans les direction **NS et N25°**.

Une comparaison est ensuite faite entre l'orientation des galeries de la grotte et celle des principaux groupes de fissures. La meilleure coïncidence, donc la plus forte karstification s'observe dans les directions **NS, N25°, N150° et N70°**. La fréquence des fissures est cependant faible dans cette dernière direction. En conclusion, "les principales directions des cavités sont influencées par l'orientation des principaux groupes de fissures, par la perméabilité géométrique de chaque groupe de fissures et par la direction générale du gradient hydraulique des eaux souterraines" (Kiraly et al., 1971).

Lors des camps de terrain du CHYN, des mesures ont été effectuées près de Porrentruy, à proximité de la source du Voyeboeuf. Les principales directions sont: **N100° (EW), NS-N15° et N150°**, directions comparables à celles observées dans la région du Maira.

### 1.3.3 Failles et accidents majeurs

Nous avons vu que les axes des plis ont une orientation variable selon les secteurs. L'anticlinal du Banné possède une direction N60°, direction divergente de celle de l'anticlinal du Mont-Terri situé plus au sud (N85°). Plusieurs systèmes de contrainte ont donc joué au cours des phases de plissement. Le résultat de ces contraintes est indiqué par les trois principales directions de fracturation, correspondant à des failles ou des chevauchements:

- direction NS environ
- direction N150°, environ **NW-SE**
- direction **N60°**

Ces trois familles de fractures règlent les directions d'écoulement en Ajoie. Chacune de ces directions est une zone de faiblesse dans les calcaires, donc un endroit propice à la dissolution des calcaires au passage de l'eau. Ces directions sont celles relevées sur le terrain par les géologues. Mais elles ne représentent que les accidents majeurs et d'autres directions de fracturations forment également des zones de faiblesse des calcaires et servent d'amorce au développement d'une karstification. L'ensemble de ces directions correspondent approximativement à celles des vallées, donc aux directions d'écoulement superficielles anciennes ou actuelles.

Nous avons mesuré les directions des vallées, dans toute la zone tabulaire non recouverte de tertiaire. Nous les avons ensuite classées par secteurs de 20° (9 secteurs). Ceux situés entre 40 et 60° ainsi qu'entre 80 et 100° sont les mieux représentés (15% chacun) suivi des secteurs 0-20° (14%) et 60-80° (13%). Les directions des failles correspondant aux secteurs déterminés sont NS et N60°. La direction N150° est nettement moins bien représentée au niveau des secteurs (4% entre 140 et 160°), mais comprend néanmoins la vallée de l'Allaine entre Buix et Boncourt.

**Les résultats recueillis sur l'ensemble de l'Ajoie (N0-20°/ N40-60°/ et N80-100°) sont comparables aux mesures relevées dans une zone restreinte (réseau de Milandre), avec les directions NS, N50° et EW. La direction N150°, indiquée par des failles et par la fracturation, ne ressort que très peu sur le plan morphologique.**

## 2. DELIMITATION DU BASSIN HYDROGEOLOGIQUE DE L'ALLAINE A BONCOURT

### 2.1 Critères de délimitation

Les éléments essentiels pour délimiter un bassin versant hydrogéologique sont:

- la géologie, avec sa structure
- la morphologie (topographie)
- les essais de traçage

Les deux premiers éléments sont des éléments statiques bien qu'évoluant, bien sûr dans le temps géologique, en particulier la morphologie. Ces deux éléments ont été étudiés dans le chapitre 1. Le troisième élément est un élément dynamique, qui peut fournir, selon les conditions hydrologiques auxquelles il correspond, des résultats différents.

### 2.2 Les essais de traçage

#### 2.2.1 Types d'interprétation possible des essais

On a très souvent recours à l'utilisation des traceurs artificiels fluorescents pour délimiter les systèmes d'écoulement. L'interprétation des essais de traçage peut être qualitative et/ou quantitative, selon le temps et les moyens mis à disposition. L'*interprétation qualitative* des essais permet d'établir rapidement et facilement des connexions souterraines. Elle permet de confirmer ou d'exclure parfois des parties importantes du bassin versant d'un captage.

Dans un cas favorable survenu dans le cadre de la délimitation des zones de protection des captages des Gorges de l'Areuse (Neuchâtel), un double essai de traçage a permis d'exclure une grande zone comprenant de nombreuses résidences secondaires et terrains constructibles. Cela à l'évidence peut ainsi éviter de coûteuses expropriations

Dans un autre cas, défavorable, un essai de traçage a démontré une relation univoque rapide entre un site prévu pour l'implantation d'une décharge d'ordures dans le canton de Neuchâtel et des captages publics situés dans le canton voisin (Gretillat, 1986). La décharge fut condamnée.

L'interprétation quantitative fait appel à des moyens beaucoup plus importants (voir partie A). Cette approche devrait permettre notamment une meilleure estimation des conséquences de l'introduction de polluants dans un système karstique, en particulier lors d'études d'impact d'un projet, de délimitation d'une zone de protection ou, après un accident, lorsque des mesures visant à en limiter les effets doivent être prises.

#### 2.2.2 Inventaire des essais

Nous avons recensé plus d'une centaine d'essais de traçage en Ajoie, dont près de la moitié effectués depuis le début de cette étude, en 1988 (cf. liste numérotée des essais de traçage au chap. 5.3, vol.2).

L'uranine a été utilisée pour près de la moitié des essais (54), les rhodamines (sulfo G extra, B01, ...) pour le quart (28), le naphthionate (Leibundgut, 1987) pour neuf essais et le sel (NaCl) pour cinq essais. Les bactériophages ont été beaucoup employés pour les derniers essais (104 à 112). Quatorze essais ont été

organisés dans le cadre de cette étude. L'implantation future de l'autoroute N16 sur sol ajoulot a déjà nécessité 23 essais pour les études d'impacts sur les eaux souterraines (construction de la route et dépôts de matériaux). Les autres essais ont eu lieu dans le cadre d'expertises locales (essentiellement pour la place d'Armes de Bure et les zones de protection).

### 2.2.3 Appréciation des différents traceurs:

L'*uranine* reste incontestablement le meilleur traceur des eaux souterraines. Lors d'essais de traçage multiples, nous devons choisir d'autres traceurs, si possible sans interactions les uns avec les autres.

L'utilisation du *naphtionate* en Ajoie s'est révélée judicieuse, étant donné les faibles valeurs de bruits de fond et un seuil de détection élevé. Injecté en grande quantité (20-50 kg) ce traceur peut même être utilisé avec des eaux usées (essai n° 62, cf. liste vol.2).

La *sulforhodamine G extra* (Sulfo G), avec les autres rhodamines, peut être injectée dans le karst, pour autant que les sources susceptibles d'être touchées ne comportent pas quelques mètres d'alluvions à traverser. Ce traceur est très facilement adsorbé dans les terrains argileux. La moitié des traceurs non retrouvés étaient des rhodamines. La sulfo G est le traceur le plus toxique. Il **ne doit absolument pas** être injecté dans un cours d'eau ou lorsqu'il risque d'atteindre un captage public dans des concentrations supérieures à 1 mg/l. Des tests révélateurs ont été récemment réalisés sur des daphnies. Ces organismes ont été exposés pendant 48 h à différentes concentrations de sulfo G. Avec cette dernière, le taux de mortalité élevé des daphnies nous a contraint à changer de traceur et à utiliser la fluorescéine. Les tests sur des daphnies et de jeunes truitelles n'ont par contre occasionné aucune mortalité à des concentrations allant jusqu'à 500 mg/l (Matthey, 1994).

Un traceur récent, la *duasyne*, a été utilisé avec succès avec l'*uranine*, lors de notre multitraçage du 27.9.90. Sa détection a cependant nécessité une séparation par chromatographie liquide (HPLC).

L'*éosine*, injectée parallèlement à la sulfo G pose quelques petits problèmes de cohabitation et demande aussi dans ce cas des analyses par HPLC (essais n° 65 & 66).

Le classement des différents traceurs établis pour le milieu poreux par R. Allemann et A. Mdahgri Aloui (1991) semble aussi bien correspondre à la réalité karstique. Les meilleurs traceurs sont donc **l'*uranine*, la *duasyne*, le *naphtionate* et l'*éosine*** (Parriaux et al., 1988), mais sans oublier les **bactériophages** qui ont un avenir très prometteur (Rossi, 1994) dans tous les milieux (poreux, fissurés et karstiques et en rivière).

### 2.2.4 Principaux résultats des essais effectués en Ajoie.

Les essais du 2 mai 1988 (n°61 à 63; Gretillat et al. 1988a & b) et du 27 septembre 1990 (n°81 à 83) ont permis de connaître plus précisément les limites occidentales du bassin de la Beuchire. Les résultats obtenus permettent de réviser largement les conclusions de nos prédécesseurs (Lièvre, 1940 & 1955; Schweizer, 1970). Par ces essais, nous avons pu exclure du bassin de l'Allaine une partie importante de la Haute-Ajoie, avec les villages de Rocourt, Grandfontaine, Réclère et Damvant, drainés par le Gland ou par le Doubs. Notons que ces villages rejettent encore intégralement leurs eaux usées dans le karst! De son côté, le bassin de la source française de la Doue, jusque là très mal connu, a également pu être délimité (voir rapport du SRAE, réalisé par J.-P. Mettetal, Besançon).

Les essais du 11 novembre 1988 (n°67 et 68; Meury et Flury, 1990a) ont réduit les zones d'incertitude régnant entre les bassins de la Beuchire et du Saivu, en faveur de ce dernier. Ces essais ont précédé des investigations beaucoup plus poussées, développées:

- dans le cadre du projet européen COST65; de très nombreux essais ont été effectués sur le réseau de Milandre par le CHYN, notamment dans les forages N16 et dans la rivière souterraine;
- par Türberg (1993)
- pour les reconnaissances géologiques effectuées pour la N16 par MFR (1991b)

Les essais du 1<sup>er</sup> mars 1989 (n° 69 à 71) et du 26 mai 1989 (n° 73) ont permis de déterminer le bassin versant jusque là incertain de la source du Voyeboeuf et de préciser la limite commune avec le bassin du Betteraz (Schindler, 1990).

Si la plupart des essais sont univoques, certains demeurent ambigus. L'essai de Cornol (n° 75), effectué à proximité immédiate d'une importante décharge de solvants chlorés, a montré une faible réapparition du traceur (uranine) au cours de la crue suivant l'injection. L'arrivée de l'uranine au Betteraz paraît plutôt rapide étant donné les très faibles perméabilités du site d'injection. L'uranine apparue au Betteraz pourrait être imputée à la rémanence de ce traceur (très utilisé) dans les aquifères karstiques (Parriaux et al. 1990). *Les résultats complets des quatorze essais réalisés dans le cadre de notre étude sont disponibles au CHYN.*

## 2.3 Géologie des principaux exutoires

### **La Beuchire**

L'exutoire de *La Beuchire* est situé près du contact des marnes à Ptérocéras. Ces marnes surmontent encore un aquifère de près de 250 m de puissance au-dessus de l'aquiclude régional oxfordien. Situé au centre ville de Porrentruy, l'exutoire principal comprend des exutoires secondaires, ponctuels et diffus se trouvant en aval: source de la Boucherie (40 m au N) et venues diffuses dans les alluvions, dont certaines ont été observées dans des fouilles lors de l'assainissement des canalisations d'eaux usées (120 m au NW). L'exutoire de La Beuchire possède une configuration un peu particulière, avec un grand bassin de réception ne facilitant guère les mesures de débit. Ce bassin comporte trois sorties et quatre seuils placés à des hauteurs différentes et sous lesquels se produisent des fuites. Un exutoire secondaire, situé 40 m au nord, complique encore les mesures, en rejoignant les eaux de la sortie ouest de l'exutoire principal.

Les exutoires de crue du système de La Beuchire jalonnent l'Ajoulot. Dans les crues les plus importantes, ces exutoires fonctionnent jusqu'à Chevenez (Creux-des-Prés), 6 km en amont de La Beuchire. Le principal est le Creugenat, 4.4 km en amont de La Beuchire.

### **Le Betteraz**

L'exutoire du *Betteraz* est situé sur le versant sud de l'anticlinal du Pont d'Able, **au contact des marnes à Natica (Séquanien inf.)**. Au-dessous de celles-ci, une deuxième zone d'exutoire est constituée par l'aquifère alluvial du Pont d'Able (substratum rauracien). L'exutoire du Betteraz, est situé en aval de Porrentruy. Plutôt que d'un exutoire ponctuel, nous devrions parler d'une zone d'exutoire. Dans le bassin de réception, plusieurs venues ont été observées avant la construction du captage de la source. Autrefois, avant les travaux de correction de son lit, l'Allaine traversait pratiquement le site de la source. Plusieurs exutoires ont été repérés dans le lit actuel de l'Allaine, au cours d'un essai de traçage effectué dans des conditions hydrologiques moyennes (n°100). La source de la Première Combe est le seul exutoire temporaire connu. Il est situé latéralement vers le nord, par rapport à la source du Betteraz.

### **Le Voyeboeuf et La Bonne-Fontaine**

Les exutoires de *La Bonne-Fontaine* et du *Voyeboeuf* se placent sur le versant sud de l'anticlinal de la Perche, entre les marnes à Ptérocéras et celles à Natica. Ces aquicludes n'ont pas d'effet sensible sur la position des deux sources, contrairement à la position de la source du Betteraz.

Le système du Voyeboeuf comprend un exutoire principal dans une petite cluse située en amont de Porrentruy. En hautes eaux, un cours d'eau superficiel s'écoule de Courgenay en passant par la source. Du fait de cette situation hydrologique, l'eau de la source ne peut être séparée des eaux de surface. Cette rivière temporaire reçoit en effet toutes les eaux superficielles ainsi que les eaux issues des exutoires de crue du système du Voyeboeuf. Trois exutoires de crue se trouvent en amont de la sortie principale, ainsi qu'un certain nombre de dolines devenant émissives en crues (combe Vatelín, Noires Terres).

Le système de la Bonne-Fontaine comporte un exutoire situé au centre du village de Fontenais. En hautes eaux, la partie sud du système s'écoule en direction de la source du Voyeboeuf. Lors de grandes crues, le gouffre de Mavalau fonctionne comme exutoire temporaire du système Bonne-Fontaine et s'écoule dans la plaine de Courtedoux.

### **La Basse-Allaine**

Dans La Basse-Allaine, le Malm est représenté par le Séquanien et le Rauracien. Entre ces deux formations aquifères, les marnes à Natica constituent un niveau peu perméable d'une certaine importance (20-30 m), mais pas un écran aux écoulements. **Les exutoires sont pour la plupart situés dans le Rauracien**, mais ils sont en généralement en relation avec les eaux du Séquanien supérieur. Les principaux systèmes concernés sont ceux de *La Fontaine* (Courtemaîche), du *Saivu* et de *La Font* (Boncourt). Plusieurs systèmes mineurs sont situés dans la région de Buix (Favergeatte, Côtais, Marmitaine...).

### **La Fontaine**

Le système de la Fontaine compte un exutoire permanent en rive gauche de l'Allaine, dans le village de Courtemaîche. Des sorties diffuses existent en aval, car le débit augmente progressivement jusqu'à son arrivée dans l'Allaine. La Fontaine comporte encore plusieurs exutoires temporaires. L'un d'eux se trouve aussi en rive gauche, 650 m au sud, en amont de la source. Un deuxième est situé encore plus en amont, sur la rive droite de l'Allaine, dans la plaine alluviale.

### **Saivu-la Font**

Le système Saivu-la Font est double. Il y a un système propre à la source de la Font et un autre, commun aux deux sources du Saivu et de la Font, drainé par la Milandrène. Ces deux sources se trouvent de part et d'autre de la nappe alluviale de Boncourt, l'une en amont et l'autre en aval, à l'entrée du village. L'exutoire de crue principal de ce système double est la source temporaire de la Bâme.

### **Autres sources**

D'autres sources de moindre importance ont également été suivies.

Celle du Pâquis est très particulière. Canalisée jusqu'à l'Allaine, cette source se trouve à proximité de la source du Betteraz (mêmes conditions géologiques).

Egalement située à proximité du Betteraz (mêmes conditions géologiques), la source St-Nicolas se trouve à la hauteur de la STEP de Porrentruy. Ses débits sont faibles, mais cette source représente une référence en Ajoie, car elle est d'une grande qualité et ainsi bien épargnée des effets des interventions humaines. Aucun traçage n'a même réussi à l'atteindre et son impluvium a finalement été localisée immédiatement à l'amont de la source, en zone forestière.

A l'inverse de la source St-Nicolas, la source Domont est passablement polluée par la décharge communale de Porrentruy, située sur son bassin versant. Située à proximité de l'Allaine, à l'entrée de Courchavon, l'emplacement exact de la source, dans les calcaires rauraciens, n'est pas connu précisément suite à sa mise en canalisation sur une centaine de mètres.

Ressemblant en bien des points à la source de La Beuchire, celle de La Doue est, après elle, la plus importante source karstique de la région. La source de la Doue est située en France, mais à moins de 200 m de la frontière suisse. Elle sourd au pied d'une falaise, à proximité d'un accident tectonique subméridien, dans les calcaires rauraciens. Le bassin versant est donc pour sa plus grande partie situé sur sol suisse.

### ***Exutoires diffus***

La plupart des systèmes étudiés possèdent non seulement un exutoire visiblement ponctuel, mais en plus également des sorties diffuses soit dans les alluvions, soit directement dans l'Allaine.

A l'image de la nappe du Pont d'Able, les nappes alluviales de Courtemaîche (système de la Fontaine), de Bux et de Boncourt (système Saivu-la Font) constituent probablement d'importantes zones d'exutoires (diffus) pour les calcaires du Malm.

## **2.4 Description des limites du bassin de l'Allaine**

### **2.4.1 Bassin versant de l'Allaine**

Le bassin hydrogéologique (182 km<sup>2</sup>) comprend l'ensemble des eaux souterraines s'écoulant dans l'Allaine. Le bassin hydrologique (215 km<sup>2</sup>) représente un bassin topographique qui récolterait l'ensemble des eaux superficielles.

Le bassin hydrogéologique de l'Allaine est donc plus petit que le bassin hydrologique (projection en surface). Leurs limites divergent surtout dans la partie occidentale (fig. B.11). Cette zone est drainée par le Gland. Les limites du bassin hydrogéologique ont été déterminées:

- par la topographie, pour autant qu'elle soit conforme à la géologie et aux résultats des traçages;
- par les connaissances géologiques et structurales (accidents tectoniques, plis);
- par les résultats des essais de traçages lorsque la topographie et la géologie ne suffisaient pas;

### ***Limites méridionale et orientale***

Les limites des deux types de bassin coïncident assez bien au sud, le long de la chaîne du Mont-Terri, entre Roche d'Or et les Rangiers. De là, la limite correspond aussi à la ligne de partage des eaux entre les bassins du Rhône et du Rhin; elle se poursuit vers le nord jusqu'à Lucelle puis vers l'ouest, par l'anticlinal du Morimont (Nord de Charmoille). Dans la région du Mont de Miserez, la ligne Rhône - Rhin bifurque en direction de Bonfol (coïncidence avec le bassin de l'Allaine à Joncherey).

### ***Limite septentrionale***

En direction de Porrentruy, la limite septentrionale du bassin de l'Allaine (à Boncourt) est mal définie, surtout entre Miécourt et Alle, où les conditions hydrologiques font varier ces limites dans le temps. Rappelons que le bassin est défini dans des conditions moyennes. En crue, sa superficie augmente légèrement dans cette zone entre Miécourt et Alle. Les limites hydrologiques et hydrogéologiques correspondent encore bien au NE du bassin, sur le versant oriental de la vallée de la Basse-Allaine, entre Porrentruy et Boncourt. Les bassins adjacents appartiennent certes à celui de l'Allaine (à Joncherey), mais ils sont drainés par la Coeuvatte qui ne rejoint l'Allaine qu'en France, en aval de Delle, à Joncherey.

### **Limite occidentale**

La zone comprenant Roche d'Or, Fahy, Villars-le-Sec (F) et Boncourt constitue la limite occidentale du bassin hydrogéologique de l'Allaine. En revanche, la limite du bassin hydrologique se trouve plus à l'ouest, elle inclut les régions de Damvant - Réclère et de Grandfontaine - Rocourt. Dans un passé plus ou moins lointain, ces limites devaient être identiques. Mais, à la suite à l'approfondissement du Doubs, ce dernier a capté les eaux souterraines du bassin de Damvant - Réclère jusqu'à Rocourt. De même, le Gland a capté les eaux de la région Grandfontaine - Rocourt (différence avec le Doubs). Le secteur Croix - St-Dizier se trouve dans la zone d'influence de l'Allaine à partir de Delle. La relativement faible épaisseur de la zone saturée (50 m au maximum) ne peut expliquer les différences observées.

### **2.4.2 Bassins versants des principales sources karstiques**

**La Beuchire** possède un bassin versant d'environ 48 km<sup>2</sup>, soit plus du quart de la superficie du bassin versant de l'Allaine à Boncourt. Situé à l'ouest de Porrentruy, le bassin versant est relativement bien délimité dans sa partie nord, avec les bassins de Milandre et de Val St-Dizier. A l'ouest, les failles NS (ligne de La Ferrière) jouent probablement un rôle majeur, les rejets verticaux des failles de cette zone étant suffisamment importants (fig. B.7) pour constituer une position structuralement haute et dont les axes anticlinaux s'abaissent de part et d'autre. Ainsi, au sud de Fahy, les essais de traçage ont permis de définir la limite occidentale en excluant 4 villages (avec leurs rejets d'eaux usées...) du bassin versant de La Beuchire: Grandfontaine, Rocourt, Damvant et Réclère. Pourtant topographiquement (vallée sèche), tout semblait indiquer des liaisons hydrauliques entre ces villages et La Beuchire à Porrentruy. Les essais de traçages effectués dans cette région ont d'autre part permis de délimiter les bassins versants de La Ronde Fontaine, au sud (se jette dans le Doubs), et de La Doue (se jette dans le Gland), à l'ouest.

La partie méridionale est moins bien définie, avec une zone à cheval entre Jura plissé et Jura tabulaire, le chevauchement du second sur le premier n'étant pas déterminant comme limite hydrogéologique. La limite a été définie sur la charnière de l'anticlinal du Mont-Terri. Dans la partie aval, la limite avec le bassin versant de La Bonne-Fontaine a été définie sur l'anticlinal du Banné, au sud d'une ligne reliant Le Creugenat à La Beuchire (zone de différences).

**Le Betteraz** draine une zone située au NE de Porrentruy. Si la partie aval du bassin versant est bien délimitée grâce aux essais de traçage (10 km<sup>2</sup>), il n'en est pas de même pour la partie amont (15 km<sup>2</sup> env.) qui comprend un important recouvrement tertiaire (100 à 200 m), ceci entre Alle, Cornol et Miécourt. Cependant, la source du Betteraz n'est pas l'unique exutoire de cette zone complexe: La Première Combe -temporaire- et la nappe alluviale du Pont d'Able constituent également des exutoires d'une partie au moins de la même zone. En traversant l'impluvium du Betteraz, l'Allaine participe également à l'alimentation du système, ainsi que l'ont démontré plusieurs essais de traçage (n° 45, 104 et 105, voir vol. 2, p. 305), au moins temporairement et dans des proportions variables. Des forages et travaux liés à la transjurane ont recoupé des cavités importantes, mais souvent comblées de remplissages sidérolithiques (sables vitrifiables et limons atteignant une puissance de 8.5 m).

Le bassin versant du **Voyeboeuf** (13.5 km<sup>2</sup>) est relativement bien délimité depuis les traçages de 1989. Il prend place entre les bassins versants de La Bonne-Fontaine (à l'ouest, zone mal définie avec des différences) et celui du Betteraz (limite septentrionale sur l'anticlinal du Cras d'Hermont).

Le bassin versant de **La Bonne-Fontaine** (16 km<sup>2</sup>) prend place dans le synclinal de Bressaucourt et sur le versant sud du Mont-Terri (Jura plissé). A l'est, nous n'avons pas de limite très précise avec le bassin du Voyeboeuf et nous avons vu ce qu'il en était de la limite nord avec le bassin de La Beuchire (différences). Le bassin versant de la source du **Pâquis** est très difficile à délimiter de par la diversité des

apports démontrés par des traçages (Allaine, Jura plissé, bassins du Betteraz, de la Bonne-Fontaine). Un seul essai a concerné exclusivement cette source (n°94, anticlinal de La Perche, sud de Porrentruy).

Le versant ouest de la **Basse-Allaine**, entre Courchavon et Boncourt est composé de plusieurs sous-bassins imbriqués les uns dans les autres. Cet ensemble forme une étroite zone de direction N-S, mais avec un drainage généralisé WSW-ENE en direction de l'Allaine (niveau de base et drain principal) et avec de nombreuses diffluences. La direction WSW-ENE est soulignée par un certain nombre de vallées sèches entre Courchavon (Combe du Varieu) et Buix.

Parmi ces bassins, nous mettrons en évidence celui de **La Fontaine** (5.2 km<sup>2</sup>) qui s'étend du nord de Mormont jusqu'au nord de la colline de Tcherteau (W de Courtemaîche). Cette limite sépare le bassin de La Fontaine et celui de Milandre (Saivu- La Font), sans diffluence mise en évidence. Une importante faille de direction NS semble drainer l'ensemble du bassin vers son exutoire, entre Courchavon et Courtemaîche. L'Allaine constitue la bordure orientale du système de la Fontaine à partir de Courchavon, en participant, par des pertes, à l'alimentation du système.

Enfin, au NW, la plus grande partie du plateau de Bure constitue le bassin versant de **Milandre (Saivu - La Font)** qui fait l'objet de recherches dans le cadre des projet COST65 et EPIK. Dans sa partie aval, une part des eaux de la Milandrine se dirige par diffluence sur la source de la Font. La plupart des traceurs parvenus à la source du Saivu ont en effet également atteint la source de la Font, avec des concentrations correspondant à près de 50% de celles du Saivu.

### 2.4.3 Caractérisation du bassin de l'Allaine et de ses principaux sous-bassins karstiques.

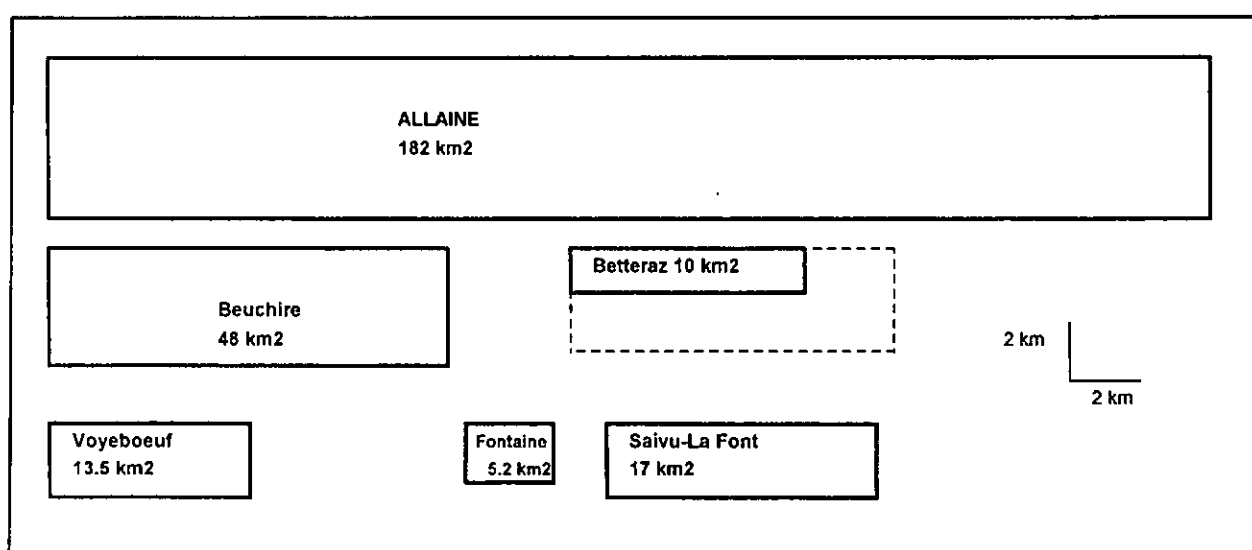
Le bassin versant hydrogéologique de l'Allaine couvre une surface de 182 km<sup>2</sup> (215 km<sup>2</sup> pour le bassin hydrologique). En forme de "T" renversé, il regroupe des bassins aux formes simples, peu allongés (voir les indices de Gravelius, tab. B.1 et les rectangles équivalents à la figure B.8 pour les principaux bassins). Les caractéristiques hypsométriques des principaux bassins et sous-bassins de l'Allaine figurent au tableau B.2. Le bassin de la Doue, adjacent à celui de la Beuchire, figure également dans ce tableau vu son importance régionale (taille comparable à ceux du Saivu - La Font et de la Bonne-Fontaine).

**Tableau B.1:**

*Caractéristiques géographiques de quelques sous-bassins de l'Allaine*

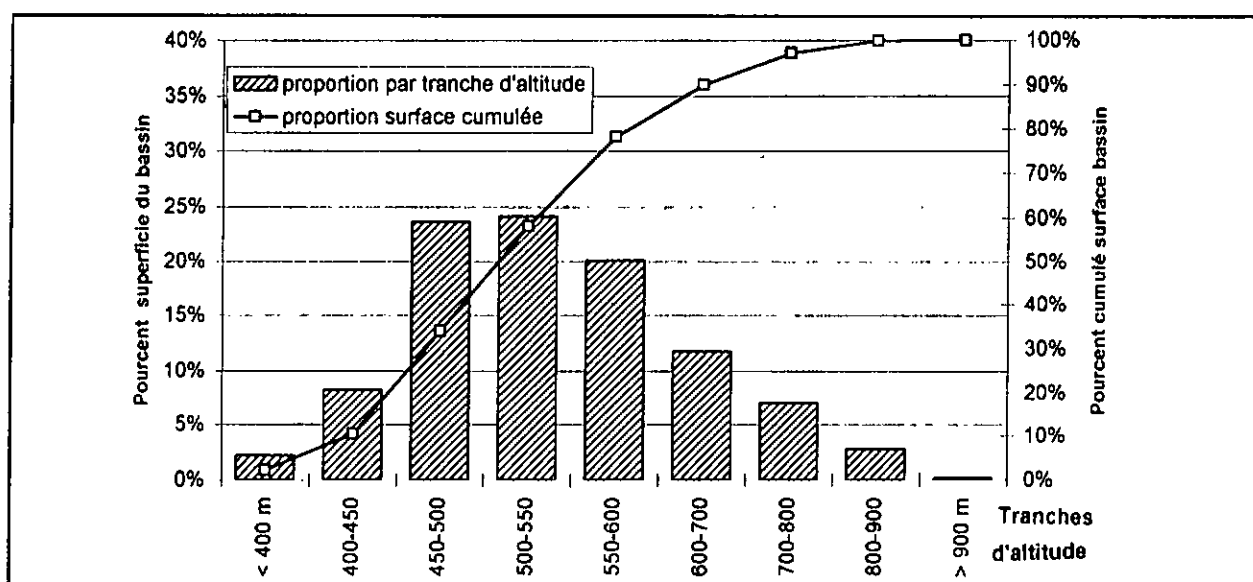
| Bassin hydrogéologique | Surface [km <sup>2</sup> ] | Périmètre [km] | Long.max [km] | Larg.max [km] | Gravelius <sup>*</sup> |
|------------------------|----------------------------|----------------|---------------|---------------|------------------------|
| Beuchire               | 48.0                       | 31.3           | 9.8           | 7.3           | 1.27                   |
| Betteraz rapide        | 10                         | 16.5           | 5.5           | 2.8           | 1.47                   |
| total                  | 25.4                       | 23             | 9.5           | 3.8           | 1.29                   |
| Voyeboeuf              | 13.5                       | 15.8           | 6.1           | 4.0           | 1.21                   |
| Bonne-Fontaine         | 16                         | 15.1           | 6.0           | 3.8           | 1.06                   |
| La Fontaine            | 5.2                        | 9.1            | 3.0           | 2.1           | 1.13                   |
| Saivu-La Font          | 17.0                       | 19.5           | 7.5           | 3.8           | 1.33                   |
| ALLAINE                | 182                        | 77.4           | 22.5          | 7.75          | 1.62                   |

<sup>\*</sup> L'indice de Gravelius est égal au quotient du périmètre du bassin sur le périmètre du cercle de surface équivalente. Plus l'indice est grand, plus le bassin est allongé, ce qui a une incidence certaine sur l'hydrogramme de l'exutoire considéré.



**Figure B.8**

Représentation des surfaces des bassins versants étudiés en rectangles équivalents



**Figure B.9**

Hypsométrie du bassin de l'Allaine, histogramme et courbe cumulée

## 2.5 Hypsométrie

Près de la moitié du bassin hydrogéologique de l'Allaine se place en-dessous de 500 m d'altitude et 90% en-dessous de 650 m alors que la tranche d'altitude la plus fréquente se situe vers 500-600 m (fig. B.9). Le point le plus bas est à 365 m (Boncourt) et le plus haut à 995 m (Les Ordon près des Rangiers). La carte hypsographique donne la répartition des tranches d'altitude sur l'ensemble du bassin hydrologique (fig. B.11) et le graphique B.9 la courbe hypsométrique de la totalité du bassin.

Les courbes hypsométriques de fréquences cumulées (fig. B.10) des sous-bassins de l'Allaine montrent 3 catégories de bassins:

- 1) Le Voyeboeuf et la Bonne Fontaine ont une courbe similaire, avec une partie importante de leur surface entre 600 et 800 m;
- 2) La Beuchire, La Fontaine et Le Saivu ont près de 80% de leur bassin entre 400 et 550 m;
- 3) Le Betteraz est un bassin très plat, avec moins de 100 m de dénivellation.

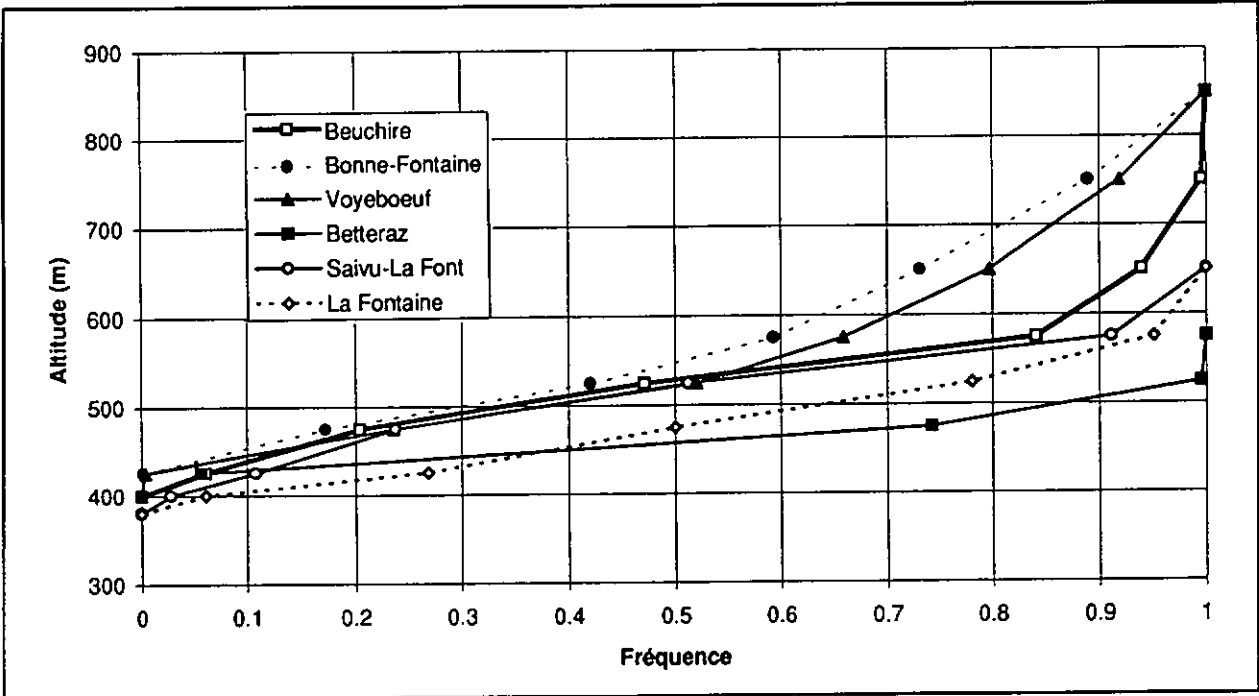
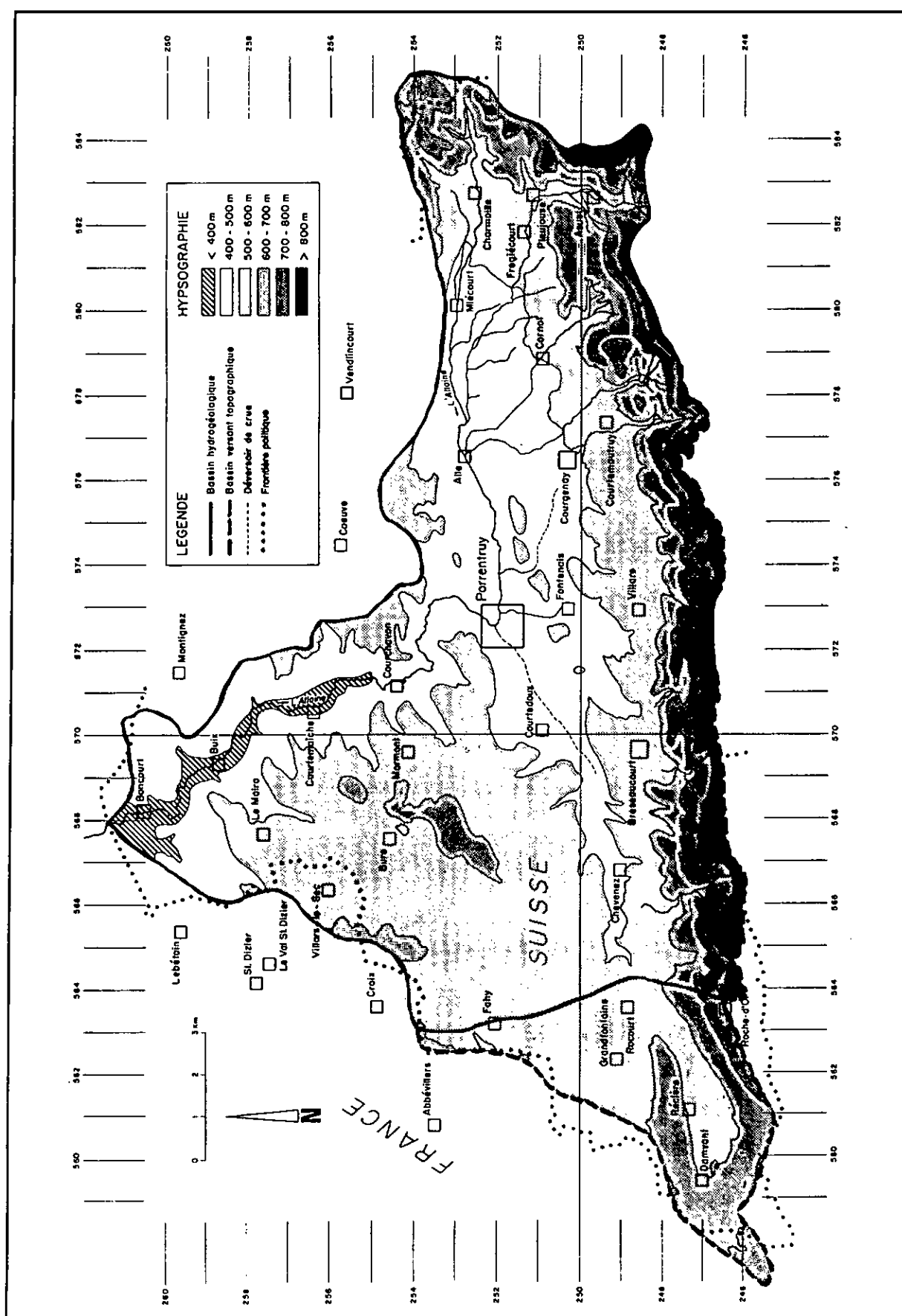


Figure B.10  
Courbes hypsométriques des principaux sous-bassins karstiques de l'Allaine

Tableau B.2:  
Caractéristiques hypsométriques de quelques sous-bassins de l'Allaine

| Bassin versant | ALTITUDE (m) |               |                   |          |        | Dénivelé total (m) |
|----------------|--------------|---------------|-------------------|----------|--------|--------------------|
|                | Moyenne      | Médiane (50%) | Minimale (source) | Maximale | Modale |                    |
| Beuchire       | 557          | 530           | 423               | 830      | 575    | 407                |
| Betteraz       | 485          | 455           | 418               | 630      | 475    | 212                |
| Voyeboeuf      | 593          | 518           | 440               | 890      | 525    | 450                |
| Bonne-Fontaine | 611          | 545           | 440               | 930      | 525    | 490                |
| La Fontaine    | 497          | 475           | 390               | 613      | 525    | 223                |
| Saivu-La Font  | 524          | 520           | 380               | 620      | 575    | 240                |
| ALLAINE        | 552          | 505           | 365               | 995      | 525    | 630                |
| La Doue        | (552)        | (560)         | 440               | 642      | 550    | 222                |

Les bassins de basse altitude sont situés exclusivement dans le Jura tabulaire, avec une altitude moyenne inférieure à 525 m. Il s'agit des bassins suivants du Betteraz, de La Fontaine et du Saivu-La Font.  
Les bassins d'altitude supérieure sont des bassins mixtes, appartenant à la fois au Jura plissé et au Jura tabulaire. Leur altitude moyenne avoisine 600 m. Les bassins correspondants à cette caractéristique sont ceux du Voyeboeuf et de La Bonne-Fontaine.  
On trouve encore comme bassin mixte les bassins de La Beuchire et La Doue, mais à une altitude intermédiaire aux deux groupes précédant, 550 m, correspondant à l'altitude moyenne de l'ensemble du bassin de l'Allaine. Les altitudes moyennes (tab.B.2) des bassins se trouvent entre 485 et 524 m pour les plus basses (Jura tabulaire) et entre 557 et 611 m pour les plus élevées (Jura plissé et Jura tabulaire).



**Figure B.11**  
*Carte hypsographique du bassin versant de l'Allaine*

## 3. BILANS HYDROLOGIQUES PROVISOIRES

### 3.1 Entrées

#### 3.1.1 Stations météorologiques

Dans ce chapitre, nous analyserons l'ensemble des apports atmosphériques, considérés comme des traceurs naturels: les précipitations, du point de vue quantitatif (lame d'eau tombée sur les bassins) et qualitatif (température, isotopes, minéralisation et polluants atmosphériques). Les données se rapportent généralement à des cycles hydrologiques débutant en novembre et se terminant en octobre. Ce dernier mois met le plus souvent un terme à la période de basses eaux annuelles ainsi qu'à la période de végétation. Lorsqu'elle est mentionnée, la période d'hiver concerne les mois de novembre à avril et la période d'été les mois de mai à octobre

##### **Trois stations suisses (ISM)**

En 1989, le réseau pluviométrique mis en place par l'ISM comportait trois stations en Ajoie:

- **Mormont** (station pluviométrique en service depuis 1901);
- **Fahy** (station pluviométrique de 1957 à 1980 puis météorologique - réseau Anetz - depuis 1981);
- **Les Ranglers** (station pluviométrique de 1967-1980 puis climatologique depuis 1981).

##### **Stations françaises**

Dans la région limitrophe, Météo France exploite les stations pluviométriques d'Abbevillers (2 km au NW de Fahy), de Sochaux et du Joncherey (Delle). Les stations de Fahy (596 m) et Mormont (540 m) sont très proches de l'altitude moyenne du bassin de l'Allaine (552 m).

##### **Onze stations complémentaires N16**

Ces stations ne suffisaient pas à donner une vision globale des précipitations en Ajoie. Aussi, dans le cadre de l'étude d'impact sur les eaux souterraines (EIE) pour la N16, onze stations supplémentaires ont été implantées sur l'ensemble du bassin de l'Allaine (tab. B.4). Elles comportent chacune un acqui-siteur de données "Madd", relié à un pluviomètre à auget basculant. La date et l'heure du basculement de l'auget (2/10 de mm) peuvent ainsi être enregistrées et chaque précipitation traitée en fonction des besoins (RWB, 1990-92). Mis en place dès le milieu de l'année 1989, ce réseau de 11 stations était encore en service en août 1998 et les données sont exploitées régulièrement par le bureau RWB SA (annuaires).

Ce réseau (nous l'appellerons réseau N16) permet d'obtenir à la fois une vision spatiale et temporelle des précipitations sur tout le bassin avec une densité d'une station pour 15 km<sup>2</sup> (avec Fahy). Le réseau établi par l'ISM permet de contrôler les stations nouvellement installées et de les replacer dans l'évolution interannuelle des précipitations.

##### **Mesures de température: sol et air**

Hormis l'aspect quantitatif des entrées, il y a aussi un aspect qualitatif non négligeable. Pour la température de l'air, la station de référence est celle de Fahy (596 m): la température de l'air est mesurée sur deux niveaux (1.5 m et 5 cm) et celle du sol à quatre profondeurs (5, 10, 20 et 50 cm). Les températures de l'air sont aussi mesurées aux Rangiers (856 m) et dans cinq stations thermographiques implantées dans le cadre de la N16 (fig. B.16).

##### **Station de référence Isotopique: Mormont**

Les entrées sont également caractérisées par d'autres traceurs naturels: les isotopes. Le tritium et l'oxygène-18 ont été déterminés sur les précipitations mensuelles de Mormont, de janvier 1988 à février 1991. D'autres paramètres chimiques y ont également été analysés, de même que sur quatre autres sites,

mais essentiellement pour les solvants chlorés. Les résultats des isotopes sont présentés dans le rapport final LCE-CHYN (Lièvre et al., 1993).

### 3.1.2 Précipitations

#### a) Présentation des résultats

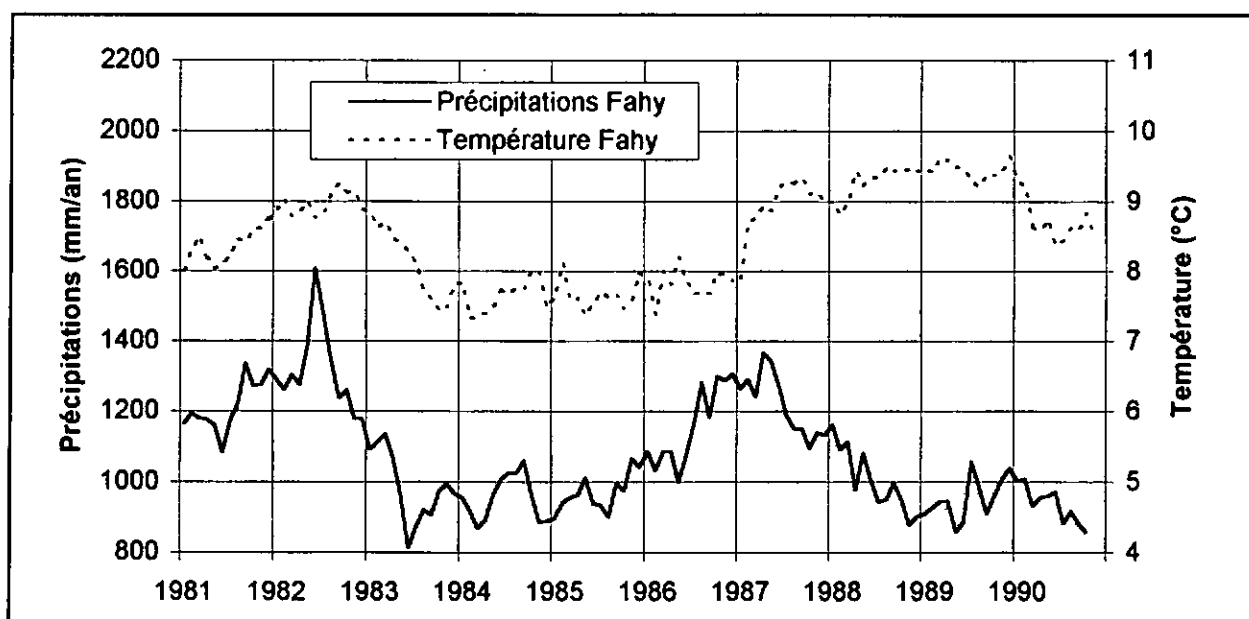
##### **Période d'observation sèche**

Au niveau de l'évolution des précipitations de Fahy, nous constatons que la période d'étude est située dans une tendance à la diminution des précipitations, après un maximum de pluviosité atteint en 1987 (fig. B.12). Les précipitations annuelles passent ainsi de plus de 1300 mm à moins de 1000 mm.

La période prise en considération pour les besoins de l'étude est ainsi particulière pour établir des bilans représentatifs.

A Fahy, les trois années hydrologiques de 1988-89 à 1990-91 ont été les plus sèches depuis la période 1961-62 à 1963-64, avec une moyenne de 921 mm.

A Mormont, les valeurs sont un peu plus élevées (1032 mm) et il faut remonter aux années 1970-71 à 1972-73 (839 mm) trouver une série de trois années plus sèches.



**Figure B.12**

Précipitations et température de l'air à Fahy. Evolution des moyennes annuelles par moyennes mobiles sur 12 mois.

##### **Quelques situations extrêmes**

Les précipitations annuelles maximales peuvent atteindre le double de celle des années les plus sèches:

- 1571 mm en 1977 contre 803 en 1964, à Fahy;
- 1576 mm en 1981 contre 695 mm en 1953, à Mormont.

En moyennes plurimensuelles, les mois les plus secs sont ceux de novembre et février et les plus humides ceux de mai et juin, selon les sites de mesure.

A Mormont, les précipitations mensuelles ont atteint leur maximum avec 330 mm en novembre 1950. A Fahy, le maximum a été atteint en mai 1983 avec 289 mm. Au cours de ce mois, l'Allaine a connu une crue centennale (env. 90 m<sup>3</sup>/s).

Les précipitations journalières les plus importantes ont été mesurées le 7.8.1977 avec 86 mm/j. Une valeur de 61 mm a été obtenue le 24 mai 1983, événement ayant causé la crue exceptionnelle de l'Allaine.

**Essai de corrélation des précipitations avec l'altitude**

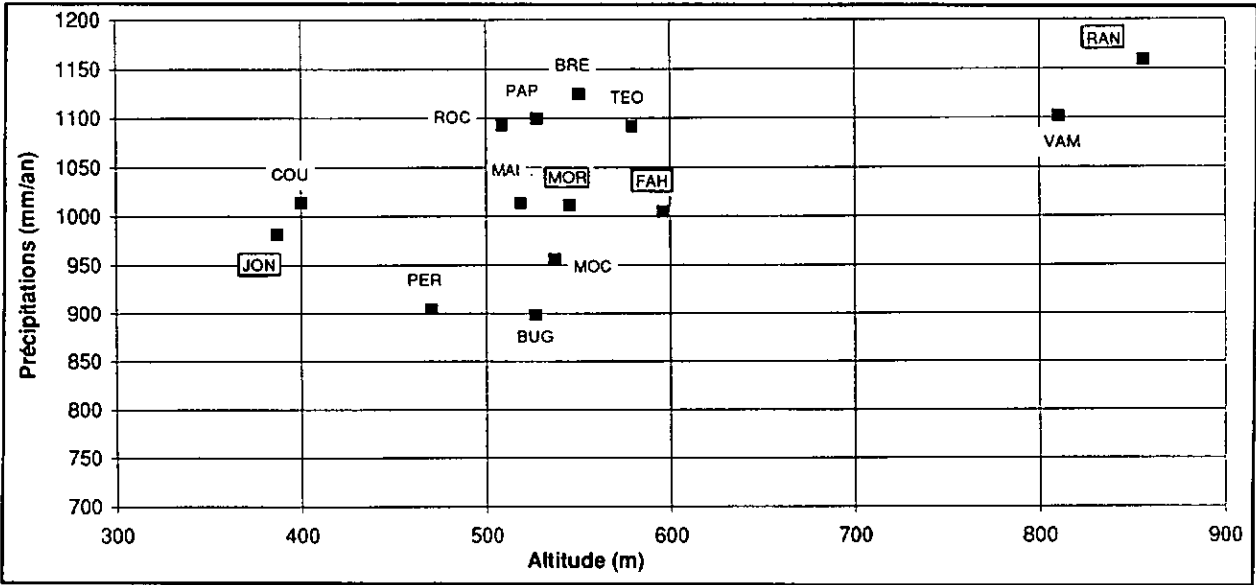
Les données fournies par l'ISM et Météo France nous montrent que les précipitations ne sont guère corrélées avec l'altitude (tab. B.3). Cette conclusion est renforcée par les résultats du réseau N16 (fig. B.13). Ces anomalies sont probablement causées par les effets orographiques et les microclimats.

Avec une altitude inférieure, la station de Mormont (540 m) reçoit davantage de pluie que celle de Fahy (596 m): 1149 mm contre 1080 mm, pour les trente dernières années.

**Tableau B.3:** Moyennes des précipitations pluriannuelles des stations pluviométriques d'Ajoie

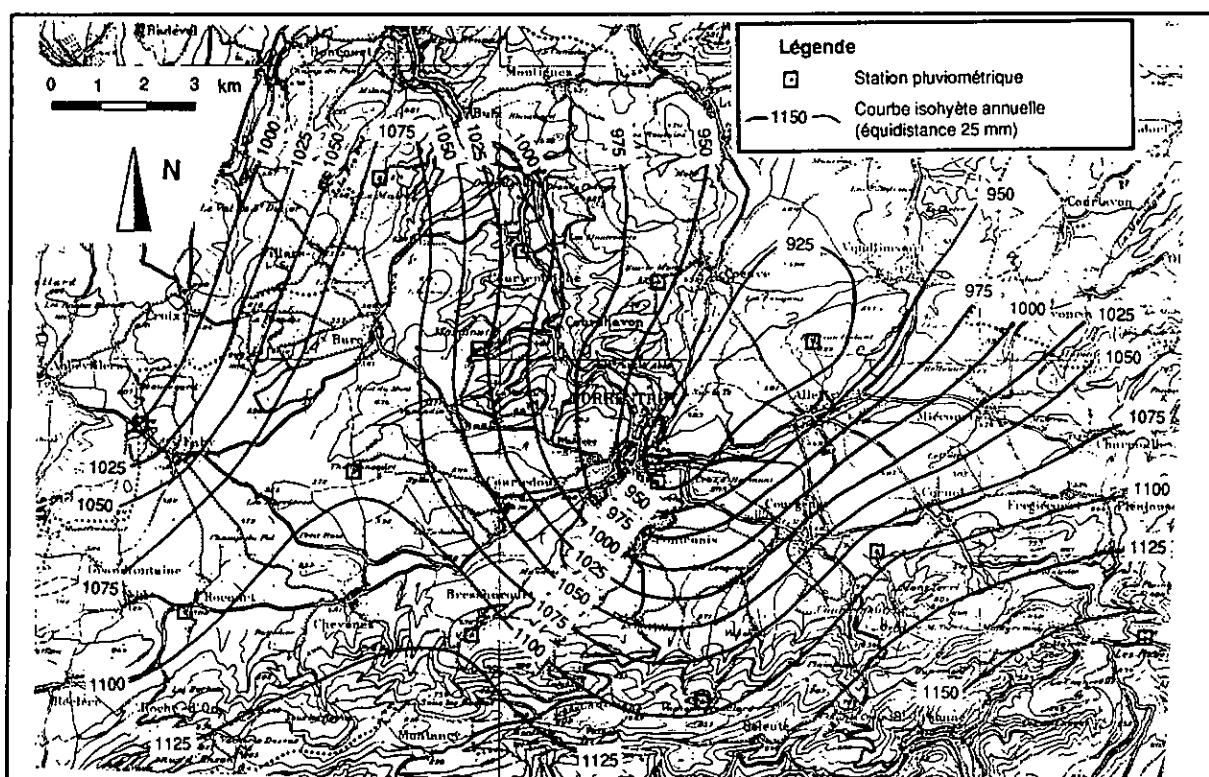
|           | Fahy | Mormont | Les Ranglers | Joncherey |
|-----------|------|---------|--------------|-----------|
| 1967-1990 | 1098 | 1199    | 1267         | 1065      |
| 1980-1990 | 1096 | 1287    | 1326         | 1108      |
| 1970-1980 | 1120 | 1137    | 1218         | 1020      |

La comparaison est aussi révélatrice pour la station du Joncherey (F) située 210 m plus bas que celle de Fahy et avec des valeurs pluriannuelles à peine inférieures (30 mm).

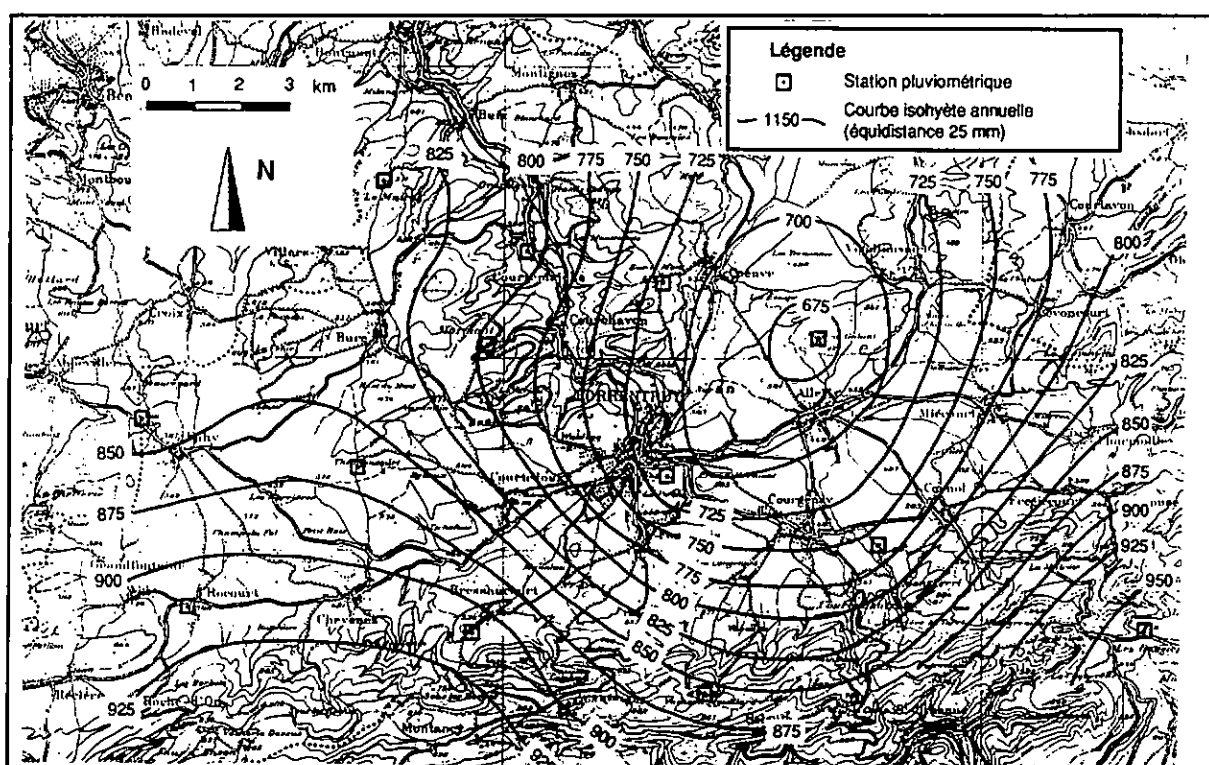


**Figure B.13**

Répartition annuelle des précipitations en Ajoie, en fonction de l'altitude, pour l'année hydrologique 1989-1990 (14 stations pluviométriques). Les anciennes stations sont mises en évidence.



**Figure B.14**  
Précipitations annuelles en Ajoie, pour l'année hydrologique 1989-90: courbes isohyètes.



**Figure B.15**  
Précipitations annuelles en Ajoie pour l'année hydrologique 1990-91: Courbes isohyètes

### **Répartition spatiale des précipitations**

Les cartes de répartition spatiale des précipitations illustrent encore mieux le phénomène, pour les années hydrologiques 1989-90 (fig. B.14) et 1990-91 (fig. B.15)). Ces cartes ont été dressées par la méthode de krigeage. Des cartes mensuelles ont permis d'estimer des valeurs mensuelles lacunaires, à la suite d'une panne survenue à l'une ou l'autre des stations. Pour le cycle 1989-90, 7 valeurs ont dû être estimées (jamais plus de 2 pour une même station) et 3 pour le cycle 1990-91.

A l'exception du plateau de Bure, relativement plus arrosé en 1989-90, la répartition des précipitations en Ajoie ne varie guère d'un cycle à un autre. Les cycles 1991-92 et 1992-93 n'ont fait que confirmer cette constatation.

**Les précipitations annuelles distribuées selon trois zones correspondent approximativement au NE, NW et SW de l'Ajoie. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées au NE, dans la région Porrentruy - plaine de Courgenay, plateau de Coeuve et Basse-Allaine (bassins du Betteraz, Voyeboeuf et de la Fontaine). Les valeurs les plus élevées sont mesurées au SW, en Haute-Ajoie et sur le relief (bassins de la Beuchire et de la Bonne-Fontaine). Des valeurs intermédiaires ont été obtenues au NW, sur le plateau de Bure (bassin du Saivu).**

La direction des vents dominants est un facteur important qui intervient dans la répartition donnée ci-dessus: **les précipitations proviennent essentiellement du SW** (les vents dominants viennent pour environ 50% du secteur SSW-W et 25 % du secteur E) et se déchargent en progressant vers l'est, notamment sur le plateau de Bure (présence de zones à trombes d'eau). Entre Rocourt et Paplemont, l'effet orographique se fait nettement sentir (pied du versant nord de la chaîne Lomont - Mont-Terri).

Les impluviums de La Beuchire et du Saivu reçoivent ainsi davantage de précipitations que celui du Betteraz.

### **Evénements ponctuels utilisés comme traceur naturel**

Au niveau d'un épisode pluvieux (orage par exemple), les cartes montrent des événements particulièrement intéressants en vue de la compréhension de certains systèmes hydrologiques. L'exemple de l'orage du 13 août 1990 est très parlant: un orage s'est abattu sur une zone très limitée (Cornol - Courgenay), provoquant une crue de l'Allaine en amont de Porrentruy. Celle-ci s'est répercutée en aval sur le système de Courtemaîche où aucune précipitation n'a été mesurée. Le réseau N16 est ainsi très utile pour analyser ce type d'événement, car un orage peut jouer le rôle de traceur naturel.

### **Intensités de pluies horaires**

Le plateau de Bure notamment connaît des zones à trombes d'eau, ou tout au moins à forte intensité de pluie horaire. Au cours d'un violent orage de 35 minutes sur Mormont, le 29 mai 1989, il est tombé 42 mm de pluie, soit une intensité moyenne de 72 mm/h calculée sur l'ensemble de la pluie (mesure de M. Amstutz, responsable de la station ISM). Mais des intensités allant jusqu'à 100 à 140 mm/h ont été enregistrées dans la plupart des stations automatiques Madd; des intensités de 170 mm/h (Paplemont, 14.8.90) et 320 mm/h (Théodoncourt, 27.6.90) ont même été atteintes sur des intervalles d'une minute (RWB SA, 1991).

### **Rôle mineur de la neige**

La neige joue un rôle mineur en Ajoie, surtout pour les cycles 1988-89 et 1989-90 au cours desquels la neige a été pratiquement inexistante: l'hiver 1989-1990 a été le plus pauvre des dix dernières années avec 14 cm alors que l'hiver 1990-91 se situe dans la moyenne avec 101 cm. La seule période où une fonte de neige a été à l'origine d'une crue a été celle de février 1991. Jusque là, les pluies ont été prédominantes.

## **b) Evaluation de la lame d'eau moyenne sur le bassin de l'Allaine**

### ***Période d'évaluation***

Pour l'évaluation du bilan global du bassin de l'Allaine, nous devons calculer la lame d'eau moyenne tombée lors des périodes qui nous intéressent. Nous pouvons faire des bilans depuis 1984, début des mesures de débit en continu. Au vu de l'hétérogénéité des pluies, cet exercice est délicat. Nous devons donc nous référer à la période 1989-1990 pour obtenir une estimation correcte de la répartition des pluies en Ajoie avec les 14 stations en service. Malheureusement, il paraît difficile d'extrapoler ensuite cette répartition aux années précédentes. En effet, nous considérons la période 1989 à 1991 comme peu représentative (période sèche, événements pluvieux exceptionnels de février et de juin 1990).

### ***Méthode de calcul la mieux adaptée***

Nous avons utilisé les méthodes de Thiessen et des isohyètes (base: fig. B.14 et B.15) pour approcher les bilans 1989-1990 et 1990-91 d'une manière optimale. La méthode des précipitations pondérées en fonction de l'altitude nous a paru inadaptée au cas de l'Ajoie, vu l'absence de corrélation entre les hauteurs de pluie et l'altitude. La méthode des isohyètes prend en effet en compte la répartition des pluies par tranche d'altitude alors que la méthode de Thiessen permet de déterminer des polygones d'influence autour de chaque station pluviométrique. La répartition de ces surfaces d'influence figure dans le tableau B.4.

### ***Lame d'eau moyenne selon différentes méthodes de calcul***

Les calculs effectués selon les deux méthodes de Thiessen et des isohyètes donnent une lame d'eau moyenne pratiquement identique (tab. B.4) pour 1989-90 et 1990-91, sur l'ensemble du bassin de l'Allaine. La moyenne arithmétique calculée sur 14 stations est légèrement inférieure (moins de 2%). En revanche, si l'on prend la moyenne des quatre stations pluviométriques en service depuis plus de 20 ans (ou seulement les trois stations ISM), nous obtenons des écarts plus grands pour l'année 1990-91. Le manque de recul nous empêche malheureusement de juger la valeur de ces écarts. En l'absence d'autres mesures, il est préférable d'utiliser la moyenne des quatre stations (ISM/F) plutôt que les valeurs d'une seule station (Fahy), davantage sujette à des fluctuations plus importantes pour quantifier la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin de l'Allaine, avant 1990. Ainsi, au cours des dix dernières années (hydrologiques), ce sont en moyenne 1192 mm de précipitations qui sont tombées sur la région (mais seulement 1054 mm pour Fahy!).

La répartition des précipitations estivales et hivernales montrent que les premières sont généralement plus importantes (période 1981-1991) et connaissent des fluctuations nettement plus grandes (425 à 845 mm en été contre 380 à 630 mm en hiver). L'année 1982-1983 fait exception à la première remarque (pluies hivernales plus importantes) alors que l'année 1988-1989 a connu l'équilibre entre les précipitations estivales et hivernales.

### ***Hétérogénéité spatiale des précipitations***

Des précipitations, nous retiendrons surtout une hétérogénéité spatiale importante au cours des averses, accentuée au niveau des infiltrations par l'hétérogénéité de la couverture du karst (zones à infiltration lente et zones à infiltration rapide et concentrée). Le manque de recul nous empêche malheureusement de confirmer la fiabilité des faibles écarts constatés. En l'absence d'autres mesures, nous utiliserons donc la moyenne des quatre stations pour une estimation de la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin de l'Allaine, avant 1990. Quant à la station de Fahy, elle sous-estime (en 1989-90) les précipitations sur l'ensemble du bassin, mais nous l'utiliserons néanmoins pour les calculs d'évapotranspirations, à cause de ses enregistrements météorologiques et de son altitude représentative du bassin versant de l'Allaine.

**Tableau B.4:**

*Stations pluviométriques sur le bassin de l'Allaine.*

*Précipitations pour les années hydrologiques 1989-1990 et 1990-1991;*

*lame d'eau calculée sur l'ensemble du bassin versant de l'Allaine.*

| STATION                                  |                         | SIGLE | ALT.<br>(m) | SURFACE<br>km <sup>2</sup> % |      | Pluie<br>89-90    | Pluie<br>90-91   | Pluie<br>91-92 | Pluie<br>92-93 |
|------------------------------------------|-------------------------|-------|-------------|------------------------------|------|-------------------|------------------|----------------|----------------|
| T                                        | Paplemont (1989)        | PAP   | 528         | 25.7                         | 14.2 | 1100              | 750              | 978            | 1048           |
| T                                        | Le Maira (1989)         | MAI   | 519         | 20.3                         | 11.2 | 1082              | 837              | 1183           | 1107           |
| T                                        | Bressaucourt (1989)     | BRE   | 550         | 19.1                         | 10.5 | 1124              | 923              | 1129           | 1072           |
| T                                        | Théodoncourt (1989)     | TEO   | 579         | 18.7                         | 10.3 | 1092              | 867 <sup>1</sup> | 1113           | 1122           |
| T                                        | Porrentruy (1989)       | PER   | 470         | 18.4                         | 10.2 | 905 <sup>1</sup>  | 702              | 847            | 943            |
| I                                        | Les Rangiers * (1967)   | RAN   | 856         | 18.2                         | 10.1 | 1159              | 979              | 1181           | 1380           |
| I                                        | Mormont1 * (1901)       | MOR1  | 540         | 13.6                         | 7.5  | 1128              | 923              | 1239           | 1176           |
| T                                        | Mormont2 (1989)         | MOR2  | 540         | 13.6                         | 7.5  | 1012              | 790              | 1013           | 1023           |
| T                                        | Vacherie Mouillard (89) | VAM   | 810         | 10.5                         | 5.8  | 1101              | 864              | 1099           | 1197           |
| T                                        | Courtemaîche (1989)     | COU   | 400         | 9.7                          | 5.4  | 1014              | 816              | 994            | 1073           |
| T                                        | Buisson Galant (1989)   | BUG   | 527         | 9.5                          | 5.3  | 898 <sup>1</sup>  | 662 <sup>2</sup> | 827            | 906            |
| T                                        | Rocourt (1989)          | ROC   | 509         | 7.9                          | 4.4  | 1093 <sup>2</sup> | 920              | 1112           | 1189           |
| I                                        | Fahy (1957)             | FAH   | 596         | 5.3                          | 2.9  | 1005              | 833              | 1004           | 1087           |
| T                                        | Mont de Coeuve (1989)   | MOC   | 537         | 4                            | 2.2  | 956 <sup>3</sup>  | 718              | 885            | 971            |
| F                                        | Joncherey (1961)        | JON   | 387         | 0.1                          | <0.1 | 981               | 825              | —              | —              |
| TOTAL méthode Thiessen                   |                         |       |             |                              |      | 1058              | 826              | 1138           | 1182           |
| TOTAL méthode isohyètes                  |                         |       |             |                              |      | 1055              | 825              |                |                |
| Moyenne arithmétique toutes les stations |                         |       |             |                              |      | 1043              | 821              | 1043           | 1092           |
| Moy. arithmétique (FAH-MOR-RAN-JON)      |                         |       |             |                              |      | 1068              | 895              |                |                |
| Moy. arithmétique ISM (FAH-MOR-RAN)      |                         |       |             |                              |      | 1097              | 919              | 1141           | 1214           |

T: Pluviographe Madd réseau Transjurane (auget basculant)

I: Pluviomètre Institut Suisse de Météorologie

F: Pluviomètre Météo-France

\*: Totalisateur journalier

<sup>2</sup>: Lacune sur 2 mois, somme annuelle par interpolation entre les stations.

(1989): Date de mise en service de la station

### **Corrections absolues des hauteurs de pluie**

En valeur absolue, les hauteurs de précipitations mesurées dans l'ensemble des stations sont sous-estimées. Selon l'atlas hydrologique de la Suisse (1992), différentes corrections dues à des erreurs systématiques doivent être effectuées consécutivement:

- à des pertes dues aux vents (3-80% selon la force du vent), selon l'exposition de la station;
- au mouillage des parois du pluviomètre (env. 0.3 mm/j de pluie);

Pour l'Ajoie, une hauteur d'eau d'environ 100 mm devrait être ajoutée aux valeurs annuelles des stations ISM de Fahy et de Mormont. Pour le réseau N16, les corrections sont plus importantes. Etant données les valeurs plus faibles mesurées avec un pluviographe à auget, la correction est plus importante, de 20 à 25% probablement. En l'absence de recul suffisant, les hauteurs de précipitations mesurées par les stations N16 ont essentiellement une valeur au niveau de la répartition spatiale des précipitations et des événements ponctuels.

### 3.1.3 Pluies efficaces

Le but du chapitre 1 n'était pas d'étudier les précipitations, l'évapotranspiration, la température de l'air, mais bel et bien d'approcher quantitativement et qualitativement l'apport de chacun de ces éléments pour les systèmes étudiés. La température et l'oxygène-18 sont de très bons traceurs naturels pour évaluer la rapidité des infiltrations et du transit à travers l'aquifère. Le bilan des précipitations (P) et de l'évapotranspiration (E) nous permet d'estimer les pluies efficaces ( $P_e$ ) infiltrées dans les aquifères selon l'équation:

$$P_e = P - E$$

Les valeurs sont exprimées en mm/an (lame d'eau annuelle).

Une partie importante des précipitations est soustraite des débits aux exutoires et repart dans l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration (évaporation, utilisation de l'eau par la végétation). L'estimation de l'évapotranspiration permet d'effectuer le bilan d'un bassin versant, d'expliquer la différence entre entrées et sorties et d'observer d'éventuelles pertes de débits (bilan déficitaire).

#### **Méthodes utilisées**

Les calculs d'évapotranspiration sont basés sur les données de Fahy. Ils ont été effectués depuis 1984, année coïncidant avec le début des enregistrements du débit de l'Allaine à Boncourt. Les méthodes de Turc (ETR) et de Thornthwaite (ETP) ont été utilisées.

La méthode de Turc donne l'évapotranspiration réelle (ETR) alors que celle de Thornthwaite indique l'évapotranspiration potentielle (ETP). Cette dernière correspond à l'évaporation maximale. ETP est toujours supérieure ou égale à ETR. ETP est égale à ETR tant que la pluie est excédentaire. Lorsque le déficit hydrique du sol atteint 100%, l'évapotranspiration réelle devient inférieure à l'évapotranspiration potentielle.

Pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle, la formule de Thornthwaite donne un bilan mensuel de l'évapotranspiration, en fonction de l'index calorifique annuel et de la température moyenne mensuelle (annexe 1). Pour l'évapotranspiration réelle, nous avons retenu la formule de Turc, basée sur les précipitations et la température moyenne annuelle.

#### **Importance des précipitations estivales pour ETR**

L'évapotranspiration étant effective surtout durant l'été, l'évapotranspiration réelle devrait être surtout influencée par l'importance des précipitations estivales, celles qui fluctuent le plus. Ni la méthode de Turc, ni la méthode de Thornthwaite ne prennent en compte ce facteur. Turc considère cependant les précipitations annuelles et ces dernières sont (en général) plus directement liées aux précipitations estivales (58% des précipitations annuelles). C'est pour cette raison que la méthode de Turc sous-estime probablement l'ETR. En principe, la formule Thornthwaite donne des valeurs maximales (évapotranspiration potentielle).

**Pour le calcul des bilans, nous avons retenu une valeur moyenne entre les deux méthodes. De cette manière, l'évapotranspiration se situe généralement entre 500 et 550 mm/an (tab.B.5). La variation des valeurs d'évapotranspiration est relativement faible par rapport à celle des précipitations. L'écart type sur les valeurs d'évapotranspiration de 1984 à 1991 atteint 24 mm pour Thornthwaite et 21 mm pour Turc.**

Les pluies efficaces sur Fahy sont de l'ordre de 48 % des précipitations totales, avec des fluctuations allant de 37 à 60%. Les minima - moins de 40% - se sont produits en 1988-89 et 1990-91. Avec environ 300 mm de pluies efficaces, l'année 1990-91 n'a pas atteint la moitié des pluies efficaces de l'année 1986-87, pour

une évapotranspiration semblable! Le débit de l'Allaine ne varie pas dans des proportions aussi importantes pour ces deux années (62 % au lieu de 40%).

**Tableau B.5:**  
*Evapotranspiration et pluies efficaces à Fahy*

| ANNEE          | TURC<br>ETR | THORNTHWAITE<br>ETP | ETR<br>moyenne | PLUIE<br>Fahy | PLUIE EFFICACE |             |
|----------------|-------------|---------------------|----------------|---------------|----------------|-------------|
|                | mm          | mm                  |                |               | mm             | %           |
| 1984-85        | 469         | 556                 | 512            | 884           | 372            | 42.1        |
| 1985-86        | 465         | 534                 | 500            | 1064          | 564            | 53.0        |
| 1986-87        | 489         | 550                 | 520            | 1287          | 767            | 59.6        |
| 1987-88        | 512         | 582                 | 547            | 1139          | 592            | 52.0        |
| 1988-89        | 490         | 595                 | 543            | 878           | 335            | 38.2        |
| 1989-90        | 510         | 597                 | 553            | 1005          | 452            | 45.0        |
| 1990-91        | 462         | 582                 | 522            | 833           | 311            | 37.3        |
| <b>1984-91</b> | <b>485</b>  | <b>571</b>          | <b>528</b>     | <b>1013</b>   | <b>485</b>     | <b>47.9</b> |

**3.1.4 Qualité des apports atmosphériques**

**a) Température**

Une équation liant la température à l'altitude a été établie pour le nord de la Suisse avec, comme base, une température moyenne de 10.6°C à 0 m (Bider, 1978) et un gradient de 0.5°C/100 m (Schüepp, 1960 et Kirchhofer, 1982):

$$T = 10.6 - 0.005 h$$

T: température en °C  
h: altitude en mètre

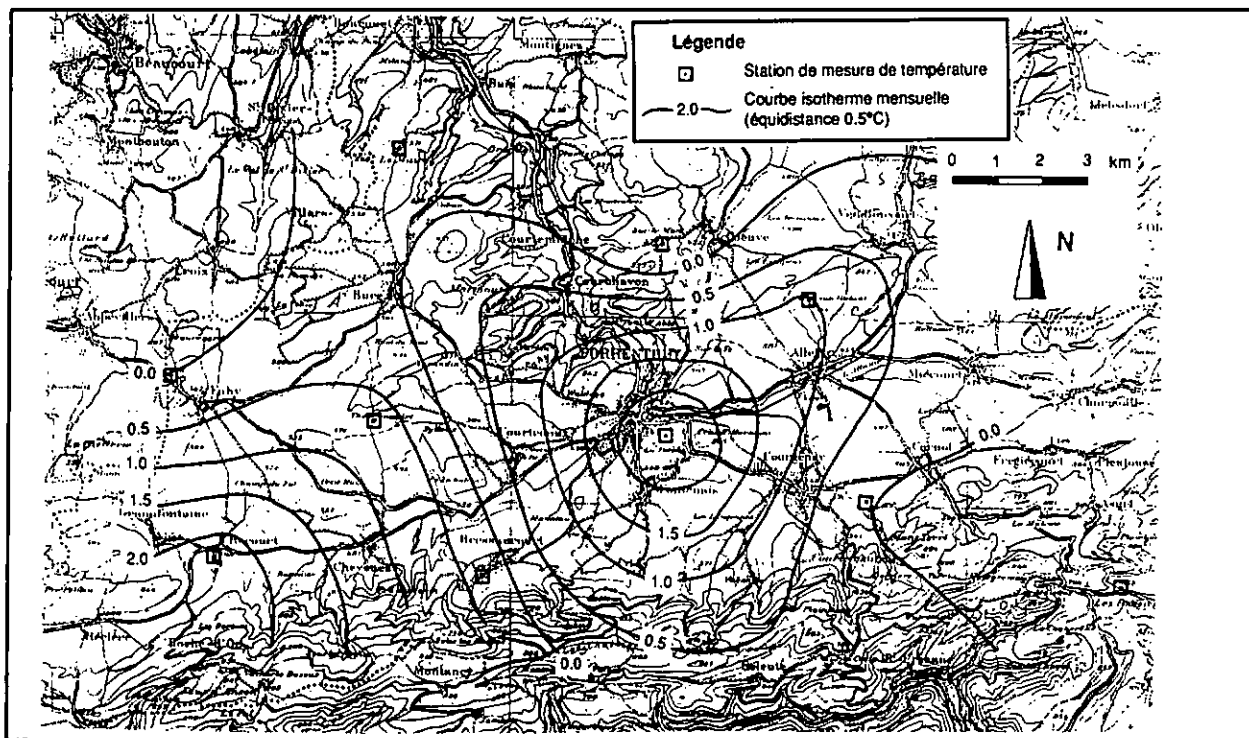
D'après cette équation, la température de Fahy devrait se situer à 7.6 °C et celle des Rangiers à 6.35 °C. Ce sont pratiquement les valeurs prises comme températures pluriannuelles par l'ISM (7.5 et 6.5°C). Ces températures sont faibles (env. -1°C) en regard des moyennes calculée sur l'ensemble de la période d'activité de ces stations (1981-1991): 8.5°C pour Fahy et 7.3°C pour les Rangiers, soit un gradient de 0.46°C/100 m, conforme à l'équation. La température mesurée à Fahy sera utilisée par la suite comme référence

**Hétérogénéité spatiale des températures**

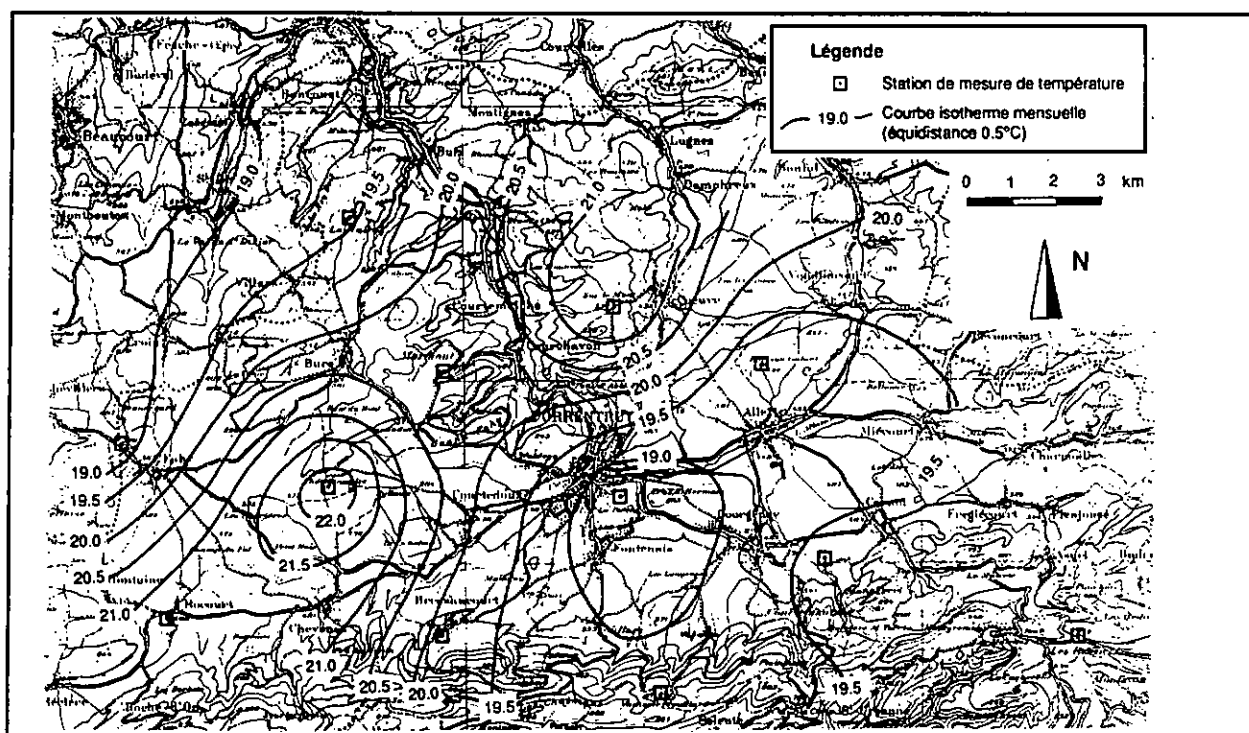
Sur d'autres sites, la différence avec la théorie peut varier selon l'influence des microclimats. La comparaison des températures de Fahy avec deux stations de mesures situées près de Cornol (à 625 m) et près de Porrentruy (à 500 m) indiquent des écarts parfois importants. Tout comme les précipitations, la relation entre température et altitude est donc mauvaise: la répartition des températures est hétérogène sur l'ensemble de la région. Les microclimats sont fréquents en Ajoie, de même que les inversions de température. De plus, les différences d'altitude sont relativement faibles d'une station à l'autre: rappelons que 90% du bassin se trouve en dessous de 650 m d'altitude.

Les stations pluviométriques ne possèdent pas toutes un enregistrement continu des températures. Pour les stations N16 (annexe 3.1), nous possédons les températures minimales et maximales journalières, à partir desquelles sont calculées les moyennes journalières puis mensuelles et annuelles. Ces données ont aussi été utilisées en complément des mesures plus fiables des thermographes. Cela donne une vision

plus globale de la répartition des températures en Ajoie. Sur la carte de décembre 1990 (fig. B.16), une anomalie froide est nettement visible sur Porrentruy (effet "cuvette"). En été (août 1990, fig. B.17), le phénomène se répète et des maxima sont observables sur les plateaux de Coeuvre et de Bure.



**Figure B.16**  
Températures moyennes mensuelles en Ajoie, décembre 1990. Courbes isothermiques.



**Figure B.17**  
Température moyenne mensuelle en Ajoie, août 1990. Courbes isothermiques.

**Tableau B.6:**

*Station de Fahy: températures moyennes annuelles et saisonnières, comparées aux précipitations annuelles.*

| ANNEE          | P (mm)      | T (°C)     | T hiver    | T été       |
|----------------|-------------|------------|------------|-------------|
|                | mm          | °C         | °C         | °C          |
| 1981-82        | 1276        | 8.62       | 2.9        | 14.3        |
| 1982-83        | 1179        | 9.13       | 3.7        | 14.6        |
| 1983-84        | 993         | 7.50       | 2.2        | 12.8        |
| 1984-85        | 884         | 7.97       | 2.2        | 13.8        |
| 1985-86        | 1064        | 7.58       | 1.0        | 14.2        |
| 1986-87        | 1287        | 7.95       | 2.2        | 13.7        |
| 1987-88        | 1139        | 9.11       | 4.1        | 14.2        |
| 1988-89        | 878         | 9.46       | 4.3        | 14.6        |
| 1989-90        | 1005        | 9.53       | 4.6        | 14.5        |
| 1990-91        | 833         | 8.48       | 2.9        | 14.1        |
| <b>MOYENNE</b> | <b>1054</b> | <b>8.5</b> | <b>3.0</b> | <b>14.1</b> |

T: température (en °C)

P: précipitations (en mm/an)

### **Evolution générale des températures**

Les années 1987-88 à 1989-90 couvrant l'étude sont des années plus chaudes avec des températures oscillant entre 9 et 9.5°C (9.37°C en moyenne). Les années 1983-84 à 1986-87 ont été nettement plus fraîches, avec des valeurs toutes inférieures à 8°C (7.68°C en moyenne, tab. B.6). Ces valeurs ne peuvent être mises en relation directe avec les hauteurs de précipitations (tableau B.6 et fig. B.12).

Dans l'évolution plurimensuelle des température à Fahy (1984-90), le minimum se situe en janvier (février ou décembre selon l'année) et le maximum en juillet (août). Excepté durant l'été 1984, **la température moyenne estivale est relativement stable à 14°C (+/- 0.5°C)**. **Les fluctuations de la température moyenne annuelle sont donc essentiellement provoquées par les températures hivernales**. Ainsi, les quatre années dont les températures moyennes sont inférieures à 8°C ont connu des hivers plus froids, avec des températures inférieures à 2.5°C. A l'opposé, les années "chaudes" (plus de 9°C) ont eu des températures hivernales proches ou supérieures à 4°C.

### **Comparaison des températures de l'air et du sol**

A Fahy (voir 3.1.1), la température de l'air mesurée près du sol (à 5 cm) est toujours inférieure à celle de l'air mesurée à 1.5 m (env. 0.5°C). Par contre, **les températures mesurées dans le sol sont toujours supérieures à celles de l'air** (tab.B.7). Les écarts atteignent 1 à 2°C en moyenne annuelle.

On constate également que la température moyenne à 5 cm diffère très peu de celle enregistrée à 50 cm de profondeur (+ 0.2°C). Les variations saisonnières mesurées à 50 cm se superposent pratiquement à celles de l'air. Les fluctuations de la température de l'air sont enregistrées dans le sol avec quelques jours de retard (1-3 jours).

**Tableau B.7:**

*Station de Fahy: températures moyennes annuelles de l'air et du sol*

| Cycle   | Température air (°C) |      | Température sol (°C): profondeurs |       |       |       |
|---------|----------------------|------|-----------------------------------|-------|-------|-------|
|         | 1.5 m                | 5 cm | 5 cm                              | 10 cm | 20 cm | 50 cm |
| 1988-89 | 9.46                 | 9.02 | 10.86                             | 10.72 | 10.71 | 10.67 |
| 1989-90 | 9.53                 | 9.04 | 11.00                             | 10.88 | 10.87 | 10.82 |

#### b) Analyses isotopiques

Les isotopes ont pu être mesurés tout au long de l'étude à une altitude comparable à l'altitude moyenne du bassin versant de l'Allaine et des principaux bassins versants karstiques (station pluviométrique de Mormont, voir résultats en annexe 3). Ce sont surtout les valeurs très basses mesurées pour l'oxygène-18 dans la neige qui nous fournissent une bonne connaissance des entrées lors d'une crue en février 1991 (voir 1.3.4.e.). Les écarts sont très importants entre les entrées estivales (-5.65 à 7.74 ‰) et les entrées hivernales (-8.65 à -10.0 ‰). Ces écarts peuvent être utilisés pour interpréter les temps de séjours dans les eaux souterraines.

Les valeurs parfois élevées de Tritium au printemps pourraient donner un bon signal d'entrée, nous ne l'avons cependant pas exploité dans le cadre de cette étude.

#### c) Analyses chimiques

Des analyses ont été effectuées sur les précipitations mensuelles de Mormont, pour la période 1988-1990 (27 analyses).

La conductivité électrique oscille entre 30 à 60  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , avec une valeur moyenne de 37  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour Mormont. Le potassium et le sodium ont des concentrations inférieures à 1 mg/l (moyennes de 0.5 et 0.4 mg/l), alors que les sulfates ont des fluctuations importantes (2 à 16 mg/l) et une moyenne à 5 mg/l. Les chlorures (1 mg/l) et les nitrates (2.3 mg/l) fluctuent dans de plus faibles proportions. L'acidité des pluies a également été régulièrement mesurée, mais à St-Ursanne, de 1982 à 1991. Les fluctuations sont très importantes, avec des pH entre 3 et 9, pour une moyenne d'environ 6 pour les années 1988 à 1991. Une acidité particulièrement forte a été mesurée sur la neige.

#### d) Pollution des eaux de pluie

Des polluants ont aussi été mesurés, avec des teneurs plus élevées sur la neige (20.2.87): substances organiques (14 mg/l), phénols (0.2 mg/l), hydrocarbures (1.5 mg/l). Pour l'évaluation des apports atmosphériques de solvants chlorés dans les eaux souterraines, une vingtaine d'analyses ont été effectuées sur 4 sites: Alle, Courtemaîche, Courtedoux et Porrentruy. La contamination est relativement homogène d'un site à l'autre, avec des pointes relativement élevées, jusqu'à 15  $\mu\text{g}/\text{l}$  de trichloréthylène! Une charge moyenne évaluée à 3  $\mu\text{l}$  et une pluviométrie annuelle de 1100 mm permettent de calculer l'apport de solvants chlorés par les pluies: il s'élève à environ 2.2  $\text{kg}/\text{km}^2/\text{an}$  dans la région de Porrentruy, mais sans grandes conséquences pour les eaux souterraines.

L'origine des pollutions est essentiellement anthropogène. Pour les solvants, elle provient de l'évaporation directe de ces produits dans les industries, du "stripping" dans les cours d'eau (dégazage par brassage) et de l'évaporation à partir des décharges. Certes, les concentrations de solvants chlorés mesurées dans les eaux de pluies sont significatives, mais elles ne sont pas suffisantes pour expliquer la pollution des eaux souterraines par ces éléments

## 3.2 Sorties

### 3.2.1 Débits de l'Allaine à Boncourt

#### a) Stations de mesures

L'Allaine est la rivière principale de l'Ajoie. Elle draine l'ensemble des cours d'eau superficiels de la Baroche à Boncourt. L'Allaine fonctionne également comme une zone d'exutoire des eaux souterraines sur plus de 29 km. Sa zone d'influence atteint environ 182 km<sup>2</sup> (bassin versant hydrogéologique).

Les trois secteurs de l'Allaine déterminés au chapitre 1.1 ont des stations de mesure des débits à Alle, Courchavon et Boncourt:

- La station située le plus en amont, à Alle, a été implantée par l'OEPN<sup>1</sup> en 1985. Elle fournit les débits de l'Allaine du secteur supérieur (25% du bassin), à forte densité de drainage.
- L'OEPN a également installé une station de mesures à Courchavon en 1985. Ce site représente l'ensemble des débits des secteurs supérieurs et moyens de l'Allaine, immédiatement en aval de Porrentruy (trois quarts du bassin de l'Allaine).
- Exploitée depuis 1984 par le SHGN<sup>2</sup>, la station de Boncourt fait l'objet de jaugeages réguliers et ses débits sont publiés chaque année dans l'annuaire hydrologique de la Suisse. Les débits mesurés représentent la totalité des eaux infiltrées sur le bassin versant hydrogéologique de l'Allaine.

**La station de mesure de Boncourt représente donc la station principale qui fournit le débit total du bassin versant de l'Allaine, tel qu'il est décrit dans cette étude.**

Pour les besoins de l'EIE N16, d'autres stations, dont certaines équipées de seuils, ont été implantées tout au long de l'Allaine, entre Alle et Boncourt. Chaque station possède un acquiseur de données Madd (Etrélec) et une sonde pression. Les stations placées entre Alle et Porrentruy doivent quantifier les pertes du cours d'eau. Celles situées en aval de Porrentruy sont dotées de sondes triples CTP (conductivité, température, pression), avec comme objectif de mieux comprendre les relations rivière-aquifères alluviaux. Ces données sont en cours de traitement.

L'ensemble des débits (y compris ceux de la station fédérale) sont peu fiables en valeur absolue et sujets à une marge d'erreur relativement importante (plus de 10%). L'installation de seuils de jaugeage a peut-être même provoqué des erreurs supplémentaires (déviation des débits, écoulements sous les seuils, etc...). Cependant, faute de mieux, nous utilisons les données disponibles tout en étant bien conscient qu'il faut relativiser les résultats.

#### b) Allaine à Alle

L'Allaine à Alle recueille les eaux de la Baroche et du versant nord du Mont-Terri jusqu'au ruisseau du Jonc (Courtemaury). La surface drainée représente environ 42 km<sup>2</sup> et les débits moyens varient entre 350 l/s (1989) et 825 l/s (1986). Les débits moyens de 1985 à 1990 atteignent 600 l/s, soit 18.5% du débit de l'Allaine à Boncourt pour la même période alors que le bassin versant a paradoxalement une proportion de surface plus élevée (23%). La différence peut être provoquée par plusieurs facteurs:

- les débits de l'Allaine à Alle sont sous-estimés (mais les débits de Boncourt le sont aussi);
- une partie des eaux d'infiltration du bassin supérieur ne rejoint l'Allaine qu'en aval de Alle;

- la forte densité de drainage entraîne probablement une évaporation supplémentaire de l'eau superficielle.

### c) Allaine à Courchavon

L'Allaine à Courchavon draine l'ensemble des bassins situés en amont de Porrentruy, (Beuchire, Betteraz, Voyeboeuf, Bonne-Fontaine ajouté aux débits de Alle). La surface du bassin représentatif atteint 137 km<sup>2</sup>, soit les trois quarts du bassin de l'Allaine à Boncourt. Bien que la station de mesure soit installée en 1985, les débits ne sont exploitables que depuis 1987 pour l'ensemble d'une année. Le débit moyen (2405 l/s) atteint 75 % du débit à Boncourt pour une surface d'influence similaire (voir tab.B.8). Le débit spécifique pour la station de Courchavon (17.6 l/s/km<sup>2</sup>) est très proche de celui de Boncourt (17.7 l/s/km<sup>2</sup>), pour la période 1987-1991. Les débits étudiés à Boncourt reflètent bien le comportement de l'ensemble du bassin versant de l'Allaine. Les débits mesurés à Boncourt sont probablement trop faibles. Des comparaisons avec des débits ponctuels de l'Allaine à Buix ont montré des pertes de l'ordre de 10% entre ces deux stations, sans compter les apports karstiques estimés en aval à 300 l/s (moyenne annuelle).

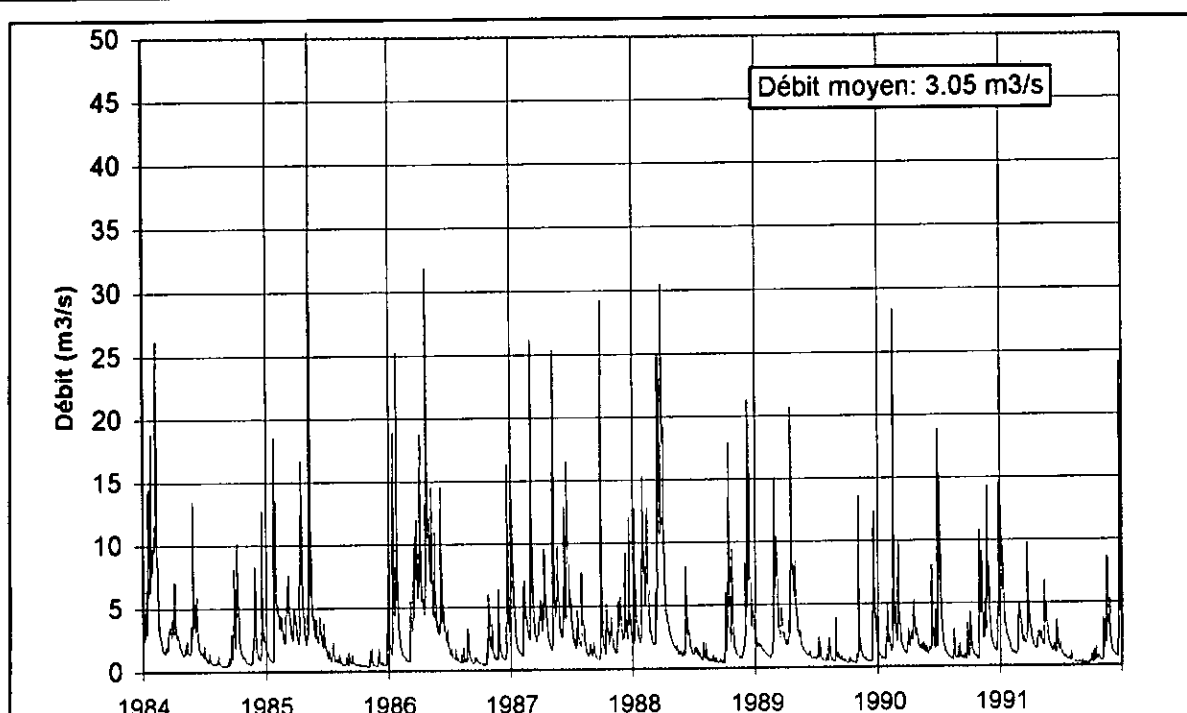
**Tableau B.8:**

*Synthèse des débits de l'Allaine à Alle et Courchavon, comparés à ceux de Boncourt.*

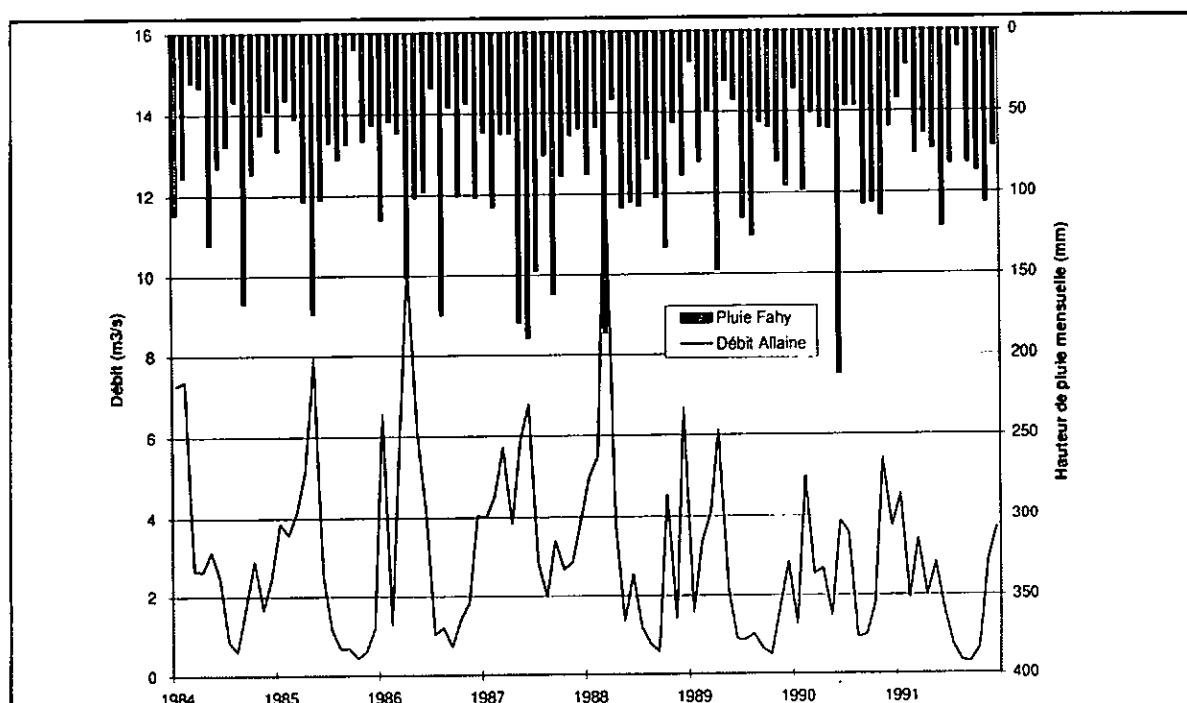
|                                             | <b>ALLE</b>                      |                               | <b>COURCHAVON</b>                |                               | <b>BONCOURT</b>                  |
|---------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| <b>ANNEE</b>                                | <b>débit<br/>[l/s]</b>           | <b>% Allaine<br/>Boncourt</b> | <b>débit<br/>[l/s]</b>           | <b>% Allaine<br/>Boncourt</b> | <b>débit<br/>[l/s]</b>           |
| <b>1985</b>                                 | 568                              | 21                            | --                               | --                            | 2670                             |
| <b>1986</b>                                 | 824                              | 22                            | --                               | --                            | 3720                             |
| <b>1987</b>                                 | 722                              | 18                            | 3129                             | 78                            | 4020                             |
| <b>1988</b>                                 | 611                              | 16                            | 2735                             | 71                            | 3860                             |
| <b>1989</b>                                 | 353                              | 17                            | 1735                             | 83                            | 2100                             |
| <b>1990</b>                                 | 508                              | 18                            | 2020                             | 70                            | 2870                             |
| <b>1991</b>                                 | --                               | --                            | 1760                             | 78                            | 2270                             |
| <b>1987-90</b>                              | 549                              | 17                            | 2405                             | 75                            | 3213                             |
|                                             | <b>Aire<br/>[km<sup>2</sup>]</b> | <b>% total<br/>Allaine</b>    | <b>Aire<br/>[km<sup>2</sup>]</b> | <b>% total<br/>Allaine</b>    | <b>Aire<br/>[km<sup>2</sup>]</b> |
| <b>Bassin versant</b>                       | 42                               | 23                            | 137                              | 75                            | 182                              |
| <b>Débit spéc.<br/>[l/s/km<sup>2</sup>]</b> | 13.1                             |                               | 17.6                             |                               | 17.7                             |

### d) Allaine à Boncourt.

Le débit moyen de l'Allaine (entre 1984 à 1991, fig. B.18) est de 3.06 m<sup>3</sup>/s. Les débits enregistrés durant cette période oscillent entre 370 l/s et 55 m<sup>3</sup>/s (1985). Un débit d'environ 90 m<sup>3</sup>/s a même été estimé lors de la grande crue du 27 mai 1983 (crue centennale), durant laquelle le trop plein supérieur des grottes de Milandre était en activité. Le débit spécifique moyen est de l'ordre de 17 l/s.km<sup>2</sup>, avec des extrêmes allant de 1.8 à 275 l/s.km<sup>2</sup>.



**Figure B.18**  
Allaine à Boncourt: évolution des débits journaliers de 1984 à 1991.



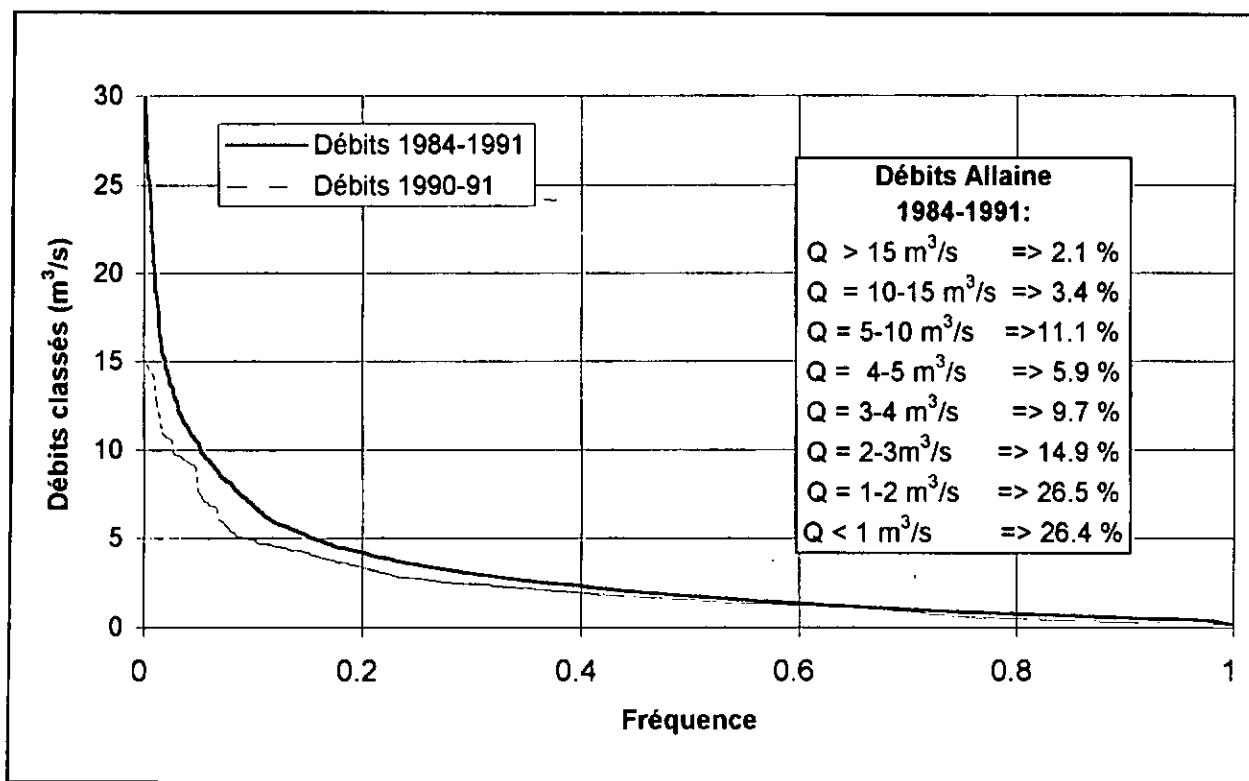
**Figure B.19**  
Allaine à Boncourt: évolution des débits mensuels comparés aux précipitations mensuelles de Fahy, de 1984 à 1991

La représentation des débits mensuels en moyennes interannuelles indique que **les débits maximaux surviennent en mars et les débits minimaux en août**. Les précipitations avaient des valeurs maximales mai/juin et minimales en novembre/février (cf. 1.2.a). Les écarts entre précipitations et débits sont causées par une importante évapotranspiration (fig. B.23). Le régime d'écoulement de l'Allaine est approché par l'analyse statistique des débits.

**Tableau B.9:**

Distribution des débits de l'Allaine à Boncourt entre 1984 et 1991.

| Débit (m <sup>3</sup> /s) | >10  | >5    | >1    | >7.2 | >3.7 | >1.86 | >0.64 | >0.48 |
|---------------------------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| Proportion                | 5.6% | 16.7% | 73.6% | 10%  | 25%  | 50%   | 90%   | 97%   |
| Nombre de jours           | 20   | 61    | 269   | 36   | 91   | 182   | 328   | 355   |



**Figure B.20**

Allaine à Boncourt. Débits classés de 1984 à 1991 ainsi que pour l'année hydrologique 1990-91. Le débits moyen atteint 3.04 m<sup>3</sup>/s

La représentation des débits classés de l'Allaine de 1984-1990 (fig. B.22) permet de définir des débits caractéristiques dépassés durant x jours par an (tab. B.9). Nous relèverons notamment:

- le débit caractéristique d'étiage dépassé 347 j/an ( $Q_{347}$ ), inférieur à 500 l/s (2.75 l/s/km<sup>2</sup>)
- le débit caractéristique maximum (DCM, dépassé 10 j/an), supérieur à 13.6 m<sup>3</sup>/s (75 l/s/km<sup>2</sup>)
- les débits les plus fréquents sont situés entre 1 et 2 m<sup>3</sup>/s (26.4 %) des débits, ils ne représentent que 12 % du volume écoulé.
- 30% des débits sont supérieurs à la moyenne pluriannuelle.

### 3.2.2 Débits des principales sources karstiques

#### a) Obtention des débits

##### Problèmes de mesures

Les mesure des débits des sources karstiques étudiée se sont heurtées à des obstacles difficilement surmontables:

- configuration de l'exutoire (grand bassin) ne permettant pas une grande sensibilité des niveaux (La Beuchire, La Bonne-Fontaine)
- accès difficile de l'exutoire (chambre de captage: Le Pâquis, La Font)
- très faible distance entre l'exutoire et la rivière (Le Betteraz, La Fontaine, La Beuchire, Le Pâquis)
- arrivées diffuses entre l'exutoire et la rivière (Le Betteraz, La Fontaine, La Beuchire)
- mise sous tuyau du trajet exutoire - rivière (Le Betteraz, La Beuchire, Le Pâquis, La Font)

Les principaux exutoires karstiques d'Ajoie ont été équipées d'acquisiteurs de données Madd et de sondes triples (pression-conductivité-température). Etant donné la situation difficiles des exutoires, la méthode des jaugeages chimiques était la plus adaptée. Ils ont été effectués pour transformer les hauteurs d'eau enregistrées par les Madd en débit. Les courbes de tarage ainsi établies sur les sources du Voyeboeuf, de la Bonne-Fontaine, de la Beuchire et du Betteraz ont ainsi permis d'obtenir une chronique des débits pour chaque source. Les enregistrements du Betteraz n'ont pu être faits que sur à peine une année (cycle hydrologique 1989-1990 raccourci).

Les courbes de tarage ont été établies dans leur intégralité grâce à des jaugeages chimiques sur les sources de la Beuchire, du Betteraz et du Voyeboeuf.

#### ***Incertitude sur les débits de La Beuchire***

L'incertitude liée aux débits de La Beuchire devient importante dans les faibles débits (moins de 120 l/s) et dans les débits de hautes eaux (plus de 1000 l/s). Dans le premier cas, une partie des débits échappe à la mesure de la hauteur dans le bassin et s'écoulent en aval: pour un débit de 80 l/s, la hauteur d'eau de septembre 1991 ne valait plus que la moitié de celle de septembre 1990! Dans le deuxième cas, les jaugeages sont difficiles à mettre en oeuvre étant donné les vitesses d'écoulement et la pression dans les tuyaux d'évacuation des eaux de la source. Durant la première phase des enregistrements continus (juin-novembre 1989), des modifications ont été apportées sur les seuils, à la suite des travaux effectués sur l'Allaine. La situation s'est normalisée dès novembre 1989, mais les débits de crues de la Beuchire ne se sont stabilisés que 5 mois plus tard. Il reste encore une inconnue sur les débits de crue, essentiellement ceux issus du Creugenat et difficiles à mesurer ou à estimer. D'autres apports viennent s'ajouter au débit temporaire du Creugenat:

- pérennes pour les sources de La Chaumont et Masset
- temporaires pour les autres exutoires de crues situés à Courtedoux.

#### ***Débits du Betteraz en basses et moyennes eaux***

Les débits du Betteraz ne sont disponibles que pour la période du 20.9.89 au 7.9.90 (début des travaux de captage). Les hydrogrammes existants depuis 1985 n'ont malheureusement pas pu être transformés en débits. Ceux dépassant 450 l/s deviennent très imprécis à cause du débordement de l'exutoire dans les prés. Les jaugeages chimiques effectués en hautes eaux rencontrent les mêmes problèmes qu'à la Beuchire: vitesses élevées et mise sous pression dans le tuyau d'évacuation à la rivière..

#### ***Envasement du flotteur au Voyeboeuf (étiage)***

Les hydrogrammes du Voyeboeuf (limnigraphe à flotteur à la source pérenne) sont peu précis. Ils existent cependant depuis 1987 et couvrent toute l'étude. Les jaugeages ont eu lieu dans des conditions de moyennes eaux. Les débits de certaines périodes sont surestimés à cause de l'envasement progressif du flotteur, généralement lors des phases de basses eaux. L'interprétation des courbes de tarissement est de ce fait très problématique.

#### ***Débits du ruisseau Le Bacavoine pour La Bonne-Fontaine***

Pour la source de La Bonne-Fontaine, la station limnigraphique a été installée sur le ruisseau du Bacavoine, 400 m en aval de la source. Le débit réel de la source n'est donc pas connu avec précision, vu les possibilités de pertes ou d'apports sur ce trajet. Lorsque la source a tari, le ruisseau coule encore

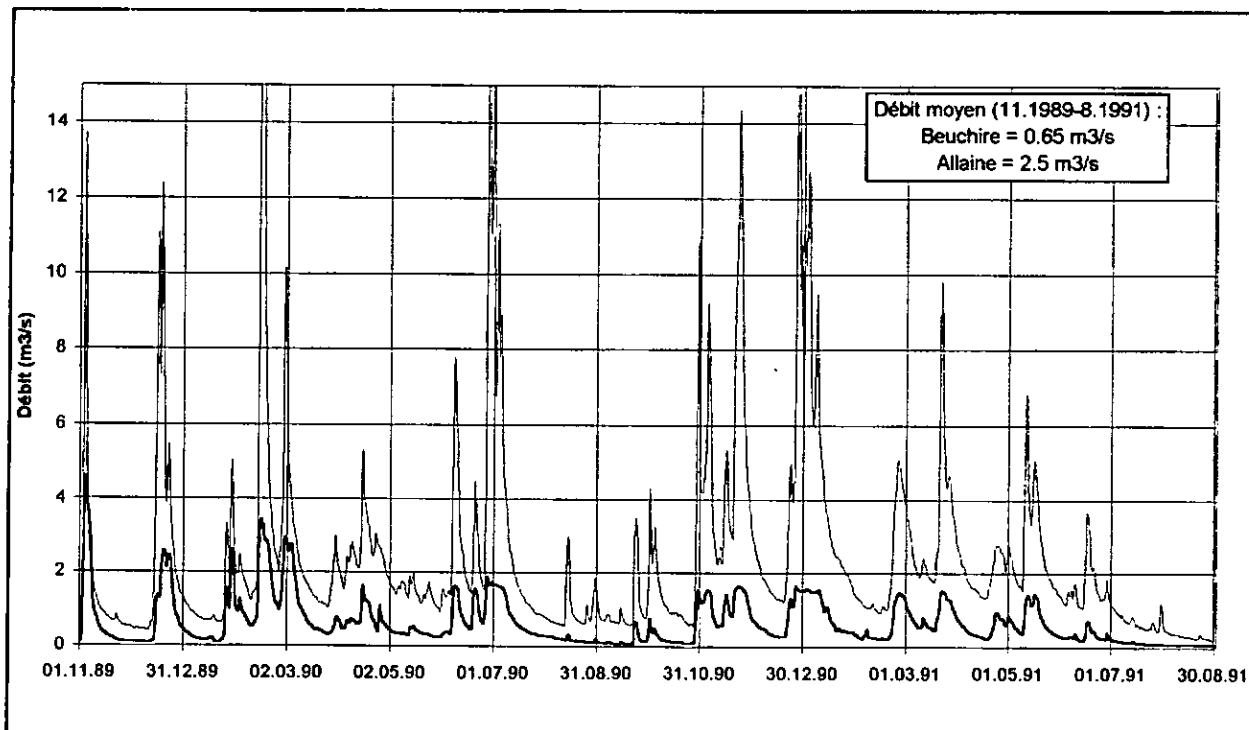
grâce à des apports reçus en aval. En revanche, des jaugeages ont démontré des pertes sur certains secteurs du ruisseau. De plus, l'utilisation de la source comme approvisionnement de Fontenais (en eau potable, env. 20 l/s) n'est pas comptabilisée dans les débits mesurés sur le Bacavoine. Le limnigraphe (à flotteur) du Bacavoine, installé dans un bassin (à l'aval d'un seuil), n'a qu'une sensibilité très relative. Il est relayé par une sonde pression installée en amont du seuil en novembre 1988. Différents types de jaugeages ont été réalisés, généralement dans de bonnes conditions. Ainsi, la courbe de tarage établie sur le Bacavoine est très satisfaisante. Nous devons compter sur une imprécision de 1 cm pour la mesure des niveaux, ce qui nous amène à une marge d'erreur sur les débits de 10 à 15%.

Les débits de la source de la Fontaine sont peu fiables. Mesurés à la source même, ils sont beaucoup trop faibles (3 à 4 fois!) par rapport aux débits mesurés antérieurement (CSD, 1973). La construction d'une dalle en béton pour améliorer les jaugeages a eu pour malheureux effet de dévier une part importante des débits vers l'aval. Des jaugeages chimiques ont été effectués ultérieurement par le bureau MFR SA. (mai 1992). Ils confirment cet état de fait. Une courbe de tarage établie dans ces conditions est inutilisable. De plus, une seule courbe est illusoire pour cette source, dont le niveau est très sensible aux fluctuations de l'Allaine: à hauteur identique, les débits peuvent s'écarter sensiblement si le niveau de l'Allaine diffère.

#### b) Débits moyens

Les débits des principales sources sont résumés dans le tableau B.10.

Durant la période d'enregistrement des débits du Betteraz et de la Beuchire (1989-90), le débit moyen de l'Allaine a atteint 2.5 m<sup>3</sup>/s, nettement inférieur à la moyenne. Les conditions d'observation des bassins karstiques se sont donc effectuées dans des situations assez particulières. La situation n'a guère évolué au cours de l'année 1991.



**Figure B.21**

*La Beuchire - Porrentruy. Evolution des débits de 1989 à 1991.*

**La Beuchire** (fig. B.21) est la plus importante source karstique d'Ajoie, avec un débit moyen (1989-1990) d'environ 685 l/s. C'est le principal exutoire pérenne de la rivière souterraine l'Ajoulotte. Les apports issus

des émissions du Creugenat (crue) n'ont pas été pris en compte dans le débit moyen de la Beuchire, en l'absence de mesures fiables. Au cours de l'année hydrologique 1989-1990 (nov.-oct), le Creugenat a ainsi débordé et déversé ses eaux dans l'Allaine pendant environ 30 jours. Nous estimons ses apports à environ 50 l/s. Notons que la source de la Doue dont le bassin jouxte celui de la Beuchire, a un débit moyen 1989-90 de 285 l/s.

Les sources karstiques du **Voyeboeuf** et du **Betteraz** ont des débits similaires, du moins pour la période septembre 1989-août 1990, à savoir 160 l/s, moins du quart du débit de la Beuchire. La Bonne-Fontaine a un débit moyen proche de 180-200 l/s. Une partie des débits du Betteraz échappe aux mesures par la présence d'exutoires secondaires dans le lit de l'Allaine et de l'exutoire temporaire de la Première Combe dont les débits n'ont pu être mesurés.

**Tableau B.10:**

*Synthèse des débits moyens et extrêmes des principales sources ajoulotes.*

| DEBIT                         | Surface            | Débits 1989-1990 (l/s) |            |               | Débits spécifiques (l/s.km <sup>2</sup> ) |                  |            |
|-------------------------------|--------------------|------------------------|------------|---------------|-------------------------------------------|------------------|------------|
|                               | [km <sup>2</sup> ] | moyen                  | étiage     | crue          | moyen                                     | étiage           | crue       |
| Beuchire<br>Creugenat         | 48                 | 685<br>(50)            | 80<br>0    | 1500<br>10000 | 14.3<br>(1)                               | 1.7<br>0         | 31<br>208  |
| Betteraz                      | 10                 | 180                    | 50         | 1500          | 18                                        | 5                | 150        |
| La Fontaine                   | 5.2                | 65                     | 25         | 400           | 11.5?                                     | 3.9              | 96         |
| Bonne-Fontaine                | 16                 | 200                    | 25         | 2500          | 12.5                                      | 1.6              | 156        |
| Voyeboeuf                     | 13.5               | 200                    | 20         | 3500          | 13.3                                      | 1.5              | 296        |
| Pâquis                        | 1                  | 12                     | 10         | ?             | 12                                        | 10               | ?          |
| Doue                          | 18                 | 285                    | 30         | 3200          | 15.8                                      | 1.7              | 178        |
| Milandrine amont <sup>1</sup> | 4.5                | 62                     | 13         | 750           | 13.8                                      | 2.9              | 167        |
| Saivu                         | 13                 | 65                     | 20         | 200           | 5 <sup>1</sup>                            | 1.5              | 15.4       |
| -La Bâme                      |                    | 90                     | 0          | 1500          | 6.9                                       | 0                | 115        |
| La Font                       | 3                  | 50                     | 5          | 500           | 16.7 <sup>1</sup>                         | 1.7 <sup>1</sup> | 167        |
| <b>ALLAINE</b>                | <b>182</b>         | <b>2510</b>            | <b>480</b> | <b>33000</b>  | <b>13.8</b>                               | <b>2.6</b>       | <b>181</b> |

<sup>1</sup> Les données de la Milandrine amont concernent la période 1990-1993. Les trop faibles débits spécifiques du Saivu et ceux trop élevés de La Font sont provoqués par les pertes de la Milandrine aval vers La Font et L'Allaine (Grasso et Jeannin, 1995). Les données des sources du Saivu, de la Bâme et de La Font ont été fournies par MFR SA.

### c) Débits d'étiage

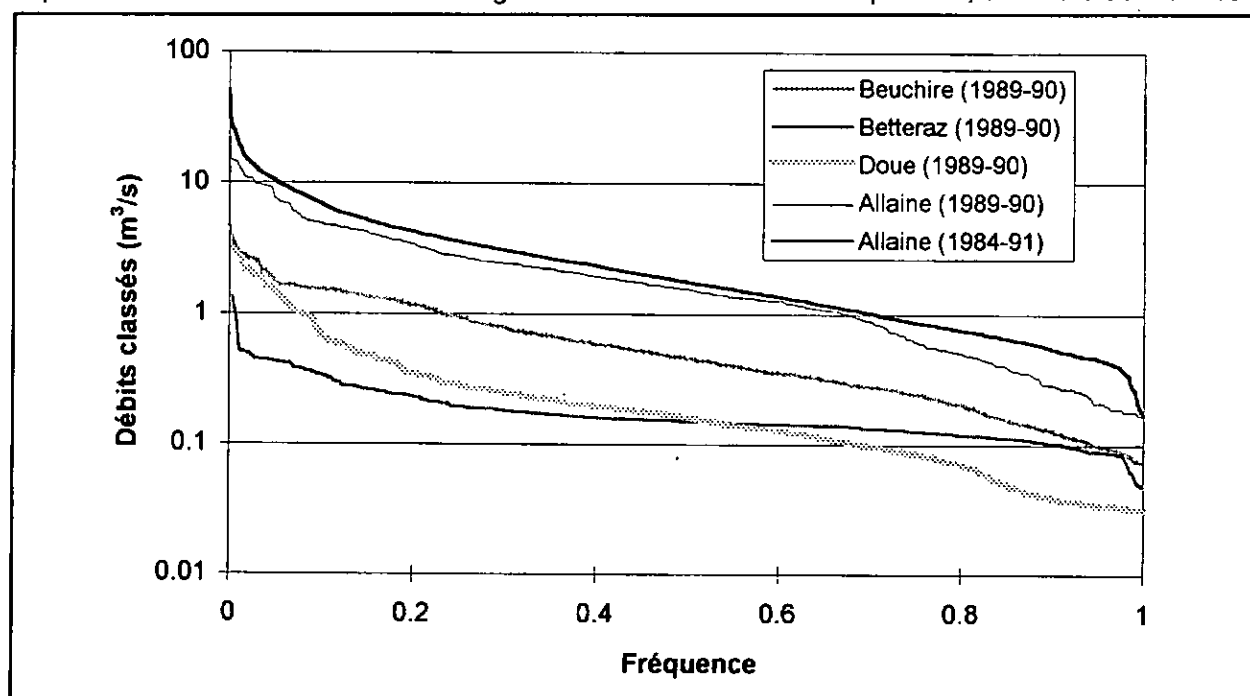
Les débits d'étiage des principales sources se tiennent entre 20 l/s (Voyeboeuf) et 80 l/s (Beuchire). Les débits spécifiques d'étiage sont inférieurs à 2 l/s.km<sup>2</sup> pour les sources purement karstiques, sans apports de rivières. Ainsi, pour les sources de la Fontaine et du Betteraz (4 et 5 l/s.km<sup>2</sup>), ils sont davantage soutenus. Pour la Fontaine, seuls les apports de la rivière expliquent ces valeurs élevées (bassin versant éventuellement sous-estimé). Par contre, le Betteraz est alimenté par la rivière et par l'aquifère tertiaire

situé à l'amont du bassin: en cours de tarissement, ce dernier participe de manière de plus en plus importante aux écoulements vers le Betteraz.

#### d) Débits de crue

Les exutoires de crue de la Beuchire jalonnent la rivière souterraine Ajoulote. Le principal est le Creugenat (Courtedoux). Un autre exutoire, plus exceptionnellement actif, se trouve 1300 m en amont. L'ensemble de ces exutoires peut déborder plusieurs  $\text{m}^3/\text{s}$ , exceptionnellement 20-30  $\text{m}^3/\text{s}$  (crue du 25 mai 1983).

Moins spectaculaires que le Creugenat, les crues du Voyeboeuf sont plus importantes que celles du Betteraz (environ 4  $\text{m}^3/\text{s}$  contre 1.5  $\text{m}^3/\text{s}$ ). Si le Betteraz ne connaît qu'un exutoire de crue (Première Combe), le Voyeboeuf en possède plusieurs, drainés par un cours d'eau superficiel. Celui-ci coule vers la source à partir de Courgenay et vient se mélanger à l'exutoire karstique, en y amenant un débit important. La Bonne-Fontaine connaît également des débits de crue importants, de l'ordre de 2.5  $\text{m}^3/\text{s}$ .



**Figure B.22**

Débits classés de la Beuchire, du Betteraz et de la Doue en 1989-90, comparés à ceux de l'Allaine.

#### e) Débits classés

Les débits moyens de la Beuchire et du Betteraz sont dépassés sur environ 30% du cycle et 27% pour l'Allaine. Durant un mois les débits du Betteraz n'ont même pas atteint 67 l/s (concession du captage du Betteraz). En basses eaux, la courbe du Betteraz converge vers celle de la Beuchire (fig. B.22), la diminution des débits est moins forte qu'à la Beuchire. Elle a une allure assez semblable à celle de l'Allaine, avec cependant une pente plus faible.

### 3.3 SYNTHÈSE

#### 3.3.1 Bassin versant de l'Allaine à Boncourt

Le tableau B.11 comprend un bilan global des entrées et sorties dans le bassin versant de l'Allaine, représenté graphiquement sur la figure B.23. Ce bilan montre l'évolution décroissante des débits annuels avec une augmentation de la température de l'air. Les trois années hydrologiques couvrant l'étude indiquent de faibles débits moyens. Le bilan de ces trois années se trouve en figure B.24. On notera les très faibles débits et la forte évapotranspiration au cours de la période allant de juin à octobre (période de végétation). L'évapotranspiration est particulièrement forte (en valeur relative) en août 1991, mois durant lequel l'Allaine s'infiltrait totalement sur plus d'un km entre Alle et Porrentruy.

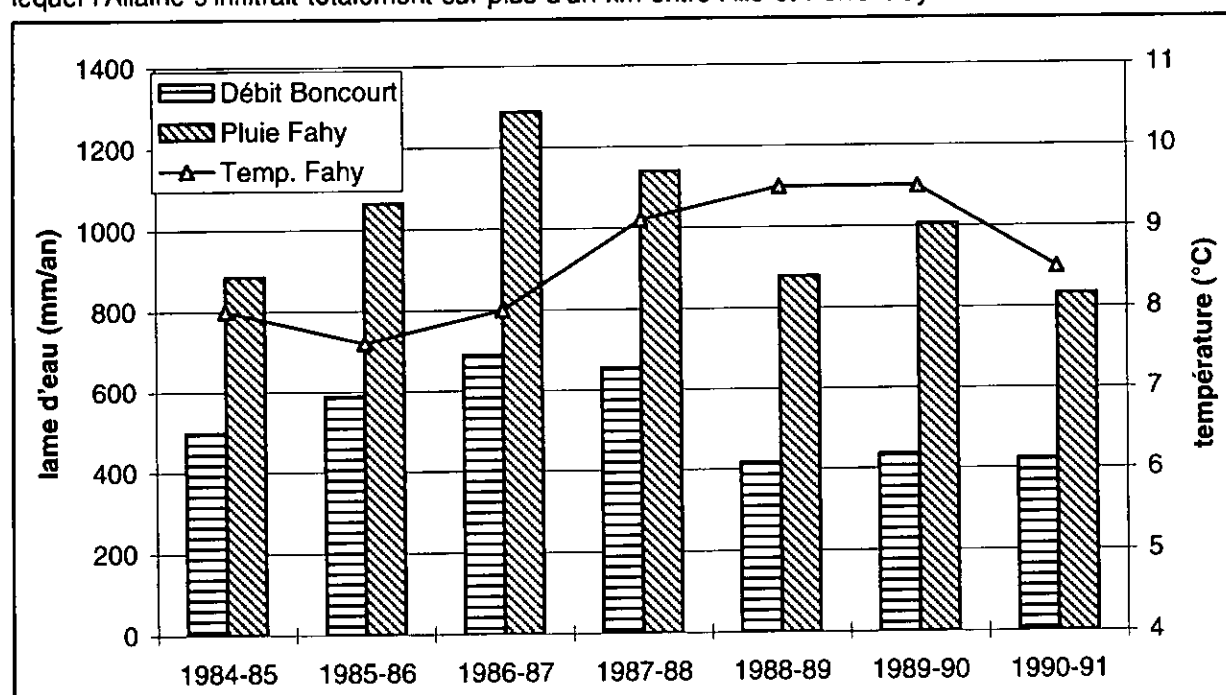


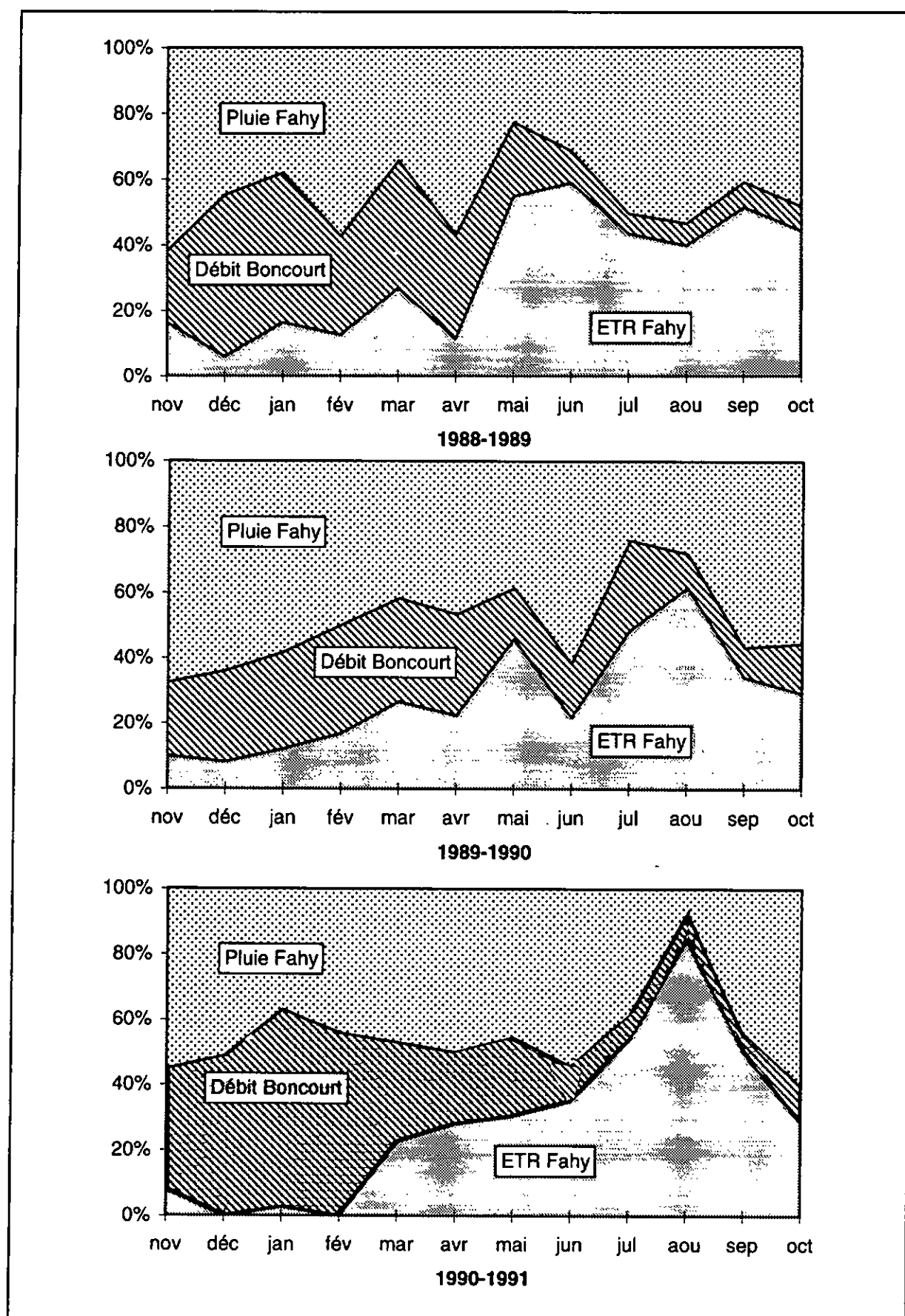
Figure B.23

Bilan des entrées (pluies Fahy) et des sorties (débit Allaine Boncourt).

Les débits de l'Allaine à Boncourt devraient théoriquement être semblables aux pluies efficaces (avec une marge d'erreur de 10% sur les débits et de 5 à 15% sur les pluies efficaces).

Les débits de l'Allaine à Boncourt sont transformés en lame d'eau ( $Q_i$ ) et comparés aux précipitations efficaces des quatre stations fixes de Fahy, Mormont, Les Rangiers et Joncherey. Les déficits d'écoulements ont été calculés pour Fahy et pour les 4 stations.

Sur les 6 cycles observés, celui de 1988-1989 montre cet équilibre (2% d'écart). En tenant compte de la marge d'erreur, les cycles 1984-1985 (10%) et 1987-88 (5.5%) sont assez bien équilibrés avec un débit, transformé en lame d'eau équivalente, supérieur de 8% à la pluie efficace pour 1984-85 et inférieur de 5% pour 1987-88. Les autres cycles montrent des écarts plus importants: débits inférieurs aux pluies efficaces de 15% (1989-90) à 22% (1985-86). La moitié des cycles indique donc un déficit d'écoulement significatif entre les pluies efficaces et les débits de Boncourt (tab. B.11). Ce déficit s'est surtout produit pour les deux cycles ayant un débit moyen de plus de  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  (1985-86 et 1986-87), correspondant aux hivers les plus froids de la décennie.



**Figure B.24**

Bilan hydrologique du bassin de l'Allaine pour les années 1988-89, 1989-90 et 1990-91

**Tableau B.11:**

*Bilan des écoulements sur le bassin de l'Allaine (année hydrologique)*

|                       | ALLAINE                |                      | 4 STATIONS                  |                        | FAHY                   |                        | 4 ST.                          | FAHY      |
|-----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------|
| ANNEE<br>HYDROLOGIQUE | DEBITS                 |                      | PLUIE                       |                        | PLUIE                  | TEMP                   | DEFICIT<br>ECOULEMENT          |           |
| (nov.-oct.)           | Q<br>m <sup>3</sup> /s | Q <sub>i</sub><br>mm | P <sub>efficace</sub><br>mm | P <sub>tot</sub><br>mm | P <sub>tot</sub><br>mm | T <sub>moy</sub><br>°C | 100-(Q/P <sub>tot</sub> )<br>% |           |
| 1984-85               | 2.86                   | 498                  | 462                         | 974                    | 884                    | 8.0                    | 49                             | 44        |
| 1985-86               | 3.38                   | 588                  | 753                         | 1253                   | 1064                   | 7.5                    | 53                             | 45        |
| 1986-87               | 3.95                   | 688                  | 827                         | 1347                   | 1287                   | 8.0                    | 49                             | 47        |
| 1987-88               | 3.75                   | 655                  | 685                         | 1232                   | 1139                   | 9.1                    | 47                             | 43        |
| 1988-89               | 2.40                   | 416                  | 406                         | 949                    | 878                    | 9.5                    | 56                             | 53        |
| 1989-90               | 2.51                   | 435                  | 515                         | 1068                   | 1005                   | 9.5                    | 59                             | 57        |
| 1990-91               | 2.44                   | 423                  | 378                         | 900                    | 833                    | 8.5                    | 48                             | 49        |
| <b>1984-91</b>        | <b>3.04</b>            | <b>529</b>           | <b>575</b>                  | <b>1103</b>            | <b>1013</b>            | <b>8.6</b>             | <b>52</b>                      | <b>48</b> |

Ainsi, les débits mesurés à Boncourt sont probablement trop faibles. Des comparaisons avec ceux de l'Allaine à Bux ont montré des pertes de l'ordre de 10% entre ces deux stations, sans compter les apports de bassins couvrant une surface de plus de 20 km<sup>2</sup> (soit une estimation de 300 l/s ou 10% du débit de l'Allaine). Le bilan des pertes atteindrait donc près de 20 % du débit, correspondant aux proportions évoquées ci-dessus.

Les fluctuations des précipitations par rapport à la moyenne sont toujours inférieures (en proportion) aux variations de débit. L'écart le plus grand a été enregistré durant l'année 1989-90: les précipitations ont été inférieures de 6% et les débits de 20% à la "norme".

### 3.3.2 Sources karstiques

A Porrentruy, les apports de la Beuchire viennent pratiquement doubler le débit de l'Allaine. Pour le bilan de la Beuchire, nous avons calculé (méthode de Thiessen) pour la période 1989-90, une lame d'eau totale de 1072 mm. Selon le tableau B.5, les pluies efficaces se montaient à 45% des précipitations totales. La lame d'eau infiltrée vaut donc 482 mm pour les 48 km<sup>2</sup> du bassin de la Beuchire. En fonction de ces valeurs, le débit de la Beuchire (y compris le Creugenat) devrait donc atteindre 735 l/s, soit environ 30 % de celui de l'Allaine à Boncourt. Celui obtenu sur La Beuchire seule est un peu plus faible (685 l/s). Cela donne un débit moyen annuel d'environ 50 l/s pour Le Creugenat. Reporté sur les 30 jours de fonctionnement, il se situe près de 600 l/s. En superficie, le bassin de La Beuchire n'atteint que 26% de celui de l'Allaine alors que pour les débits, cette proportion s'élève à 30 %. Nous attribuons cette différence à la répartition spatiale des précipitations, plus forte sur le bassin de la Beuchire que sur les bassins situés à l'est ou au nord.

Dans un bilan, il faudrait tenir compte du volume de variation des réserves. Dans le cas présent, nous considérons ce volume comme négligeable dans le bilan global. Nous admettons que le volume des réserves au début et à la fin du cycle sont comparables. **Malgré les incertitude sur les pluies efficaces (lame d'eau totale et évapotranspiration), sur les limites de bassin et sur les débits de la Beuchire (avec Creugenat), le bilan apparaît globalement correct.**

Pour Le Betteraz, nous devrions effectuer le bilan sur une période plus courte de 10 mois, correspondant à la période de mesure des débits (décembre 1989 à août 1990). Mais le calcul du bilan est lié à trop d'incertitudes pour avoir une quelconque valeur:

- les apports de l'aquifère tertiaire sont difficiles à quantifier et son impluvium est encore mal connu;
- le Betteraz n'est pas le seul exutoire du système: il y a la Première Combe (hautes eaux) et l'aquifère alluvial du Pont d'Able.

Pour La Bonne-Fontaine, le débit calculé d'après la lame d'eau efficace atteint 238 l/s, soit 16% de plus que celui mesuré 400 m en aval de la source. S'il existe des incertitudes liées aux mesures, nous admettrons cependant la présence de pertes situées en aval de la source. L'interprétation d'essais de traçage vont effectivement dans le même sens. Des diffluences ont été observées du système de La Bonne-Fontaine vers ceux de La Beuchire et du Pâquis

Pour Le Voyeboeuf, le bilan s'établit à une lame d'eau efficace de 495 mm soit un débit de 212 l/s. Nous avons également un débit surestimé par rapport à celui calculé, mais la grande imprécision régnant tant pour les bas débits que pour les débits d'étiage ne permet pas d'établir un bilan correct.

# **PARTIE C:**

## **INTERPRETATION ET FONCTIONNEMENT DES AQUIFERES ETUDIES.**

Page

|     |                                                                                   |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 67  | <b>1. AQUIFERES KARSTIQUES SANS RELATION<br/>AVEC UN COURS D'EAU PERENNE</b>      |
| 67  | 1.1 Caractéristique des systèmes, points communs et divergences                   |
| 69  | 1.2 Interprétation des débits                                                     |
| 70  | 1.2.1 Courbe de concentration et mise en charge des aquifères karstiques          |
| 74  | 1.2.2 Courbe de récession, décharge des milieux transmissifs et capacitifs.       |
| 76  | 1.2.3 Volumes écoulés et réserves écoulables                                      |
| 77  | 1.3 Apport de la physico-chimie à la compréhension du fonctionnement              |
| 77  | 1.3.1 Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources ajoulotes            |
| 80  | 1.3.2 Pollution des eaux souterraines                                             |
| 87  | 1.3.3 Evolution physique et chimique de la source de La Beuchire                  |
| 89  | 1.3.4 Interprétation des variations de température et de conductivités            |
| 100 | 1.3.5 Synthèse                                                                    |
| 103 | <b>2. SPECIFICITE DES AQUIFERES KARSTIQUES<br/>EN RELATION AVEC UNE RIVIERE</b>   |
| 103 | 2.1 Caractéristiques particulières des systèmes                                   |
| 107 | 2.2 Influence de la rivière sur les débits de la source                           |
| 108 | 2.3 Apport de la physico-chimie à la compréhension du fonctionnement              |
| 112 | <b>3. AQUIFERES ALLUVIAUX ALIMENTES PAR LE KARST ET UNE RIVIERE</b>               |
| 112 | 3.1 Caractéristique des systèmes, points communs et divergences                   |
| 113 | 3.1.1 Nature des aquifères alluviaux                                              |
| 113 | 3.1.2 Zone de battement de la nappe                                               |
| 115 | 3.1.3 Perméabilités                                                               |
| 116 | 3.2 Interprétation des cartes piézométriques                                      |
| 119 | 3.3 Interprétation des cartes des paramètres physico-chimiques                    |
| 119 | 3.3.1 Acquisition des données                                                     |
| 119 | 3.3.2 Température moyenne annuelle                                                |
| 121 | 3.3.3 Evolution saisonnière des paramètres physiques                              |
| 127 | 3.3.4 Conductivité moyenne                                                        |
| 128 | 3.3.5 Caractérisation chimique des nappes alluviales                              |
| 132 | 3.4 Analyse des réactions rapides et lentes par la température et la conductivité |
| 136 | 3.5 Ressources                                                                    |
| 137 | 3.6 Synthèse                                                                      |

*Page*

|     |                                                                               |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------|
| 141 | <b>4. SYNTHESE</b>                                                            |
| 141 | 4.1 Principaux enseignements                                                  |
| 143 | 4.2 Apport des essais de traçage dans la délimitation des systèmes karstiques |
| 144 | 4.3 Vulnérabilité et ressources des principaux aquifères                      |
| 145 | 4.4 Réflexions sur quelques directions d'écoulements                          |
| 146 | <b>5. LA CARTE HYDROGEOLOGIQUE DE L'AJOIE</b>                                 |

# **PARTIE C:**

## **INTERPRETATION ET FONCTIONNEMENT DES AQUIFERES ETUDIES.**

### **1. AQUIFERES KARSTIQUES**

#### **1.1 Caractéristique des systèmes, points communs et divergences**

La situation des systèmes étudiés est donnée à la figure C.1.

Les systèmes de La Beuchire, de La Bonne-Fontaine, du Voyeboeuf et du Saivu sont dépourvus de cours d'eau permanents interférant avec les écoulements souterrains. Pour Le Voyeboeuf cependant, un cours d'eau pérenne de faible débit s'écoule sur la partie méridionale du système avant de se perdre totalement à l'entrée sud de Courgenay (ruisseau de Courtemautruy). En revanche, les systèmes du Betteraz, du Pâquis et de La Fontaine bénéficient dans une large mesure des infiltrations de L'Allaine. Ils forment chacun un système complexe en relation avec un aquifère alluvial. Les spécificités de ces trois systèmes, liées aux relations Allaine-Karst, feront l'objet du chapitre 2.

Des quatre systèmes énumérés ci-dessus, indépendants d'un cours d'eau superficiel permanent, seul celui du Saivu est situé en totalité dans le Jura tabulaire. Afin de compléter les comparaisons et malgré des données lacunaires, nous aborderons ponctuellement l'étude du système karstique de la Doue, situé comme le Saivu en totalité dans le Jura tabulaire.

Les trois autres systèmes karstiques (Beuchire, Bonne-Fontaine et Voyeboeuf) possèdent des zones alimentaires remontant jusqu'au sommet du Jura plissé, sur l'anticlinal du Mont-Terri - Lomont (traçages n°72, 83, 95. Ils constituent donc des systèmes "mixtes", appartenant à la fois au Jura plissé et au Jura tabulaire. Le chevauchement du Jura plissé sur le Jura tabulaire ne constitue pas, dans ces trois cas, un véritable obstacle aux écoulements souterrains. Les trois systèmes sont situés dans les mêmes types d'aquifère (Dogger-Malm). Au niveau de l'alimentation, la répartition des précipitations sur l'impluvium de ces bassins est sensiblement la même (fig. B.14).

#### ***Connexions entre les systèmes de La Beuchire, de La Chaumont et de La Bonne-Fontaine***

Aucun de ces trois systèmes karstiques n'est totalement indépendant. En raison des liaisons souterraines qui ont été mises en évidence entre eux, on pourrait éventuellement les grouper en un seul système possédant trois exutoires pérennes, avec pour chacun un impluvium indépendant des autres et un impluvium commun. Les nombreuses diffluences qui ont été mises en évidence par essais de traçage iraient dans ce sens. Le premier essai (n°14) à avoir montré une diffluence a été réalisé en 1968. D'autres, beaucoup plus récents ont confirmé ce résultat et précisé les limites entre impluvium propre et impluvium commun.

Plusieurs traceurs ont été retrouvés à La Chaumont avec des concentrations 4 à 5 fois plus faibles, mais avec une remarquable similitude de la courbe de restitution (Gretillat et al., 1988).

On connaît depuis fort longtemps les exutoires de crue du système de La Beuchire, en particulier ceux du Creugenat et du Creux-des-Prés. Il y en a d'autres encore, de moindre importance, dans la plaine de Courtedoux, qui se mettent en charge avec Le Creugenat situé plus en amont. Le système de La Bonne-Fontaine a également au moins un exutoire de crue (Mavalau) qui ne se met en charge que rarement, lorsque l'exutoire supérieur du système de La Beuchire, Le Creux-des-Prés, est actif. Il se déverse alors

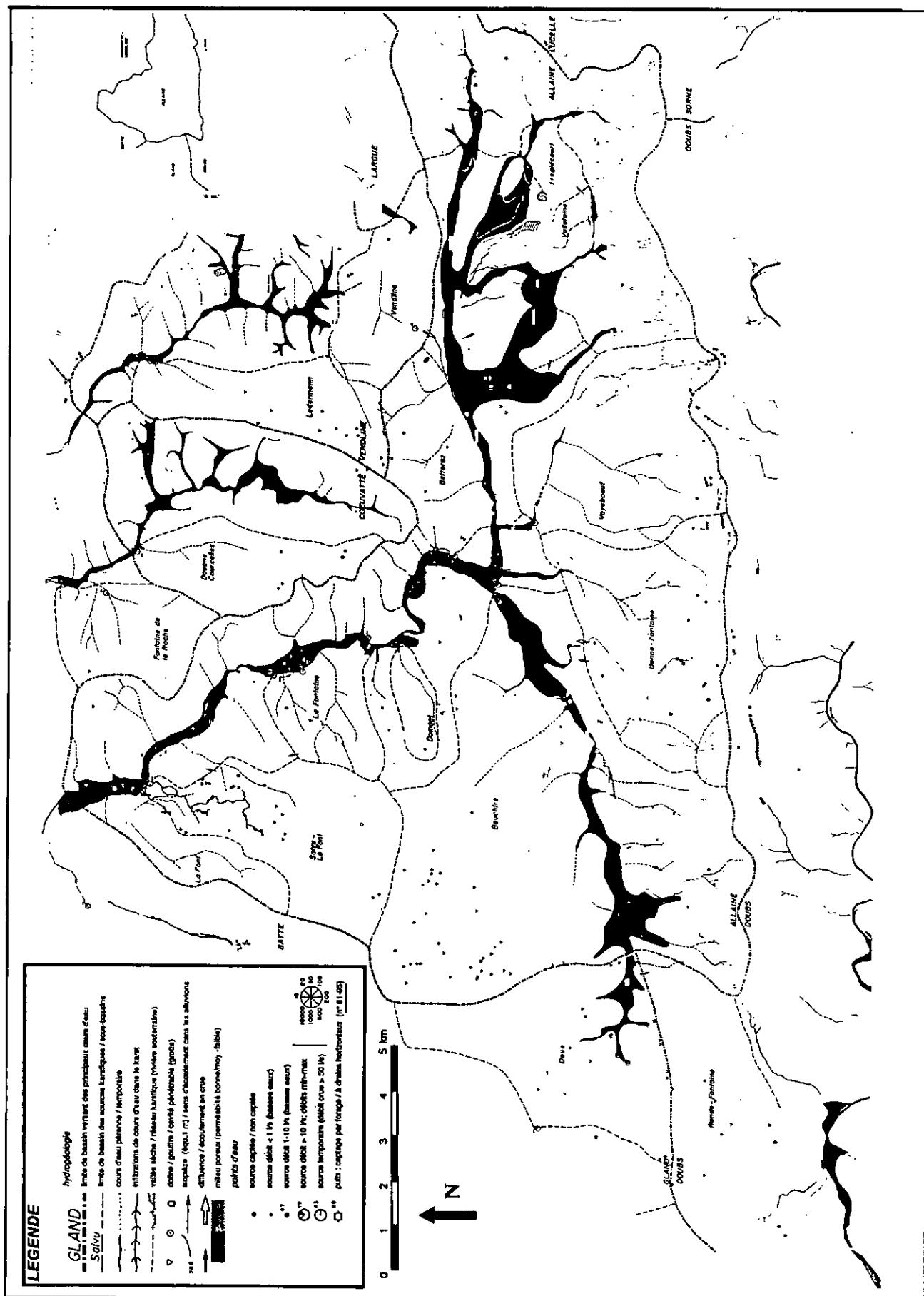


Figure C.1

Situation des sources karstiques étudiées avec leurs bassins versants

superficiellement dans la plaine de Courtedoux pour rejoindre le cours superficiel du Creugenat.

Ainsi, **les connexions entre les systèmes de La Beuchire et de La Bonne-Fontaine se réalisent tant en basses eaux qu'en crue**. Aucun exutoire de crue n'est connu pour le système de La Chaumont et en l'absence d'enregistrement continu de hauteur d'eau/débit, on ne peut répondre à cette question. Etant donné la position de la source pérenne (source déplacée et canalisée d'environ 200 m vers le nord, recouvrement de plusieurs mètres d'alluvions sur le karst) et ses relations avec le système de la Beuchire, cet exutoire de crue pourrait également être Le Creugenat.

Non seulement une relation importante entre le Jura plissé et le Jura tabulaire a été mise en évidence dans la partie occidentale du bassin de La Beuchire (essai n° 83), mais également une relation directe avec Le Creugenat, sans utilisation du conduit Creux-des-Prés - Creugenat. Bien que rapide, cette relation a montré une dispersion plus grande de la restitution du traceur par rapport aux essais réalisés dans d'autres parties du bassin. Cet essai confirme le rôle de confluence joué par Le Creugenat.

### ***Schéma de fonctionnement du système de La Beuchire***

Le système de La Beuchire est un système comportant un aquifère puissant de calcaires du Malm dans sa partie septentrionale situés dans le Jura tabulaire. La partie méridionale, plus petite (env. 12% du bassin versant), comprend le Jura plissé avec les aquifères du Malm et du Dogger. La partie centrale avec la vallée sèche principale correspond à 15 % du bassin versant; elle est recouverte d'une vingtaine de mètres d'alluvions. L'ensemble du système est très bien drainé et converge sur le secteur Creugenat -La Beuchire.

Les vitesses d'écoulement sont élevées, même en basses eaux (de 15 m/h à plus de 300 m/h). Les vitesses sont les plus rapides (100 à 300 m/h) dans la partie aval du Creugenat. L'ensemble des traceurs injectés dans le système ont d'abord atteint Le Creugenat avant de rejoindre La source de La Beuchire, moyennant un décalage de 24 à 48 h, avec des concentrations un peu plus faibles voire comparables. Une rivière souterraine est visitable (pour les spéléologues!) depuis la région de Chevenez. L'interprétation des essais de traçage effectués dans le secteur ainsi que les explorations spéléologiques du Creux-des-Prés et de Combe Varu nous ont amené à considérer trois drains principaux qui drainent l'essentiel du système:

- un drain débouche entre Le Creux-des-Prés et Le Creugenat (Combe de Varu), depuis le Jura plissé;
- un drain provient de la région amont de Chevenez (à l'ouest);
- un drain, probablement le plus important, vient de Fahy, en drainant une surface prépondérante (3/4 du bassin versant).

L'existence de trois drains peut amener, lors des crues, des arrivées distinctes, préférentiellement d'une zone à une autre.

## **1.2 Interprétation des débits**

Nous avons constaté dans la partie B que l'obtention des débits de La Beuchire était fort complexe, étant donné sa situation géographique (zone urbaine, grands bassin de réception avant canalisation multiple, sorties diffuses non captées) et géologique. L'interprétation quantitative des résultats est donc très contestable. C'est malheureusement le cas pour le tarissement, puisque la courbe de tarage pose de gros problèmes dans les débits d'étiage, inférieurs à 100 l/s. La source de La Bonne-Fontaine pose également de sérieux problèmes. La configuration de l'exutoire est du même type et il est capté par des pompes discontinues. La station limnigraphique a dû être implantée 400 m en aval et sur ce trajet des apports et des pertes ont été mesurées ponctuellement.

### 1.2.1 Courbe de concentration et mise en charge des aquifères karstiques

L'existence d'un ou de plusieurs exutoires de crue peut être mis en évidence par l'écèlement des pointes de crue (Saivu, la Fontaine, Betteraz) voire même par des paliers de débits comme à La Beuchire (fig. B.21 et C.2). A la Beuchire, un tel palier est atteint, vers 1500 à 2000 l/s. Les exutoires temporaires sont

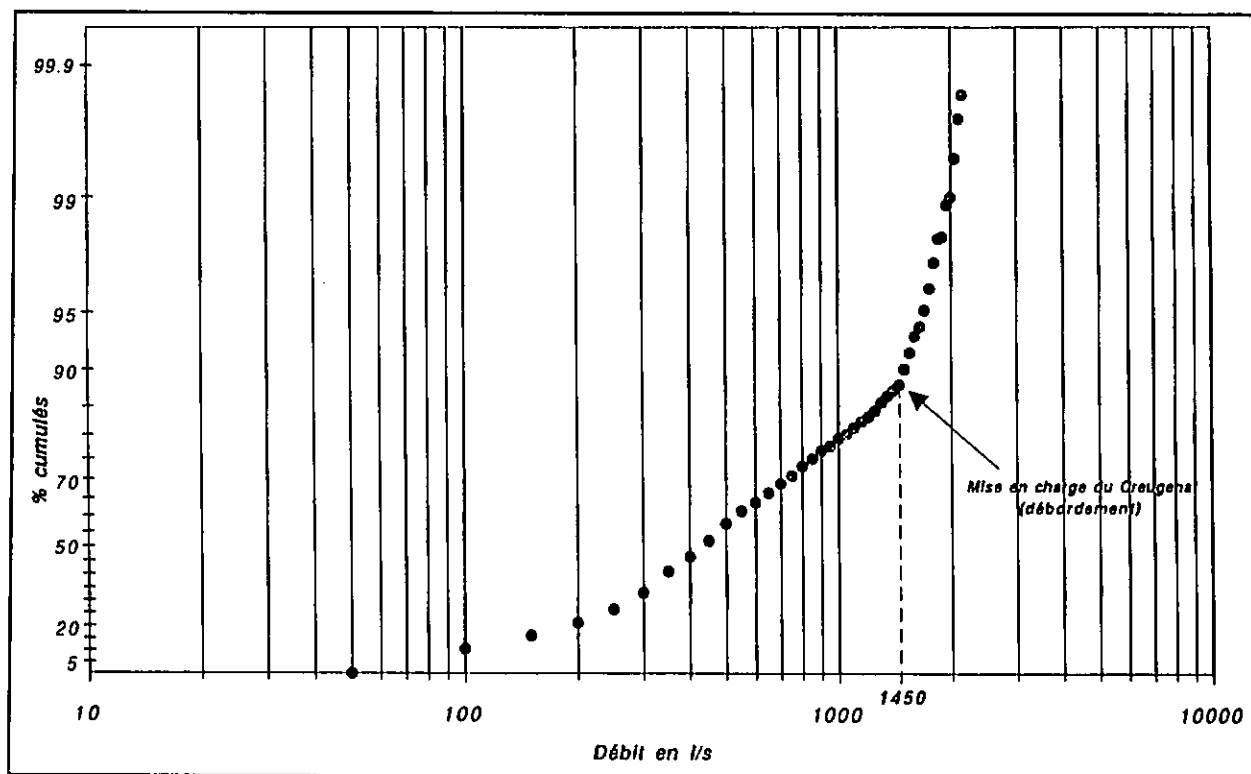


Figure C.2

Courbe des débits classés de la source de La Beuchire, pour la période 1990-1993 (tiré de MFR SA., 1994).

généralement en fonction lorsque le débit de l'exutoire principal est stabilisé, afin d'évacuer les volumes d'eau que le système ne peut absorber. Le Creugenat déborde ainsi dans la plaine de Courtedoux, après une mise en charge très rapide des chenaux, qui ne dure que 4 à 6 h pour les crues les plus rapides (27.8.89 et 8.6.90). Les eaux de débordement du Creugenat atteignent ensuite Porrentruy par le déversoir de crue en quelques heures (5 h le 8.6.90, soit une vitesse d'environ 800 m/h).

Les temps de concentration pour les différentes sources pérennes sont extrêmement rapides, 3 à 6 h pour les crues les plus soudaines, entre le début de la montée et le palier, présent pour toutes les sources possédant un trop plein de crue.

L'éloignement de l'événement pluvial a-t-il une influence sur le début de la montée de l'hydrogramme?

- Comme dans les autres systèmes, le temps de mise en charge du système du Betteraz est très rapide suite à l'infiltration des eaux de pluie, il est inférieur à 90 minutes sur tous les événements observés. Ce laps de temps ne représente que l'impulsion, mais pas encore l'arrivée effective des eaux de pluie infiltrées. **Le temps de réaction n'augmente pas significativement pour des événements localisés dans la périphérie du bassin versant de la source.**

Ce temps de concentration est-il plus élevé si l'on tient également compte des exutoires de crue?

-En l'absence de pointe de crue sur les hydrogrammes des sources étudiées, on pourrait supposer des temps de concentration réels plus important en tenant compte de l'exutoire temporaire. Nous allons vérifier

avec l'exemple de la Beuchire si les temps de concentration ne sont pas augmentés significativement, étant donné que le palier n'a été atteint qu'après le débordement de l'exutoire temporaire du Creugenat.

#### **Hydrogrammes Beuchire-Creugenat-Ajoulote (Porrentruy)**

Les hydrogrammes des différents exutoires des systèmes de La Beuchire et de La Bonne-Fontaine sont représentés à la figure C.3. Seules les hauteurs d'eau sont représentées pour faciliter les comparaisons (débits pas tous connus). D'après cet exemple, la mise en charge des drains karstiques s'effectue progressivement sur l'ensemble du système et pas une fois que l'exutoire principal a atteint son palier: la montée des eaux est simultanée au Creugenat et à La Beuchire, **Le Creugenat a même débordé 2 h avant que La Beuchire n'atteigne son palier** (niveau maximum). La mise en charge semble donc se transmettre de l'amont vers l'aval et non l'inverse. La pointe de crue elle-même a été atteinte au Creugenat environ 1 h après le palier de La Beuchire. Sur l'hydrogramme de l'Ajoulote, il s'est passé environ 3 h entre la première arrivée de l'eau superficielle du Creugenat et le pic de la crue.

A l'image d'un tuyau sous-dimensionné qui refoule lors d'arrivées massives d'eau, le conduit karstique situé en aval du Creugenat refoule ce qu'il ne peut évacuer, cela même avant que le débit ne soit stabilisé 4.4 km en aval, à La Beuchire. La mise en charge du système de La Beuchire a pu être mesurée non seulement au Creugenat (12 m), mais également dans quelques forages de la N16. Le maximum a été atteint dans un forage proche du Creugenat, le forage n°33 (annexe 2.2) avec plus de 18 m de mise en charge.

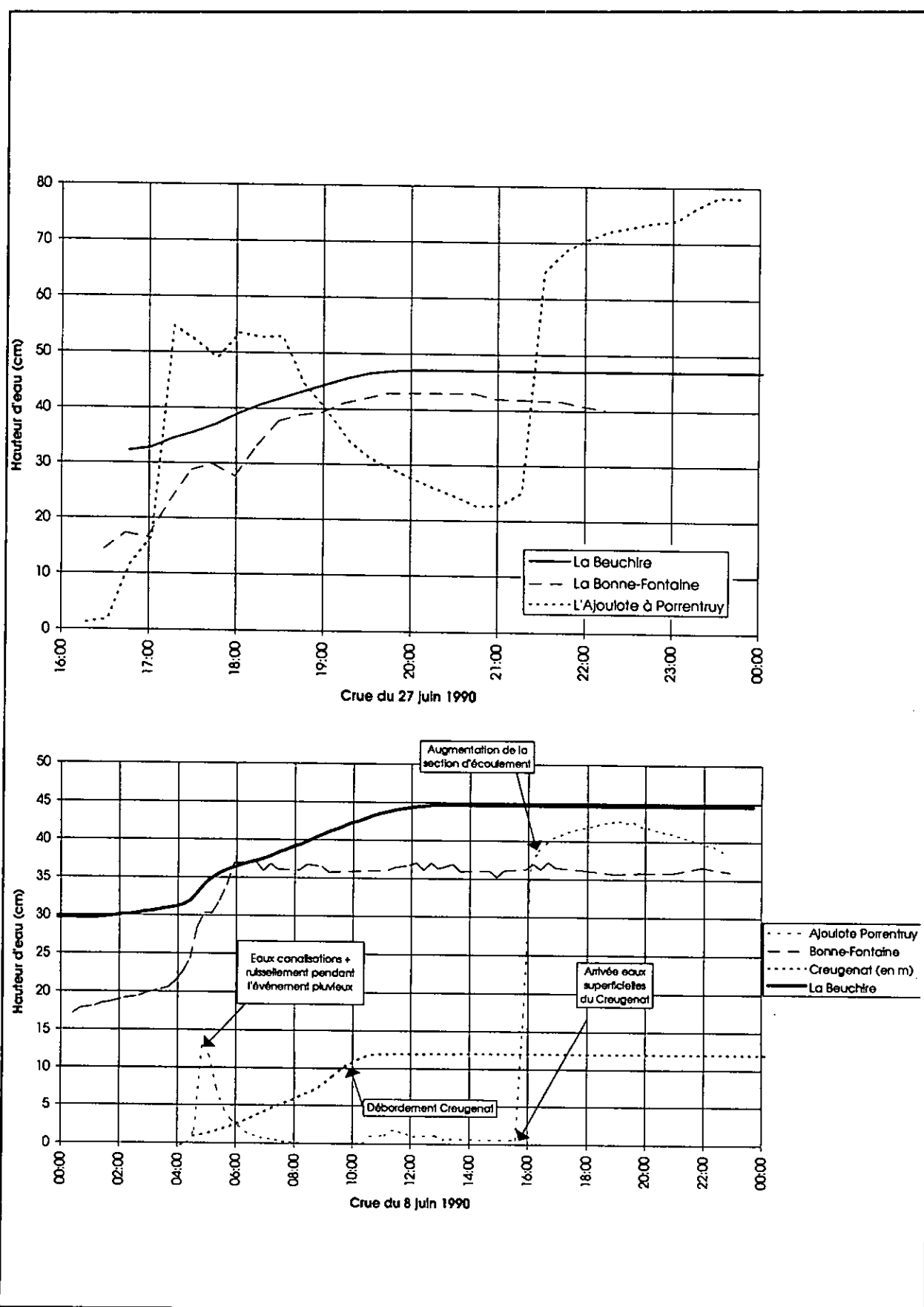
On ne peut comparer cette mise en charge de conduits karstiques dans une zone d'exutoire avec les fluctuations naturelles de l'aquifère dans la zone alimentaire. Ces fluctuations peuvent être aussi importantes dans les blocs peu perméables. Deux forages très proches l'un de l'autre peuvent montrer des niveaux piézométriques très différents, d'autant plus si l'un se trouve dans un bloc capacitif (vitesse de réaction plus lente) et l'autre dans un conduit karstique. La transmission des pressions est beaucoup plus rapide dans les conduits que dans les blocs. Vu les faibles vitesses, la répercussion d'une crue ne s'effectue qu'après un certain temps.

**Dans la montée de la crue, la mise en charge du milieu transmissif étant plus rapide que celle du milieu capacitif, une inversion des gradients s'opère, avec comme conséquence l'arrêt (ou la diminution) temporaire du drainage (apports) du milieu capacitif.**

Ainsi, sur le plateau de Bure, des mesures en continu ont été effectuées sur plusieurs forages (Jeannin, 1994). Elles ont mis en évidence l'allure chaotique de la nappe karstique, avec des gradients très élevés, atteignant 100%. à quel point le milieu karstique était discontinu et réagissait avec une inertie inversement proportionnelle à la perméabilité. Cela explique en partie les niveaux discontinus entre les points de mesure et l'amplitude des fluctuations, différentes d'un point à un autre.

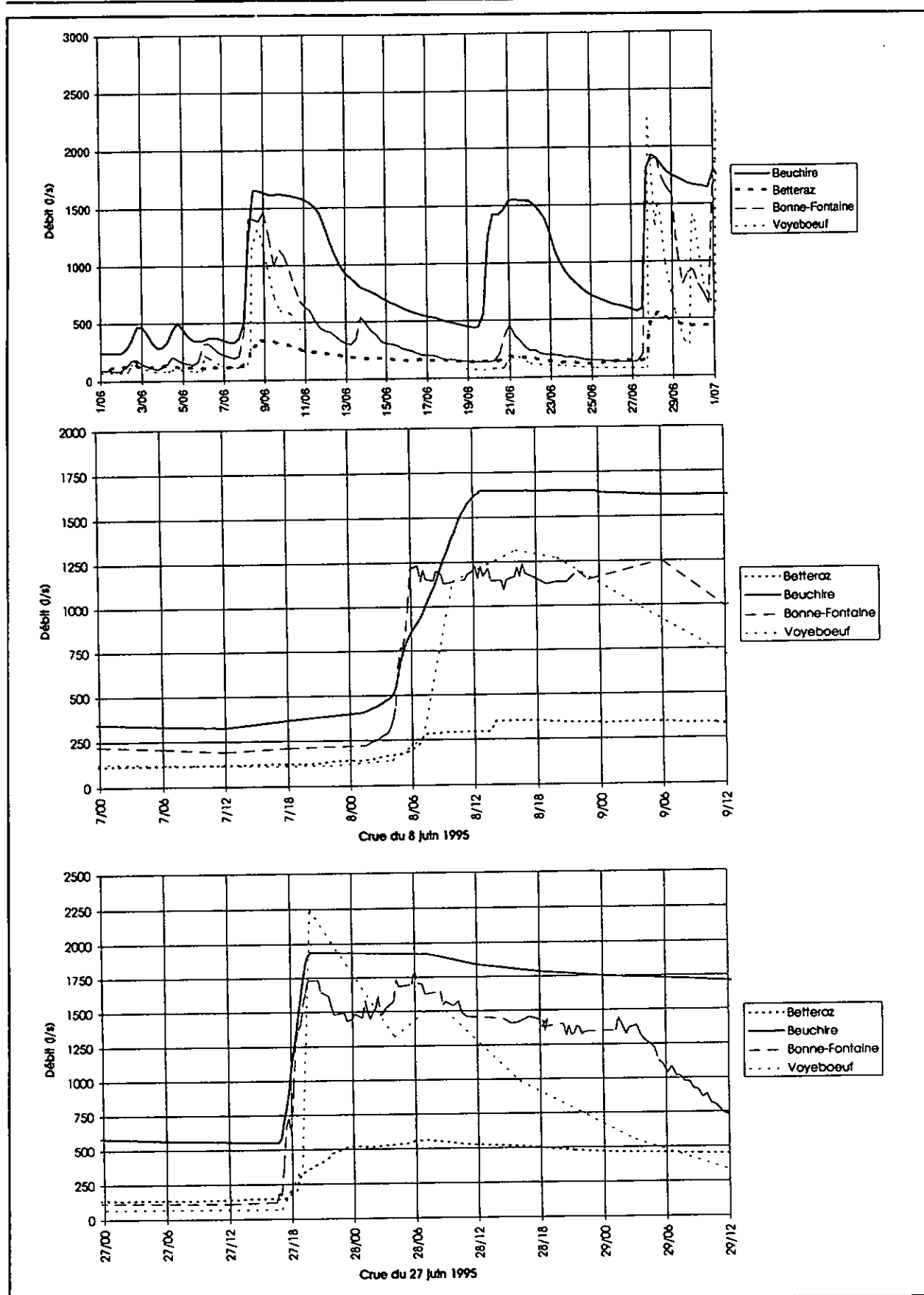
#### **Hydrogrammes Beuchire, Bonne-Fontaine, Voyeboeuf et Betteraz**

Un violent orage de très courte durée nous permet de comparer les réactions de La Beuchire, de La Bonne-Fontaine, du Voyeboeuf et du Betteraz, le 27 juin 1990 (fig. C.4) . La station de mesures du Creugenat ayant été mise hors service par un acte de malveillance 10 jours auparavant, il nous manque hélas des données permettant de compléter l'ensemble des mesures. Nous avons utilisé cet événement pour calculer les temps de concentration les plus rapides pour l'ensemble des sources étudiées. **Le débit augmente dans l'heure qui suit le début des précipitations.** Le temps de réponse entre le centre de gravité d'une averse et la pointe de l'hydrogramme d'une source est très court (quelques heures). En l'occurrence, **le temps de concentration pour La Beuchire s'est élevé à 2 h seulement et à 3 h pour La Bonne-Fontaine.** Les temps sont un peu plus élevés pour le Voyeboeuf et le Betteraz, que ce soit pour le début de la montée ou pour la pointe de la crue.



**Figure C.3**

Hydrogrammes de crue (8 et 27 juin 1990) pour les systèmes Beuchire - Bonne-Fontaine, avec Le Creugenat (débordement, 8 juin seulement) et son arrivée à Porrentruy.



**Figure C.4**  
 Comparaison des hydrogrammes de crue de La Beuchire, de la Bonne-Fontaine, du Voyeboeuf et du Betteraz, les 8 et 27 juin 1990. Retards des sources du Voyeboeuf et du Betteraz.

Les eaux du Creugenat n'ont mis que 5h30 pour se mettre en charge et parvenir à Porrentruy (Ajoulote) et encore deux heures de plus pour atteindre le pic de l'hydrogramme.

Au vu de ces résultats, nous pouvons considérer que la forme du signal d'entrée a une importance primordiale sur le signal sortie: le signal est relativement peu transformé pour le système de La Beuchire en particulier. La répartition spatiale des précipitations (fig. C.5), leur durée et leur intensité ont un rôle

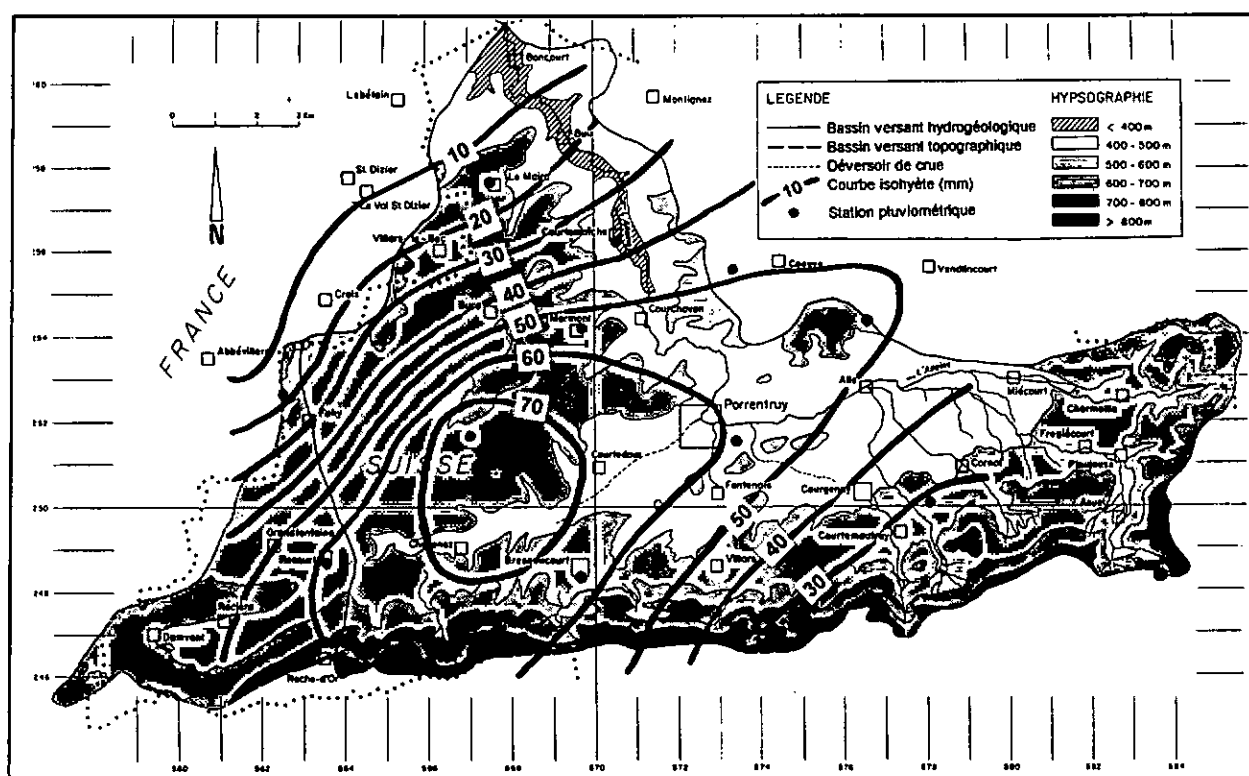


Figure C.5

Répartition des pluies (en mm) en Ajoie lors de l'orage du 27 juin 1990 de 16 h à 18 h

important à jouer et leur connaissance est primordiale pour comprendre ce qui se passe aux exutoires. Lors de l'orage du 27 juin 1990, la répartition des précipitations (très différente de la répartition annuelle) indique un couloir entre Rocourt et Alle, avec une lame d'eau concentrée sur la région Courtedoux-Théodoucourt, à l'ouest de Porrentruy. En temps réel, le décalage des précipitations est insignifiant entre les stations extrêmes (moins de 20 minutes). On remarque que **pour un même bassin (La Beuchire), des valeurs très différentes de la lame d'eau sont enregistrées: 10 mm au NW, 80 mm au centre, 60 mm à l'exutoire, 30 mm au Sud.** Pour le même événement, le bassin versant du Saivu ne reçoit qu'une lame d'eau très faible. Au vu de cet événement, on imagine assez bien les difficultés qui se présentent lorsque l'on compare les hydrogrammes de sources karstiques, en l'absence de données sur la répartition spatiale et temporelles des précipitations.

### 1.2.2 Courbe de récession, décharge des milieux transmissifs et capacitifs.

#### a) Décrue

Après la montée de la crue (pointe de crue), la seconde partie de l'hydrogramme, la courbe de récession, englobe la décrue et le tarissement. La décrue comprend les débits de la vidange rapide du réseau transmissif pour l'essentiel. Dans la pratique, la limite ne se détermine pas toujours facilement. Pour les

sources possédant un palier de débit, nous devons prendre, en l'absence de l'hydrogramme de l'exutoire de crue associé, la fin du palier. Pour le début du tarissement, une rupture de pente généralement assez nette est observée sur l'hydrogramme. Si le temps de concentration a été bref, la durée de la décrue est également rapide, témoignant d'un degré de karstification important et un réservoir tampon relativement faible. Ce phénomène est observé sur les sources ajoulotes qui ont été étudiées (Beuchire, Bonne-Fontaine, Doue et La Fontaine). Si pour le temps de concentration la taille du bassin n'était pas un facteur majeur, ce dernier le devient dans la décrue. Il suffit pour cela de comparer la décrue de La Fontaine (1 à 3 j) et celle, plus lente (3 à 5 j) de la Beuchire, dont le bassin versant est dix fois plus grand. Pour les sources du Voyeboeuf, de La Bonne-Fontaine et de La Doue (dont le bassin versant est de taille intermédiaire), la décrue est très rapide (2 à 4 j) et la transition décrue - tarissement est très nette.

### **b) Tarissement**

Durant trois années consécutives (1989-1991), des étiages sévères ont été observés en Ajoie et à la Beuchire en particulier. Des tarissements de plusieurs semaines sans recharge significative ont ainsi été mesurés. Deux longs tarissements, entrecoupés de plusieurs événements pluvieux, ne sont visiblement pas perturbés dans l'évolution des débits.

La courbe de tarissement comprend essentiellement les débits du milieu capacitif peu perméable, rechargé en partie lors de la crue qui a précédé la courbe de récession. Lorsque les précipitations s'étalent sur plusieurs jours, la courbe de récession est plus difficile à interpréter pour séparer la décrue du tarissement avec une rupture de pente. C'est notamment le cas de la crue du 27 juin 1990 (annexe 4.4). La décrue ne s'est véritablement amorcée à la Beuchire que 12 jours après le début de l'événement pluvieux. La fin de la décrue et le début du tarissement ne sont pas clairement bien définis. D'autre part, l'emplacement de la rupture de pente sur la courbe de récession dépend essentiellement de deux facteurs difficiles à classer en l'état de nos connaissances actuelles:

- Etat de recharge de l'aquifère avant la crue;
- Volume d'eau parvenant dans le réservoir capacitif avant le début du tarissement.

### ***Exemples de La Beuchire et de La Doue***

Pour la Beuchire, le début de tarissement se produit dans une fourchette de débits de 400 à 800 (1000?) l/s, alors que pour celle de la Doue, cela oscille entre 100 et 300 l/s. La courbe de tarissement devient une droite lorsque les débits sont reportés en échelle logarithmique. Deux droites distinctes apparaissent pour certaines situations, lorsque le tarissement est suffisamment long. Quelques courbes de tarissements ont été étudiées pour La Beuchire et mises en comparaison avec la source de La Doue. Les différents paramètres calculés se trouvent au tableau C.1.

Les coefficients de tarissements calculés sur des courbes de tarissement peu fiables n'ont pas été retenus. Ces courbes deviennent très imprécises en-dessous de 100 l/s pour La Beuchire (en 1991 surtout) et 30 l/s pour La Bonne-Fontaine et pour Le Voyeboeuf. Les débits de La Doue sont les plus fiables et cela se ressent sur les résultats. Les coefficients de tarissement sont assez proches, entre 0.035 et 0.050. Il en va de même avec le calcul des réserves écoulables. Avec 0.57 mio m<sup>3</sup> en moyenne, les réserves du système de La Doue sont du même ordre de grandeur que celles calculées pour le Saivu, à savoir 0.6 mio m<sup>3</sup> (Jeannin, 1994). Pour la Beuchire, si  $\alpha$  fluctue peu entre 0.02 et 0.045, les réserves écoulables varient davantage, étant donné la moins bonne précision des bas débits. Les valeurs les plus faibles ont été obtenues pour des événements relativement brefs qui se sont produits après un tarissement important.

**Tableau C.1**

*Présentation des coefficients de tarissement calculés pour quelques crues de 1989 à 1991 pour les systèmes de La Beuchire et de La Doue.*

| Date crue | Débit max<br>(l/s) | Débit à<br>l'ordonnée<br>Q <sub>o</sub> | Durée du<br>tarissement/<br>courbe récession | Coefficient de<br>tarissement<br>$\alpha$ | Réserves<br>écoulables<br>(mio. m <sup>3</sup> ) |
|-----------|--------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| BEUCHIRE  |                    |                                         |                                              |                                           |                                                  |
| 2.11.89*  | ( )                | 1000                                    | 26 j                                         | 0.029                                     | 0.7                                              |
| 27.6.90   | 1800               | 665                                     | 63 j                                         | 0.029                                     | 1.9                                              |
| 2.10.90   | 854                | 245                                     | 19 j                                         | 0.045                                     | 0.5                                              |
| 17.5.91   | 1410               | 570                                     | 26 j                                         | 0.037                                     | 1.35                                             |
| 18.6.91   | 735                | 220                                     | 45 j.                                        | 0.020                                     | 0.96                                             |
| LA DOUE   |                    |                                         |                                              |                                           |                                                  |
| 24.4.89   | 1410               | 300                                     | 51 j                                         | 0.035                                     | 0.74                                             |
| 2.11.89   | 2300               | 233                                     | 33 j                                         | 0.045                                     | 0.45                                             |
| 27.6.90   | 2200               | 300                                     | 34 j                                         | 0.050                                     | 0.52                                             |

\* débits surestimés

### 1.2.3. Volumes écoulés et réserves écouables

Les réserves écouables se situent en moyenne à 1.1 millions de m<sup>3</sup> (tab.C.1), mais c'est un minimum et nous relèverons cette valeur à 1.5 million de m<sup>3</sup>. Notons surtout que les volumes calculés sont des volumes minimaux qui ne peuvent tenir compte des plus faibles débits, non fiables, inférieurs à 100 l/s.

**Les volumes calculés ne représentent que 6 % des volumes écoulés annuellement à La Beuchire ou à La Doue. Ces volumes correspondent à environ 30 mm de lame d'eau sur le bassin, soit 3 % des précipitations annuelles (brutes).**

Pour la crue du 27 juin 1995, nous avons calculé les volumes écoulés à La Beuchire et à la Doue depuis le début de la crue. Les volumes écoulés des réservoirs lents et rapides sont donnés au tableau C.2. D'après ces résultats, le volume du réservoir rapide de La Doue est proportionnellement plus élevé que celui du réservoir rapide du système de La Beuchire. Le débit total de La Doue a été mesuré lors de la crue alors que celui de La Beuchire est amputé du débit de débordement du Creugenat, difficile à estimer en l'absence de jaugeages. Les volumes calculés pour le réservoir rapide sont sous-estimés en supposant que le débit de base dû au milieu capacitif diminue très fortement au cours de la crue (en raison de l'inversion des gradients milieu capacitif - milieu transmissif).

Au vu de ces résultats, **les volumes d'eau contenus dans les réservoirs rapides (milieu transmissif) sont plus importants que ceux contenus dans les réservoirs lents (milieu capacitif).** Cependant, les volumes se tiennent dans un ordre de grandeur de 2:1 plutôt que de 10:1 ou 1:10. Le volume du milieu capacitif comprend également les eaux de l'épikarst à écoulement lent. L'absence de précipitation durant 2 mois a des conséquences très rapides et très importantes sur les débits d'étiage des exutoires.

**Tableau C.2**

*Comparaison des volumes écoulés dans les réservoirs lents et rapides des La Beuchire et de La Doue, lors de la crue du 27 juin 1990. Les volumes sont exprimés en millions de mètres cube.*

| Système     | Volume du réservoir lent $R_l$ | Volume du réservoir rapide $R_r$ | $R_l/R_r$ |
|-------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------|
| La Beuchire | 1.9                            | 1.4                              | 1.35      |
| La Doue     | 0.5                            | 1.1                              | 0.45      |

Des compartiments de moins en moins perméables sont drainés et prennent une importance toujours plus grande dans le débit de la source. En cours de tarissement, les débits diminuent moins rapidement grâce à ces apports issus du réservoir le plus vaste, mais le plus lent à la restitution.

La comparaison des tarissements de septembre et d'octobre 1990, montre un tarissement beaucoup plus rapide en octobre. Les petites crues de fin septembre et début octobre ont été nettement insuffisantes pour permettre à l'aquifère de se recharger après la longue période de basses eaux. Cette situation s'est répétée voire accentuée en 1991. En effet, à la fin de l'été 1991, le niveau d'eau du bassin de réception de la Beuchire a atteint son niveau le plus bas, consécutivement à un déficit des recharges au cours du printemps 91 (crues de faible intensité illustrées par un Creugenat très peu actif) et de l'année précédente.

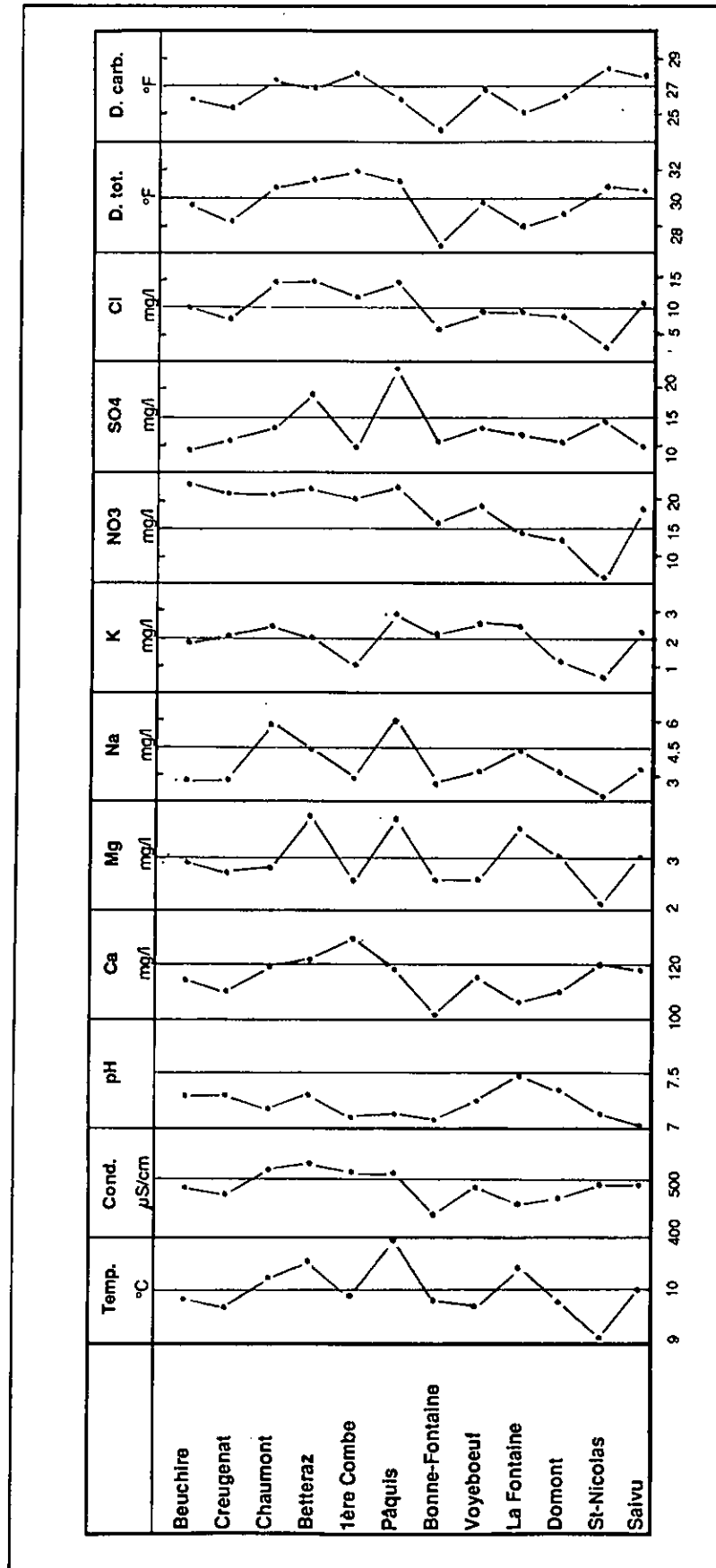
## 1.3 Apport de la physico-chimie à la compréhension du fonctionnement des aquifères

### 1.3.1 Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources ajoulotes

Les principaux paramètres physiques et chimiques des sources étudiées se trouvent dans le tableau C.3 sous forme de moyennes annuelles. Ces dernières ont été reportées graphiquement sur la figure C.6, afin de caractériser les différentes sources entre elles du point de vue des apports. La qualité de l'eau des différentes sources étudiées a été observée en dehors de périodes de hautes eaux. En effet, lors des crues, l'entraînement massif de polluants par le lessivage des sols augmentent les concentrations de ces polluants dans la source. Le calcul des moyennes serait faussé par la disparité des concentrations entre crues et basses eaux.

#### ***Influence de l'occupation du sol sur la minéralisation d'une source***

La minéralisation moyenne des sources donne généralement une bonne indication de l'altitude de son bassin versant. Dans une même région, une source **moins minéralisée** que les autres possède un **Impluvium plus élevé** en altitude, par exemple La Bonne-Fontaine. D'autres facteurs influencent cependant la minéralisation. Ainsi, la source de La Fontaine ainsi que celles du versant ouest de la Basse-Allaine, ont une minéralisation inférieure à la moyenne de 490  $\mu\text{S/cm}$ , mais un bassin versant de basse altitude. Les bassins versants de ces sources sont en grande partie boisés ou occupés par des pâturages. Sachant que l'infiltration à travers le sol permet d'acquérir la quasi-totalité de la minéralisation, sa nature prend une importance considérable dans la caractérisation des eaux souterraines.



**Figure C.6**  
Chimie des principales sources karstiques d'Ajoie. Comparaison de quelques valeurs physico-chimiques moyennes.

**Tableau C.3:**

*Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources karstiques ajoulotes (moyennes de l'année 1988-1989, 10 analyses).*

|                                   | TEMP | COND<br>20°C | pH   | Ca   | Mg   | Na   | K    | NO <sub>3</sub> | SO <sub>4</sub> | Cl   | DURETÉ |         |
|-----------------------------------|------|--------------|------|------|------|------|------|-----------------|-----------------|------|--------|---------|
|                                   |      |              |      |      |      |      |      |                 |                 |      | TOTALE | TEMPOR. |
|                                   | °C   | µS/cm        |      | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l            | mg/l            | mg/l | °F     | °F      |
| <b>Beuchire</b><br>année 1989-90* | 9.9  | 490          | 7.12 | 114  | 2.4  | 2.8  | 2.1  | 22              | 9.4             | 9.5  | 29.3   | 26.2    |
|                                   | 9.8  | 490          | 7.32 | 115  | 2.4  | 2.7  | 1.7  | 24              | 9.2             | 11   | 29.6   | 26.0    |
| Creugenat                         | 9.7  | 480          | 7.31 | 110  | 2.2  | 2.6  | 2.0  | 21              | 11              | 8.4  | 28.4   | 25.3    |
| Chaumont                          | 10.2 | 521          | 7.17 | 119  | 2.3  | 5.7  | 2.4  | 21              | 13              | 14   | 30.7   | 27.2    |
| <b>Betteraz</b><br>année 1989-90* | 10.5 | 517          | 7.20 | 120  | 3.3  | 4.4  | 2.1  | 21              | 19              | 14   | 31.2   | 25.2    |
|                                   | 10.4 | 526          | 7.32 | 122  | 3.2  | 4.2  | 1.9  | 23              | 18              | 15   | 31.7   | 26.9    |
| 1.Combe(#)                        | 9.8  | 519          | 7.1  | 129  | 2.1  | 2.9  | 0.9  | 20              | 10              | 12   | 32     | 28      |
| Pâquis                            | 10.9 | 510          | 7.16 | 118  | 3.2  | 5.9  | 2.8  | 22              | 24              | 14   | 30.7   | 25.9    |
| Bonne-Fontaine                    | 9.8  | 438          | 7.10 | 102  | 2.1  | 2.6  | 2.1  | 16              | 11              | 6.2  | 26.3   | 23.7    |
| Voyeboeuf                         | 9.7  | 491          | 7.27 | 116  | 2.1  | 3.2  | 2.5  | 19              | 13              | 8.9  | 29.6   | 26.5    |
| La Fontaine                       | 10.4 | 459          | 7.44 | 107  | 3.0  | 4.4  | 2.4  | 14              | 12              | 9.1  | 27.9   | 25.2    |
| Saivu (2)                         | 10.0 | 493          | 6.95 | 118  | 2.5  | 3.2  | 2.2  | 18              | 9               | 11   | 30.5   | 27.5    |
| Domont (1989-90)*                 | 9.8  | 470          | 7.35 | 111  | 2.5  | 3.1  | 1.2  | 13              | 11              | 7.6  | 28.7   | 26.2    |
| St-Nicolas                        | 9.1  | 493          | 7.17 | 121  | 1.6  | 1.6  | 0.5  | 4.7             | 14              | 2.9  | 30.8   | 28.1    |
| ALLAINE                           |      |              |      |      |      |      |      |                 |                 |      |        |         |
| amont Porrentruy                  | 8.1  | 485          | 8.3  | 106  | 4.8  | 5.1  | 2.8  | 12              | 35              | 11   | 28.8   | 24.1    |
| aval Porrentruy                   | 9.4  | 489          | 7.8  | 113  | 3.0  | 3.9  | 2.0  | 19              | 17              | 11   | 29.5   | 25.8    |
| Courchavon                        | 9.7  | 514          | 7.9  | 113  | 3.0  | 10.0 | 3.5  | 21              | 20              | 16   | 29.4   | 26.1    |
| Courtemaiche                      | 10.4 | 489          | 8.0  | 112  | 2.8  | 6.9  | 3.2  | 22              | 17              | 14   | 29.1   | 25.1    |
|                                   | TEMP | COND         | pH   | Ca   | Mg   | Na   | K    | NO <sub>3</sub> | SO <sub>4</sub> | Cl   | D.TOT  | D.TEMP  |

\* analyses hebdomadaires

# analyses pour hautes eaux: source temporaire

Par rapport à des sols cultivés intensivement, les sols forestiers et non cultivés dégagent beaucoup moins de CO<sub>2</sub> (comm. orale J. Fernex, biologiste à l'OEPN), lequel est le principal facteur de dissolution du carbonate de calcium. Les eaux d'infiltration sont donc nettement moins chargées en traversant ces types de

sol. Les eaux se chargent aussi moins en **nitrate**, si bien que les sources peu minéralisées sont les mêmes que celles possédant les valeurs les plus faibles en nitrate (Bonne-Fontaine, La Fontaine, Domont, St-Nicolas).

### **Sources magnésiennes**

Les eaux sont de type bicarbonaté calcique. Elles ne sont pas toujours équilibrées. Selon les sources, les eaux sont incrustantes (La Fontaine) ou agressives (Betteraz). Les eaux de la source de La Fontaine montrent les valeurs de **pH** les plus élevées (7.44 en moyenne annuelle, moins de 7.33 dans les autres sources d'Ajoie). Les eaux incrustantes de La Fontaine ont posé de nombreux problèmes à la sonde de conductivité qui, malgré un nettoyage régulier, a subi plusieurs pannes. La source de La Fontaine se distingue des autres sources étudiées par des valeurs étonnamment élevées en **magnésium (Mg)**. Les sources du Betteraz et du Pâquis possèdent aussi des valeurs élevées, mais qui s'expliquent par des apports ayant traversé:

- des calcaires du Portlandien, plus riches en Mg que les autres formations du Malm,
- des roches du Tertiaire et du Keuper.

Ces roches contiennent des niveaux évaporitiques qui induisent encore des apports élevés de **sulfates** au Betteraz et au Pâquis. Des sources issues du Keuper montrent des valeurs de sulfates supérieures à 2000 mg/l. A La Fontaine, le magnésium n'est pas lié aux sulfates, mesurés avec des concentrations deux à trois fois plus faibles qu'au Betteraz et au Pâquis.

## 1.3.2 Pollution des eaux souterraines

### a) Influence des eaux usées

Jusqu'en 1987, la quasi totalité des eaux usées d'Ajoie étaient rejetées directement dans le karst ou dans un cours d'eau (cfi C.H.: carte hydrogéologique). La contamination des eaux n'était pas seulement bactériologique mais également chimique. Sachant que les eaux usées industrielles des régions de Cornol, Courgenay et Porrentruy notamment contiennent des concentrations importantes en solvants chlorés, on imagine la contamination générale des eaux superficielles et karstiques. Notons cependant que ces substances étant très volatiles, la contamination de l'Allaine est décroissante vers l'aval. Jusqu'à la mise en service de la STEP de Porrentruy (22 000 EH<sup>1</sup>), la qualité<sup>2</sup> de l'Allaine était mauvaise sur toute sa longueur (nettement à fortement polluée).

L'assainissement a eu des résultats très nets: dès 1988, l'Allaine est considérée comme faiblement polluée jusqu'à l'aval de Porrentruy. Ce résultat a son importance lorsqu'on sait qu'une partie de cette rivière alimente, par des pertes, certains systèmes d'écoulement, dont celui du Betteraz. La source est captée et traitée depuis 1992 par les communes de Porrentruy et Courgenay.

Les rejets d'eaux usées dans le karst sont progressivement dirigés vers une STEP. La situation de la Basse-Allaine, entre Courchavon et Boncourt reste cependant précaire, dans l'attente des raccordements des communes concernées à la STEP de Grandvillars (France). L'ouest de l'Ajoie, avec les communes de Damvant, Réclère, Grandfontaine et Rocourt n'a pas encore de plan d'assainissement des eaux usées,

---

<sup>1</sup> Equivalents habitants

<sup>2</sup> Les critères de qualité sont déterminés d'après les concentrations annuelles moyennes en basses eaux des polluants suivants: phosphate, ammonium, carbone organique, DBO<sub>5</sub> et les bactéries fécales.

mais ces eaux usées ne contaminent pas le système de La Beuchire comme on le pensait jusqu'en 1988.

Le problème de la rétention des argiles issus de la Place d'Armes de Bure n'est que partiellement résolu à ce jour. Les sources de Courtemaîche, Buix et Boncourt sont encore touchées.

Malgré un programme d'assainissement encore chargé, les principaux bassins versants karstiques ont été débarrassés d'infiltrations massives d'eaux usées: La Beuchire, Le Betteraz, Le Voyeboeuf, Le Saivu et La Bonne-Fontaine. Ainsi, le réseau souterrain du Creugenat, utilisé durant 50 ans comme collecteur d'égouts (Brandt, 1975), est à nouveau visitable par les spéléologues.

Le remplacement des phosphates par le NTA et le EDTA dans les produits de lessive a entraîné une forte augmentation du premier élément dans les eaux usées (Giger et al. 1992), mais cette substance est rapidement biodégradée et retrouvée dans de faibles concentrations dans les sources. Par contre, l'EDTA, (lessives, industrie), beaucoup plus stable est régulièrement trouvé dans les puits et sources de la région.

La concentration du **sodium** est généralement égale ou inférieure à 3 mg/l. Avec des concentrations supérieures, on trouve les sources du Betteraz, Pâquis, de La Fontaine et de la Chaumont. Pour ces quatre points, le sodium paraît nettement lié aux apports d'eaux usées (fuites des collecteurs) de zones urbanisées. La charge organique (oxydabilité) de ces points est aussi importante (Lièvre et al., 1992). Issus d'eaux usées (lessives), le **NTA** et l'**EDTA** sont décelés dans ces sources avec des valeurs non négligeables et corroborent l'origine domestique du sodium.

Avec le potassium, le sodium reflète ainsi bien le degré d'activité humaine sur les différents bassins versants ajoulots.

Même si nous ne possédons que peu d'analyses de la source de la Doue, nous pouvons la comparer sur bien des points à celle de La Beuchire. La minéralisation est un peu plus haute (10  $\mu\text{S/cm}$ ). Les concentrations en potassium, chlorure, nitrate, phosphate et matières organiques nous paraissent bien plus élevées, montrant une emprise humaine proportionnellement plus importante que pour La Beuchire.

La contamination par les métaux lourds était également très importante avant 1987. Actuellement l'Allaine n'en est plus que faiblement chargée.

La pollution bactérienne reste importante malgré l'épuration des eaux usées ou leur sortie des systèmes concernés et malgré le pouvoir autoépurateur du karst (50-99% de disparition des streptocoques fécaux et des *Escherichia coli*). L'origine des bactéries est aussi bien domestique qu'agricole (Lièvre et al. 1993).

## b) Influence agricole

La charge polluante organique provenant des apports diffus est essentiellement d'origine agricole, celle en azote l'est presque totalement. En revanche, les apports de phosphore sont plus nettement d'origine domestique. Pourtant utilisé en grande quantité dans les engrais, l'ion orthophosphate est beaucoup mieux adsorbé dans les sols alors que le nitrate n'est lessivé que lors de fortes pluies entraînant des particules de sol. Le phosphore est un bon indicateur de pollution car il n'entre pas dans la composition des roches comme le chlorure, le sodium, le sulfate ou le potassium.

Les **chlorures** se retrouvent aussi en plus fortes concentrations dans les sources de Betteraz, du Pâquis et de la Chaumont. Ici, c'est plutôt une origine agricole qui est à rechercher, mais de manière différenciée par rapport aux nitrates. Ces sources montrent également les minéralisations et duretés les plus importantes (plus de 500  $\mu\text{S/cm}$  et plus de 30°F). Les bassins, aux surfaces agricoles importantes, donnent naissance à des sources marquées par des valeurs plus élevées en nitrates: celle de La Beuchire s'ajoute

aux sources précédentes dans le groupe des sources dépassant 20 mg/l en moyenne annuelle. Les sources du Saivu et du Voyeboeuf, dont le bassin est occupé de manière différente par les activités humaines, se trouvent dans un groupe intermédiaire. Le mode de culture se répercute bien sur les teneurs en chlorure et nitrate, les plus élevées en octobre-novembre (fig. C.6).

Des micropolluants rejetés par l'agriculture parviennent également dans les sources karstiques: les triazines (atrazine) n'en représentent qu'une petite partie. Ces herbicides sont utilisés massivement dans les cultures de maïs. Ils ont également été répandus sur les voies ferrées jusqu'en 1989. Les concentrations mesurées dans les eaux souterraines dépassent souvent la limite fixée pour l'eau potable (0.1 µg/l). Durant les périodes de traitement des champs de maïs (mai à juillet), les concentrations dépassent parfois cette limite d'un facteur 10 ou plus. Cette contamination des eaux souterraines par l'atrazine reflète bien la vulnérabilité des aquifères karstiques et alluviaux aux polluants d'origine agricole.

Ces polluants se révèlent être de relativement bon traceurs des eaux souterraines. La biodégradation partielle de l'atrazine en déséthylatrazine indique par exemple des relations peu rapides entre l'Allaine et la nappe alluviale de Courtemaîche (voir chap.3).

L'intervention humaine sur la qualité des eaux souterraines n'est pas toujours aussi polluante. Ainsi, certaines pratiques agricoles comme le chaulage de grandes surfaces agricoles en automne subsistent encore en Ajoie. Ces pratiques ont un impact sensible sur les eaux souterraines lors des premières crues d'automne. En lieu et place d'une dilution des eaux karstiques par l'arrivée massive d'eau de pluie, on observe une sensible minéralisation de l'eau des exutoires karstiques, notamment à La Beuchère.

### c) Influence des décharges

A l'image de nombreuses régions, le problème des décharges (autorisées ou sauvages) est encore crucial. Dans le canton de Vaud, une partie des décharges autorisées contiennent des substances interdites et les premiers scandales commencent à éclater quand des sources privées deviennent impropres à la consommation où que des accidents mortels surviennent lors d'assainissements indispensables. Dans le canton du Jura, le problème des décharges est aussi crucial. Il a commencé avec la fameuse décharge de la chimie bâloise à Bonfol. Cette décharge est aujourd'hui assainie et ses lixiviats traités par une STEP construite à cet effet.

A Porrentruy, la commune a engagé des poursuites contre les entreprises responsables des dépôts qui ont pollué la source du Betteraz. De gros investissements ont été consentis par la commune pour capter et traiter l'une des sources karstiques les plus polluées (chimiquement) d'Ajoie.

Après l'assainissement des eaux usées (en cours en 1994), l'assainissement des décharges est un problème crucial pour la qualité des eaux souterraines. Plus de la moitié des entreprises ajolotes utilise de grandes quantités de solvants chlorés. Durant des décennies, ces derniers (contenus dans des déchets industriels liquides) étaient rejetés dans les égouts, dans un cours d'eau ou déposés dans des décharges sauvages. La plus grande partie de ces décharges étant située dans des dolines, on imagine l'ampleur de la contamination des aquifères karstiques et alluviaux (avant 1985, valeurs dépassant 100 µg/l dans certaines sources dont le Betteraz). Des recherches systématiques de solvants chlorés ont été menées sur plus de trente sites connus (abandonnés ou en activité). Dix-sept sites ont révélé la présence de ces déchets industriels (cf. C.H.). La permanence de la contamination implique que des sources de polluants déposés entre 1950 et 1980 continuent de relâcher des solvants chlorés et que cette contamination va durer encore des dizaines d'années sans apports nouveaux. La bonne oxygénation des eaux karstiques ne permet pas une biodégradation efficace des solvants chlorés. L'assainissement des sites de pollution paraît pratiquement impossible étant donné l'importance des volumes contaminés (Freiburghaus, 1994).

Tous les sites connus sont localisés sur la carte hydrogéologique de l'Ajoie et à la figure C.7. Ils sont de deux types:

- décharges de matériaux de démolition/ordures ménagères dans des carrières/dolines/combes, directement sur calcaires;
- dépôts industriels (liquides) uniquement, sur terrains argileux.

La nature du sous-sol supportant les dépôts de solvants est déterminante dans cette classification. Les dépôts se situent soit directement sur les calcaires perméables (vallées sèches), soit sur des terrains argileux. Le lessivage de ces dépôts va être très différent. Le premier type libère des solvants à chaque crue importante par lessivage de la décharge, généralement dénoyée. Le second type relâche de manière permanente des solvants dans les aquifères; ces dépôts contiennent souvent une certaine quantité d'eau avec des circulations lentes. Ils sont localisés dans le secteur Courgenay-Cornol, sur des dépôts tertiaires.

Les décharges contiennent également des déchets à forte concentration de tritium (horlogerie), surtout à proximité de Porrentruy où deux sources (Chaumont et Masset) montrent des teneurs élevées (voir ci-dessous).

### ***Problèmes des solvants chlorés dans les aquifères karstiques***

Trois types de pollution sont à l'origine de la contamination des eaux souterraines d'Ajoie:

- infiltration directe dans les aquifères avec les eaux usées;
- infiltration depuis des décharges sauvages;
- évaporation de ces substances volatiles et retombée avec les pluies (faible influence).

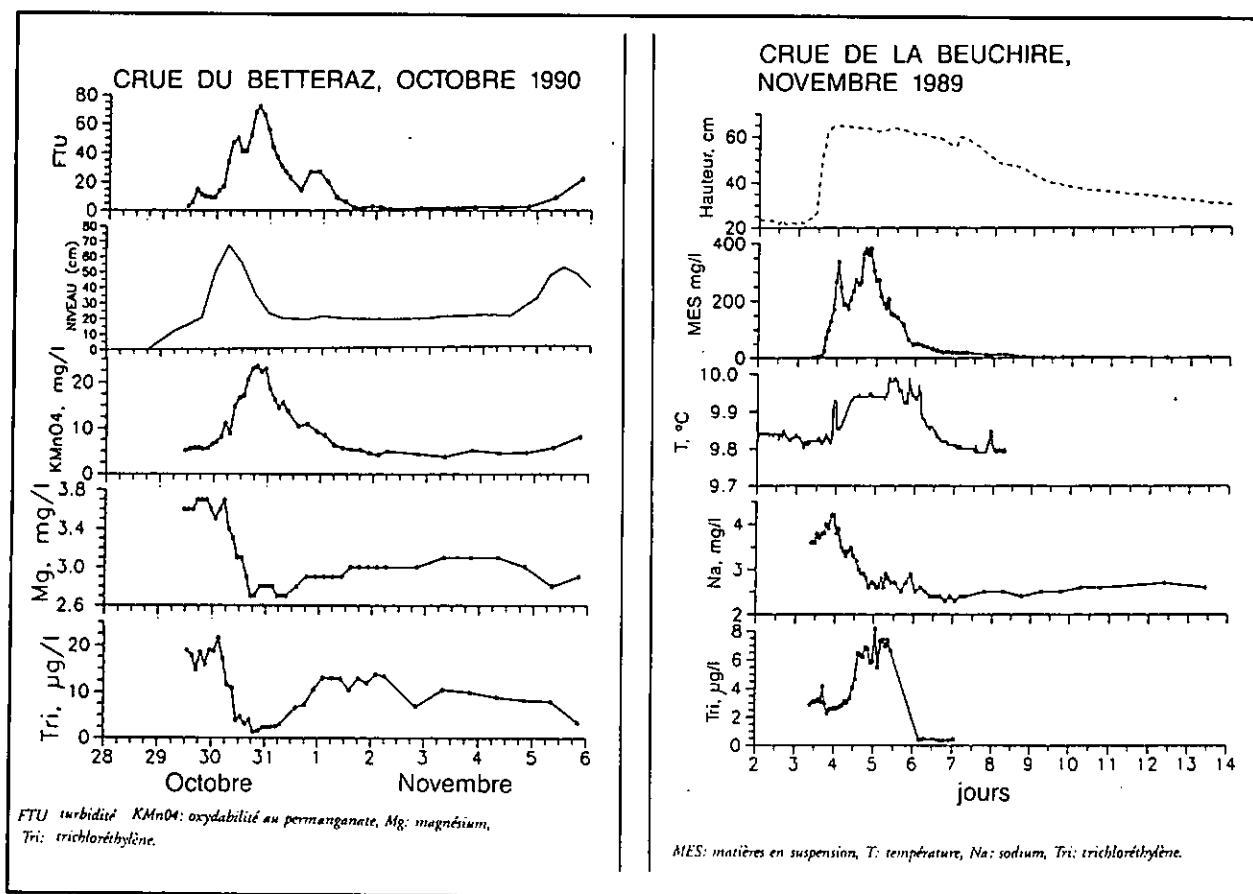
Dans les eaux usées, des concentrations en solvant de 300 µg/l ont été atteintes, avec 20 à 40 µg/l en moyenne pour la STEP de Porrentruy alors que dans les pluies elles atteignent environ 3 µg/l. Ces deux apports sont relativement de faible ampleur et ne parviennent pas à expliquer des pollutions aussi importantes des eaux souterraines. Ainsi, les eaux souterraines n'échappent pas à la contamination par les solvants chlorés, essentiellement le trichloréthylène et le perchloréthylène. Des concentrations supérieures à 1 µg/l ont été mesurées dans les sources. Les sources du Pâquis, du Betteraz, de Domont et de la Chaumont sont les plus touchées, surtout par le trichloréthylène, avec des moyennes de 5 à 24 µg/l (1987-1990). Des concentrations très élevées dépassant 100 µg/l ont même été mesurées au Betteraz avant 1985. Le perchloréthylène est pour sa part également présent dans les sources du Betteraz et du Pâquis (12 et 5 µg/l) en plus des puits du Pont d'Able (voir chap. 2). Les deux sont donc fortement contaminées par des arrivées régulières de solvants et la diminution n'est pas encore décisive, malgré les assainissements réalisés à ce jour. A l'opposé, la source St-Nicolas, relativement proche du Betteraz mais indépendante, n'est que très faiblement contaminée, par les précipitations uniquement. Les concentrations mesurées à St-Nicolas représentent le bruit de fond régional (référence) sans contamination par les décharges ou les eaux usées.

### ***Exemples***

Deux types de comportement opposé se produisent dans l'évolution des solvants au cours d'une crue:

1) A la source de La Beuchire (crue de novembre 1989, donnée à la fig. C.7), on observe une augmentation simultanée de la concentration de trichloréthylène, de la température et de la turbidité. Les solvants sont lessivés par les pluies au même titre que les argiles. Cela indique une relation directe entre les eaux d'infiltration rapide et la pollution. Le phénomène a également été constaté pour d'autres sources: Bonne-Fontaine et Domont. Dans cette dernière, l'effet est comparable à un essai de traçage: le dépôt de solvants est connu, l'injection est pratiquement ponctuelle, la courbe de restitution est obtenue avec un temps de transfert d'environ 12 h et des vitesses de déplacement de 170 m/h. Les solvants sont rapidement lessivés dans le substratum calcaire tout proche. Certains événements, apparemment

insignifiants du point de vue de l'augmentation des débits, occasionnent une forte augmentation de solvants chlorés en l'absence de toute autre variation chimique (15.8.90, cf. fig. C.8).



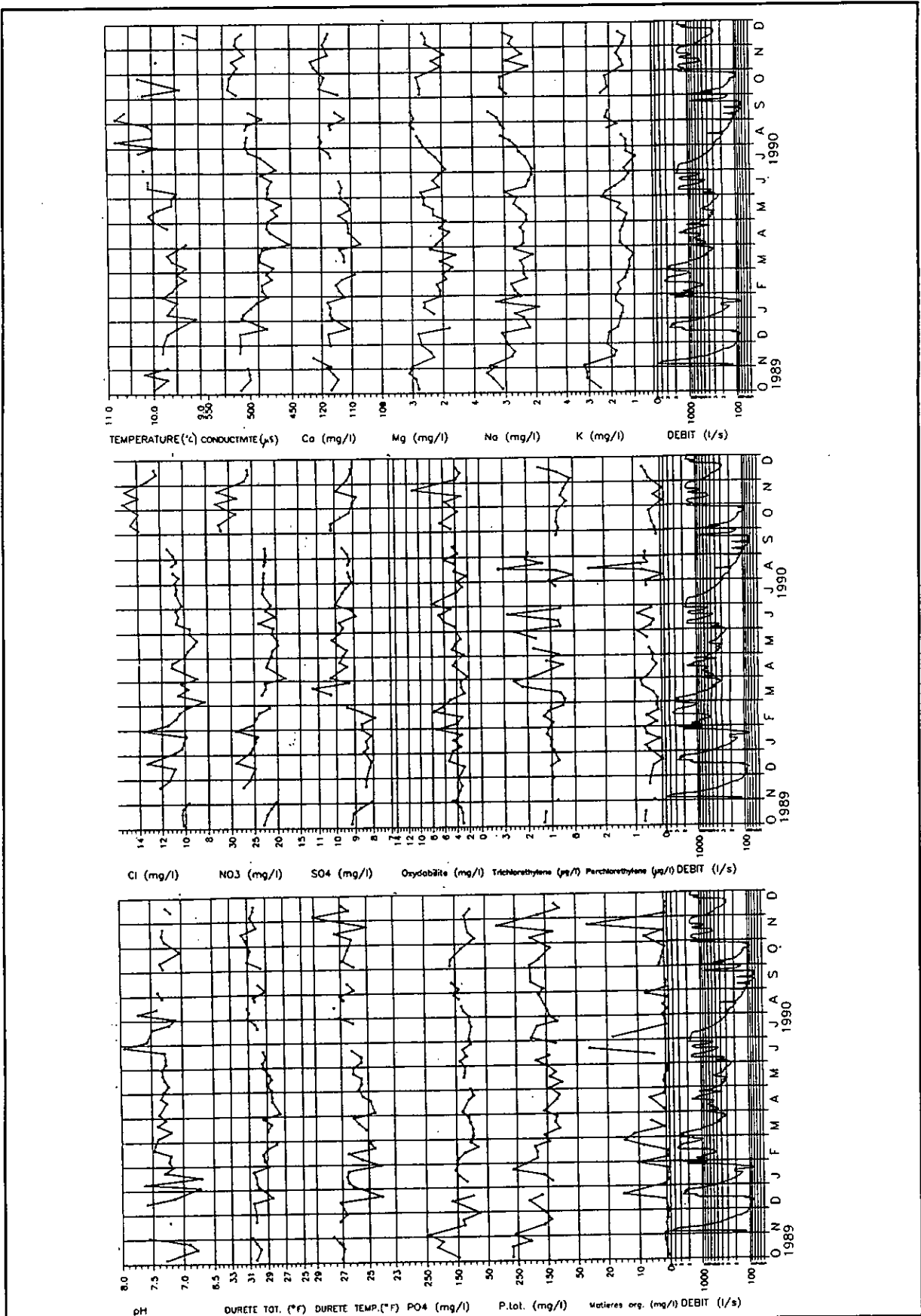
**Figure C.7**

Sources de la Beuchire et du Betteraz. Comportement différent des solvants au cours d'une crue (tiré de Lièvre et al. 1993).

2) Dans les sources du Betteraz (fig. C.7), du Pâquis et du Voyeboeuf, une dilution importante du trichloréthylène a été mesurée, après un effet piston variant selon la distance source-dépôt. Dans le bassin versant du Betteraz, les dépôts tertiaires couvrant la partie amont constituent probablement tout une zone à apport continu de solvants. Pour le Voyeboeuf, les faibles concentrations en solvant de la source ne sont causées que par un site très localisé, en liaison relativement rapide avec l'aquifère karstique (traçage n°69, plus de 100 m/h en crue). Pour la source du Pâquis, l'origine de la contamination est à rechercher essentiellement dans les alluvions supportant la ville de Porrentruy (concentrations importantes de solvants mesurées dans des piézomètres, suite à des anciennes fuites d'égouts, antérieures à la réfection du réseau des années 1987 et suivantes). Les deux types de dépôts nous mènent à deux type de source (fig. C.7):

- les sources faiblement contaminées en basses et moyennes eaux (Beuchire et Domont) mais dont la contamination augmente en crue;
- les sources fortement contaminées en basses eaux, beaucoup moins en hautes eaux (Betteraz, Pâquis, Voyeboeuf). Lors des années sèches, les concentrations moyennes de solvants sont ainsi plus élevées que lors des années humides (voir tab. C.4).

Les apports de solvants chlorés sont le plus souvent sous forme dissoute. Les concentrations sont basses mais le sont-elles suffisamment pour ne pas modifier les caractéristiques physiques de l'eau? La question



**Figure C.8**  
Source de la Beuchire, Porrentruy. Evolution hebdomadaire de l'hydrochimie d'octobre 1989 à décembre 1990

mérite d'être posée, car les solvants sont plus lourds que l'eau et auraient donc tendance à être entraînés dans les parties plus profondes des aquifères. Le temps de rémanence des solvants chlorés dans les aquifères en serait d'autant plus élevé.

**Tableau C.4:**

*Comparaison des valeurs de solvants chlorés volatils (moyennes annuelles) et de deux campagnes d'analyses de tritium dans quelques sources karstiques et dans les nappes alluviales (valeurs en italique) de Porrentruy (Pont d'Able) et Courtemaîche.*

| Source /<br>/ Date             | Somme des solvants chlorés (µg/l) |      |      |      |      | Tritium (TU) |         |
|--------------------------------|-----------------------------------|------|------|------|------|--------------|---------|
|                                | 1986                              | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 4.10.89      | 24.1.91 |
| Betteraz                       | 22                                | 20   | 24   | 28   | 38   | --           | 39      |
| Pâquis                         | 36                                | 23   | 27   | 35   | 35   | --           | 53      |
| Voyeboeuf                      | 2.1                               | 3.6  | 4.2  | 5.5  | --   | 54           | 36      |
| Beuchire                       | 2.6                               | 4.0  | 3.8  | 2.9  | 2.3  | 55           | 42      |
| Creugenat                      | --                                | 1.4  | 2.1  | 2.5  | --   | 39           | 32      |
| Chaumont                       | --                                | 6.0  | 8.4  | 9.4  | --   | 152          | 256     |
| Bonne-Fontaine                 | --                                | 2.4  | 1.5  | 4.7  | --   | 95           | 38      |
| La Fontaine                    | --                                | 4.0  | 4.5  | 4.0  | 3.3  | 104          | 58      |
| <i>Courtemaîche</i>            | --                                | 2.5  | 4.5  | 2.5  | 2.4  | 114          | 124     |
| <i>Pont d'Able</i>             | --                                | 6.5  | 8.6  | 6.4  | 8.5  | --           | 126     |
| Saivu                          | --                                | --   | --   | --   | --   | 68           | 33      |
| La Vendline                    | --                                | --   | --   | --   | --   | 54           | 52      |
| Précipitations<br>Fahy (mm/an) | 1086                              | 1265 | 1161 | 907  | 1002 | --           | --      |

Afin de déterminer l'âge moyen de l'eau des principales sources ajoulotes, des analyses de tritium ont été effectuées. Les résultats obtenus n'ont pas été à la hauteur de nos objectifs. Nous avons ainsi constaté une pollution relativement élevée de certaines sources (La Chaumont, La Fontaine, nappe alluviale de Courtemaîche), appartenant à de relativement petits systèmes situés en zone urbaine industrialisée. Il faut rechercher l'origine des pollutions dans de petits dépôts régulièrement lessivés (décharges sauvages, dolines comblées et oubliées). Ces dépôts contenant du tritium ne contiennent pas forcément des solvants chlorés et vice-versa.

Les meilleurs exemples sont:

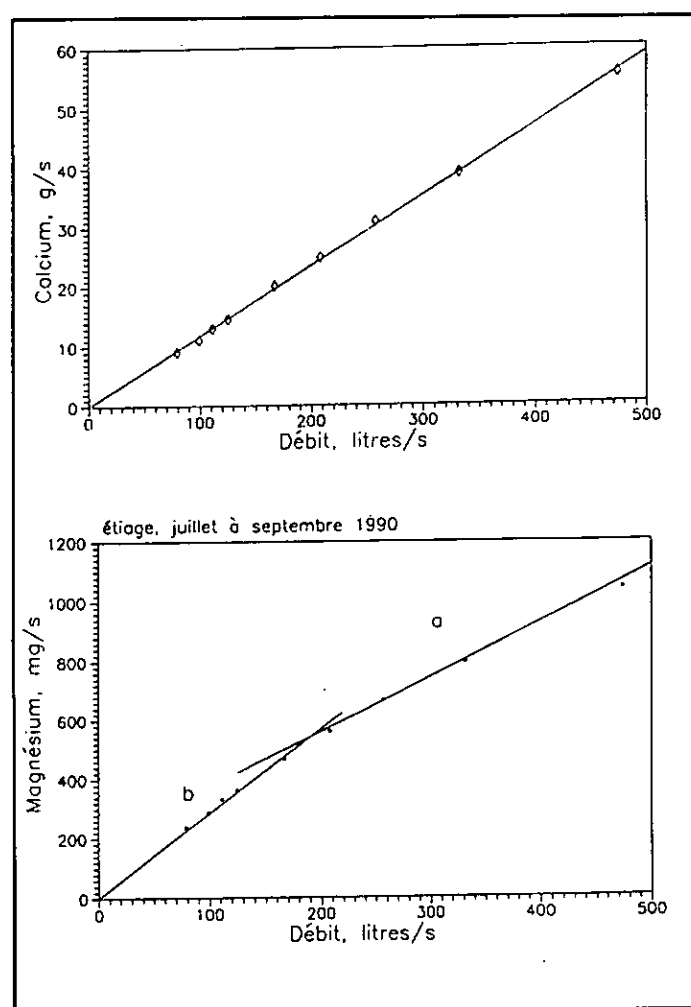
- La Fontaine, peu contaminée en solvant mais davantage en tritium;
- Le Betteraz, fortement pollué en solvants et pratiquement pas en tritium.

Les sources ajoulotes ont des valeurs supérieures à celles de la moyenne des précipitations annuelles et les fluctuations sont généralement trop importantes pour ne pas être attribuée à une contamination par des dépôts sauvages. Seul Le Creugenat, dont le bassin versant est essentiellement agricole, a des valeurs relativement normales. La source de la Vendline a pour sa part des valeurs moyennement élevées mais stables en tritium, tout comme en oxygène-18. Une proportion importante de ses eaux, plus ancienne, pourrait provenir de circulations profondes (Jura plissé ?).

### 1.3.3 Evolution physique et chimique de la source de La Beuchire

Le suivi chimique à moyen terme de la source de La Beuchire a été réalisé avec un intervalle de temps hebdomadaire, d'octobre 1989 à décembre 1990, soit sur 15 mois (fig. C.8). L'évolution de certains paramètres est intéressante. Quelques-uns montrent une évolution lente, avec de petites variations, d'autres sont stables, avec des concentrations extrêmes enregistrées en périodes de hautes eaux. L'évolution saisonnière de quelques paramètres est applicable à d'autres sources. Cela concerne notamment les paramètres liés au climat (température, conductivité voir chap.1.3.4), mais également à l'activité agricole: nitrate, chlorures.

Après la crue du 27 juin 1990, les eaux karstiques s'enrichissent progressivement en Mg, en Na et en K jusqu'à la fin août, soit pendant 2 mois. Le potassium et le sodium, de même que la conductivité, montrent la même tendance saisonnière, mais pour des raisons différentes. Si le potassium et le sodium ont une double origine (naturelle et humaine), le magnésium dépend uniquement de la nature de la roche. Au cours du tarissement, cet élément est donc fortement enrichi, parallèlement au sodium et au potassium.



**Figure C.9**  
Source de la Beuchire, Porrentruy. Relation des flux de calcium et de magnésium en fonction du débit (1989-90)

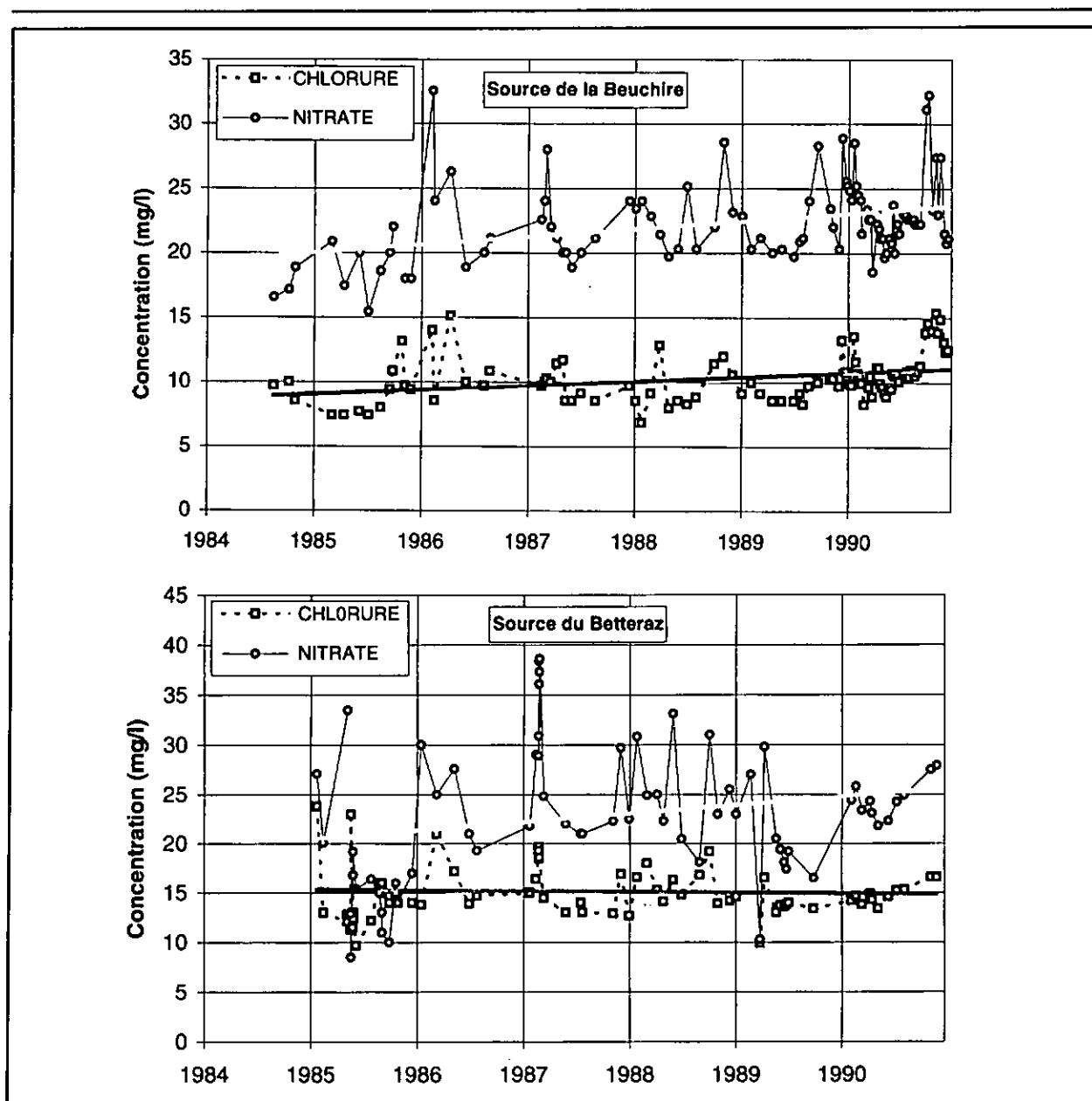
anions montrent des valeurs basses en été et élevées en automne. A la fin de son cycle (octobre), les nitrates ne sont plus guère fixés par la végétation. Ils sont donc plus facilement entraînés dans les eaux souterraines par les pluies d'automne (lessivage des sols).

La relation linéaire flux de calcium (g/s) et débit ne montre pas de cassure comme le magnésium (fig. C.9). L'essentiel de la charge calco-carbonatée est donc acquis dans la zone supérieure d'infiltration des eaux.

Le sulfate suit une tendance annuelle très différente des autres ions. Ainsi que nous l'avons vu ci-dessus, son origine est à rechercher dans des roches évaporitiques du type Keuper, voire dans certains engrais. Les valeurs les plus élevées observées après les grandes crues de la fin de l'hiver sont encore énigmatiques dans le cas de La Beuchire.

La conductivité se stabilise déjà à la fin juillet; Au cours de la même période, les nitrates et les chlorures restent stables, aucune entrée significative n'étant survenue.

L'évolution des chlorures est pratiquement stable depuis 1984 alors que celle des nitrates indique une tendance à l'augmentation, avec des pointes pouvant atteindre 33 mg/l (fig. C.10). La même tendance est observée dans d'autres sources. Au Betteraz, les nitrates ont même dépassé 45 mg/l. Ce phénomène est surtout dépendant de l'évolution des techniques agricoles. L'origine essentiellement humaine du nitrate et du chlorure en font des paramètres caractéristiques de la partie superficielle des aquifères. Ces deux



**Figure C.10**

Sources de la Beuchire et du Betteraz, Porrentruy. Evolution des concentrations en nitrates et en chlorures de 1984 à 1990.

Si la conductivité montre généralement une dilution importante lors des crues, ce n'est pas le cas en automne. On observe au contraire une augmentation de la minéralisation (enrichissement en carbonates de calcium).

Celle-ci a trois origines possibles:

- le chaulage des terres, fréquent en Ajoie, permettant une dissolution très rapide du carbonate de Ca en poudre;
- libération du  $\text{CaCO}_3$  par les sols bruns calciques;
- la concentration des eaux en carbonate de calcium par ETR dans l'épikarst.

Les fortes turbidités mesurées à La Beuchire ont essentiellement pour origine la région située entre Fahy et Bure, recouverte de sols superficiels facilement lessivés (présence des pistes de chars de la place d'arme de Bure). Les travaux en cours sur la N16 en amont de Porrentruy occasionnent également depuis

leur début une augmentation de la turbidité des sources, essentiellement celle du Betteraz. Dans un avenir proche, ces travaux vont également toucher d'autres sources lorsqu'ils se poursuivront sur le plateau de Bure. Précisons que la turbidité due à toutes ces activités humaines ne fait que s'ajouter à la turbidité "naturelle", issue du nettoyage des réseaux karstiques.

### 1.3.4 Interprétation des variations de température et de conductivités

#### a) Valeurs moyennes et extrêmes de la température

La température est un excellent traceur naturel qu'il convient cependant d'utiliser avec précaution. Il est ainsi primordial de bien connaître le signal d'entrée (température de l'air voire des cours d'eau) autant que le signal de sortie (température des points d'eaux) avec si possible des enregistrements en continu. Ces derniers permettent d'affiner la compréhension de phénomènes cycliques ou éphémères. Les fluctuations de température des sources sont de plusieurs types.

- cycliques; cycles journaliers et cycles annuels (saisonniers, fortes valeurs en été et faibles valeurs en fin d'hiver);
- Irrégulières et rapides lors de crues (été ou hiver).

L'évolution des températures (enregistrements continus) de La Beuchire se trouve à la figure C.11 et celle des autres sources étudiées en annexe 6.1. Les valeurs de août-septembre 1991 sont artificiellement trop élevées à cause du réchauffement rapide de l'eau à l'exutoire (niveau très bas au cours d'un étiage exceptionnel).

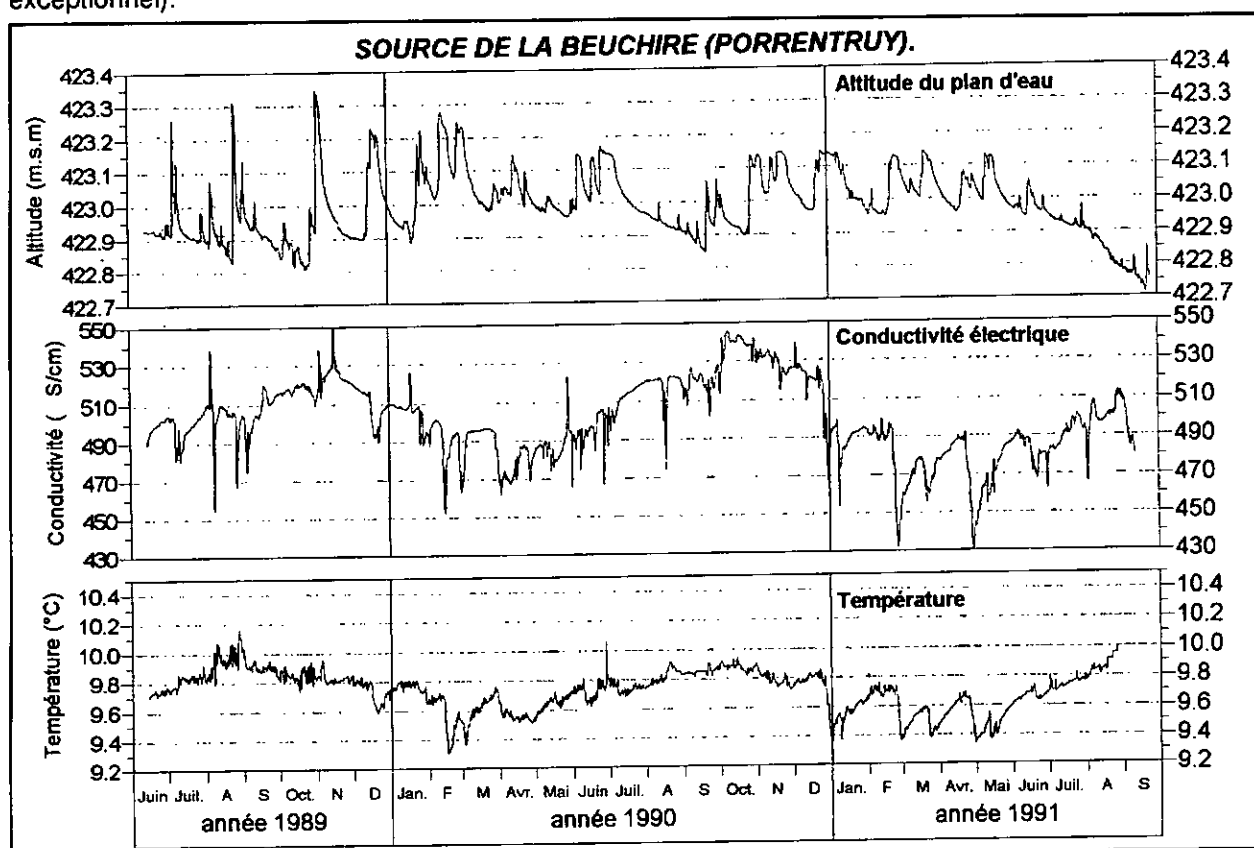


Figure C.11

Source de la Beuchire. Evolution de l'altitude du plan d'eau, de la conductivité électrique et de la température entre 1989 et 1991.

### Moyennes annuelles

Les températures moyennes des principales sources karstiques d'Ajoie sont proches de 10°C (voir tab.C.5). La différence d'altitude entre les différentes sources est faible: 440 m pour la source du Voyeboeuf et 370 m pour celle du Saivu. Les sources dont l'impluvium recouvre une partie du Jura plissé (altitudes plus élevées) montrent les températures les plus basses, inférieures à 10°C.

Pour les systèmes du Betteraz et de La Fontaine, les températures moyennes, très proches, (même période de 10 mois de mesures continues) sont plus élevées que les autres sources karstiques. On observe encore dans les deux sources précitées des fluctuations journalières de la température (voir chap.2).

L'évolution interannuelle de la température des sources n'a pu être mise en évidence dans le cadre de cette étude, faute du recul nécessaire. La plus longue période de mesures continues n'excède pas 30 mois.

Les plus lentes variations thermiques observées sont saisonnières, avec des maxima enregistrés en automne, généralement entre la fin août et la mi-novembre, selon la source et l'année. Pour Le Saivu, nous remarquons une périodicité, de faible amplitude, autour des 10°C, avec environ la première moitié de l'année hydrologique au-dessous et la seconde moitié au-dessus de cette température.

**Tableau C.5:**

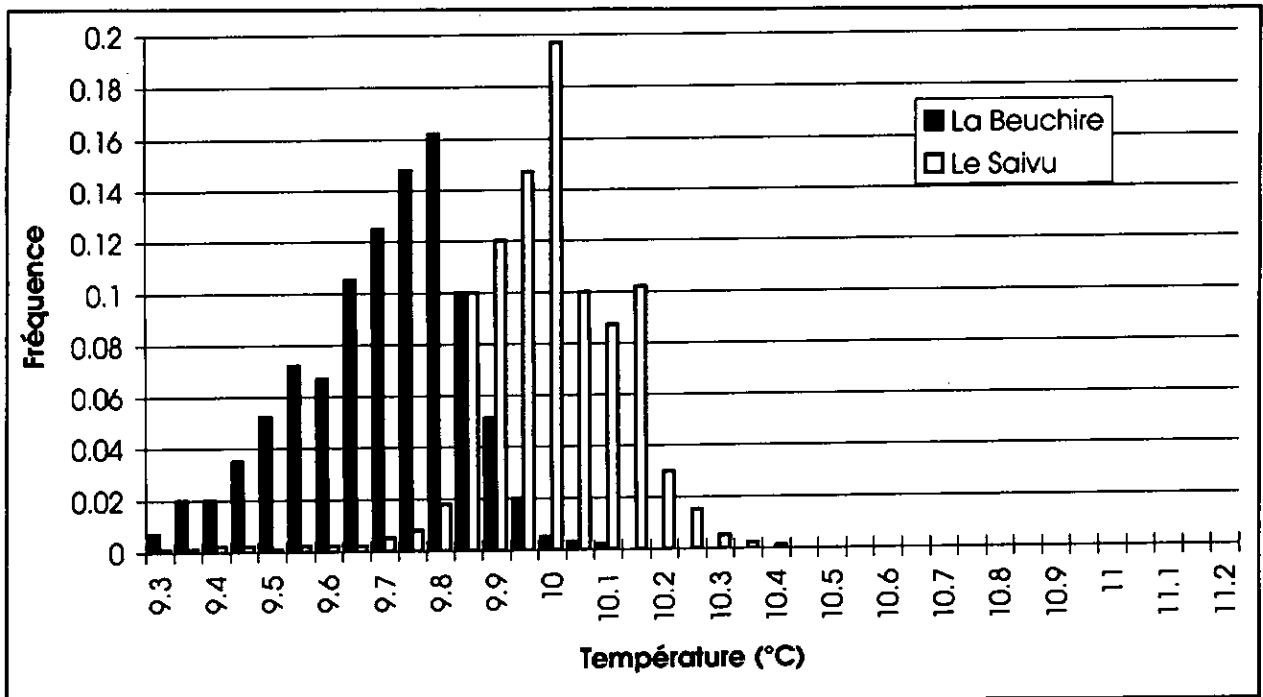
*Synthèse des températures (°C) et conductivités (µS/cm) des sources ajolotes (sur enregistrements continus). Les moyennes calculées sur des mesures ponctuelles sont indiquées entre parenthèses (voir tab. C.3).*

|                | TEMPERATURE (°C) |        |      |      | CONDUCTIVITE (µS/cm) |       |      |      |
|----------------|------------------|--------|------|------|----------------------|-------|------|------|
|                | moy.             |        | min. | max. | moy.                 |       | min. | max. |
| Beuchire       | 9.75             | (9.8)  | 9.3  | 10.2 | 505                  | (490) | 450  | 550  |
| Betteraz       | 10.25            | (10.4) | 9.6  | 11.3 | 545                  | (526) | 500  | 570  |
| Pâquis         | 11.1             | (10.9) | 10.0 | 11.6 | 507                  | (510) | 350  | 520  |
| Bonne-Fontaine | 9.5              | (9.8)  | 8.5  | 10.6 | 430                  | (438) | 380  | 490  |
| La Fontaine    | 10.15            | (10.4) | 9.5  | 11.1 | 465                  | (459) | 400  | 510  |
| Saivu          | 10.0             | (10.0) | 9.4  | 10.4 | ?                    | (?)   | ?    | ?    |

### Températures extrêmes

En 1989, les maxima des sources de La Beuchire, du Saivu, du Betteraz et de La Fontaine ont bien coïncidé à la fin août. En 1990, le maximum du Betteraz a probablement (arrêt des mesures continues début septembre) eu lieu en août déjà et seulement fin septembre pour La Beuchire, Le Saivu et La Fontaine. Une crue importante n'ayant touché que Le Betteraz à la mi-août explique cette situation et confirme le rôle primordial joué par les crues dans les cycles saisonniers.

Les minima suivent aussi les crues, irrégulières d'une année à l'autre, entre février et avril-mai. Ils sont beaucoup moins nets que les maxima et parfois se multiplient. Ainsi, durant l'hiver 1990-91, on observe même un "palier" minimum de quelques mois (Beuchire, Saivu, La Fontaine), certe perturbé par les crues, mais qui se prolonge jusqu'à la mi-mai. A partir de cette période, la température de base augmente sensiblement, à l'image de ce qui se passe également dans la rivière. Cependant le rôle de cette dernière est complexe à la suite de la double influence des sources karstique et de la météorologie.



**Figure C.12**

Sources karstiques de la Beuchire et du Saivu. Distribution fréquentielle (histogrammes) des températures moyennes journalières (1989-1991).

L'écart entre minima et maxima varie d'une source à une autre. Nous allons classer les écarts en trois catégories: faibles, élevés et moyens. Ils peuvent aussi être illustrés par la distribution fréquentielle des températures pour chaque source (fig. C.12 et C.13).

#### 1) Ecart faible

Ils sont observés pour les sources importantes (Beuchire - Saivu) dépourvues de cours d'eau permanent; les écarts sont inférieurs à 1 °C au cours d'un cycle hydrologique. Bien que le bassin de La Beuchire soit 4 fois plus vaste que celui du Saivu, ils ont des caractéristiques semblables, notamment en étant drainés par une rivière souterraine visitable. La distribution fréquentielle illustre bien ces faibles variations, mais également le décalage thermique entre les deux courbes: La Beuchire étant plus froide que Le Saivu. L'asymétrie de chacune des courbes est différente: peu de mesures dans les températures basses pour Le Saivu, au contraire de La Beuchire. Rappelons que l'altitude moyenne de l'impluvium de La Beuchire est supérieur de 50 m à celui du Saivu-La Font.

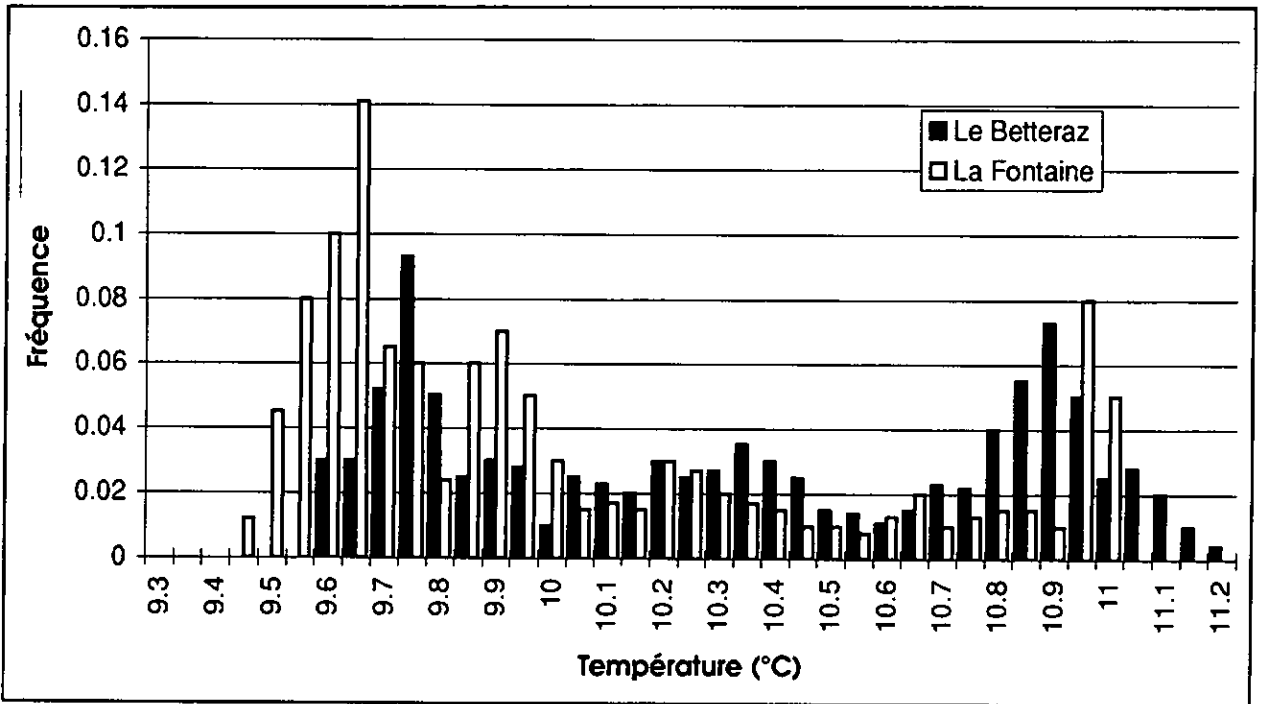
#### 2) Ecart élevé

Ces écarts concernent des sources en relation avec une rivière. L'Allaine qui s'infiltre dans les systèmes du Betteraz et de La Fontaine provoque à leur exutoire des variations saisonnières qui atteignent 1.6 à 1.8 °C.

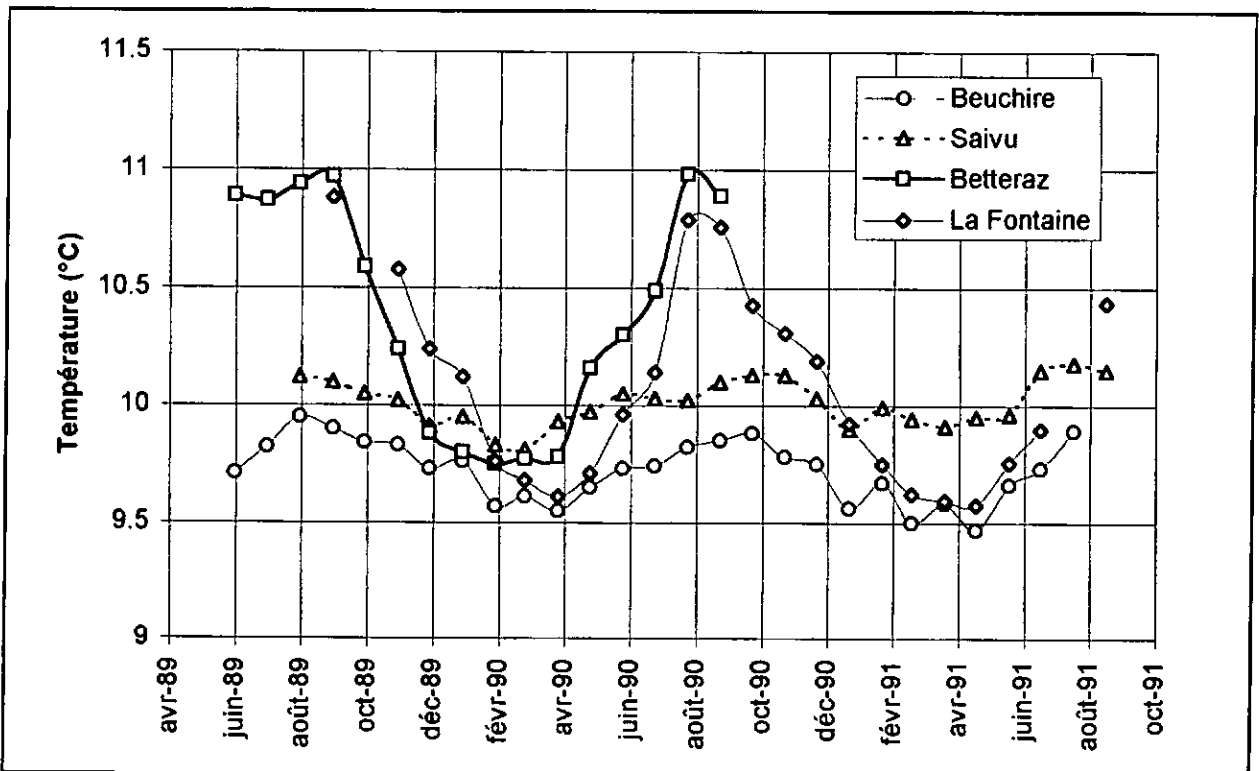
#### 3) Ecart moyen

Une source comme le Voyeboeuf montre des écarts intermédiaires (1.4°C), avec des infiltrations d'un cours d'eau temporaire venant de Courgenay et de petits cours d'eau ne s'écoulant que dans la partie amont, au SE du bassin. Si Le Pâquis possède également des écarts moyens (1.3°C) et des infiltrations de l'Allaine, le comportement de la source n'est pas typiquement karstique.

Nous verrons au chapitre 3 que minima et maxima sont bien plus marqués pour les systèmes alluviaux; l'amplitude également plus importante, peut atteindre 3 à 5°C (Porrentruy, Courtemaîche et Buix).



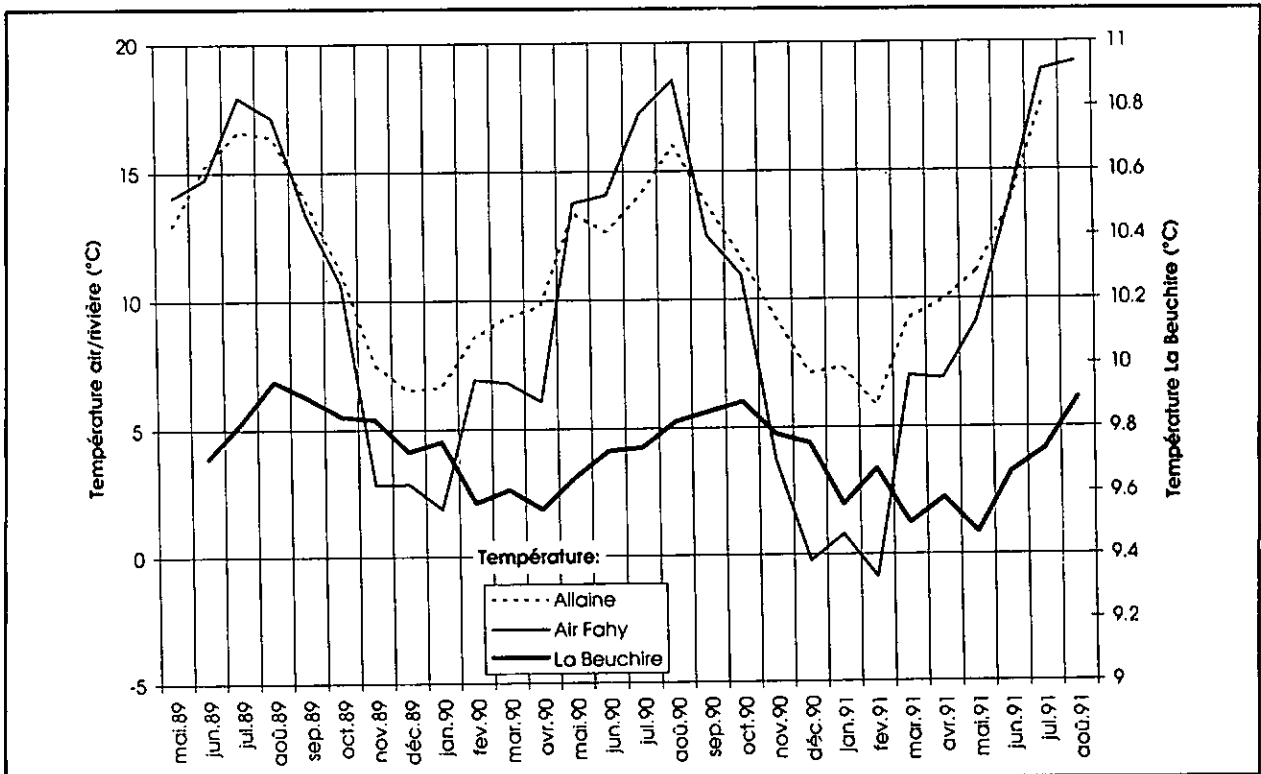
**Figure C.13**  
Sources karstiques du Betteraz et de la Fontaine. Distribution fréquentielle (histogrammes) des températures moyennes journalières (1989-1991).



**Figure C.14**  
Sources karstiques d'Ajoie. Evolution des températures moyennes mensuelles entre 1989 et 1991.

#### Répercussion de la température de l'air sur celle des sources

Nous faisons l'hypothèse que la position du maximum annuel des sources dépend davantage de la situation des crues que de la température de l'air maximale. Le comportement des groupes Beuchire-Saivu



**Figure C.15**  
Evolution des températures moyennes mensuelles de L'Allaine, de l'air à Fahy et de la source de La Beuchire de 1989 à 1991.

et Betteraz-La Fontaine (en relation avec l'Allaine) illustre bien l'influence essentielle d'infiltrations d'eau dans l'évolution des températures saisonnières (fig. C.14). Le maximum est atteint en août 1989 pour le second groupe alors que pour le premier, il n'est atteint qu'en octobre. De plus, sitôt après le maximum, la baisse de température est très marquée pour le second groupe, grâce aux apports quasi permanents de l'Allaine qui trouve rapidement un équilibre thermique avec l'air (pas de décalage sur les températures mensuelles). Le décalage est très sensible pour la source de La Beuchire. Le décalage avec la température de l'air (maximum en juillet ou en août) peut atteindre de 1 à 3 mois (fig. C.15).

#### b) Valeurs moyennes et extrêmes de la conductivité

**La conductivité électrique** exprime de manière très sensible la minéralisation totale de l'eau, fortement dominée par les composants formant la dureté totale de l'eau. Celle-ci est déterminée essentiellement par la dureté carbonatée, suite à la faible teneur en anions  $SO_4$ ,  $Cl$  et  $NO_3$ .

Le suivi régulier de la conductivité dans les sources contribue à la compréhension du fonctionnement des systèmes karstiques. Nous avons vu au chapitre 1.3.2 que les conductivités moyennes mesurées à partir d'échantillons d'eau ponctuels répartis sur une ou plusieurs années. Cet échantillonnage reste faible (analyses mensuelles) et ne reflète pas forcément la conductivité réelle de chaque source. C'est pour cette raison que nous pouvons observer certains écarts (voir tab. C.5) entre la conductivité moyenne annuelle calculée sur une douzaine de points et celle calculée sur l'ensemble des mesures en continu (environ 35'000 mesures). L'évolution des conductivités (enregistrements continus) des sources du Betteraz et de La Fontaine se trouvent à la figure C.26 (figure C.11 pour La Beuchire).

Les conductivités moyennes (sur mesures continues) des sources karstiques d'Ajoie permet de confirmer la classification suivante, en référence à la source de La Beuchire:

- sources peu minéralisées avec La Fontaine et La Bonne-Fontaine;

-source très minéralisée avec Le Betteraz.

### Fluctuations saisonnières

Nous avons observé les fluctuations saisonnières de la conductivité de la source de La Beuchire, grâce à des mesures hebdomadaires (fig. C.8). Cette tendance se retrouve évidemment sur les enregistrements en continu de toutes les sources équipées: La Beuchire, Le Betteraz, La Fontaine, Saivu et La Font.

Les minéralisations maximales (tab. C.5) se produisent généralement à la fin de l'étiage annuel (octobre-novembre). Elles ne correspondent pas forcément aux températures maximales. Les plus fortes dilutions ont lieu en mars-avril, lorsque les réserves des aquifères ont été reconstituées par les crues d'hiver: environ deux tiers du volume annuel des eaux s'écoulent au cours de cette période. Les précipitations efficaces sont importantes et ont un effet de dilution durable (cumulatif).

### Fluctuations journalières

Les cycles journaliers thermiques ne peuvent être mesurés que grâce à un enregistrement continu (4 mesures par heure), effectué par des appareils suffisamment précis (précision relative du 1/100 de degré), car les fluctuations journalières ne dépassent guère 0.1°C (0.05 à 0.15 °C) pour les sources. Dans des cas particuliers, l'amplitude atteint 0.4 °C (La Fontaine, décembre 1989). Seules les sources du Betteraz et de La Fontaine connaissent des variations journalières de la température. Ce sont également les seules sources étudiées dont le bassin alimentaire est traversé par un cours d'eau permanent, L'Allaine.

A l'image de la température, la conductivité subit aussi des fluctuations journalières dans les sources en relation avec l'Allaine, de manière rapide. Ces fluctuations ne sont visibles que dans les sources du Betteraz et de La Fontaine (voir chap.2).

### c) Variation de la minéralisation et de la température au cours d'une crue

Les enregistrements continus de la température et de la conductivité sont précieux pour comprendre ce qui se passe au cours d'une crue.

Si les débits donnent la transmission de la pression causée par une impulsion à l'entrée du système, la variation de température ou de conductivité indique à quel moment les eaux de pluie fraîchement infiltrées et mélangées aux eaux du réseau karstique parviennent à l'exutoire. Le tableau C.6 illustre l'amplitude du phénomène pour deux crues (hiver et été).

**Tableau C.6:**

*Temps d'arrivée de la vague principale d'eau fraîchement infiltrée dans les principales sources karstiques et amplitude de l'effet de dilution, lors de la crue de février 1990.*

| Source      | Février 1990 |                  |              | 27 juin 1990 |                  |              |
|-------------|--------------|------------------|--------------|--------------|------------------|--------------|
|             | Réaction [h] | Dilution [μS/cm] | Tempér. [°C] | Réaction [h] | Dilution [μS/cm] | Tempér. [°C] |
| La Fontaine | 16           | 110              | -0.25        | 4-7          | 90               | -0.35        |
| Le Saivu    | 24           | 70               | -0.55        | 20           | ?                | +0.45        |
| Le Betteraz | 30           | 55               | -0.1         | 20-29        | 50               | -0.3         |
| La Beuchire | 48           | 50               | -0.4         | 8-10         | 80               | +0.6         |

Le tableau C.6 amène plusieurs remarques.

1) On constate que la taille du bassin joue un rôle majeur dans l'inertie et l'amplitude de la réponse à une impulsion relativement homogène sur tout le bassin de l'Allaine. Pour le système du Betteraz, plus complexe que les autres, la classification est plus délicate. Mais pour chaque source, la réaction reste extrêmement rapide et montre dans tous les cas une grande nervosité.

2) La réaction thermique du Betteraz et de la Fontaine est plus faible que pour Le Saivu et La Beuchire. En relation plus ou moins régulière avec L'Allaine, les deux premières sources ont eu le temps de s'équilibrer thermiquement avec la surface avant la crue de février 1990.

3) Les minima-maxima de température et conductivité ne coïncident pas parfaitement, la température ayant une inertie un peu plus grande, le temps de trouver un équilibre avec le milieu karstique.

**4) Anomalies chaudes ou froides lors d'une crue en fonction de la source.**

Le phénomène le plus étonnant observé dans ce tableau est certainement le comportement thermique (crue du 27 juin 1990) du groupe La Beuchire - Le Saivu opposé au groupe Le Betteraz - La Fontaine. Qu'est-ce qui différencie principalement ces deux groupes?

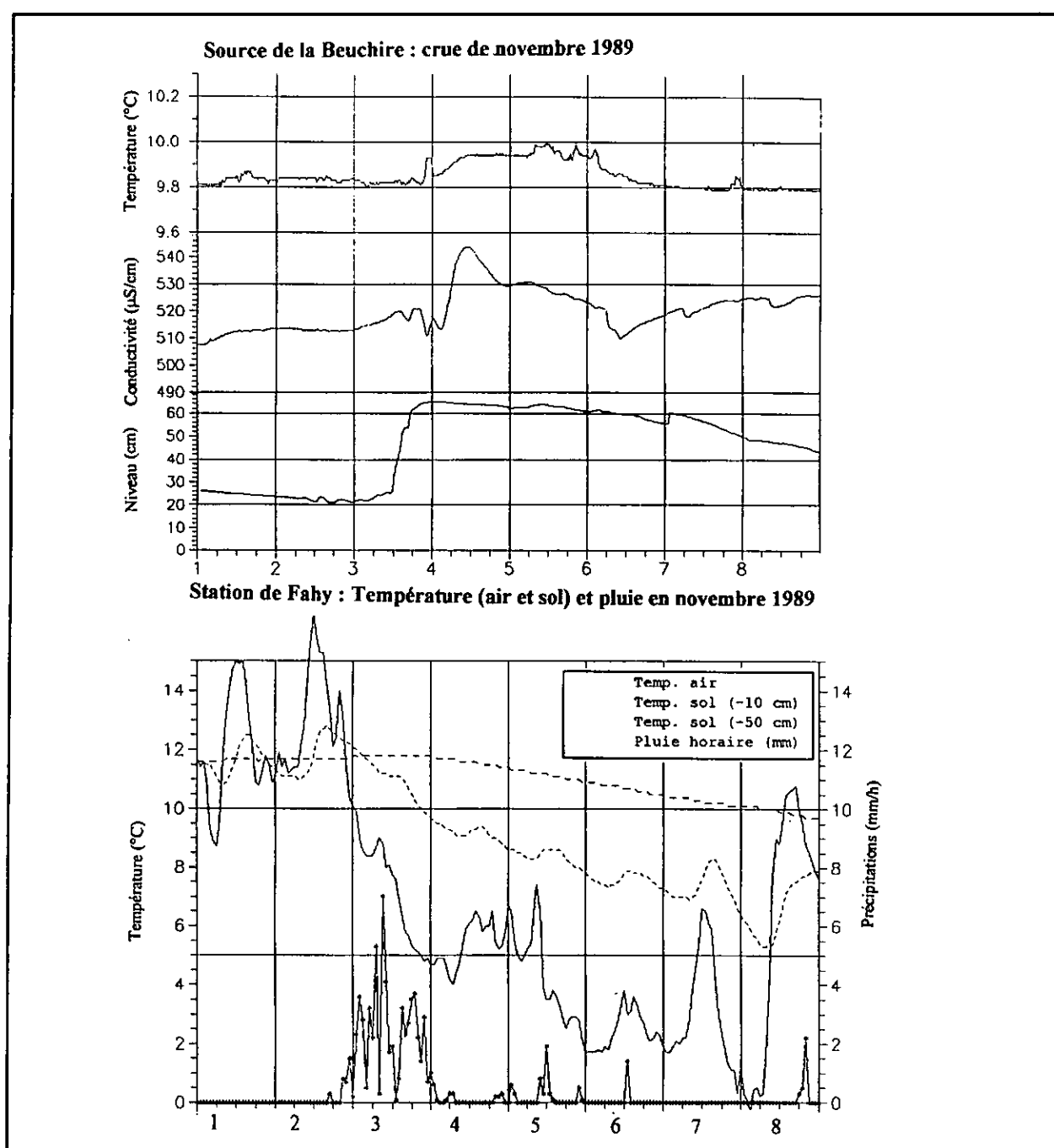
- Le premier groupe n'a aucune relation avec un cours d'eau superficiel, contrairement au second groupe;
- La zone vadose du premier groupe est plus importante que celle du second groupe;

L'anomalie froide causée par un orage de pluie chaude apparaît de prime abord étonnant. Mais, en se basant sur les constatations de Jeannin (1990), l'anomalie chaude serait au contraire anormale, surtout pour une crue annuelle, survenant après deux autres crues dans le même mois. Nous n'avons pas d'explication satisfaisante à ce phénomène. Nous ne pouvons que constater que l'anomalie chaude n'est pas due à un effet piston, la dilution maximale coïncidant voir précédant l'anomalie! Le phénomène n'est pas non plus isolé. Un autre exemple, plus étrange encore s'est produit lors de la crue du 3 novembre 1989 (fig. C.16). Une anomalie chaude a été provoquée à La Beuchire par des pluies tombées avec une température de l'air inférieure à 8 °C, inférieure à celle de la source. On notera cependant que la température du sol à 10 cm de profondeur était encore supérieure 10°C et celle mesurée à 50 cm supérieure à 12 °C... Le contraste thermique entre les eaux de pluie infiltrées et celles du système de La Beuchire était relativement faible avec une réponse nette d'environ +0.2°C à l'exutoire!

Si l'on en croit Jeannin, ce sont les flux d'air circulant dans la zone vadose qui régulent la température des eaux karstiques et qui explique pourquoi la température de l'eau de la source en étiage correspond à celle de l'air (en moyenne annuelle) au même endroit. En l'absence de données correctes de la température à Porrentruy (altitude de l'exutoire), nous ne pouvons vérifier cette hypothèse.

***Evolution de la minéralisation à la Beuchire au cours d'une crue (réponse bimodale de la conductivité)***

Lorsque des précipitations commencent à tomber sur le sol et à s'infiltrer, les conduits karstiques contiennent des eaux minéralisées qui seront poussées vers l'exutoire avec comme signal résultant une augmentation passagère de la conductivité (effet piston) jusqu'à l'arrivée réelle des eaux fraîchement infiltrées. Les volumes d'eau qui participent alors à l'écoulement sont expulsés du réseau transmissif par la pression hydrostatique, provoquée par l'infiltration concentrée via les conduits subverticaux (dolines). L'effet piston est souvent observé grâce aux mesures de conductivité, mais les mesures de température le mettent également en évidence. Nous verrons au chapitre 2 comment se manifeste cet effet avec les



**Figure C.16**

Evolution de la température de l'air et du sol à Fahy ainsi que celle de l'eau à La Beuchire: anomalie thermique chaude par un signal d'entrée "froid".

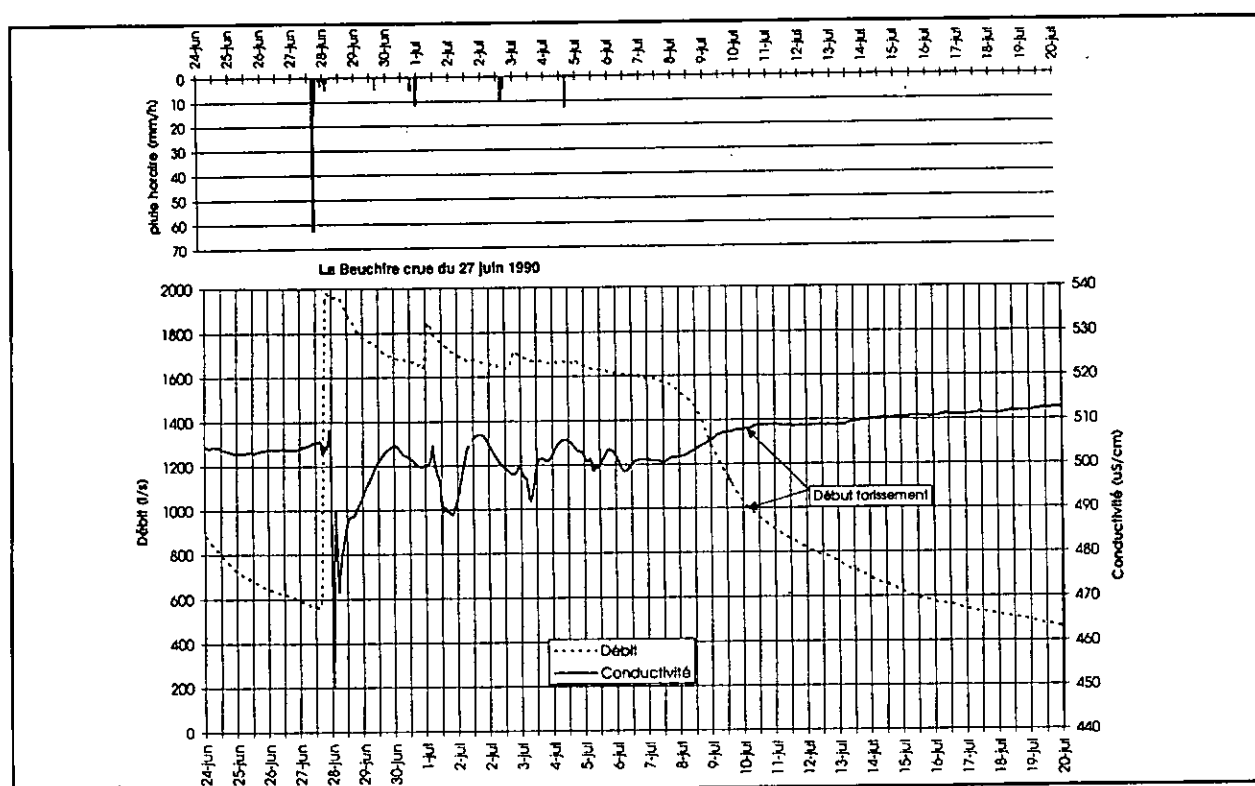
infiltrations de l'Allaine pour Le Betteraz.

Pour La Beuchire, l'effet piston se distingue faiblement, mais de manière sensible à la fin de la montée de la crue (2-5 μS/cm). L'augmentation de la minéralisation est immédiatement suivie d'une première dilution puis d'une deuxième lors de gros orages d'été. Tantôt la première dilution, tantôt la seconde est la plus importante. Plus le signal d'entrée est intense, plus les deux dilutions sont rapprochées. La hiérarchisation de l'aquifère se concrétise de cette manière. A la suite d'une forte et rapide mise en charge du réseau karstique, une partie du système s'écoule prioritairement à une autre. D'après la répartition et l'intensité des précipitations tombées sur l'impluvium, la partie centrale du bassin (vallée sèche principale

Chevenez-Courtedoux) ralentit les arrivées latérales. Lorsque le signal d'entrée est plus étalé dans le temps, ce phénomène n'est guère observé (crues d'hiver en général).

La crue de novembre 1989 (fig. C.16), qui a mis fin à l'étiage annuel, fonctionne selon le même schéma "piston"-dilution; au niveau du chimisme, l'effet piston est mis en évidence par le sodium, le potassium, le phosphate; une forte dilution se produit 24 h plus tard. Pour d'autres paramètres (turbidité, phosphore total, oxydabilité, conductivité et trichloréthylène), on observe deux pics distincts dont le premier, plus faible, représente l'effet piston et le second l'arrivée principale des eaux fraîches qui se chargent en éléments solides et en polluants par lessivage des sols et des décharges. Les différents éléments en suspension ont retrouvé leurs valeurs initiales 4 à 5 jours après le début de la crue. Les cations, par contre, ne vont pas retrouver leurs valeurs initiales, considérées comme maxima annuels.

La fin de la décrue et le **début du tarissement** est souligné par la **relative stabilisation de la minéralisation** (fig. C.17). Une fois que l'eau fraîchement infiltrée -moins minéralisée- a été évacuée du réseau transmissif, les eaux d'un chimisme équilibré reprennent une part prépondérante dans l'écoulement.

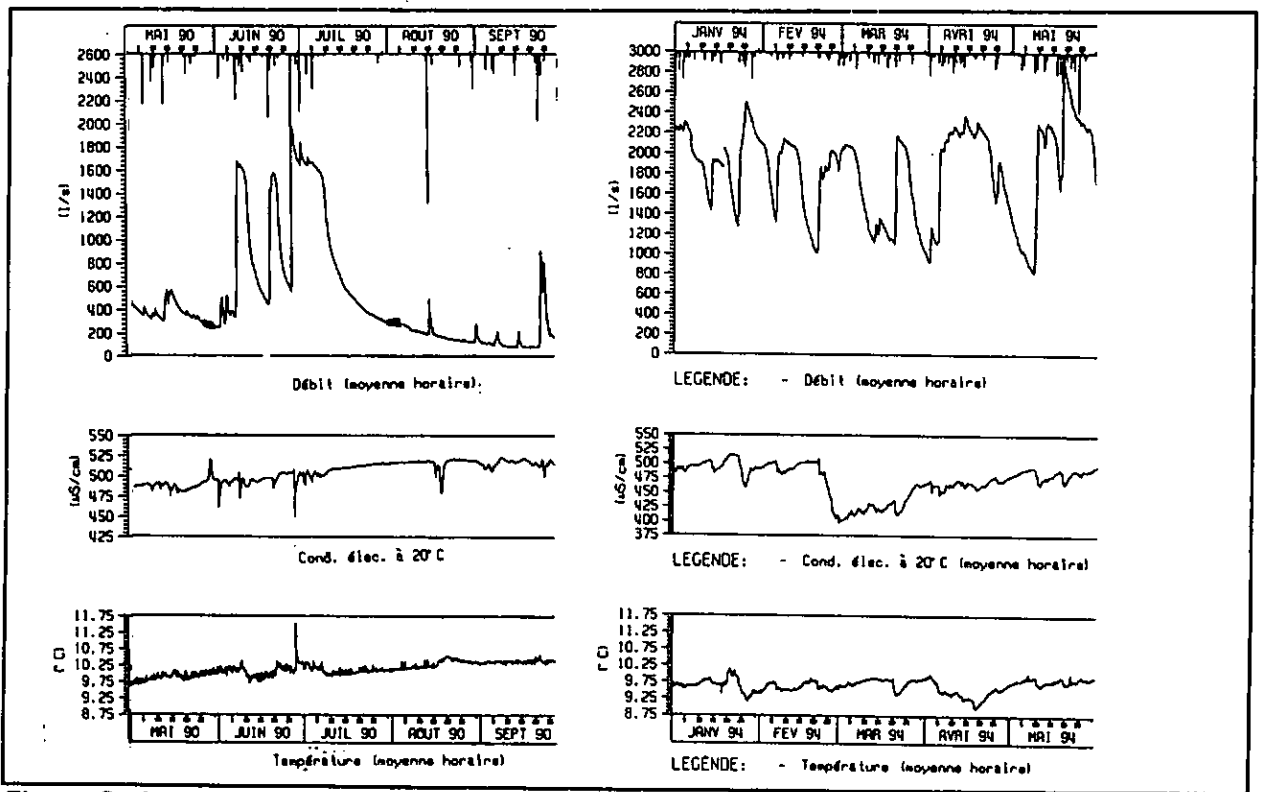


**Figure C.17**

*Evolution de la minéralisation et de la température de La Beuchire lors de la crue du 27 juin 1990 et du tarissement qui a suivi.*

La minéralisation initiale est rapidement retrouvée dans la phase de tarissement lors des crues d'été, ce qui n'est pas le cas pour les crues d'hiver qui apportent aux aquifères karstiques des volumes beaucoup plus importants (moins d'évapotranspiration). **L'état de recharge des aquifères peut donc être jugé d'après l'évolution de la minéralisation** (fig. C.18).

Comme c'est le cas avec toutes les crues étudiées, le rééquilibre thermique a une plus grande inertie que pour la minéralisation. L'évolution de la température est extrêmement lente pour les eaux du milieu capacitif.



**Figure C.18**

*Evaluation qualitative de l'état des réserves en fonction de l'évolution de la minéralisation après une ou plusieurs crues. Comparaison de 2 périodes: hiver 93-94 et été 90 à La Beuchire.*

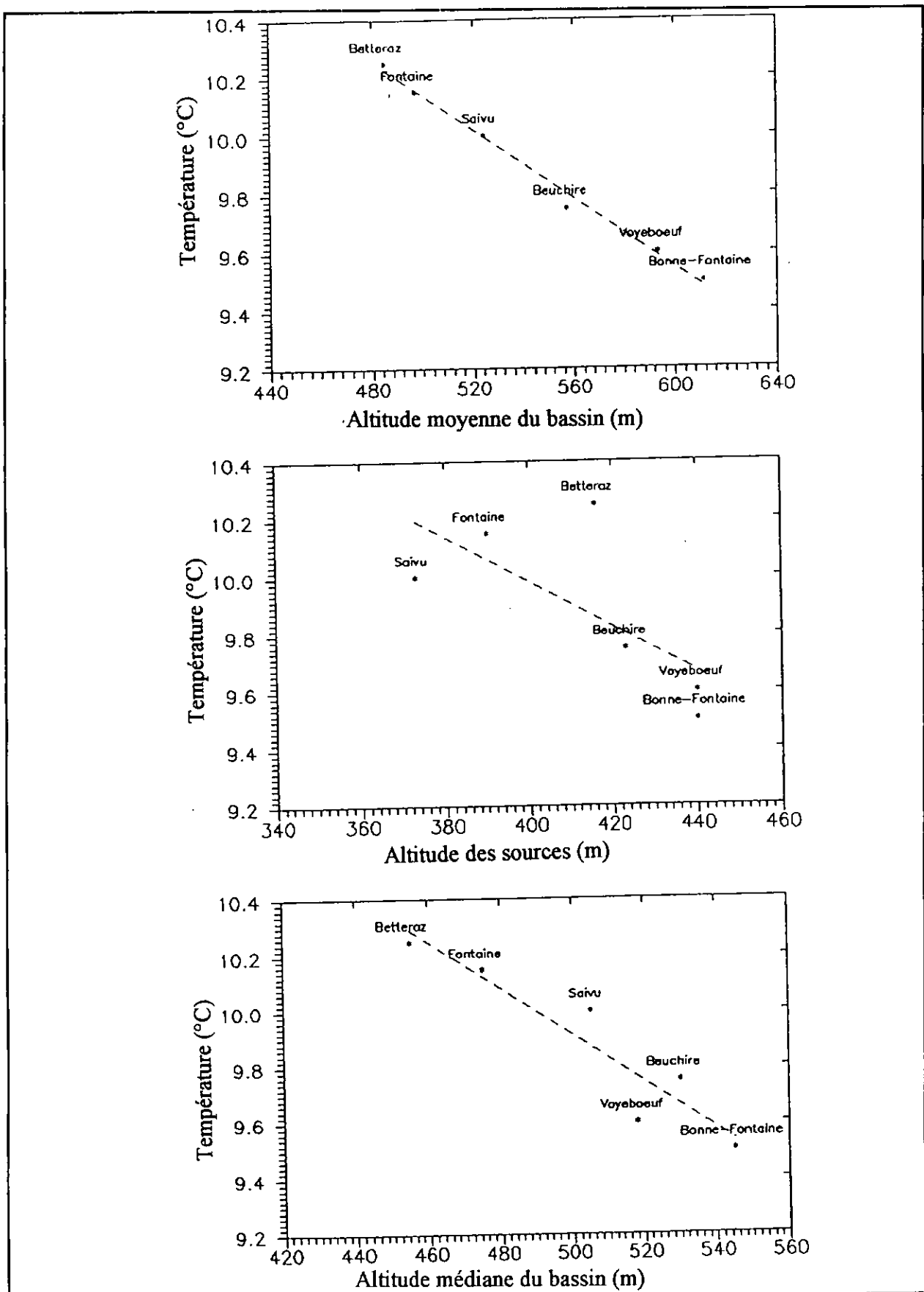
#### d) Relation entre la température/conductivité moyenne des sources et l'altitude du bassin et des exutoires

Nous avons cherché une *relation entre la température moyenne des sources et l'altitude (moyenne et médiane) du bassin et des exutoires*. La meilleure relation est observée avec l'altitude moyenne des bassins versants (0.6°C par 100 m, voir fig. C.19).

Nous en tirons l'hypothèse suivante: la température de l'eau souterraine à l'exutoire dépend essentiellement, en Ajoie, des conditions climatiques lors de l'infiltration des précipitations. Le transit semble suffisamment rapide pour que les températures n'aient pas le temps de s'équilibrer avant l'arrivée des eaux fraîches à l'exutoire. La tranche d'altitude à laquelle il se trouve ne représente qu'une faible proportion du bassin versant. La petite augmentation de température (env. 0.1 à 0.2°C entre le Creugenat et l'exutoire de La Beuchire) est à la limite de la précision absolue des mesures pour tirer des conclusions à ce sujet.

La relation mise en évidence ne cadre pas avec les mauvaises relations température de l'air - altitude observées en Ajoie sur la base des données en notre possession (existence de microclimats). Cette constatation doit cependant être relativisée par manque de recul et de précision des mesures de température de l'air (moyennes sur les maxima-minima). Les deux stations de référence de Fahy et des Rangiers indiquent cependant sur 10 ans une décroissance de la température avec l'altitude (en moyenne 0.46°C par 100 m, chap.3.1.2, partie B). Il existe donc bien une relation, mais avec des zones qui n'obéissent pas à cette relation, comme la cuvette topographique de Porrentruy.

Comme pour la température, nous avons cherché une relation entre la conductivité moyenne des sources et l'altitude (moyenne et médiane) du bassin et des exutoires. Nous n'avons pas trouvé de relation simple entre la minéralisation et l'altitude. D'autres facteurs tels que la nature pédologique du sol ou les microclimats viennent interférer. Ainsi pour la source de La Fontaine, la plus éloignée d'une bonne corrélation, des surfaces boisées importantes recouvrent le bassin et induisent une minéralisation plus basse de son eau.



**Figure C.19**  
Relation cherchée entre la température moyenne annuelle des sources karstiques et leur altitude ainsi que l'altitude moyenne et médiane de leur bassin.

### e) Analyse d'une crue hivernale avec l'oxygène-18

L'oxygène-18 a été analysé pour suivre une crue causée exclusivement par la fonte de la neige. Ce suivi avait pour objectif d'évaluer la part d'eau fraîche dans le débit écoulé dans un exutoire karstique, pour un grand système (La Beuchire) et pour un petit système (La Fontaine). En février 1991, la fonte de la neige s'est étalée sur plusieurs jours, en l'absence de précipitations. L'infiltration d'eau froide qui en résulte, très pauvre en  $^{18}\text{O}$  ( $\delta = -14\text{‰}$ ) s'est produite de manière hétérogène:

- dans le temps avec l'alternance de fonte et de gel entre le jour et la nuit;
- dans l'espace avec une fonte plus rapide dans les parties basses du bassin versant.

Seule la concentration en  $^{18}\text{O}$  de l'eau infiltrée est homogène. L'entrée isotopique était donc très favorable, au niveau des contrastes, comparée à une valeur de  $-8.89\text{‰}$  pour l'exutoire de La Beuchire.

Des fluctuations journalières ont été observées pour les débits, avec un maximum vers 18 h pour La Fontaine. Les fluctuations sont moins régulières pour La Beuchire qui voit son débit maximum atteint d'abord vers 19 h, puis 22 h puis minuit. L'éloignement progressif du lieu de fonte de neige, avec l'augmentation de l'altitude (et parties moins exposées) sont probablement la cause de ces décalages. Une fois encore, le signal d'entrée parvient de manière peu atténuée à l'exutoire, sans subir une profonde modification.

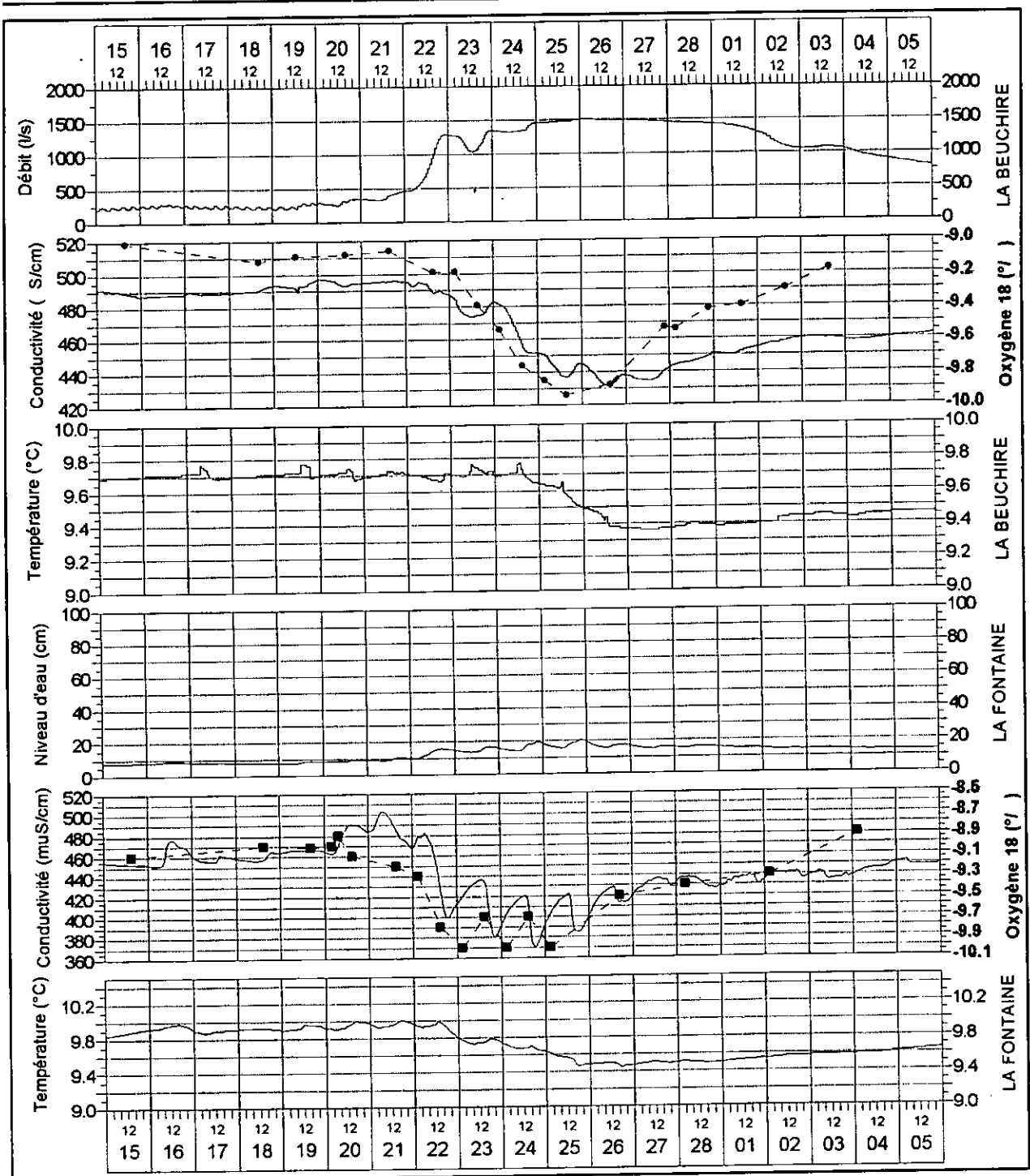
Des échantillonneurs automatiques ont été installés aux sources de La Beuchire et de La Fontaine. La figure C.20 met en parallèle les deux séries de mesures isotopiques, avec la superposition de la température et de la conductivité enregistrées en continu par les Madd. On observe une *réponse similaire de la conductivité et de  $^{18}\text{O}$* . L'amplitude des apports est plus importante à La Fontaine qu'à La Beuchire ( $^{18}\text{O}$ , conductivité et température). Connaissant le signal d'entrée de l'oxygène-18, on peut estimer dans quelle proportion l'eau de fonte participe au débit global. La part d'eau récente aux débits des exutoires se monte à environ 20% au maximum pour la Beuchire et 25 % pour La Fontaine, près d'une semaine après le début de la fonte de la neige. Le pourcentage restant représentant un mélange d'eaux plus anciennes, ce qui peut paraître étonnant si l'on se réfère au schéma de l'inversion des gradients milieu transmissif - milieu capacitif, qui devrait avoir comme conséquence une très forte diminution des apports d'eaux "anciennes" du milieu capacitif.

Dans les deux sources, on observe une inertie thermique de 1 à 2 jours par rapport à l'arrivée réelle d'eau récente, mise en évidence par la conductivité (dilution maximale) et l'oxygène-18. Étonnamment, le système le plus grand possède la plus faible inertie: la diminution de la température est réalisée sur 2 jours à La Beuchire et 3 jours à La Fontaine. Chronologiquement cependant (échelle absolue), les minima de La Fontaine ont précédé ceux de La Beuchire. Ce qui s'explique déjà par l'hypsométrie des deux bassins. Les apports des parties les plus élevées parviennent de manière différée à l'exutoire.

Globalement les deux sources ont réagi avec un signal similaire. Les volumes en jeu étant plus faibles à La Fontaine qu'à La Beuchire, les fluctuations de l'entrée sont nettement plus visibles (elles sont peu déformées) à l'exutoire de La Fontaine, que ce soit pour le débit, la conductivité, l'oxygène-18 ou la température. Notons encore que la vulnérabilité du système de La Fontaine, quelle soit qualitative ou quantitative, est particulièrement bien illustrée par cet exemple. Des analyses ponctuelles d'oxygène-18 ont été effectuées sur l'ensemble des points d'eau étudiés. Les résultats n'ont pas amené d'éléments nouveaux, aussi figurent-ils en annexe.

### 1.3.5 Synthèse

Le système de la Beuchire, pris comme exemple dans notre interprétation des phénomènes, représente assez bien les autres systèmes karstiques en ce qui concerne les événements ponctuels et les



**Figure C.20**

Evolution de l'isotope Oxygène-18 au cours d'une crue, fonte de neige de février 1991, pour les sources karstiques de La Beuchire et de La Fontaine.

saisonniers. Seule l'amplitude des phénomènes change, un certain décalage en relation avec la taille du système (éventuellement de la couverture karstique) ainsi que certains aspects spécifiques à une influence extérieure supplémentaire: les infiltrations de l'Allaine dans quelques systèmes karstiques (Betteraz, La Fontaine). Celles-ci ont une influence certaine sur des paramètres physico-chimiques. En particulier pour la température, qui fluctue saisonnièrement de manière plus importante et plus rapide que pour les aquifères sans relation avec un cours d'eau. Des anomalies chaudes sont observées lors des crues d'été à La Beuchire et au Saïvu alors parallèlement à des anomalies froides sur les sources du Betteraz et de La Fontaine. Ces aspects seront précisés au chapitre 2.

Une situation paradoxale existe dans le système de La Beuchère entre:

- une réaction extrêmement rapide (moins d'une heure parfois) et de forte amplitude sur les débits et les paramètres physico-chimiques au cours d'un événement météorologique (orage); le signal donné par cet événement subit une faible atténuation, précédée d'un faible effet piston. Seule la partie superficielle du système est touchée, avec les conduits principaux proches de la surface (moins de 30 m de profondeur); les réserves écoulables sont faibles, les réserves potentielles sont importantes sous le niveau de l'exutoire.
- une faible fluctuation saisonnière des principaux paramètres physiques et chimiques, montrant une inertie importante due à la taille du système et à un milieu capacitif prédominant hormis les périodes de crue.

Cette situation va dans le même sens que l'hypothèse de l'inversion des gradients entre milieu capacitif et milieu transmissif lors de la crue. Le milieu capacitif qui a un rôle atténuateur voit son influence diminuer au profit du milieu transmissif rapidement alimenté par les infiltrations récentes. Au cours de cette phase, certaines parties du système s'écoulent prioritairement à d'autres, surtout si les événements sont violents. Le système est très bien drainé et hiérarchisé. Les vitesses d'écoulement sont élevées et augmentent vers l'aval du système.

**Le début du tarissement est souligné par la relative stabilisation de la minéralisation. Les pluies d'hiver qui rechargent les aquifères ont une influence prépondérante sur le chimisme des eaux souterraines.**

## 2. SPECIFICITE DES AQUIFERES KARSTIQUES EN RELATION AVEC UNE RIVIERE

### 2.1 Caractéristiques particulières des systèmes

Au chapitre 1, nous avons passé en revue les caractéristiques des principaux systèmes karstiques ajoulots. Parmi ces systèmes, nous avons mis en évidence 3 systèmes karstiques en relation hydrogéologique avec un cours d'eau superficiel, L'Allaine.

#### ***Que doit-on connaître dans le cas d'une relation rapide entre une rivière et un aquifère karstique ?***

L'étude de ce type de relation est importante dans l'optique d'une protection et d'une gestion optimale des captages contre les infiltrations superficielles indésirables. Il est important de bien connaître:

- les sources potentielles de pollution
- la ou les zones d'infiltration de la rivière
- les vitesses de propagation jusqu'à la zone d'infiltration
- la fourchette de dilution-dispersion du polluant avant son infiltration
- la proportion de polluant s'infiltrant selon les conditions hydrologiques
- quels sont les exutoires qui seront touchés?
- le temps de parcours minimum du polluant entre l'infiltration et l'exutoire
- l'effet de dilution-dispersion du polluant infiltré dans l'aquifère
- l'apport quantitatif des eaux superficielles dans le débit du captage

Dans le cadre de la détermination des zones de protection des captages des Gorges de l'Areuse, des essais de traçage ont permis de répondre à la plupart des questions énumérées ci-dessus, mais grâce à d'important moyens mis à disposition, ce qui n'est pas toujours le cas (Matthey, 1994). Ces études peuvent ensuite déboucher sur des mesures concrètes. Un système de détection avancé (mini-laboratoire) peut par exemple être installé sur le cours d'eau infiltrant, à l'image du système en place à Genève sur l'Arve. Tout dépend de l'importance du captage pour l'alimentation en eau potable et des risques potentiels de pollutions à l'amont.

#### ***Moyens utilisés pour déterminer quelles sources ajoulotes sont en relation avec une rivière***

Les essais de traçage ont bien mis en évidence les sources karstiques en relation directe et rapide avec un cours d'eau pérenne (tab. C.8 et 9). Pour les trois sources concernées, Le Betteraz et le Pâquis à Porrentruy et La Fontaine à Courtemaîche, il s'agit de l'Allaine. Des trois sources, seul le Betteraz est capté de manière permanente. Une station de traitement des eaux très performante a par ailleurs été construite pour traiter ses eaux passablement contaminées par des polluants (pollution permanente), essentiellement des solvants chlorés. Le problème a donc été résolu à l'aval, avant d'étudier ce qui se passait en amont, où peuvent se produire d'éventuelles pollutions accidentelles.

Les relations rivière-karst ont été démontrées par des essais effectués sur des sections de la rivière où des pertes étaient suspectées. Celles-ci ont été confirmées par la suite grâce à des mesures ponctuelles (jaugeages à la canne de Jens) puis systématiques de débits (implantations de seuils et de stations de mesures limnigraphiques). Aux sources du Betteraz et de La Fontaine, la liaison démontrée par traçage a également été révélée par les enregistrements en continu de la température et de la conductivité. Le débit spécifique d'étiage plus élevé que dans les autres sources karstiques confirme ces relations.

#### ***Rappel des caractéristiques du Betteraz et de La Fontaine***

Les systèmes karstiques du Betteraz et de la Fontaine ont été décrits au chapitre 2 de la partie B, de même que le système du Pâquis, que nous mettrons à part pour l'instant. Rappelons que les deux

premiers systèmes ont des exutoires pérennes et temporaires. Les exutoires pérennes sont situés à faible distance de la rivière, à un niveau à peine supérieur, si bien qu'en crue, les niveaux semblent s'équilibrer. C'est pourquoi les mesures de débits n'ont qu'une valeur très relative. Ces exutoires pérennes révèlent davantage une zone d'exutoires qu'un exutoire ponctuel. Si à la Fontaine l'eau sort visiblement et directement des calcaires, au Betteraz l'exutoire primaire est recouvert de quelques mètres d'alluvions déposés par la rivière. Un palier de débit est visible sur certains hydrogrammes de crue du Betteraz (exutoire de crue ou/et débordement de la source dans les prés).

Dans le système du Betteraz, un seul exutoire temporaire, entre en fonction en crue alors qu'il y en a deux pour le système de La Fontaine, situés de part et d'autre de l'Allaine. Pour ces deux systèmes, leurs exutoires se trouvent à plusieurs centaines de mètre de l'exutoire principal. Les deux exutoires temporaires de la Fontaine ont été tracés positivement jusqu'à l'exutoire principal (tableau C.8).

### **Les traçages**

Les vitesses observées lors des traçages effectués dans le système de La Fontaine (8 essais: 17, 18, 59, 60, 85 à 88) sont extrêmement rapides, même en basses eaux, et pas seulement pour la zone très karstifiée située au sud de l'exutoire principal (accident NS), mais également depuis des combes latérales. Les vitesses mesurées entre les exutoires temporaires et l'exutoire pérenne sont comparables à celles de la rivière. Si des infiltrations ont pu être mises en évidence par certains essais, elles n'ont pas pu être localisées en amont, ni quantifiées par des mesures de débits.

Les essais réalisés pour le système du **Betteraz** (tableau C.7) ont mis en évidence la complexité des écoulements souterrains, non seulement entre l'Allaine et l'exutoire du Betteraz, mais également entre la partie méridionale du système du Betteraz et l'Allaine ainsi qu'avec des systèmes adjacents (Pâquis et système alluvial du Pont-d'Able). La limite septentrionale du système du Betteraz est une limite hydraulique qui fluctue en fonction des conditions hydrologiques. En hautes eaux, le système de La Vendline se met en charge de manière similaire au système de La Beuchire avec le débordement du Creugenat. Il y a cependant une différence notable. Le trop plein du système Vendline (Le Pouche) va rejoindre l'Allaine et le système du Betteraz grâce à une morphologie favorable.

Les vitesses mesurées au cours des essais de traçage dépassent 40 m/h, même en basses eaux, indiquant un système karstique très bien drainé. Un seul essai a touché à la fois la source du Betteraz et son trop plein de La Première Combe (N°40), en hautes eaux, pour quelques heures seulement au Betteraz. Avec d'autres essais effectués dans la même zone, cet essai indique une relative indépendance de ces deux exutoires et des phénomènes hydrauliques complexes (barrage hydraulique temporaire?). Cette indépendance a été confirmée par des caractéristiques chimiques propres à chaque exutoire (tab. C.3)

Les nombreux essais de traçages effectués sur l'Allaine (Adatte, 1993) ont permis de répondre à une partie des questions posées au début du chapitre. Ils pourraient être complétés pour préciser certains points. Les essais ont favorisé la détermination:

- De la zone d'infiltration de la rivière;
- Des exutoires en relation avec l'Allaine;
- Des vitesses de propagation jusqu'à la zone d'infiltration; les isochrone entre Miécourt et Porrentruy devraient cependant être complété par un essai complémentaire avec un plus grand nombre de points de contrôle;
- Du temps de parcours minimum du polluant entre l'infiltration et l'exutoire.

La fourchette de dilution-dispersion du polluant avant son infiltration est très imprécise et devrait être améliorée par un essai complémentaire;

**Tableau C.7**

*Synthèse des relations démontrées par traçage entre les aquifères karstiques et l'Allaine, en amont de Porrentruy*

|                   | INJECTION DE TRACEUR:              |                  |                           |
|-------------------|------------------------------------|------------------|---------------------------|
| EXUTOIRES         | Impluvium Betteraz                 | Allaine          | Le Pouche (exutoire crue) |
| Allaine amont     | 100                                |                  | en crue                   |
| Betteraz          | 40, 46, 74, 78<br>84, 93, 100, 104 | 45, 76, 105, 106 | probable en crue          |
| Première Combe    | 40                                 | Non démontré     | Non démontré              |
| Puits Pont d'Able | 46, 93, 104                        | 45               | Non démontré              |
| Le Pâquis         | 100, 104                           | 45, 76           | Non démontré              |
| La Vendline       | Non démontré                       | Non démontré     | 47, 89                    |

Les sources potentielles de pollution ont été déterminée par l'OEPN qui a fait l'inventaire des entreprises et des produits susceptibles de nuire aux eaux souterraines dans chaque endroit;

Les pertes étant relativement bien localisées, dans le prolongement de la combe transversale de Vaumacon (anomalie géophysique N-S), des limnigraphes implantés en amont et en aval devraient en tout temps permettre de quantifier les pertes de l'Allaine. Mais le traitement des données n'est pas encore terminé. Les résultats des données partielles analysées par différents experts chargés de l'étude divergent encore passablement (RWB SA., 1994; Palmer et al. 1994; Musy, 1994, 1995a et 1995b). La proportion de l'eau de l'Allaine qui atteint le Betteraz est encore plus difficile à déterminer vu la multiplicité des exutoires mis en évidence par les traçages.

Les traçages ont démontré des pertes en basses et en moyennes à hautes eaux (décrue). L'infiltration de la totalité des eaux de l'Allaine sur plus d'un km en août-septembre 1991 est un élément très marquant. Les résultats des mesures le sont peut-être moins. Cependant, sur plusieurs périodes, 10 à 80% du débit de l'Allaine s'était infiltré entre les deux stations de mesures ALA et MAR. En aval de MAR, il n'y a plus de zones d'infiltration. En valeur absolue, les infiltrations s'élèvent généralement entre 15 et 30 l/s, avec des pointes à 50 l/s. Nous n'avons malheureusement pas les débits du Betteraz pour les périodes considérées. Comparé à des débits du Betteraz de 50 à 80 l/s (basses eaux) et 150 l/s (moyennes eaux), **les débits infiltrés représentent cependant une part considérable qui peut probablement atteindre 20 à 30 % du débit de l'exutoire** (il faut aussi tenir compte des débits non-connus des autres exutoires). Une telle participation ne peut pas passer inaperçue au niveau physico-chimique.

En hautes eaux, les infiltrations sont remplacées par des exfiltrations causées par la mise en charge des conduits karstiques. La situation n'est peut-être pas aussi tranchée car des exfiltrations auraient également été mesurées en basses eaux. Issues de la partie sud du bassin versant (Noir Bois), elles ont été démontrées par essai de traçage simultanément à des infiltrations de l'Allaine dans la même zone. Les exfiltrations ne représentent cependant qu'une faible proportion des écoulements de cette partie du bassin. Notons qu'elles n'ont pas dépassé 10-15% du débit total de l'Allaine.

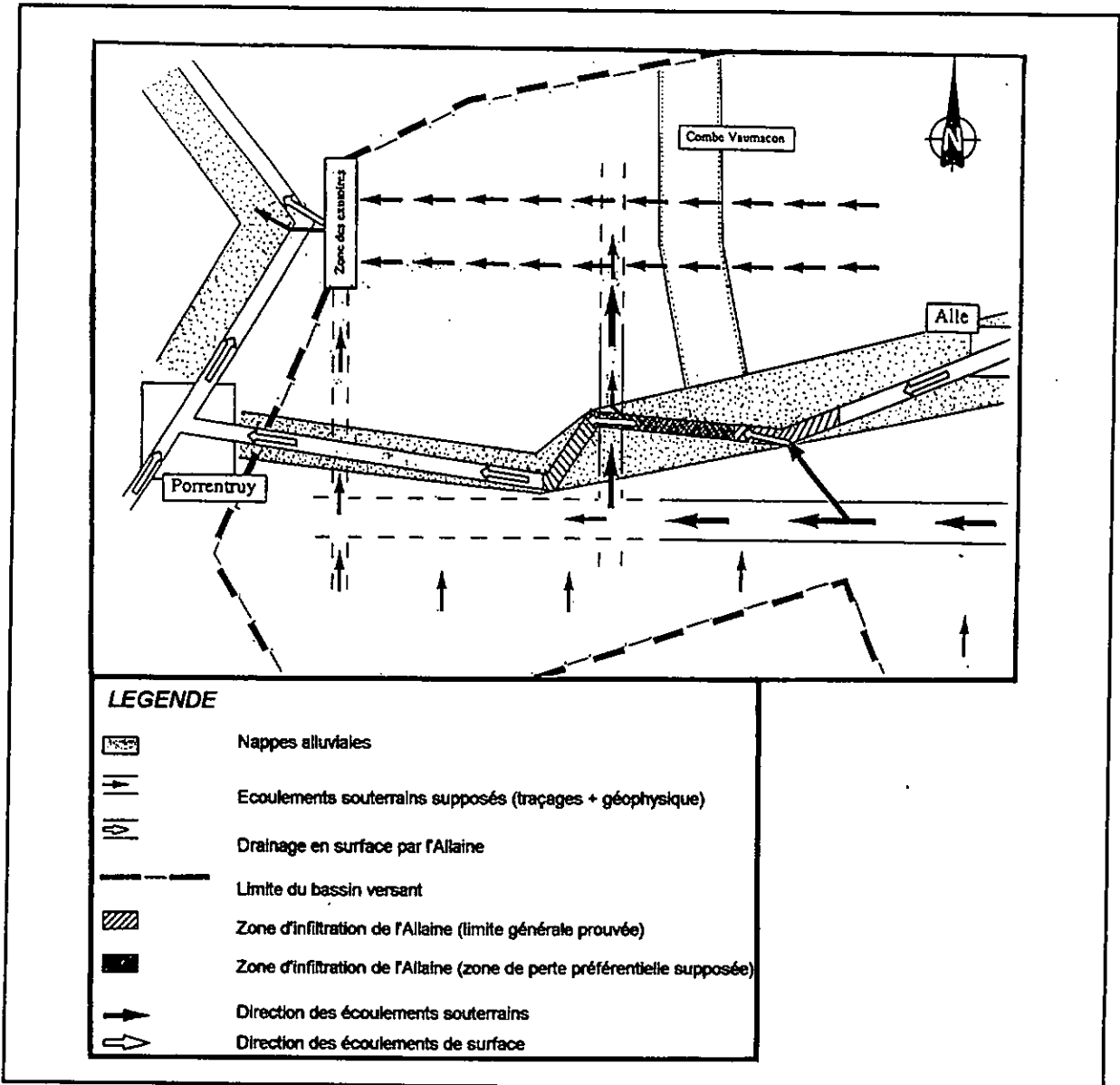
La part de polluant éventuel issue de l'Allaine dans l'exutoire du Betteraz doit encore faire l'objet d'une interprétation sur la base de résultats complets et concordants. La situation de l'été 1991 avec **l'assèchement de la rivière a bien montré que le système du Betteraz était en quelque sorte**

réalimenté par l'Allaine, surtout en étiage. Sachant qu'on n'utilise qu'une eau "propre" pour la réalimentation d'un aquifère, alluvial dans la plupart des cas, la qualité de l'eau de l'Allaine en amont des infiltrations est d'autant plus importante à préserver.

### Schéma de fonctionnement du système du Betteraz

On trouve une zone d'exutoires avec Le Pâquis, Le Betteraz (exutoire principal + exutoires dans le lit de l'Allaine), La Première Combe et le système du Pont d'Able. L'exutoire principal draine l'ensemble du système, tel qu'il est délimité sur la carte hydrogéologique. Les autres exutoires ont chacun un sous-bassin propre:

- zone nord (en hautes eaux) pour La Première Combe
- zone sud et centrale + Allaine pour Le Pâquis
- zone sud et Allaine + aquifère alluvial pour le Pont d'Able



**Figure C.21**

*Schéma des principales directions d'écoulement dans le bassin versant du Betteraz (Adatte, 1993)*

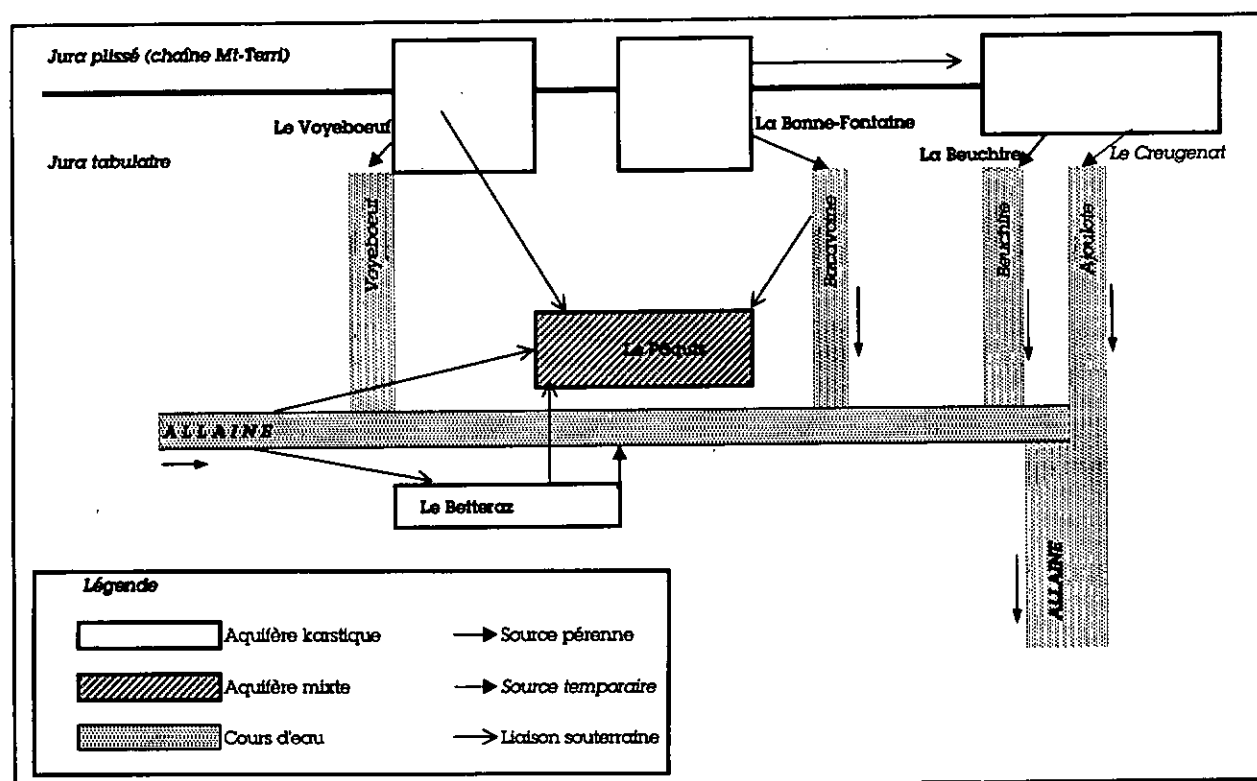
Les drainages rapides s'effectuent dans une direction E-W essentiellement, à l'exception de la zone de La Combe Vaumaçon et plus à l'ouest de la zone de la faille de Fontenais, toutes deux drainées du sud au nord (fig. C.21 et vol.II, fig. 10).

## 2.2 Influence de la rivière sur les débits de la source

Les débits d'infiltration de l'Allaine dans le système karstique du Betteraz ont pu être évalués, mais l'impact direct sur le débit de l'exutoire lui-même est difficile à chiffrer. Cependant, près de 20 à 30% du débit du Betteraz pourrait, selon les conditions hydrologiques, provenir directement de l'Allaine (en moins de 24 h). Il faudrait pour cela enregistrer soit des fluctuations régulières du débit de l'Allaine (en admettant une réaction très rapide comme celle observée au chap. 1.2.1), soit une modification rapide du débit de l'Allaine par un événement météorologique survenant hors de l'impluvium du Betteraz. Ces deux hypothèses n'étant guère réalisables, en particulier pour la première, nous devons nous tourner vers d'autres méthodes.

### Débit spécifique

Le débit spécifique moyen ou en crue n'est pas déterminant pour évaluer les infiltrations. Par contre, le débit spécifique d'étiage reflète en principe le débit du milieu capacitif uniquement. Si des apports



**Figure C.22**

*Schéma des relations du système du Pâquis avec les systèmes adjacents.*

extérieurs surviennent (infiltration d'un cours d'eau par exemple), le débit d'étiage sera nettement plus élevé. Par rapport à un débit spécifique d'étiage (inférieur à 2 l/s.km<sup>2</sup> pour les autres sources karstiques), ceux du Betteraz, de La Fontaine et du Pâquis sont situés entre 4 et 10 l/s.km<sup>2</sup>. Celui de La Fontaine est probablement le plus proche de la réalité compte tenu des incertitudes planant sur la délimitation des bassins du Betteraz et du Pâquis. Effectivement, pour le Betteraz, la partie aval, karstique (10 km<sup>2</sup>) semble bien définie au contraire de la partie amont, non-karstique (tertiaire), à écoulement lent (10 à 15 km<sup>2</sup>) dont la participation aux écoulements n'est pas quantifiable. Le débit spécifique donné au tableau B.13 ne prend en compte que la partie aval et de ce fait est surestimé. Pour le Pâquis, la délimitation est encore plus délicate étant donné la multiplicité des apports extérieurs (fig. C.22).

### Débits classés

Les courbes de débits classés données dans la figure B.32 montrent, pour le même cycle 1989-90 une convergence. Alors que les débits moyens sont dans un rapport 1:4, en phase de tarissement (été 1990), les débits du Betteraz et de la Beuchire convergent et se retrouvent dans un rapport de 1:1! en fin de tarissement (15 septembre 1990). Il y a certes eu quelques événements pluvieux, mais ces derniers sont la plupart du temps plus importants sur l'impluvium de La Beuchire. Les débits d'étiage du Betteraz ont donc deux origines: les infiltrations de l'Allaine et les apports de la zone tertiaire, assimilable à un milieu capacitif karstique dont le drain principal correspond à la zone supérieure du système rapide du Betteraz (cf. carte hydrogéologique). Dans ces conditions, le calcul de coefficients de tarissement pour le Betteraz n'a plus beaucoup de sens; la partie karstique ne jouant plus qu'un rôle mineur au cours du tarissement.

## 2.3 Apport de la physico-chimie à la compréhension du fonctionnement

Certains éléments ont été abordés au chapitre 1 pour la crue du 27 juin 1990. Rappelons que tous les événements qui se sont produits dans les systèmes du Betteraz, de La Fontaine et du Pâquis ont amené des anomalies froides plus ou moins simultanément à la dilution maximale (léger retard thermique).

Il faut cependant relever un phénomène propre aux systèmes en relation avec l'Allaine. L'influence de la température de l'Allaine sur celle des exutoires du Betteraz et de La Fontaine est sensible. Trois types de signaux d'entrée ont un impact sur les variations de température à l'exutoire:

- 1) fluctuations journalières de la température de l'Allaine;
- 2) refroidissement/réchauffement atmosphérique modifiant la température moyenne journalière de l'Allaine (sans précipitations);
- 3) crue chaude ou froide;

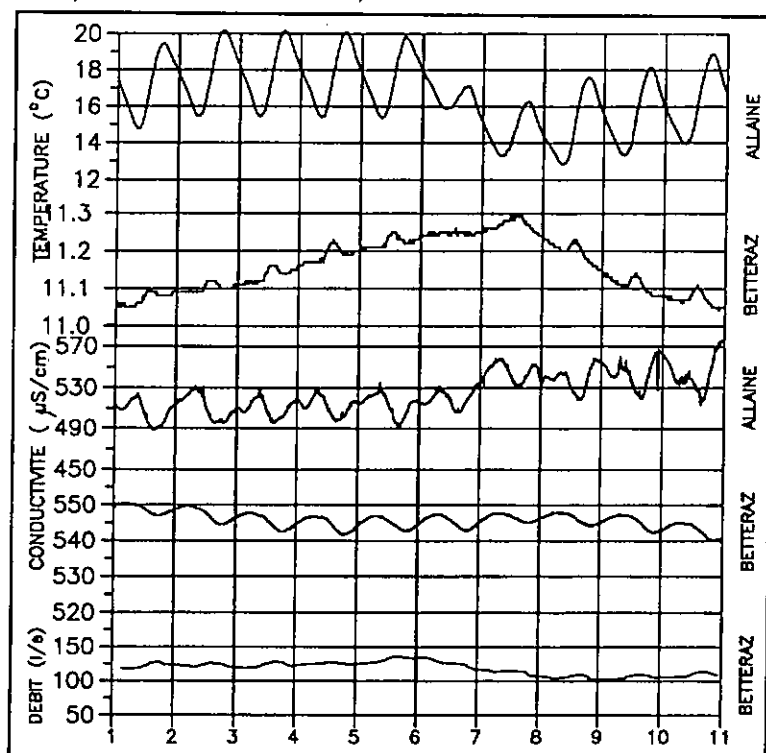


Figure C.23

Source du Betteraz. Evolution temporelle de la température et de la conductivité comparées à l'Allaine, en août 1990.

1) Seules les sources du Betteraz et de La Fontaine connaissent des variations journalières de la température. Ce sont également les seules sources étudiées (avec Le Pâquis) dont le bassin allmentaire est traversé par un cours d'eau permanent, L'Allaine. Les résultats des traçages de Schindler (1984) et Adatte (1993) ont permis de préciser ces relations entre les eaux superficielles et karstiques. Le retard entre les conditions atmosphériques et celles de la rivière varie de 1 à 3 h, tant pour les minima que pour les maxima. Le retard entre la rivière et la source peut passer de 6 à 24 h (notamment constaté du 1 au 10.12.89). L'évolution des minima (p.ex.) au cours du temps montre donc des changements dans les vitesses de transit entre les infiltrations de la rivière et la source (fig. C.23 et 24). Ceci est autant valable pour Le Betteraz que pour La Fontaine.

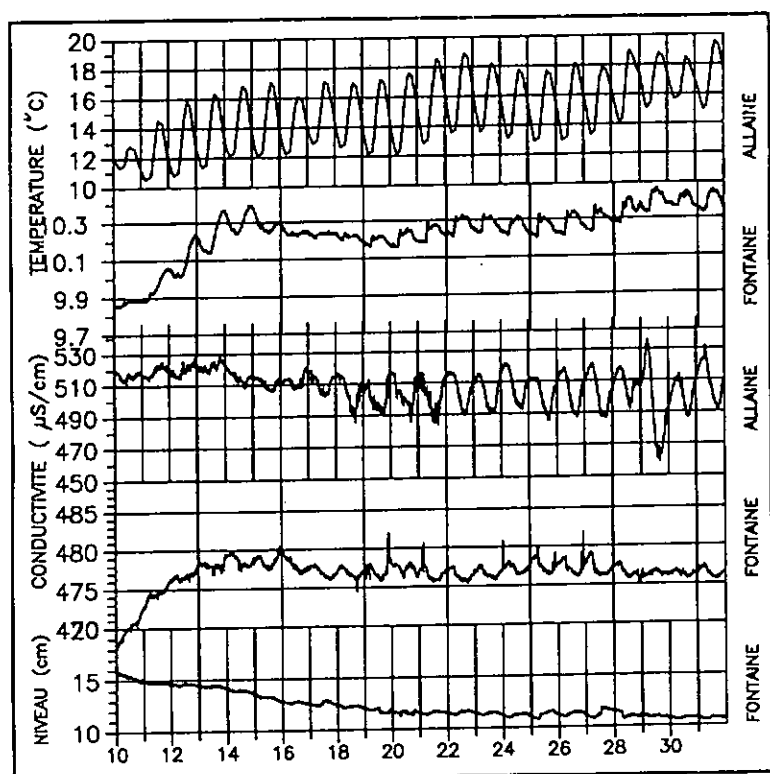


Figure C.24

Source de la Fontaine. Evolution temporelle de la température et de la conductivité comparées à l'Allaine, en juillet 1990.

L'amplitude des fluctuations comme signal d'entrée est plus élevée dans l'impluvium du Betteraz (0 à 30°C) que dans l'impluvium de La Fontaine (4 à 20°C), en raison de la différence des débits de la rivière s'écoulant sur chacun des impluvium. Les débits sont 4 fois plus importants à Courtemaîche (La Fontaine) qu'à Alle (Betteraz). Les essais de traçages ont confirmé la rapidité de réaction à ces fluctuations journalières. Des vitesses globales de plus de 600 m/h ont été mesurées lors d'un essai de traçage (n°106) entre l'Allaine et Le Betteraz. De telles vitesses reflètent des écoulements dans des chenaux importants, comme ceux de la rivière souterraine de Milandre.

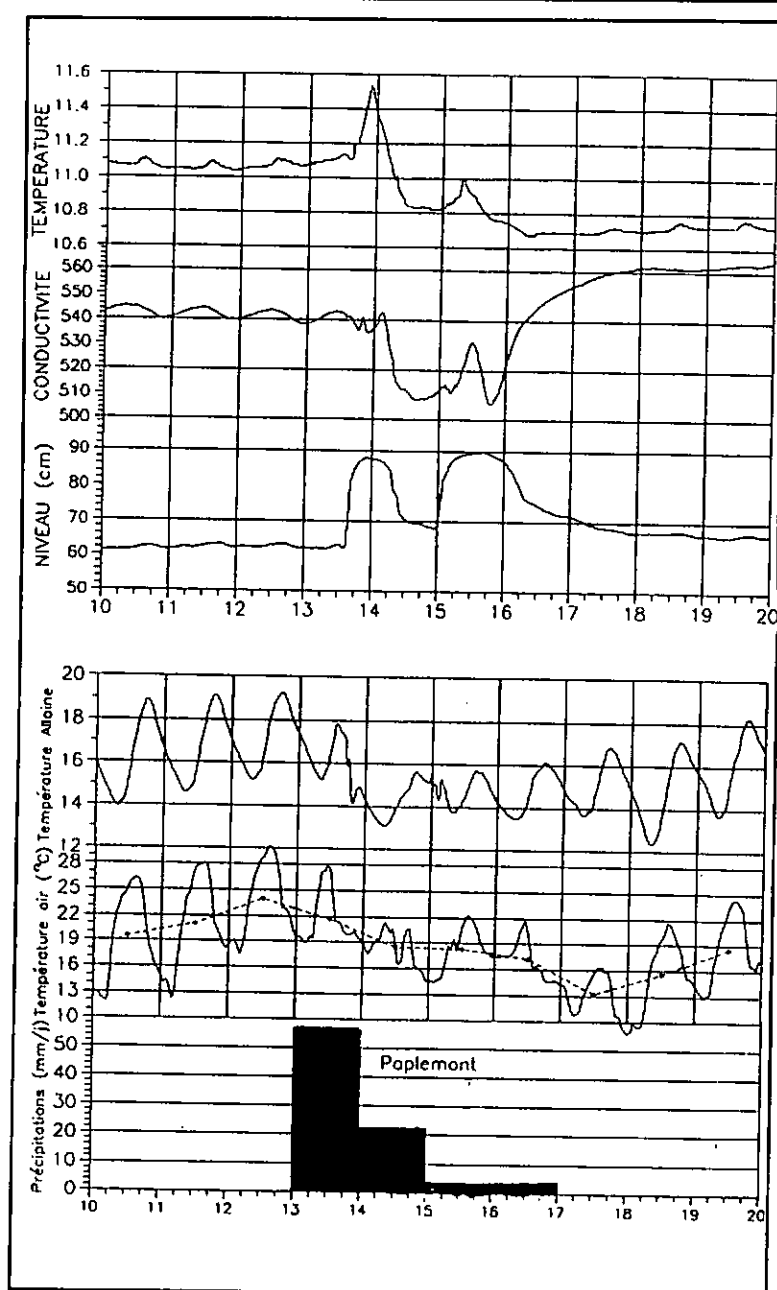
La conductivité connaît également des cycles journaliers nettement visibles sur les enregistrements des deux sources précitées (fig. C.23 et 24):

Les variations journalières de la minéralisation de l'Allaine ne se répercutent pas nécessairement à la source (fig. C.24), d'autres facteurs entrant en considération. Les fluctuations de conductivité se produisent surtout durant la période la plus chaude, celle de végétation (avril-octobre). **Le minimum journalier de la minéralisation de l'Allaine est généralement observé simultanément à la température maximale journalière.** Les écarts journaliers peuvent atteindre régulièrement de 50 à 80 µS/cm. Si plusieurs facteurs interviennent dans ces variations, le principal reste cependant la température: l'augmentation de celle-ci (souvent jusqu'à 20°C et plus) modifie l'équilibre chimique; la diminution de la solubilité du CO<sub>2</sub> provoque la précipitation des carbonates de calcium et occasionne la diminution de la conductivité. Ce qui se traduit par l'infiltration d'une vague d'eau moins minéralisée qui atteint rapidement la source. Les fluctuations à la source atteignent environ 2 à 4 µS/cm, par l'effet de dilution. Elles sont parfois visibles également en hiver, lorsque l'Allaine a de plus fortes variations de températures.

2) L'impact des refroidissements ou des réchauffements atmosphériques sur la température d'une source est assimilé à un cycle journalier (variations à court terme). Plusieurs événements de ce type ont été observés tant sur la source du Betteraz que sur celle de La Fontaine:

- Une augmentation régulière de température s'inverse brusquement moins de deux jours après une baisse de 8°C de la température moyenne journalière de l'air, donc aussi de la rivière (fig. C.23 et C.24).
- Une forte baisse de température dans l'Allaine (janvier 1991) a eu comme effet une diminution rapide de la température de la source de La Fontaine, en l'absence de crue.

L'évolution de la température de l'air a un effet beaucoup plus rapide sur les systèmes karstiques en relation avec l'Allaine que sur ceux qui en sont indépendants.



**Figure C.25**

Evolution de la température au cours de la crue du 13 août 1990 au Betteraz. Effet piston important ( $0.4^{\circ}\text{C}$ ) avant un rapide refroidissement.

3) En crue, l'impact du signal d'entrée joue le même rôle dans chaque système à une nuance près. La température a le temps de s'équilibrer par l'entremise de l'Allaine en période d'infiltration. Cependant, on peut observer un important effet piston (anomalie chaude ou froide). L'exemple du 13 août 1990 au Betteraz est illustratif (fig. C.25). Des pluies chaudes, localisées dans la partie sud du bassin du Betteraz (Paplement) ont provoqué un effet piston rapide ( $+0.4^{\circ}\text{C}$ ) sur les eaux chaudes d'infiltration de l'Allaine s'écoulant dans les conduits. Un net refroidissement a suivi (effet de dilution) avec l'arrivée des eaux de pluie récentes. L'arrêt temporaire ou la diminution des infiltrations de l'Allaine dans le système du Betteraz modifie les proportions du mélange eau superficielle (Allaine) et eau karstique. La baisse réelle de température de la source atteint  $0.4^{\circ}\text{C}$  ( $0.8^{\circ}\text{C}$  avec le pic dû à l'effet piston).

On notera que les fluctuations journalières ne reprennent qu'à la fin de la décrue, à la reprise probable des infiltrations de l'Allaine. Autre exemple, l'augmentation de température constatée depuis le mois de mai 1990 dans les sources du Betteraz et de La Fontaine a momentanément (3 semaines) été bloquée par l'effet de la crue du 27 juin 1990. Au cours de cette période, le niveau élevé des eaux karstiques n'a pas permis aux eaux de l'Allaine de s'infiltrer dans le karst.

De ces trois types d'influence de l'Allaine, on en retire un phénomène assez paradoxal:

**Les pluies chaudes provoquent des arrivées froides à la source alors que les infiltrations d'eau plus chaudes de l'Allaine montrent une augmentation de la température à la source.**

L'observation des cycles saisonniers montrent une évolution relativement rapide de la température lorsque les eaux de l'Allaine se réchauffent ou se refroidissent significativement par rapport à la température des eaux karstiques (fig. C.26)

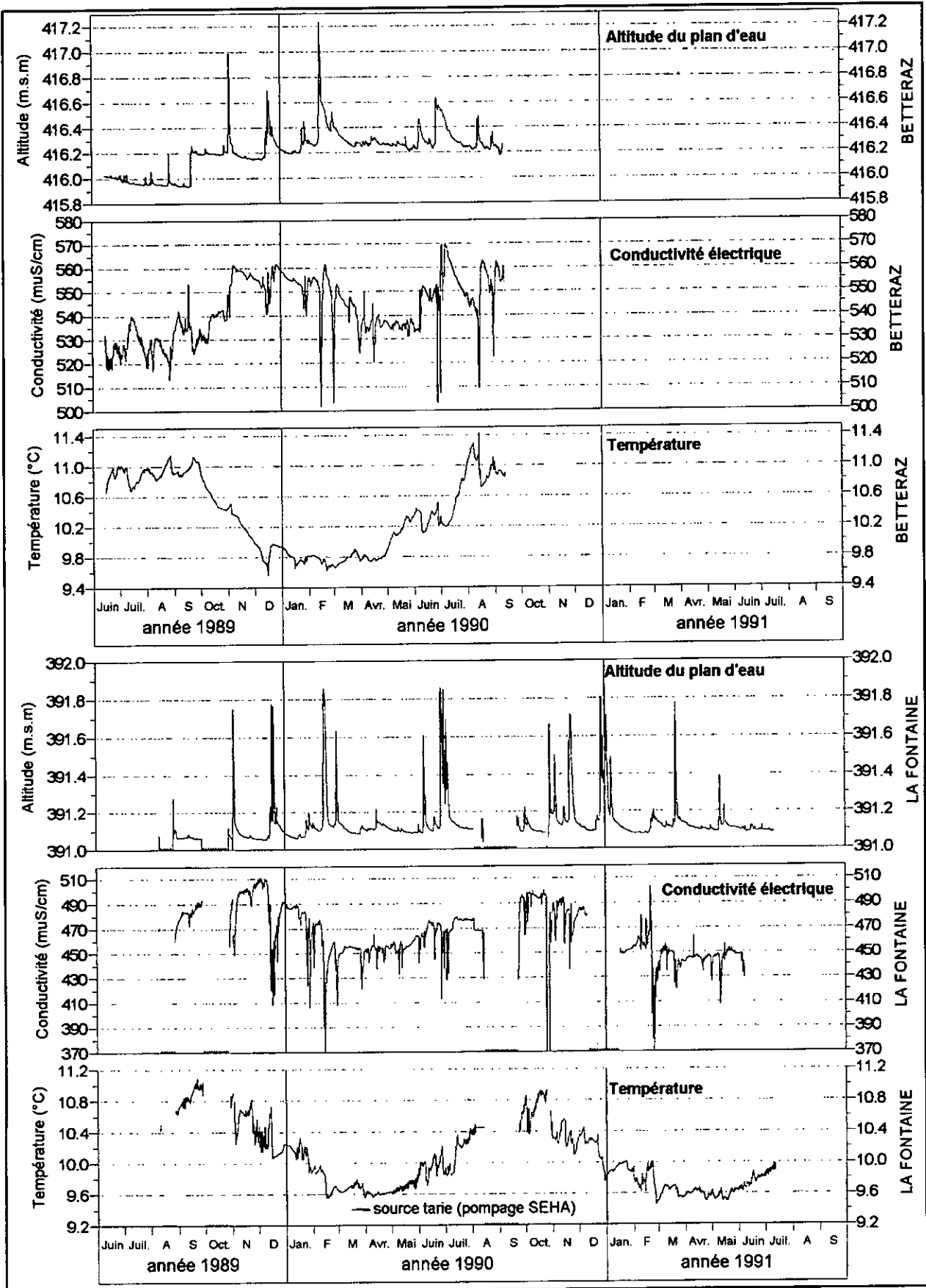


Figure C.26

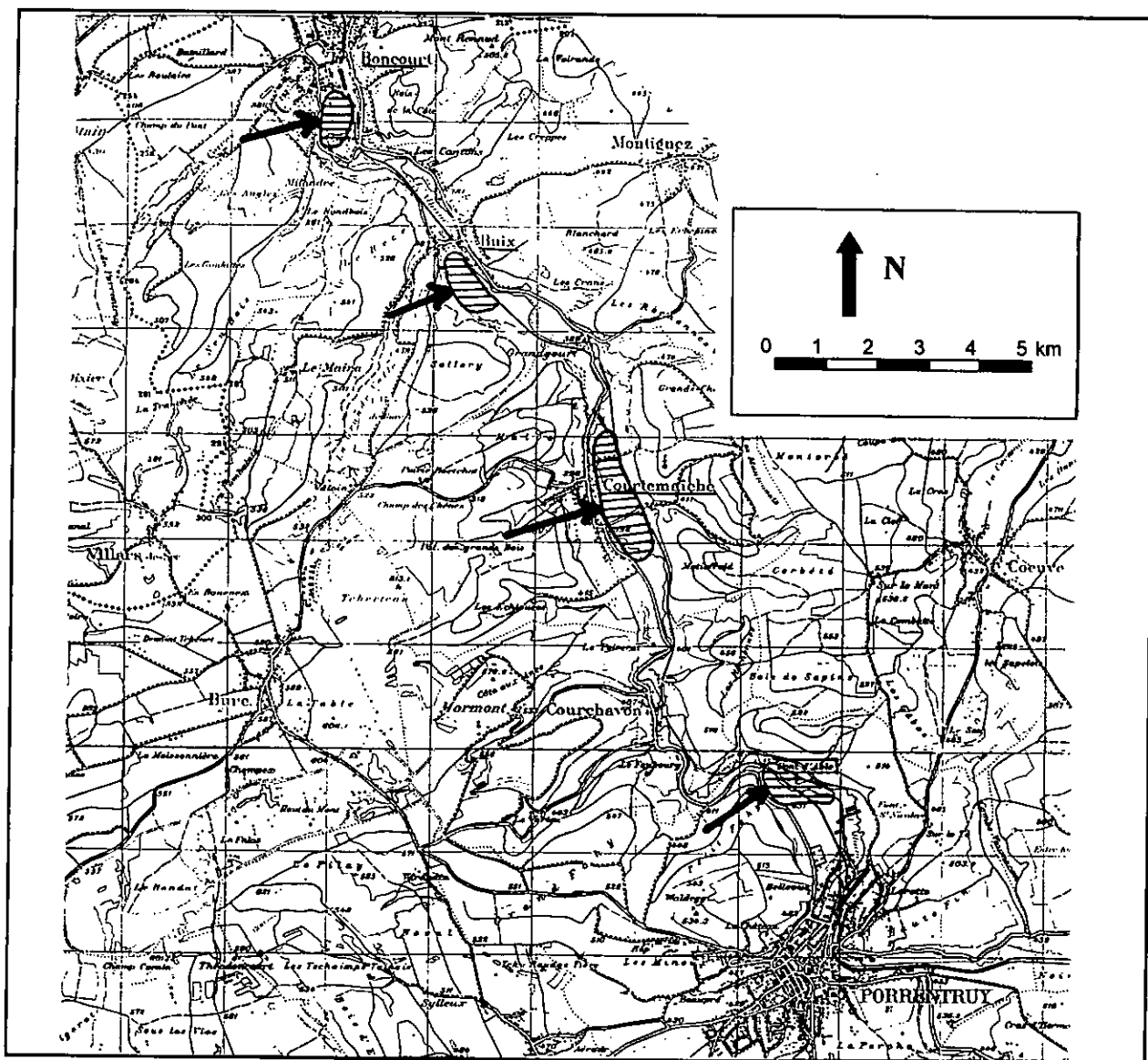
Evolution des paramètres physiques (altitude du plan d'eau, conductivité et température) des sources karstiques du Betteraz et de La Fontaine de 1989 à 1990 (1991).

### 3. AQUIFERES ALLUVIAUX ALIMENTES PAR LE KARST ET UNE RIVIERE

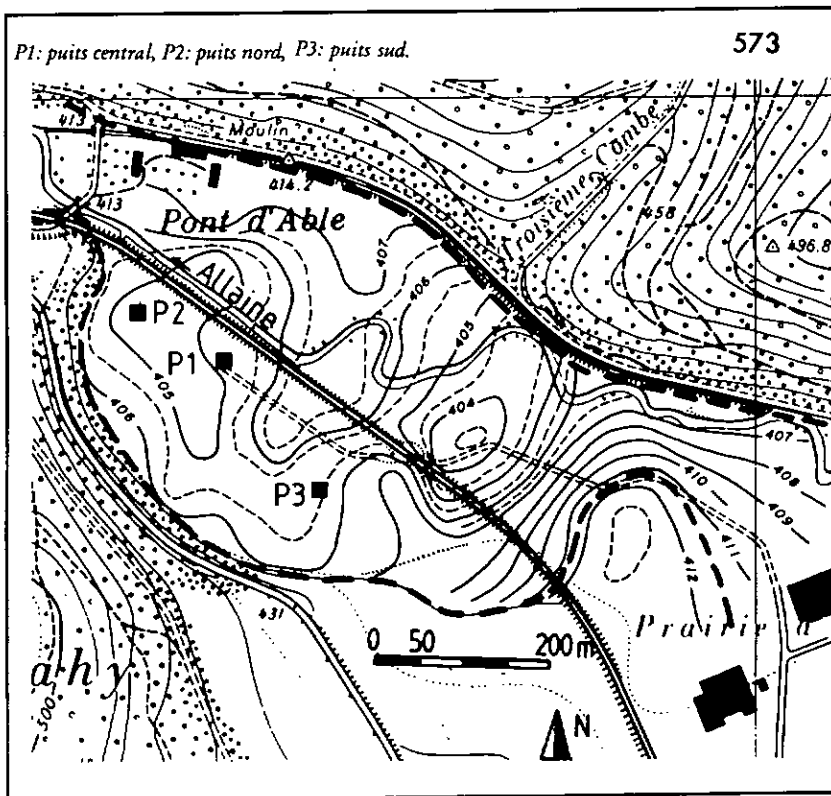
#### 3.1 Caractéristique des systèmes, points communs et divergences

##### 3.1.1 Nature des aquifères alluviaux

Les aquifères alluviaux de la Basse-Allaine (situation à la figure C.27) comprennent une faible épaisseur d'alluvions qui recouvre le substratum calcaire du Rauracien. Les alluvions dépassent rarement 8 m d'épaisseur et se réduisent parfois à 1-2 m. A Porrentruy et à Courtemaîche, la surface très irrégulière du substratum est représentée sur les cartes d'isohypses (fig. C.28 et C.29).



**Figure C.27**  
Situation des principaux aquifères alluviaux d'Ajoie, dans la Basse-Allaine, au nord de Porrentruy.



**Figure C.28**

Aquifère alluvial du Pont d'Able (Porrentruy). Carte du substratum calcaire sous les alluvions.

A Porrentruy, la carte a été établie grâce à la réalisation d'un grand nombre de sondages (CSD, 1973a). A Courtemaiche, la carte est établie d'après une douzaine de sondages et une cinquantaine de profils sismiques (annexe ). La sismique a également montré, par les grandes différences de vitesses, l'importante hétérogénéité de ces calcaires (karstification) et les possibilités de sous-alimentation karstique (Gretillat, 1990). Les quatre puits sont implantés dans des surcreusements de calcaires (cuvettes d'environ 8 m de profondeur). Une partie considérable de l'aquifère comporte moins de 5 m de puissance, y compris la couche limoneuse supérieure. Les surcreusements ont probablement été causés par un ancien cours d'eau issu de l'est (plateau de Coeuve), avec une incidence sur le tracé de l'Allaine

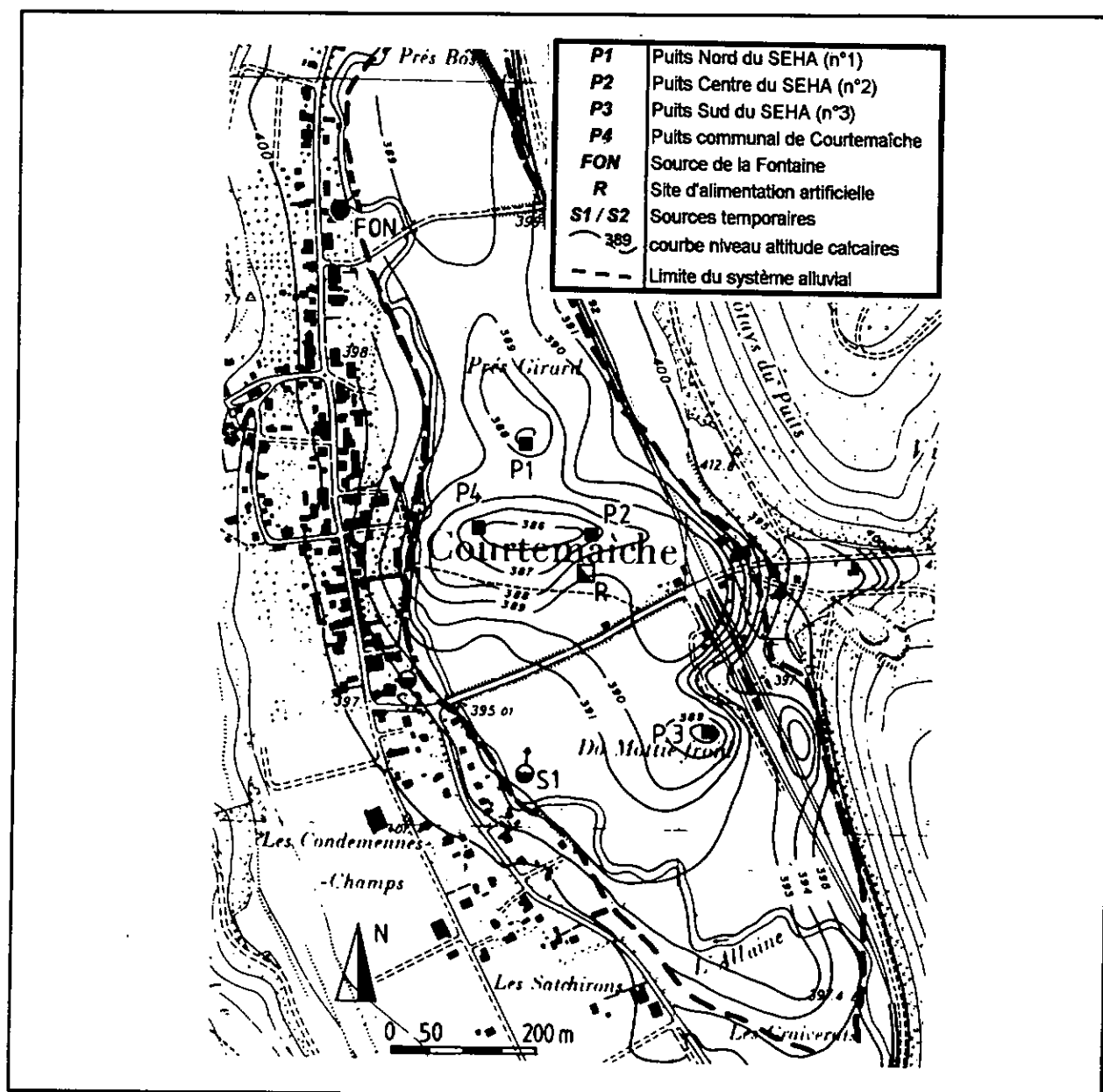
qui est passée de l'est à l'ouest de la vallée principale. L'aquifère alluvial de Courtemaiche s'est installé dans le sillon d'érosion de l'Allaine, orienté du Sud au Nord, le long d'une importante faille. La recherche d'autres failles par la méthode VLF-R s'est révélée délicate à mettre en oeuvre (présence de nombreuses conduites dissimulées). Les zones isodirectionnelles ( $\rho_{\max}$  et  $\phi_{\min}$ , voir Turberg, 1991a) de la plaine indiquent une direction de karstification E-W au milieu de la plaine, autour du puits central et des zones de direction N-S plus localisées, notamment vers le puits sud. Un sondage bipôle a indiqué une puissance de calcaires rauraciens voisine de 40 à 50 m, sous la plaine de Courtemaiche (partie B/chap.1.3.4.a).

A Porrentruy et à Courtemaiche, les alluvions sont généralement limoneuses et argileuses dans la partie supérieure et très pauvres en graviers. L'aquifère graveleux n'est que partiellement protégé par les limons superficiels. Les variations latérales d'épaisseur de ces limons sont importantes (jusqu'à 2.5 m), pour devenir localement négligeables. Au-dessous, les alluvions sont très hétérogènes, avec des lentilles de graviers dans une matrice parfois très limoneuse. Les niveaux rencontrés sont discontinus et n'ont qu'une extension latérale limitée. A Porrentruy surtout, l'aquifère représente ainsi un enchevêtrement de lentilles de perméabilité très variable avec deux pôles: les graviers et les limons.

A Courtemaiche, un niveau discontinu de graviers compactés est retrouvé fréquemment à environ 3.5 à 4 m et bloque l'implantation de la plupart des piézomètres à cette profondeur (Meury et Flury, 1989).

### 3.1.2 Zone de battement de la nappe

La nappe se trouve généralement entre 2 et 5 m du niveau du sol à Porrentruy et 1 et 3 m à Courtemaiche, Buix et Boncourt. En crue, la plaine alluviale de Courtemaiche est souvent inondée. En basses eaux, une partie des piézomètres de Courtemaiche et Porrentruy n'atteint plus la nappe. Les fluctuations piézométriques atteignent de 1 à 2 m à Courtemaiche et de 2 à 4 m à Porrentruy.

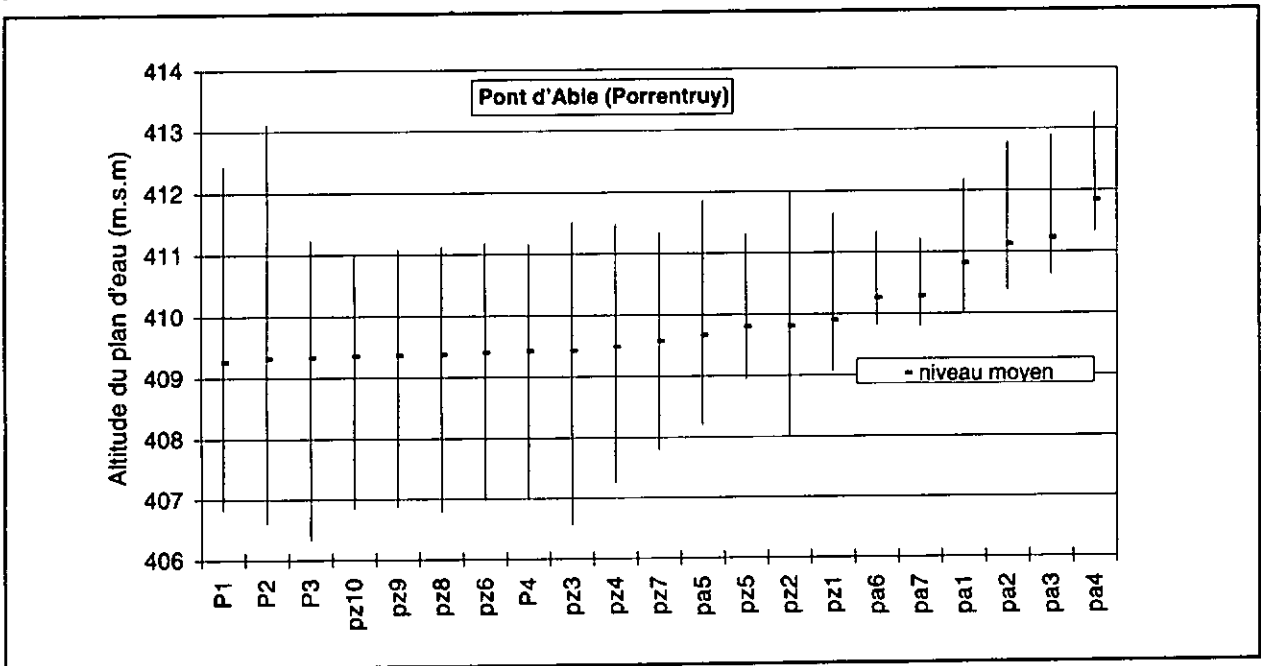


**Figure C.29**

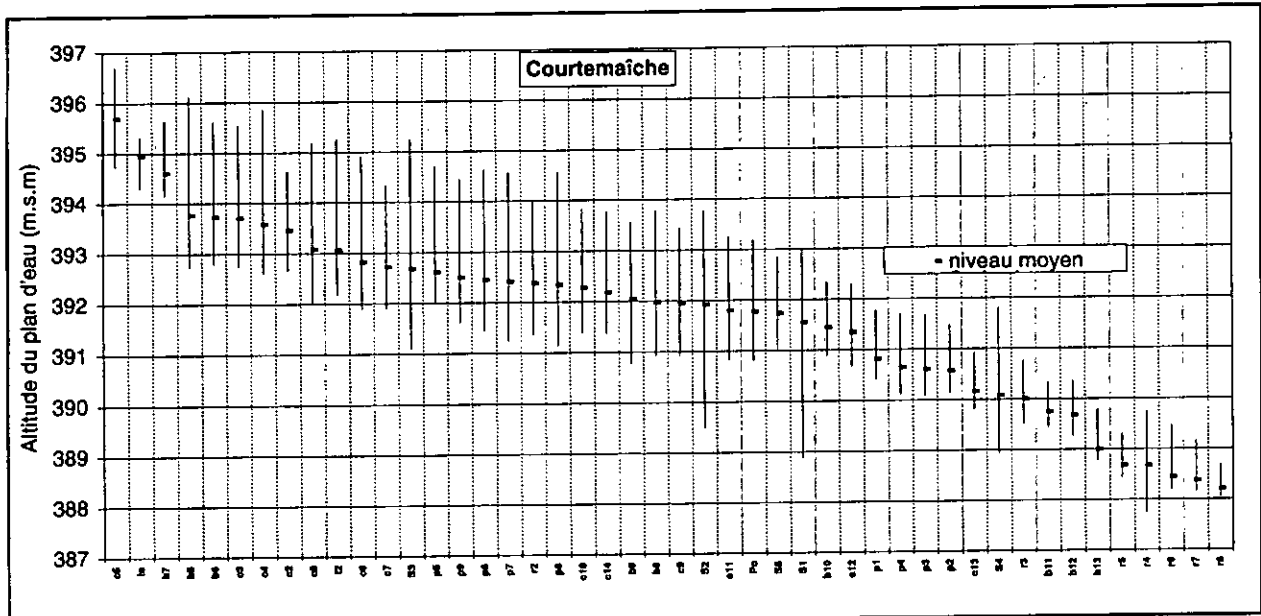
Aquifère alluvial de Courtemaîche. Carte du substratum calcaire sous les alluvions.

Dans les puits, les pompages entraînent des variations plus importantes (fig. C.30 et C.31).

A Courtemaîche, le niveau de la rivière (lit colmaté) est en tout temps supérieur à celui de la nappe, dans toute la partie exploitée située en rive droite: l'Allaine est suspendue au-dessus de la nappe. En aval, l'aquifère s'amincit fortement, ses alluvions deviennent peu perméables et les eaux se déchargent dans l'Allaine. A Porrentruy, le niveau de l'Allaine est supérieur à celui de la nappe alluviale, à l'exception des périodes de crues. Le niveau de l'Allaine y est généralement situé entre 410 et 411 m alors que dans la nappe, il passe de 406-407 m en basses eaux à 411-412 m en hautes eaux.



**Figure C.30**  
Nappe alluviale du Pont d'Able (Porrentruy). Niveaux piézométriques moyens et extrêmes pour l'ensemble des puits et piézomètres.



**Figure C.31**  
Nappe alluviale de Courtemaîche. Niveaux piézométriques moyens et extrêmes dans l'ensemble des puits et piézomètres.

### 3.1.3 Perméabilités

A Courtemaîche, la zone d'influence des pompages s'étend jusqu'à 100-200 m vers l'amont. Elle est plus limitée dans la zone des puits au Pont d'Able. A Courtemaîche, les perméabilités ont été calculées en régime transitoire (Jacob) et en régime permanent (Thiem) pour le puits central (MFR, 1992). Au Pont d'Able, les formules de Dupuit (écoulement permanent) et de Theis (non permanent) ont été appliquées pour deux des puits et des essais d'infiltration dans des piézomètres voisins sont venus compléter les mesures de perméabilité (CSD, 1973a). Les perméabilités sont de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-3}$  à  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s, pour les

deux aquifères. Mais la variabilité est grande vu l'hétérogénéité des aquifères: elles peuvent descendre à  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s dans les zones superficielles. Les transmissivités fluctuent selon la puissance de l'aquifère:  $3 \cdot 10^{-3}$  à  $3 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s au Pont d'Able, avec un coefficient d'emménagement de 6.5%. Cette valeur correspond à une nappe partiellement captive.

La complexité des dépôts alluviaux fait de la nappe du Pont d'Able une nappe mixte. Selon la situation hydrologique, certaines zones sont captives, d'autres libres. Lors de l'implantation du puits initial (central), les premiers pompages n'ont prélevé qu'une eau très pauvre en oxygène et des dégagement d'hydrogène sulfureux. La qualité s'est progressivement améliorée avec les volumes prélevés et consécutivement, le niveau piézométrique général s'est abaissé très sensiblement (1-2 m).

### 3.2 Interprétation des cartes piézométriques

Les directions d'écoulement des nappes alluviales du Pont d'Able et de Courtemaîche sont à peu près parallèles à la direction générale du cours de l'Allaine (fig. C.32 à C.35).

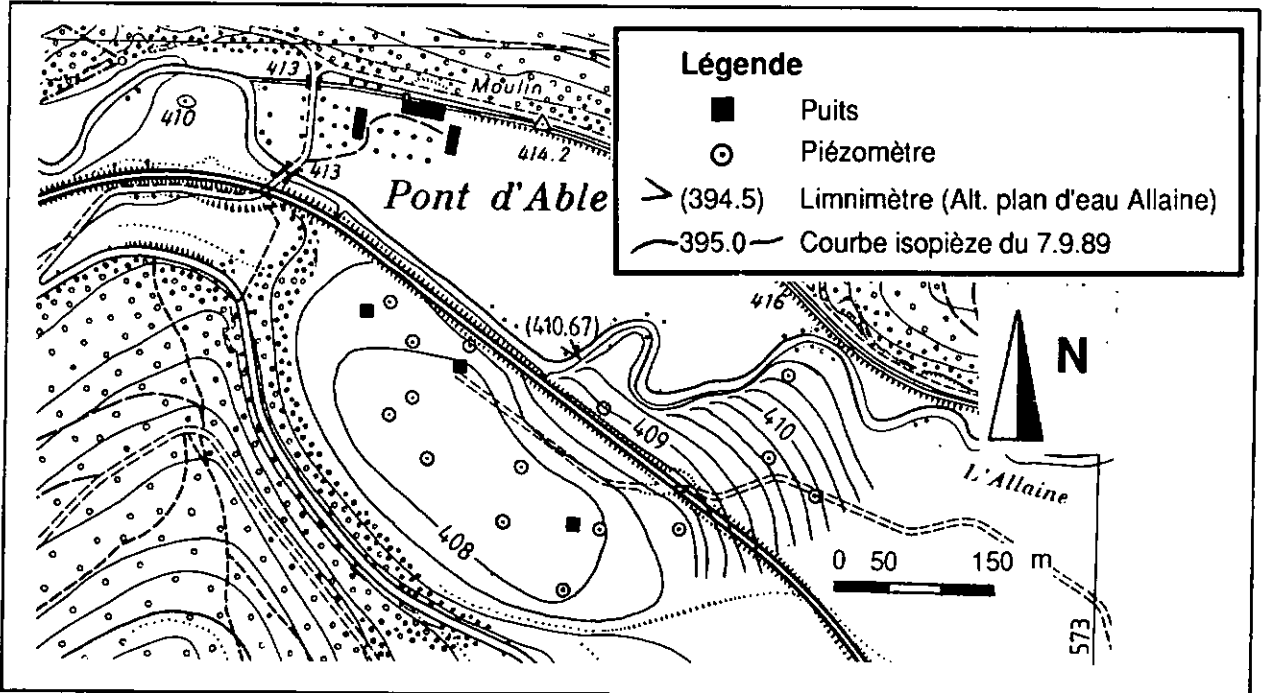


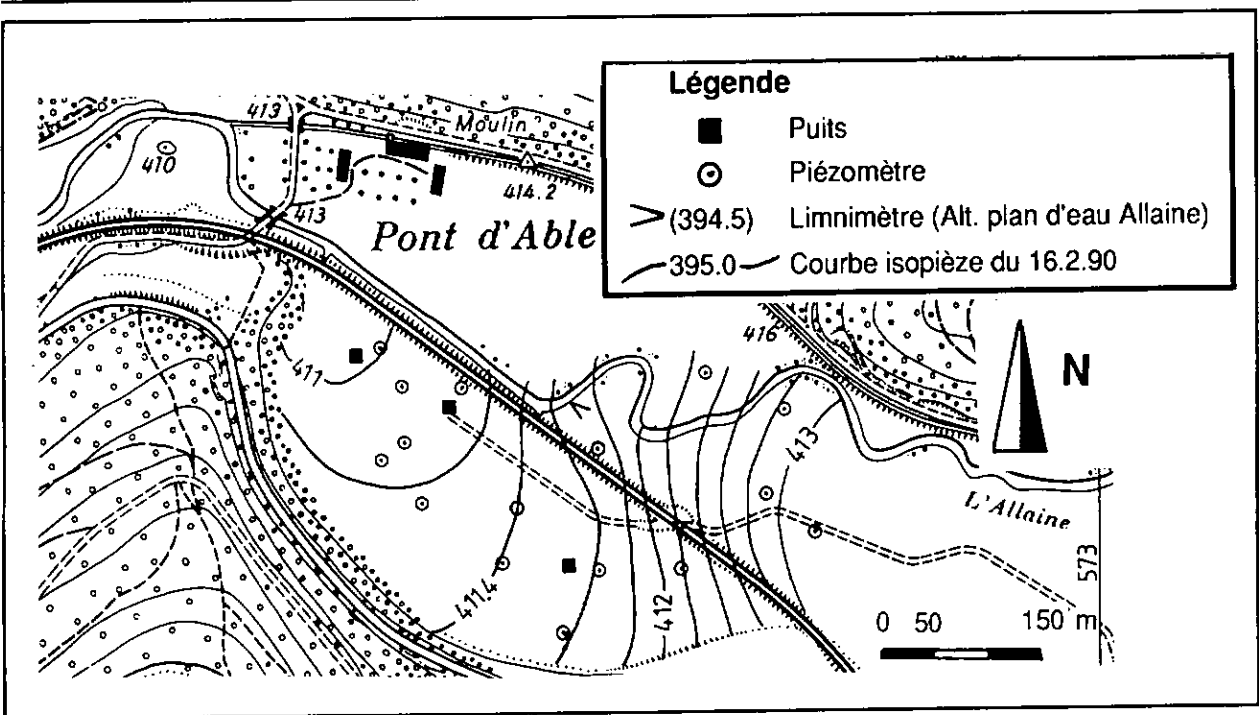
Figure C.32

Nappe alluviale du Pont d'Able (Porrentruy) en situation de basses eaux (7.9.1989). Courbes isopièzes (équidistance 0.2 m). La rivière est perchée au-dessus de la nappe.

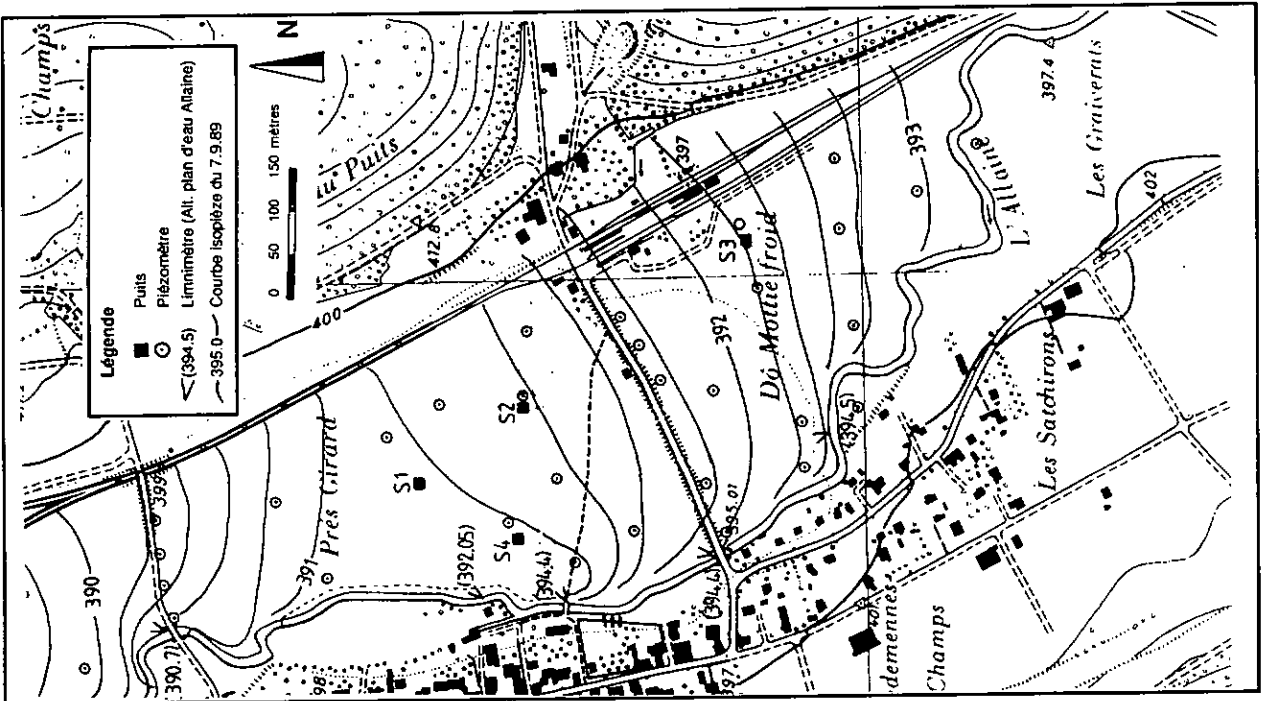
#### Gradients et vitesses d'écoulement

**Au Pont d'Able**, les faibles gradients piézométriques (0.1%) mesurés dans la zone des puits s'expliquent par de bonnes perméabilités et par l'arrivée d'apports karstiques démontrés par traçages. Ce n'est pas le cas de la partie amont de la nappe qui s'écoule avec de forts gradients (plus de 1%). L'alimentation de la nappe par l'Allaine est très nette en situation normale (basses et moyennes eaux) sur la partie NE de la nappe. En hautes eaux, le niveau de la nappe est plus ou moins en équilibre avec la rivière.

**A Courtemaîche**, les gradients piézométriques atteignent de 0.2 à 0.4 % en basses eaux, les valeurs les plus faibles étant aussi mesurées dans la zone exploitée; en amont, la traversée de la vallée par l'Allaine offre une alimentation importante pour la nappe. En hautes eaux, les gradients augmentent sensiblement

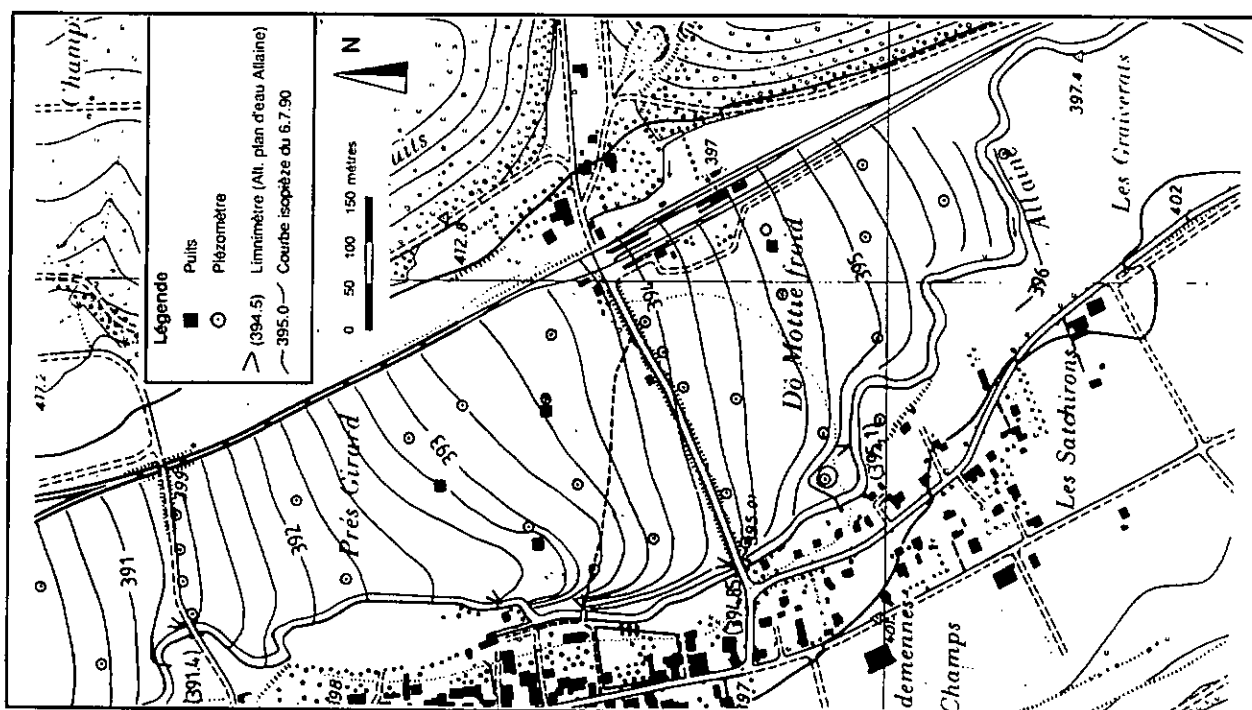


**Figure C.33**  
Nappe alluviale du Pont d'Able (Porrentruy) en situation de hautes eaux (16.2.1990). Courbes isopièzes (équidistance 0.2 m).



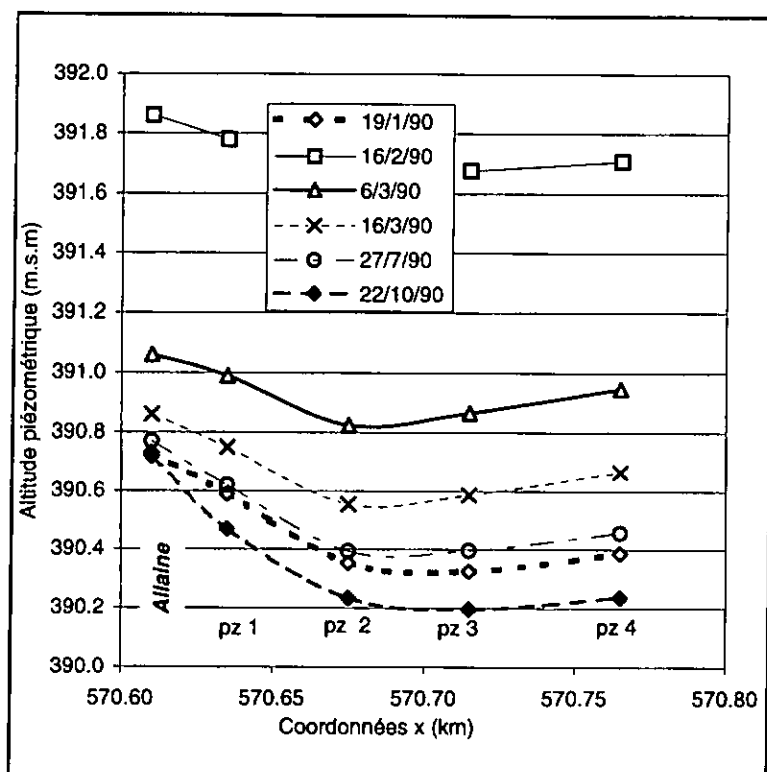
**Figure C.34**  
Nappe alluviale de Courtemaîche (Basses eaux du 7.9.1989). Courbes isopièzes (équidistance 0.2 m). La rivière est perchée au dessus de la nappe.

avec les vitesses d'écoulement de 0.4 à 0.5 %. Ils s'accroissent encore dans la zone du trou émissif qui alimente très visiblement la nappe alluviale. Cet exutoire temporaire du système de La Fontaine, situé en rive droite de l'Allaine, est alimenté par le versant ouest de la vallée, situé en rive gauche. La piézométrie nous permet d'observer une sorte de dôme piézométrique dans cette zone (moyennes et hautes eaux), sans qu'il y ait forcément débordement. D'autres apports karstiques proviennent de l'autre versant de la



**Figure C.35**

Nappe alluviale de Courtemaîche en situation de hautes eaux (6.7.1990). Courbes isopièzes (équidistance 0.2 m). Pompage dans P4.



**Figure C.36**

Nappe alluviale de Courtemaîche. Profil piézométrique W-E (amont de La Fontaine), montrant des venues d'eaux souterraines à partir du versant oriental de la vallée.

vallée: des gradients piézométriques (fig. C.36), thermiques (fig. C.43 et C.44) et d'oxygène dissous

(fig. C.45) ont été mis en évidence. Les apports karstiques proviennent donc des deux versants de la vallée. Les forts gradients qui sont observés entre le niveau de l'Allaine et celui de la nappe (2 à 3 m) dans la partie amont et centrale indiquent plutôt alimentation diffuse à cause du colmatage du lit de la rivière. En aval des puits, la nappe devient captive et s'exfiltre dans l'Allaine. Le karst alimente donc la nappe alluviale depuis le versant ouest de la vallée. Mais, par un profil piézométrique, indique aussi une alimentation karstique depuis le versant est (fig. C.36). Dans la région des puits, une dépression piézométrique n'apparaît que vers le puits communal, le plus proche de l'Allaine. Le régime de pompage de ce puits (alternance de pompes rapprochées) contraste singulièrement avec les trois autres puits qui ne s'enclenchent que la nuit. Un cône de rabattement quasi permanent s'est

donc installé dans ce puits, qui augmente à la fois les la zone d'influence du puits et les vitesses d'écoulement dans cette zone.

**La mise en route de la réalimentation par de l'eau karstique a un impact très rapide sur la pléziométrie de la nappe, dans sa zone centrale.** L'effet est également ressenti dans la partie amont de la nappe, à 300 m. L'eau infiltrée à proximité du puits central provient de l'eau pompée dans un forage de 16 m, implanté dans le karst, 500 m au NNE de la source de la Fontaine (CSD, 1973b). De la même manière qu'à Courtemaîche, l'aquifère alluvial du **Pont d'Able** est alimenté par les deux versants de la vallée.

Les vitesses moyennes de transit varient selon le gradient, la perméabilité et la porosité efficace de l'aquifère alluvial. En admettant une valeur de 15% pour ce dernier paramètre, les vitesses obtenues en basses et hautes eaux sont alors situées dans une fourchette de 1 à 20 m/j. Notons que les valeurs de 25% estimées par CSD (1973a) pour l'aquifère alluvial du Pont d'Able sont trop élevées. Dans la nappe de Courtemaîche au repos, des vitesses moyennes de 10 à 20 m/j ont été calculées en fonction des paramètres déterminés précédemment. Au Pont d'Able, ces vitesses sont faibles dans la zone exploitée (1 à 2 m/j) et dépassent 20 m/j dans la zone amont.

**L'importance des débits prélevés dans la nappe (1300 l/min) nécessite une alimentation indirecte, soit par l'Allaine, soit par le karst ou par une combinaison des deux. La part de l'alimentation directe ne dépasse pas 15 à 20% du volume annuel prélevé.** En effet, à Courtemaîche, les précipitations efficaces ne dépassent pas 500 mm/an sur une surface de 0.2 km<sup>2</sup>, ce qui donne un débit moyen de 190 l/min; Avec un calcul similaire à Porrentruy, le débit moyen peut atteindre 150 l/min, en incluant les apports de la zone amont de l'aquifère alluvial, la zone exploitée ne recueillant que 90 l/min pour elle-même.

### 3.3 Interprétation des cartes des paramètres physico-chimiques

#### 3.3.1 Acquisition des données

A Porrentruy et à Courtemaîche, des analyses chimiques des puits et de l'Allaine ont été réalisées mensuellement depuis 1988. Les piézomètres de ces deux nappes ont fait l'objet d'analyses chimiques complètes à plusieurs reprises dans des situations de basses, moyennes et hautes eaux.

Des acquiseurs de données ont été implantés dans les puits des quatre nappes alluviales. Ainsi, le niveau piézométrique, la température et la conductivité ont été enregistrés en continu (4 mesures par heure) dans chacun des puits à partir de mai 1989. Ces mesures devaient non seulement permettre de suivre l'évolution de ces paramètres et des réactions à des signaux d'entrée, mais également des comparaisons entre les différents points. Ces comparaisons sont cependant délicates, surtout en valeur absolue (voir annexe 1).

#### 3.3.2 Température moyenne annuelle

La température des eaux souterraines d'un aquifère, qu'il soit alluvial ou karstique, est la résultante de différents facteurs:

- le flux géothermique
- l'altitude (température des précipitations)
- la végétation
- l'épaisseur de la zone non saturée

- la conductivité calorifique des sols
- la répartition des perméabilités (vitesses de déplacement de l'eau infiltrée)
- apports d'un cours d'eau
- apports d'un autre aquifère

Dans le cas des aquifères alluviaux de la Basse-Allaine, le flux géothermique n'exerce aucune influence. L'altitude est identique pour les quatre aquifères situés entre 370 et 410 m. Les autres facteurs ne varient pratiquement pas d'un aquifère à l'autre. La zone non saturée, par exemple, fluctue de 1 à 3 m selon l'état hydrologique. De ce fait, les différents types d'apports extérieurs sont responsables des différences (notamment thermiques) entre les nappes. Les infiltrations directes peuvent cependant, par la nature hétérogène de la couverture exercer une influence non négligeable sur la nappe.

Dans les puits de Courtemaîche et du Pont d'Able (Porrentruy), la température moyenne annuelle atteint environ 10.4-10.6°C (année hydrologique 1989-90). Ces valeurs sont d'environ 0.4°C supérieures à celle des eaux karstiques du Betteraz ou de la Fontaine, influencées par la rivière et de 0.8°C supérieures à celles de la Beuchire (voir tab. C.11).

Nous avons vu qu'à Fahy, la température moyenne du sol à 50 cm était sensiblement supérieure (1-2°C) à celle de l'air (tab. B.7 et chap.3.1.4, partie B). La température moyenne de l'Allaine à Courtemaîche est pratiquement la même en 1989-90 que la température du sol à Fahy. Mais Fahy est situé à 600 m et Courtemaîche à 400 m! D'autre part, étant donné l'hétérogénéité régionale des températures, la différence d'altitude ne joue sans doute qu'un rôle mineur.

Il est donc difficile de déterminer à priori l'influence dominante de l'un ou l'autre des facteurs suivants sur la température moyenne de la nappe:

- température moyenne de l'air
- température moyenne du sol
- température moyenne de la rivière
- température moyenne des apports karstiques.

En Ajoie, **la température moyenne de l'Allaine est supérieure à celle des eaux souterraines**, qu'elles soient karstiques ou alluviales. Une anomalie chaude des eaux souterraines semblerait favoriser l'hypothèse d'une influence de la rivière, l'écart donnant une indication sur l'ampleur de cette influence.

Les aquifères alluviaux étant pelliculaires, la température de la nappe devrait être voisine de celle du sol. Qu'en est-il dans d'autres régions?

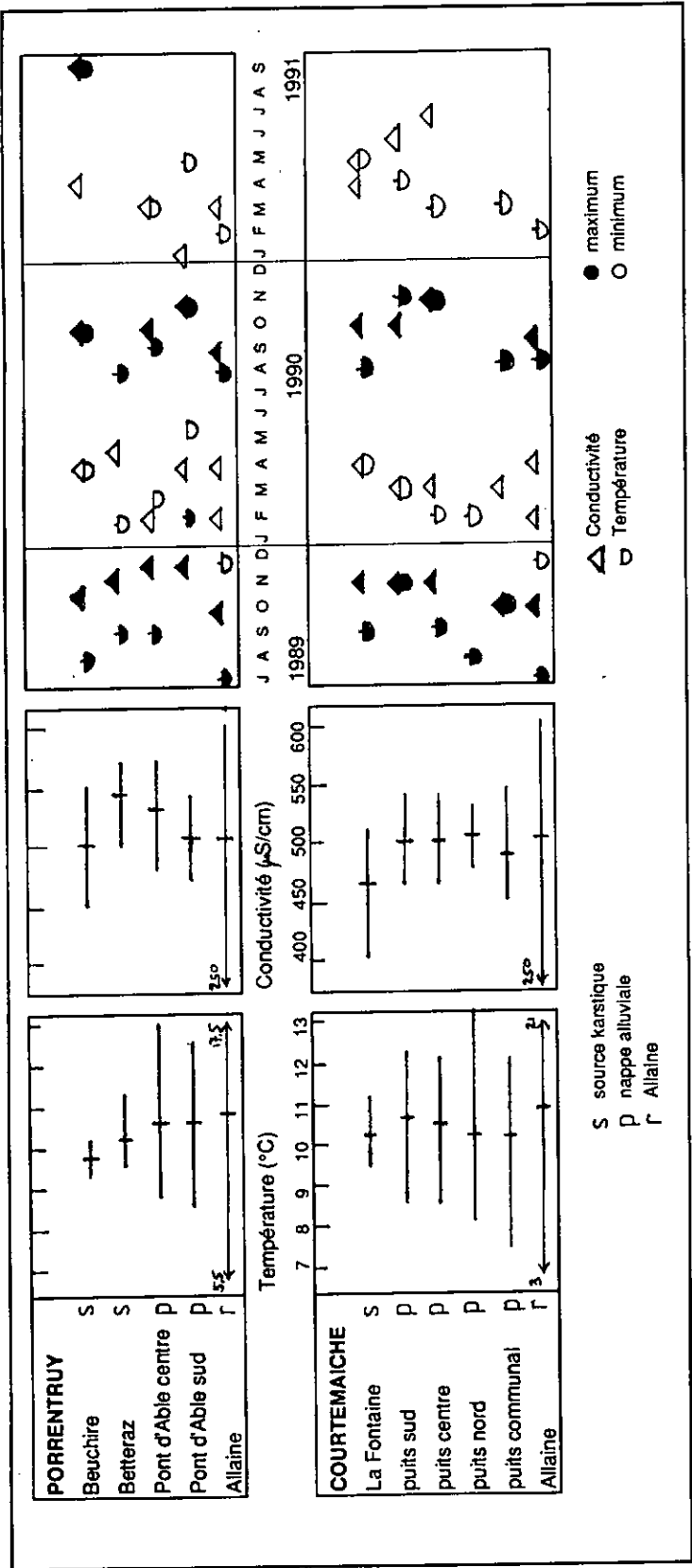
Dans les nappes alluviales du plateau (GSH, 1985), la température de l'eau est d'environ 1.5 à 3°C supérieure à la température de l'air. Quant à la température des rivières cotoyant ces aquifères, elle est inférieure à celle des nappes à l'inverse de ce qui se passe en Ajoie. Pourquoi?

**Tableau C.8:**

*Températures moyennes de l'air et de l'eau en Ajoie pour le cycle 1989-90*

| Fahy |      | Allaine | POR |       | COU   | BET  | FON  | BEU |
|------|------|---------|-----|-------|-------|------|------|-----|
| air  | sol  |         | air | puits | puits |      |      |     |
| 9.5  | 10.8 | 10.8    | 9.9 | 10.6  | 10.4  | 10.2 | 10.0 | 9.7 |

La température de l'air de Fahy est peut-être trop basse pour être une bonne référence: l'écart avec celle de la nappe alluviale atteint à peine 1°C! Selon ce critère ainsi que les exemples du plateau, la tempéra-



**Figure C.37**  
Nappes alluviales du Pont d'Able (Porrentruy) et de Courtemaîche. Valeurs moyennes et extrêmes des températures et conductivités.

ture des nappes de la Basse-Allaine serait apparemment trop basse. L'influence des eaux karstiques pourrait alors être à l'origine de ce phénomène d'inversion entre les températures moyennes de la rivière et des nappes.

### 3.3.3 Evolution saisonnière des paramètres physiques

L'évolution saisonnière des paramètres physiques est très nette (voir fig. C.37 et C.39). L'amplitude thermique oscille entre 3°C et 5.5°C selon les sites et celle de la conductivité entre 50 et 100 µS/cm. Dans cette évolution saisonnière, le déphasage thermique par rapport à la température de l'air n'est significatif que pour le puits sud du Pont d'Able (annexe ). A Buix, la température subit des fluctuations annuelles d'environ 4°C alors qu'à Boncourt, elles sont beaucoup plus faibles, soit de 1 à 2°C (tab. C.12).

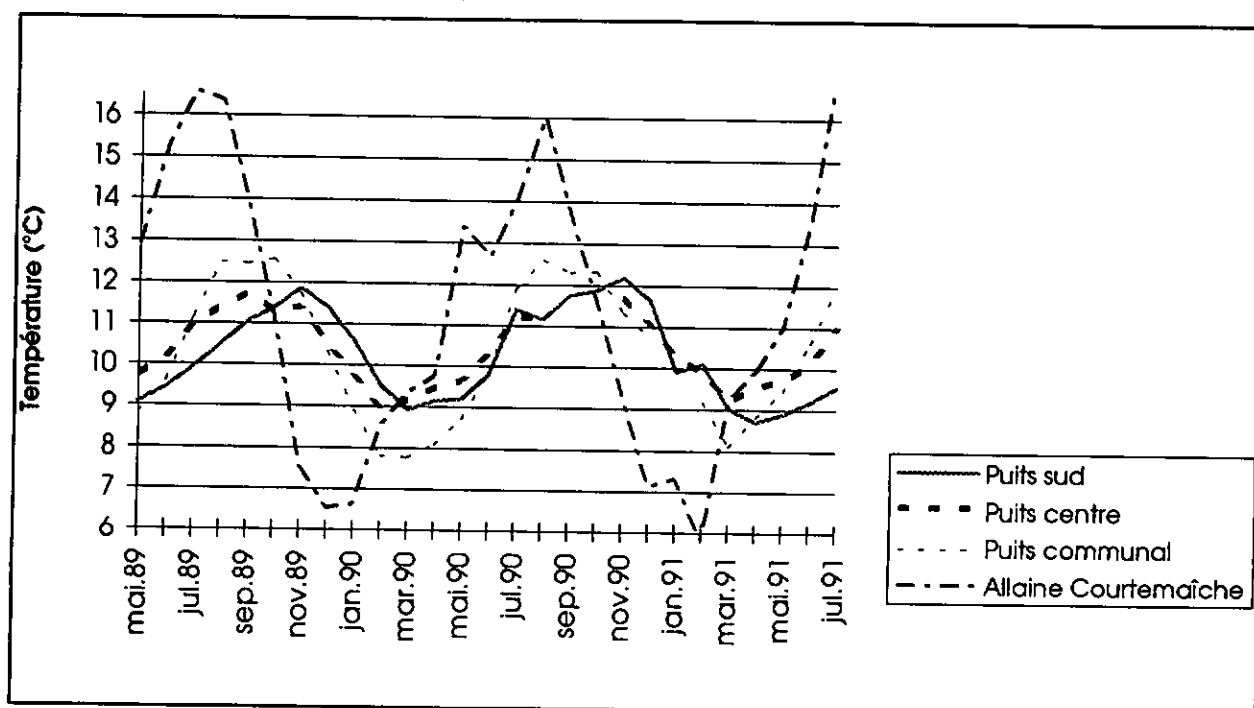
### Fluctuations thermiques des nappes alluviales

Nous avons observé de faibles fluctuations thermiques annuelles dans la plupart des sources karstiques (moins de 1.5°C). Si une nappe alluviale reçoit une alimentation prépondérante d'origine karstique, les fluctuations devraient également être relativement faibles. En comparant les fluctuations thermiques des 4 nappes alluviales de la Basse-Allaine, on s'aperçoit que celle de Courtemaîche et en particulier au puits communal proche de la rivière, l'amplitude annuelle atteint 5.5°C alors que celle de Boncourt (puits sud), cette amplitude tombe à 1°C. Ces deux exemples sont extrêmes (fig. C.38), mais il est évident que pour Boncourt, c'est essentiellement le karst qui alimente la partie sud de la nappe et que pour Courtemaîche, l'Allaine alimente de manière prépondérante le puits communal.

**Tableau C.9:**

*Synthèse des variations piézométriques, thermiques et de conductivité dans les nappes alluviales de la Basse-Allaine*

|                  | Variation<br>des niveaux<br>(m) | Variation des<br>températures<br>(°C) | Variation des<br>conductivités<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Pont d'Able sud  | 5.5                             | 3.5                                   | 50                                                            |
| Pont d'Able nord | 6                               | 4                                     | 70                                                            |
| SEHA sud         | 5.5                             | 3.5                                   | 60                                                            |
| SEHA centre      | 4.5                             | 3.5                                   | 70                                                            |
| SEHA nord        | 4.5                             | 5.5                                   | 50                                                            |
| Courtemaiche     | 4.5                             | 5.5                                   | 80                                                            |
| Buix             | 1.2                             | 4                                     | 50                                                            |
| Boncourt sud     | 2                               | 1                                     | 70                                                            |
| Boncourt nord    | 3                               | 2.5                                   | 80                                                            |



**Figure C.38**

*Nappe alluviale de Courtemaiche. Evolution des températures moyennes mensuelles dans les puits.*

Les autres nappes ou parties de nappe montrent une combinaison variable des deux types d'apport. Nos constatations sont valable pour un bilan global thermique. Des périodes (crues ou basses eaux) peuvent très bien sortir de ces schémas. Ainsi, en basses eaux, il est peu probable que les apports karstiques soient importants à Courtemaiche par exemple.

A Courtemaîche, les cycles annuels sont bien visibles pour chacun des puits que ce soit pour la température (fig. C.38) ou pour la minéralisation (fig. C.39).

Les apports karstiques du système de La Fontaine sont caractérisés par une faible minéralisation moyenne (465  $\mu\text{S/s}$ ) comparée à celle des puits (490-500  $\mu\text{S/cm}$ ) et de l'Allaine (505  $\mu\text{S/cm}$ ). Les moyennes sont cependant artificiellement faussée par la réalimentation qui ne touche pas le puits sud, situé en amont.

Au Pont d'Able, l'amplitude des fluctuations saisonnières de la conductivité est plus faible pour le puits sud (60  $\mu\text{S/cm}$ ) que pour le puits central (90  $\mu\text{S/cm}$ ). L'amplitude des température était analogue (deux tiers de la valeur du puits central pour le puits sud).

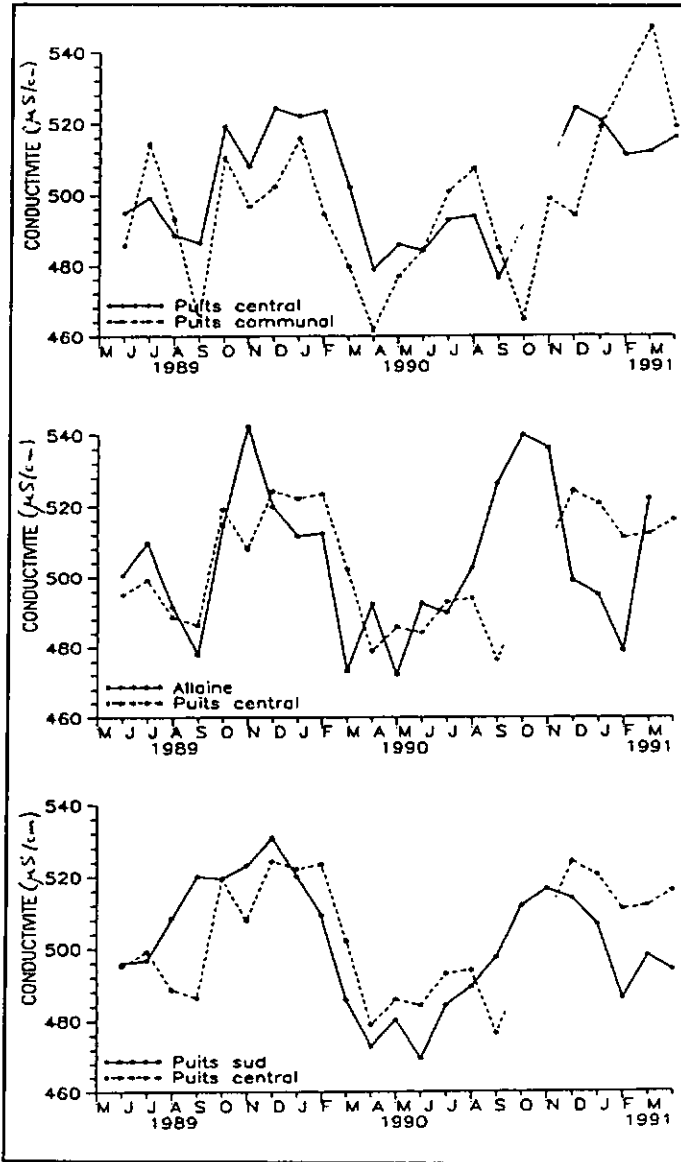
D'après Vey & Hardy (1978, in GSH, 1985), l'amplitude thermique journalière ne se fait plus sentir à plus de 50 cm de profondeur. En revanche, l'amplitude annuelle, dans un sol "sec", est encore de l'ordre de 20% à 5 m de profondeur, correspondant pour l'Ajoie, à environ 6°C. Etant donné que la conductivité thermique est peu différente avec ou sans eau (elle est la même pour un sable mouillé que pour un gravier sec), cette valeur pourrait être appliquée aux aquifères étudiés. Les sondes températures sont en moyenne situées à 7 m de profondeur. L'amplitude théorique serait de l'ordre de 3 à 4°C. Les pompages homogénéisent cependant les différences d'amplitudes avec des eaux venant de 3 à 9 m de profondeur. Dans le puits sud du Pont d'Able, la remontée de 9 à 7 m de profondeur de la sonde a provoqué une augmentation de l'amplitude annuelle de la température qui a passé de 3 à 4°C. L'amplitude est restée la même dans le puits centre, situé à moins de 200 m au NW. L'effet des pompages ne semble pas constituer un effet dominant. L'amplitude augmente avec la proximité d'un cours d'eau comme l'Allaine. A Courtemaîche, le puits situé le plus près de l'Allaine connaît les plus grandes amplitudes annuelles.

D'autre part, selon des courbes théoriques de Groeber (1955, in GSH, 1985), avec des conditions spécifiques, l'atténuation de l'amplitude annuelle de la température de l'eau souterraine dépend de l'épaisseur de la zone non-saturée au-dessus de la nappe. A plus de 4 m sous le sol et avec 2 m de zone non saturée, l'amplitude annuelle de la température serait inférieure à 2°C. Ces valeurs nous paraissent peu réalistes. Mais il est difficile, sans une étude approfondie du phénomène, d'aller plus loin dans nos considérations sur l'origine de ces amplitudes.

### **Répartition spatiale des températures**

Etant donné l'hétérogénéité des alluvions, les mesures et les analyses faites dans les puits ne reflètent pas forcément l'ensemble de la nappe. Les cartes isothermes des nappes de Porrentruy et de Courtemaîche donnent cependant une idée plus précise de la situation des puits par rapport à l'ensemble de la nappe et aussi par rapport aux influences du karst et/ou de l'Allaine (fig. C.40 à C.43).

On distinguera cependant une influence différente de l'Allaine à Porrentruy ou à Courtemaîche. A la hauteur de la nappe alluviale du Pont d'Able, les amplitudes journalières ou saisonnières de la température de l'Allaine sont sensiblement moins importantes que celles mesurées à Courtemaîche, soit environ 50 à 70%. Au Pont d'Able, l'Allaine vient de recevoir les arrivées massives d'eaux karstiques des sources de Porrentruy et n'a donc eu que peu le temps de se réchauffer ou de se refroidir. Par contre, jusqu'à Courtemaîche, les arrivées karstiques sont peu importantes et la rivière connaît des amplitudes thermiques plus conséquentes. Cette différence devrait se ressentir sur les nappes concernées. Mais les distances jusqu'aux différents puits ne sont pas les mêmes et l'atténuation de l'amplitude augmente ses effets au fur et à mesure de l'éloignement de la rivière (entre 70 et 350 m effectifs, voir tab.C.13). Ainsi, l'amplitude de l'Allaine est plus élevée à Courtemaîche mais les puits sont plus éloignés. Seul le puits communal (SEH4) fait exception et montre effectivement les amplitudes saisonnières les plus importantes.



**Figure C.39**  
Evolution saisonnière des conductivités à Courtemaîche de 1989 à 1991

l'hiver 1989-90 (janvier-février) se marque au niveau des puits situés vers l'Allaine, alors que le puits sud n'est pratiquement pas touché (fig. C.40 et C.41).

A Courtemaîche, la situation estivale (en basses eaux) de la nappe indique des arrivées d'eau plus fraîches venant de l'est (quartier de la gare). Elles se marquent également avec l'oxygène dissous (concentrations les plus importantes de la nappe, fig. C.44). Les apports de l'Allaine sont visibles par le sodium dont les concentrations diminuent de l'amont (l'Allaine traverse la vallée) vers l'aval.

**Tableau C.13:**

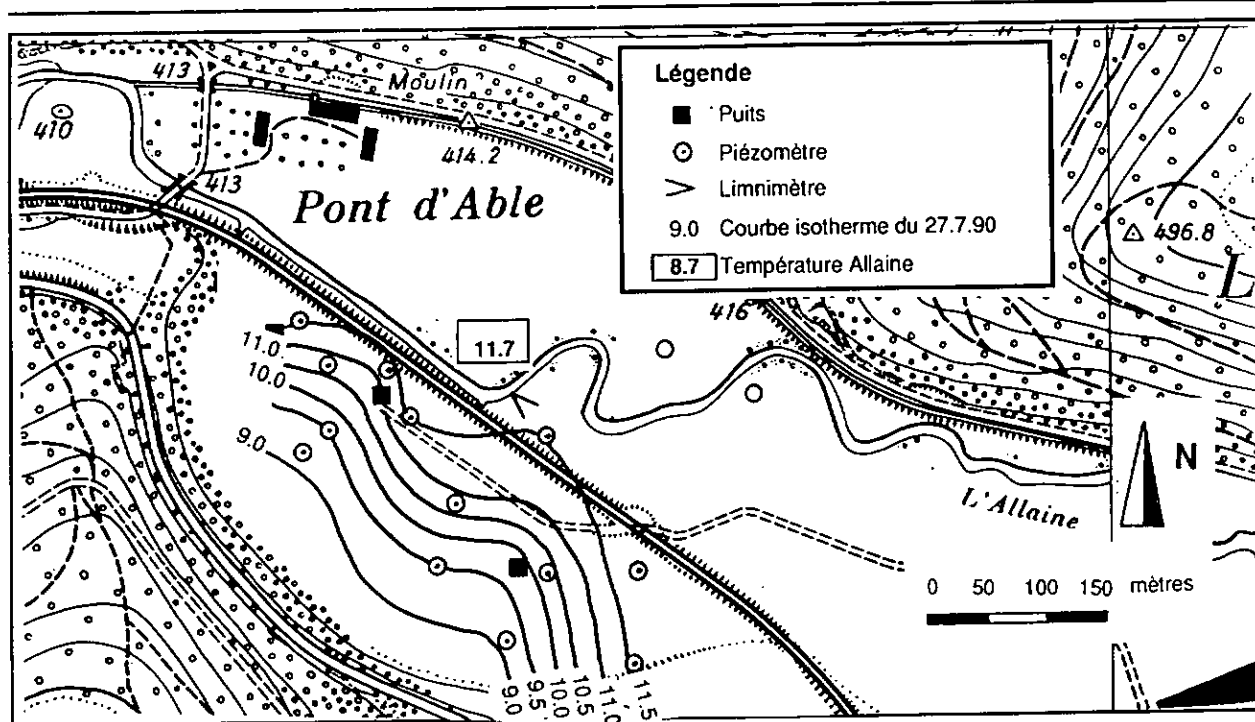
Distance entre l'Allaine et les puits des nappes alluviales

|               | D1 (m) | D2 (m) |
|---------------|--------|--------|
| ABC (centre)  | 50     | 70     |
| ABS (sud)     | 140    | 170    |
| SEH1 (nord)   | 130    | 300    |
| SEH2 (centre) | 225    | 350    |
| SEH3 (sud)    | 180    | 260    |
| SEH4 (comm.)  | 70     | 110    |
| BUIX          | 100    | >200   |
| LOM1          | 200    | 220    |
| LOM2          | 50     | >100   |

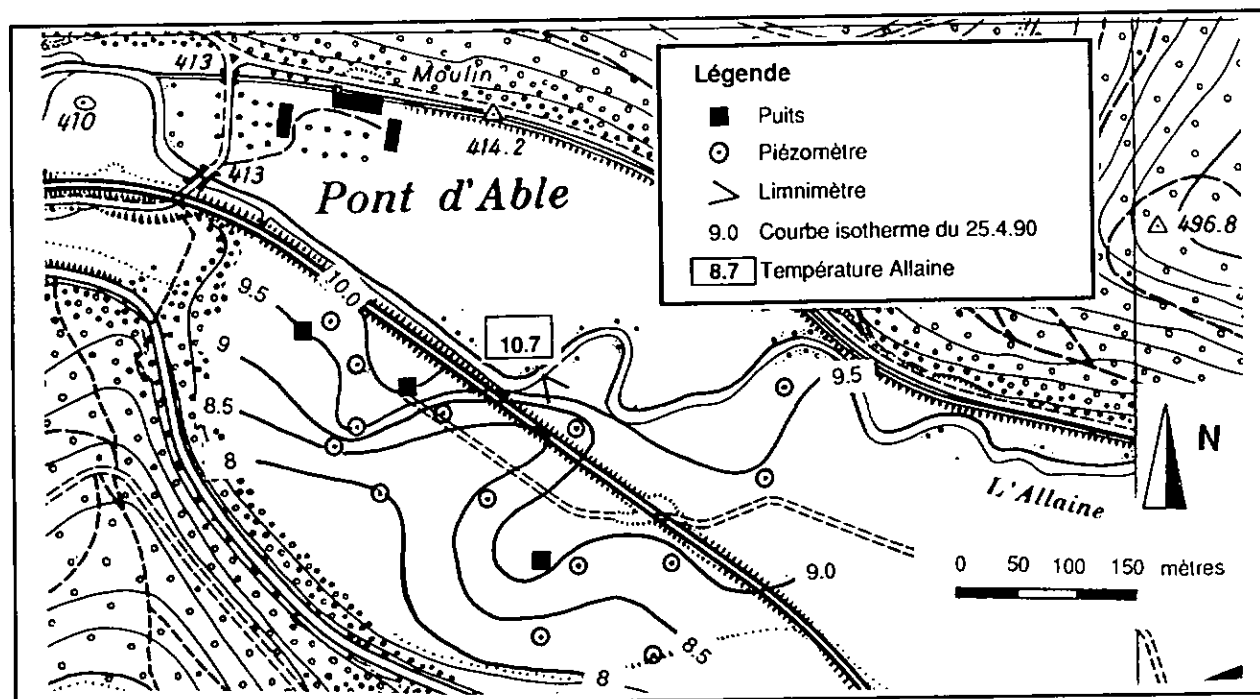
D1 représente la distance la plus courte entre l'Allaine et le puits

D2 donne la distance mesurée sur une ligne d'écoulement fictive

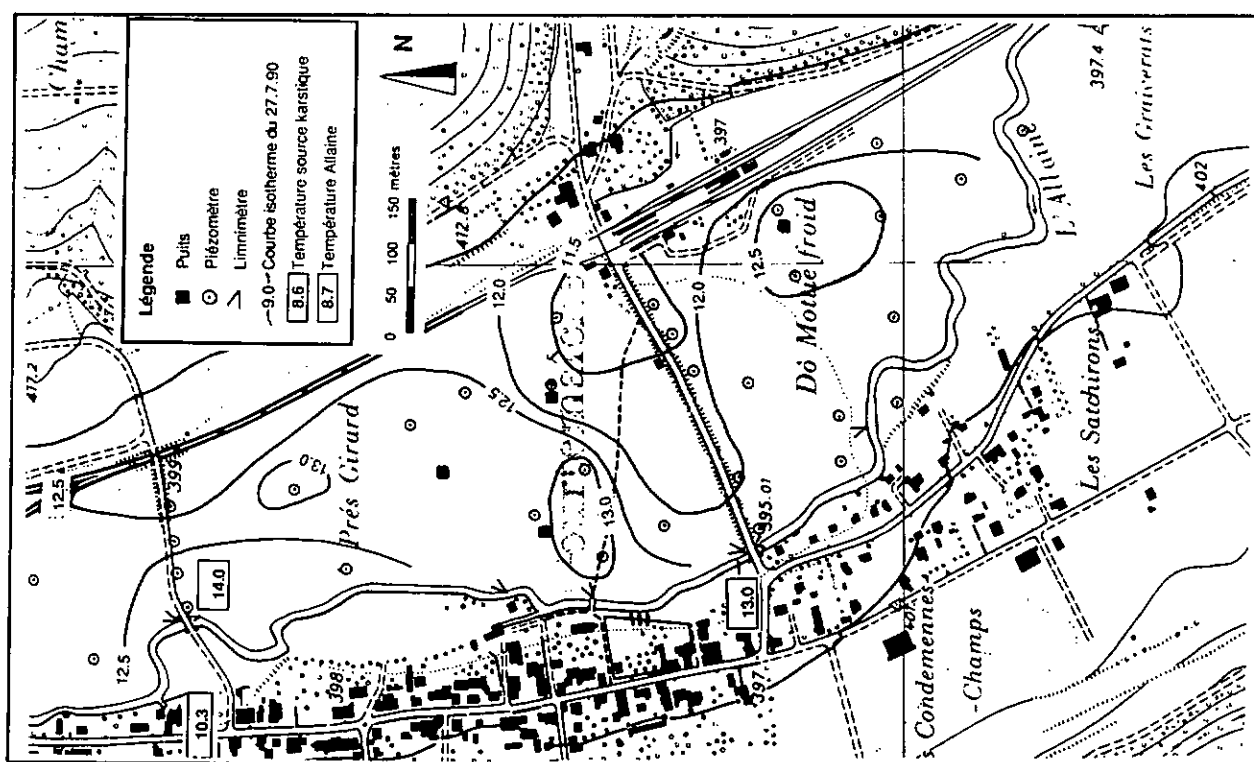
Au Pont d'Able, l'influence de l'Allaine se marque sur les isothermes qui sont parallèles aux isopièzes en amont et à la rivière quand les gradients piézométriques diminuent: l'Allaine réchauffe la nappe et l'influence karstique n'apparaît pas de manière aussi nette. En hiver, une inversion du gradient thermique s'effectue de l'Allaine vers l'intérieur de la nappe. L'influence de l'alimentation artificielle par de l'eau froide au cours de



**Figure C.40**  
Nappe alluviale du Pont d'Able (Porrentruy). Courbes isothermes (équidistance 0.5°C) en été, basses eaux du 27 juillet 1990.

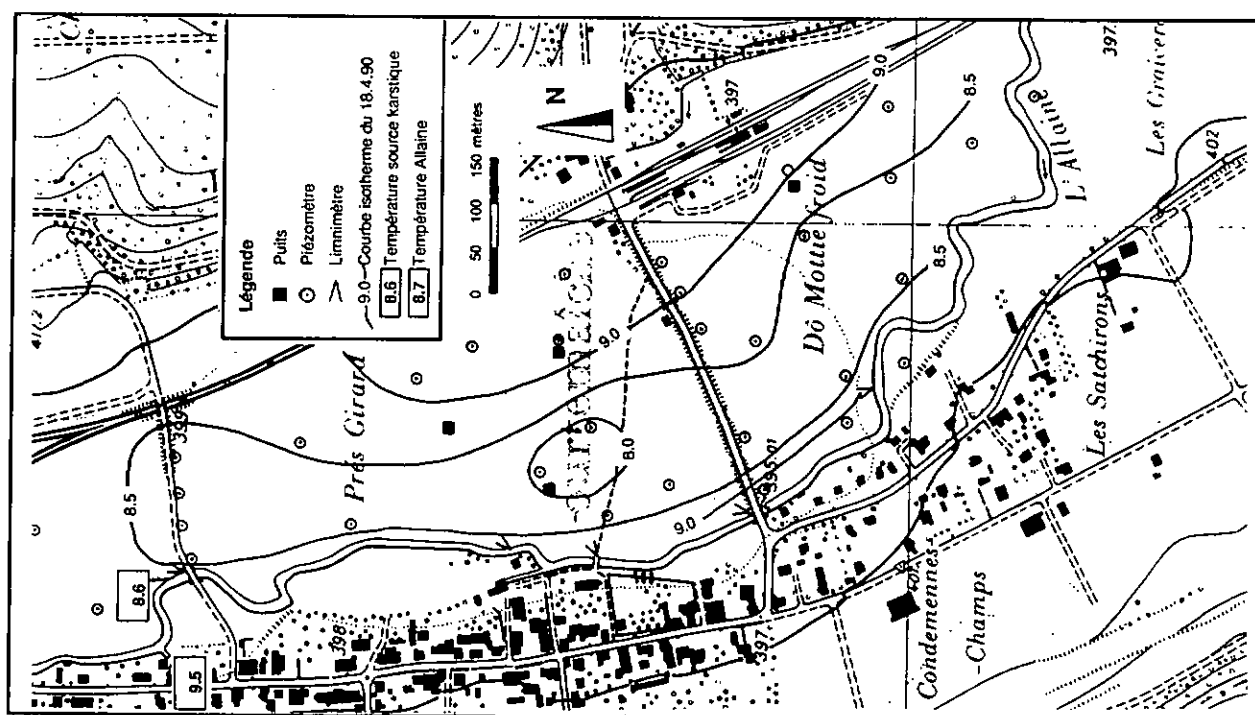


**Figure C.41**  
Nappe alluviale du Pont d'Able (Porrentruy). Courbes isothermes (équidistance 0.5°C) en hiver, moyennes eaux du 25 avril 1990.



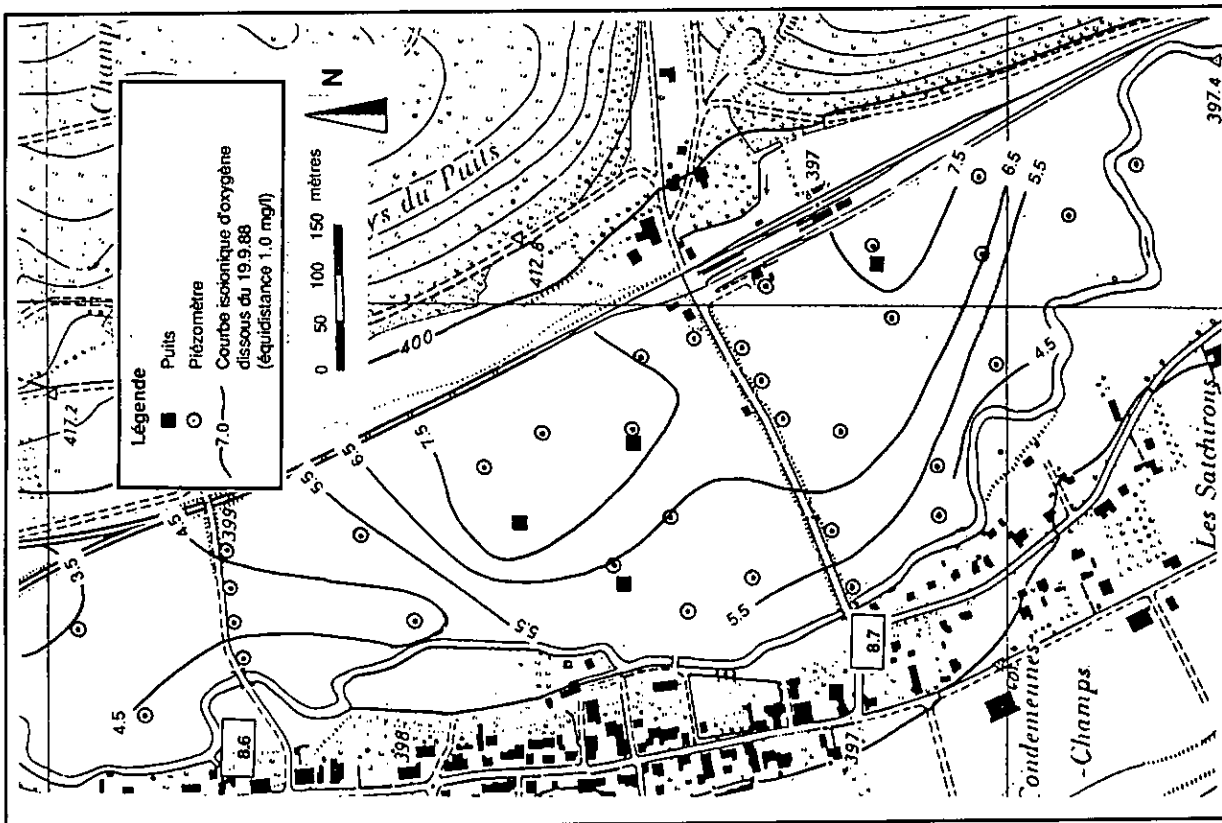
**Figure C.42**

Nappe alluviale de Courtemaiche. Courbes isothermes (équidistance 0.5°C) en été, basses eaux (27.7.90)



**Figure C.43**

Nappe alluviale de Courtemaiche. Courbes isothermes (équidistance 0.5°C) en hiver. Moyennes eaux du 18 avril 1990.



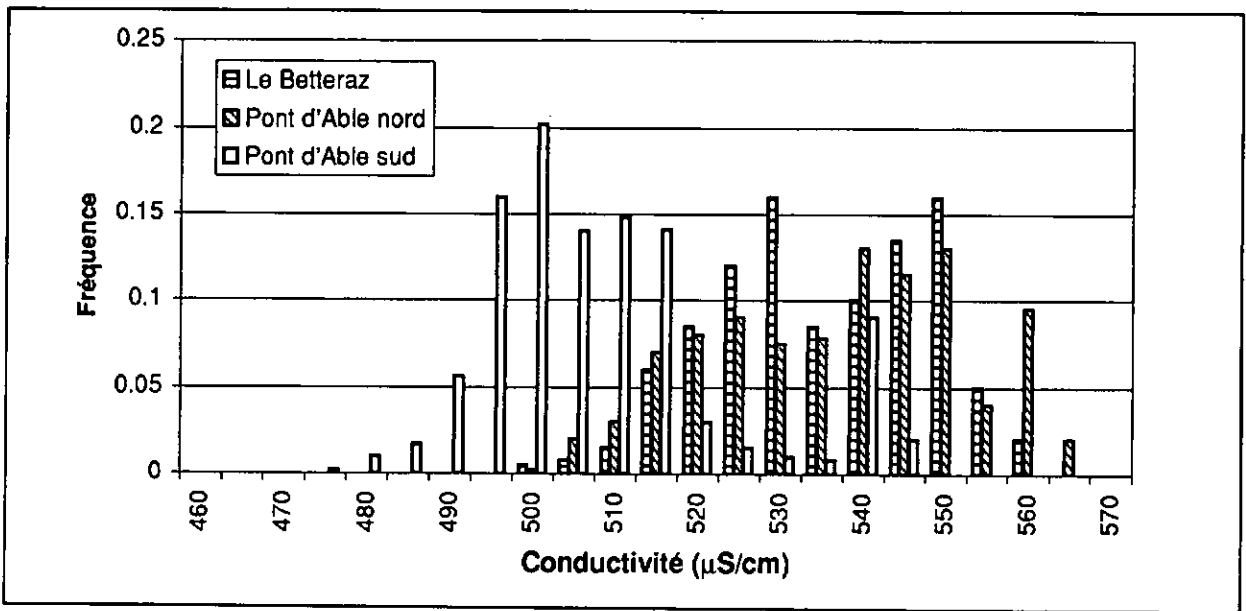
**Figure C.44**  
Nappe alluviale de Courtemaîche. Répartition de l'oxygène dissous dans la nappe.

### 3.3.4 Conductivité moyenne

A **Courtemaîche**, la conductivité moyenne des différents puits est sensiblement la même que celle de l'Allaine, environ  $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ , mais nettement plus élevée que celle de la source de la Fontaine (influencée par l'Allaine), située vers  $465 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Cette remarque va à l'encontre de l'hypothèse du paragraphe précédent. Par ses apports moins minéralisés à partir du karst, l'alimentation artificielle induit sur le bilan annuel une minéralisation plus faible des puits communal (le plus influencé) et central. Notons que l'eau karstique infiltrée artificiellement ne se charge que très peu avant de parvenir dans les puits. Etant donné la netteté de la dilution ( $-40$  à  $-60 \mu\text{S}/\text{cm}$ !) la proportion alimentant les puits est importante.

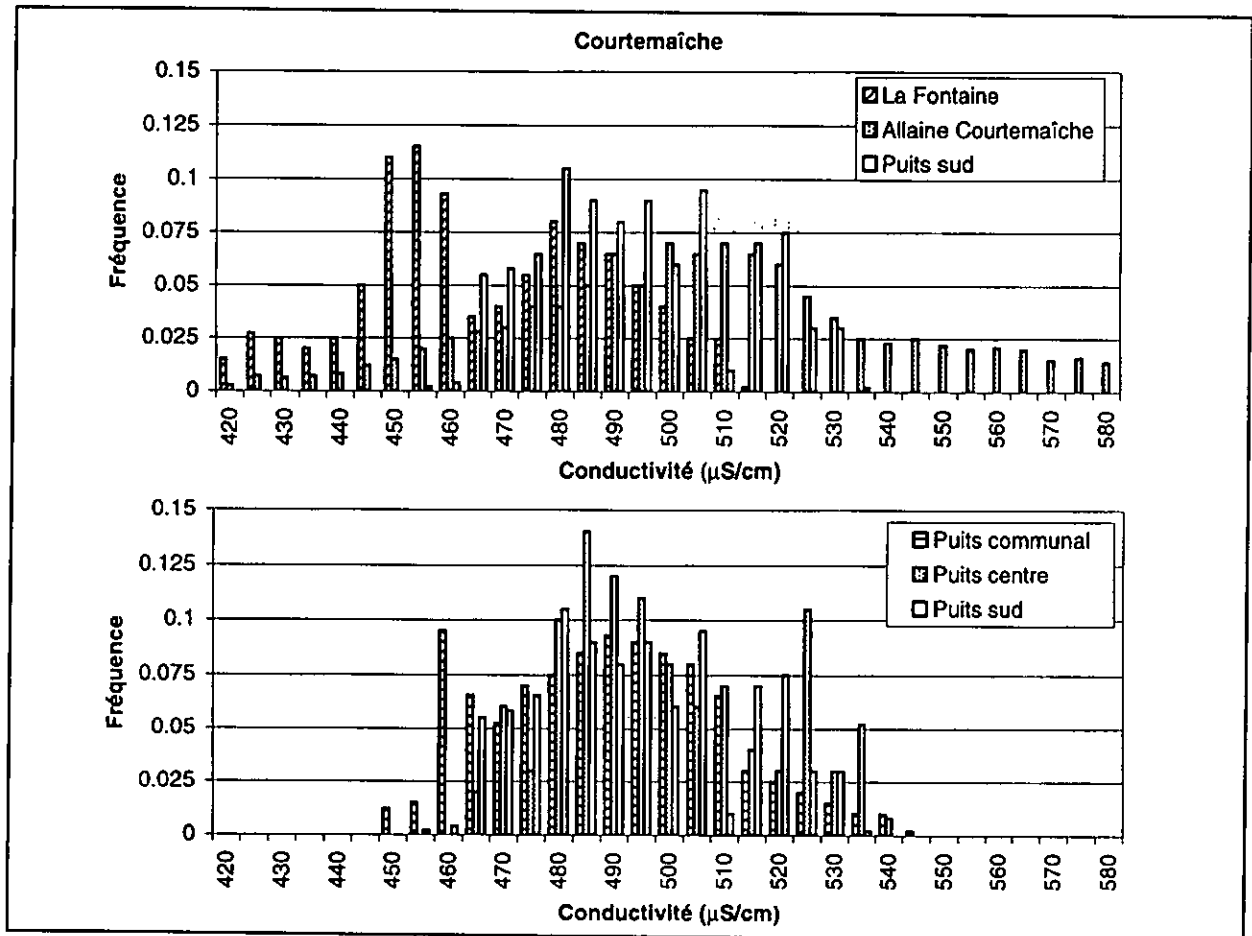
La conductivité du puits sud du **Pont d'Able** ( $505 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) est semblable à celle des puits de Courtemaîche. Par contre, le puits central, qui représente la partie orientale de l'aquifère alluvial, montre une minéralisation plus importante ( $530 \mu\text{S}/\text{cm}$ ), provoquée par les apports karstiques du système du Betteraz ( $545 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). La conductivité de l'Allaine à la hauteur du Pont d'Able est voisine de celle mesurée à Courtemaîche (environ  $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). L'Allaine tend donc à atténuer les apports plus minéralisés du système du Betteraz.

L'analyse fréquentielle des conductivités faite sur les nappes de Courtemaîche et de Porrentruy est assez révélatrice de la pluralité des apports (fig. C.45 et C.46). Un aquifère poreux du type de ceux de Courtemaîche et de Porrentruy produit généralement une courbe à faible dispersion et unimodale. La plurimodalité et la dispersion des courbes de fréquence des conductivités de ces deux systèmes les font classer dans un aquifère karstique à degré élevé de karstification. Le puits sud du Pont d'Able à Porrentruy montre la dispersion la plus faible et une courbe bimodale seulement. Cela confirme son relatif isolement causé par de faibles vitesses d'écoulement jusqu'au puits.



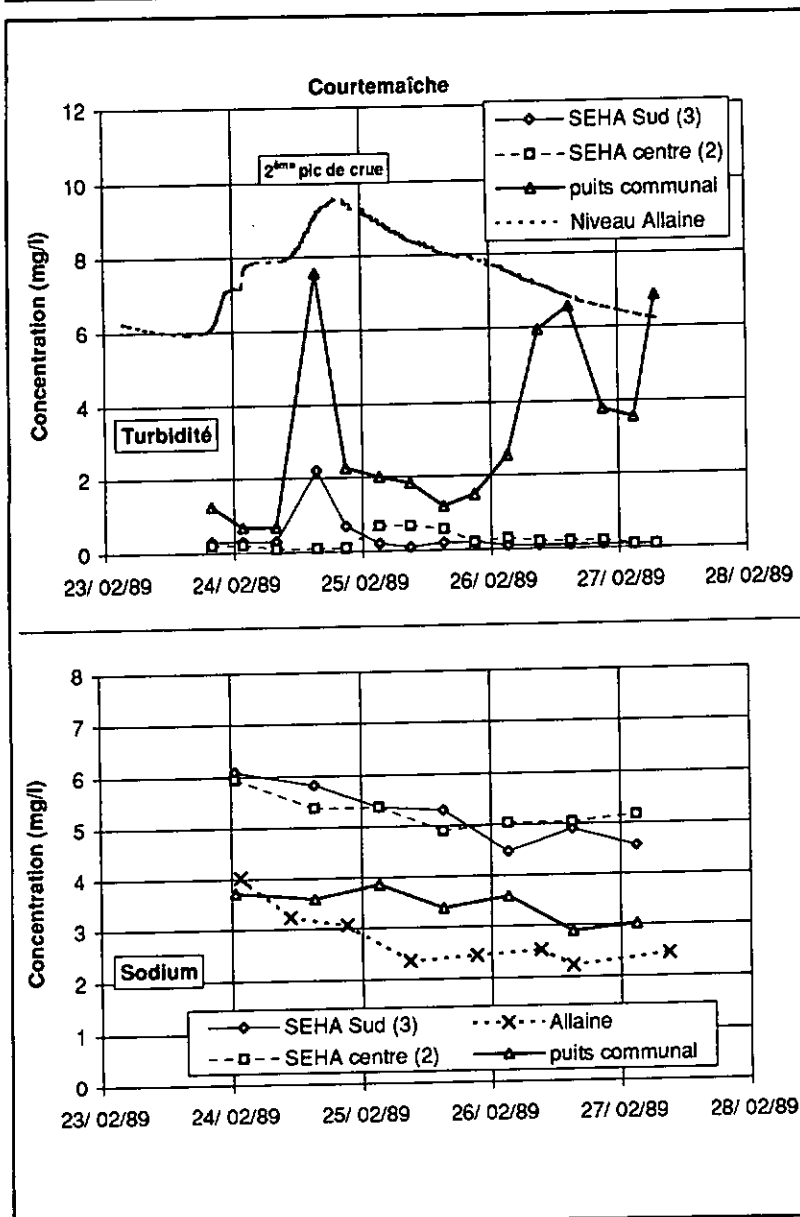
**Figure C.45**

Nappe alluviale du Pont d'Able (Porrentruy). Distribution (histogrammes) des conductivités moyennes journalières dans les puits (1989-1991).



**Figure C.46**

Courtemaîche. Distribution (histogrammes) des conductivités moyennes journalières dans la nappe alluviale (puits), l'Allaine et la source de la Fontaine (1989-1991).



**Figure C.47**  
Nappe de Courtemaîche. Variation de la turbidité et des concentrations de sodium dans les puits lors de la crue de février 1989.

tués dans la zone amont montrent également des concentrations similaires pour les éléments énumérés. L'influence de l'Allaine est apparente sur ces paramètres, sauf peut-être le potassium trouvé en concentrations plus élevées à la source de La Fontaine que dans le puits sud. En revanche, les concentrations d'EDTA relativement homogènes dans tous les puits, démentent cette affirmation. En effet, issu des eaux usées, l'EDTA est un paramètre typique de l'influence de l'Allaine. Au contraire des solvants chlorés, il ne se dégrade pratiquement pas. Nous relativiserons cependant cette contradiction en relevant la présence d'une conduite d'eaux usées pas très récente (50 ans environ...) qui traverse la plaine au niveau des puits centre et communal. Si les valeurs moyennes de NTA (biogégradable) sont faibles à Courtemaîche, les valeurs maximales sont significatives dans trois des quatre puits. **Seul le puits central n'a pas une liaison rapide avec l'Allaine.**

### 3.3.5 Caractérisation chimique des nappes alluviales

La qualité chimique générale de l'eau des nappes alluviales est peu différente de celle des sources karstiques de la région de Porrentruy-Boncourt. Elle se caractérise par une dominance du calcium et des carbonates, ce qui n'est pas surprenant étant donné son alimentation par le karst et par l'Allaine, elle-même alimentée par les sources karstiques. Avec ses graviers calcaires, les alluvions sont de même nature minéralogique que le karst.

#### Courtemaîche

A Courtemaîche, le puits communal se distingue par des teneurs en magnésium, sodium, potassium et sulfate relativement plus faibles que dans les trois puits du SEHA. L'origine de ces différences est difficile à mettre en évidence. Tant l'Allaine que les eaux karstiques (référence: source de la Fontaine) ont une concentration plus élevée de ces éléments (tab.C.14). Seul le sodium est moins concentré dans les eaux karstiques. La zone amont de la nappe (caractérisée par le puits sud) semble être la plus influencée par l'Allaine. Les concentrations en sodium, sulfates, chlorures et nitrates y sont plus élevées que dans la zone aval (caractérisée par les trois autres puits). Les piézomètres si-

Malgré la proximité de l'Allaine, le puits communal ne reçoit pas d'apports plus importants de la rivière que dans l'ensemble de la nappe. Au contraire, en crue, ce puits subit une influence plus marquée (plus rapide) du karst que les autres puits (turbidité).

A l'opposé, le puits central est le moins sensible aux apports de l'Allaine (stabilité du Na, valeur maximale de NTA faible).

Le comportement du sodium en crue (février 1989) n'est pas le même pour chaque puits (fig. C.49). Comme dans les sources karstiques, le sodium diminue progressivement dans les puits, excepté pour le puits nord, (et dans une moindre mesure pour le puits central) où la concentration reste aussi stable que le nitrate. Ce puits montre la plus grande inertie, déjà constatée lors de l'alimentation artificielle. Il faut cependant nuancer le comportement des différents puits en fonction des pompages qui modifient les directions et les vitesses d'écoulement de la nappe.

**Tableau C.11:**

*Physico-chimie des nappes alluviales du Pont d'Able et de Courtemaîche. Moyennes de l'année 1988-89 (9 à 10 analyses).*

|                     | TEMP | COND<br>20°C | pH  | Ca   | Mg   | Na   | K    | NO <sub>3</sub> | SO <sub>4</sub> | Cl   | DURETÉ |       |
|---------------------|------|--------------|-----|------|------|------|------|-----------------|-----------------|------|--------|-------|
|                     |      |              |     |      |      |      |      |                 |                 |      | tot.   | temp. |
|                     | °C   | µS/cm        |     | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l            | mg/l            | mg/l | °F     | °F    |
| <b>PORRENTUUY</b>   |      |              |     |      |      |      |      |                 |                 |      |        |       |
| Puits Centre        | 10,1 | 506          | 7,3 | 115  | 2,9  | 7,7  | 2,6  | 17              | 20              | 14   | 29,9   | 26,2  |
| Puits Nord          | 10,3 | 514          | 7,2 | 116  | 2,8  | 7,8  | 2,5  | 17              | 20              | 14   | 30,1   | 26,6  |
| Puits Sud           | 10,1 | 506          | 7,2 | 118  | 2,9  | 5,3  | 1,4  | 15              | 17              | 12   | 30,6   | 27,2  |
| Puits Ouest         | 9,6  | 491          | 7,1 | 117  | 2,3  | 5,5  | 1,2  | 14              | 16              | 13   | 30,2   | 26,7  |
| Betteraz            | 10,4 | 520          | 7,2 | 120  | 3,2  | 4,7  | 2,2  | 23              | 18              | 15   | 31,0   | 26,0  |
| <b>COURTEMAICHE</b> |      |              |     |      |      |      |      |                 |                 |      |        |       |
| Puits Centre        | 10,4 | 503          | 7,7 | 117  | 2,5  | 4,7  | 1,9  | 13              | 14              | 10   | 30,2   | 27,5  |
| Puits Nord          | 10,5 | 491          | 7,7 | 115  | 2,5  | 5,4  | 1,7  | 15              | 15              | 12   | 29,8   | 26,2  |
| Puits Sud           | 10,5 | 488          | 7,3 | 110  | 2,4  | 6,3  | 2,1  | 18              | 17              | 13   | 28,5   | 26,3  |
| Puits communal      | 10,0 | 484          | 7,7 | 113  | 2,3  | 4,0  | 1,3  | 14              | 13              | 11   | 29,1   | 26,0  |
| La Fontaine         | 10,1 | 458          | 7,5 | 107  | 2,9  | 3,8  | 2,3  | 14              | 13              | 8,7  | 28,0   | 25,0  |
| <b>ALLAINE</b>      |      |              |     |      |      |      |      |                 |                 |      |        |       |
| amont Porrentruy    | 8,1  | 485          | 8,3 | 106  | 4,8  | 5,1  | 2,8  | 12              | 35              | 11   | 28,8   | 24,1  |
| aval Porrentruy     | 9,4  | 489          | 7,8 | 113  | 3,0  | 3,9  | 2,0  | 19              | 17              | 11   | 29,5   | 25,8  |
| Courchavon          | 9,7  | 514          | 7,9 | 113  | 3,0  | 10   | 3,5  | 21              | 20              | 16   | 29,4   | 26,1  |
| Courtemaîche        | 10,4 | 489          | 8,0 | 112  | 2,8  | 6,9  | 3,2  | 22              | 17              | 14   | 29,1   | 25,1  |

Pour cette crue nous ne connaissons malheureusement pas le régime de pompage des puits du SEHA. Au cours de la même crue, les turbidités élevées enregistrées dans les puits, notamment le puits communal et le puits sud, illustrent les apports karstiques et leur rapidité pour parvenir dans les puits. Le puits communal subit les dilutions les plus grandes.

L'atrazine est également un bon paramètre pour révéler l'importance de l'Allaine dans la recharge de la nappe de Courtemaîche.

**Tableau C.12:**  
*Micropolluants dans les nappes alluviales (1988-1990)*

micropolluants dans les nappes alluviales (1998-1999),

| Micropolluants<br>en µg/l | Trichlor<br>éthylène<br>+ | Perchlor<br>éthylène<br>+ | EDTA<br>(~10 analyses) |     |     | ATRAZINE<br>(~30 analyses) |      |      |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|-----|-----|----------------------------|------|------|
|                           |                           |                           | moy                    | max | min | moy                        | max  | min  |
| PORRENTUUY                |                           |                           |                        |     |     |                            |      |      |
| Puits Centre              | 3.1                       | 3.2                       | 6                      | 13  | 2   | 0.16                       | 0.42 | 0.03 |
| Puits Nord                | 3.0                       | 3.3                       | 3                      | 4   | <1  | -                          | -    | -    |
| Puits Sud                 | 1.7                       | 5.0                       | 2                      | 4   | <1  | -                          | -    | -    |
| Betteraz                  | 15                        | 12                        | 3                      | 13  | 1   | 0.17                       | 0.45 | 0.01 |
| COURTEMAICHE              |                           |                           |                        |     |     |                            |      |      |
| Puits Centre              | 1.4                       | 1.0                       | 4                      | 5   | 2   | -                          | -    | -    |
| Puits Nord                | 1.5                       | 0.8                       | 4                      | 11  | 2   | 0.09                       | 0.22 | 0.01 |
| Puits Sud                 | 1.4                       | 1.0                       | 4                      | 9   | 2   | -                          | -    | -    |
| Puits communal            | 1.8                       | 0.7                       | 3                      | 8   | 1   | 0.06                       | 0.22 | 0.01 |
| La Fontaine               | 2.8                       | 0.8                       | -                      | -   | -   | -                          | -    | -    |
| ALLAINE                   |                           |                           |                        |     |     |                            |      |      |
| amont Porrentruy          | 1.0                       | 0.4                       | 1                      | 4   | <1  | 0.22                       | 1.39 | 0.01 |
| aval Porrentruy           | 5.6                       | 4.6                       | -                      | -   | -   | -                          | -    | -    |
| Courchavon                | 3.5                       | 2.6                       | -                      | -   | -   | -                          | -    | -    |
| Courtemaîche              | 1.9                       | 1.3                       | 7                      | 14  | 2   | 0.24                       | 0.78 | 0.01 |

+ nombre d'analyses variable: entre 48 pour le Betteraz et 24 pour la Fontaine  
les moyennes de trichloréthane sont inférieures à 1 µg/l sauf pour les puits du Pont d'Able: 1.8 µg/l pour le puits sud avec un maximum à 6.6 µg/l.

#### **Différentiation des secteurs d'alimentation au Pont d'Able**

L'hétérogénéité de l'aquifère alluvial du **Pont d'Able** à Porrentruy permet difficilement de dresser des cartes isochimiques. Des valeurs extrêmes sont observées pour certains paramètres, dans les piézomètres moins profonds du fait de leur mauvaise connexion avec l'aquifère sous-jacent. La nappe exploitée se

trouve essentiellement entre 3 et 8 m de profondeur. Le chimisme de la nappe alluviale indique des apports distincts dans les parties occidentale et orientale. La partie occidentale montre en particulier des teneurs en potassium, sodium, nitrate et sulfate plus basses que la partie orientale. La répartition spatiale des nitrates présente une décroissance des concentrations en s'éloignant de l'Allaine. Ces données confirment une alimentation de la nappe par l'Allaine dans sa partie orientale et des apports d'eau moins chargés en nitrate par le SW. Les apports en sulfates proviennent de la région située à l'est de Courgenay ainsi que du Jura plissé (Sud de Cornol). L'aquifère du Keuper alimente les affluents de l'Allaine et cette dernière. Des concentrations élevées en sulfates y ont été mesurées sur la section influençant directement la source du Betteraz (Allaine amont Porrentruy, tab. C.14) et le puits central du Pont d'Able (partie orientale de la nappe). Les sulfates proviennent donc de l'Allaine située en amont de Porrentruy, davantage que de l'Allaine traversant l'aquifère alluvial (Allaine aval Porrentruy). Après la venue de plusieurs affluents à Porrentruy (Voyeboeuf, Bonne-Fontaine et Beuchire), la concentration de sulfate dans l'Allaine a fortement baissé.

A la différence de Courtemaîche, ce sont les caractéristiques chimiques ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{Cl}^-$ ) qui permettent de différencier la provenance karstique des eaux: la zone des puits central et nord est en partie alimentée par le bassin du Betteraz, situé à l'est alors que la zone du puits sud est influencée par des écoulements venant du SW (Petit Fahy, système de la Beuchire?).

Au Pont d'Able, l'atrazine est malheureusement utilisée sur l'aquifère alluvial pour les cultures de maïs qui se trouvent à moins de 10 m des puits et ne constitue pas un bon traceur pour cet endroit particulier. Cela explique la valeur élevée du puits centre, du même ordre de grandeur que pour l'Allaine (tab.C.15).

La contamination par les solvants organochlorés (tab.C.15) corrobore clairement cette situation. Par rapport à la partie orientale, la partie occidentale présente une contamination supérieure en perchloréthylène, mais inférieure en trichloréthylène. La contamination de la zone orientale est du même type que celle du Betteraz, à un facteur de dilution près. La contamination de l'Allaine est à peine supérieure à celle de la nappe. Ainsi, les arrivées d'eau karstiques représentent probablement la principale source de contamination de la nappe alluviale.

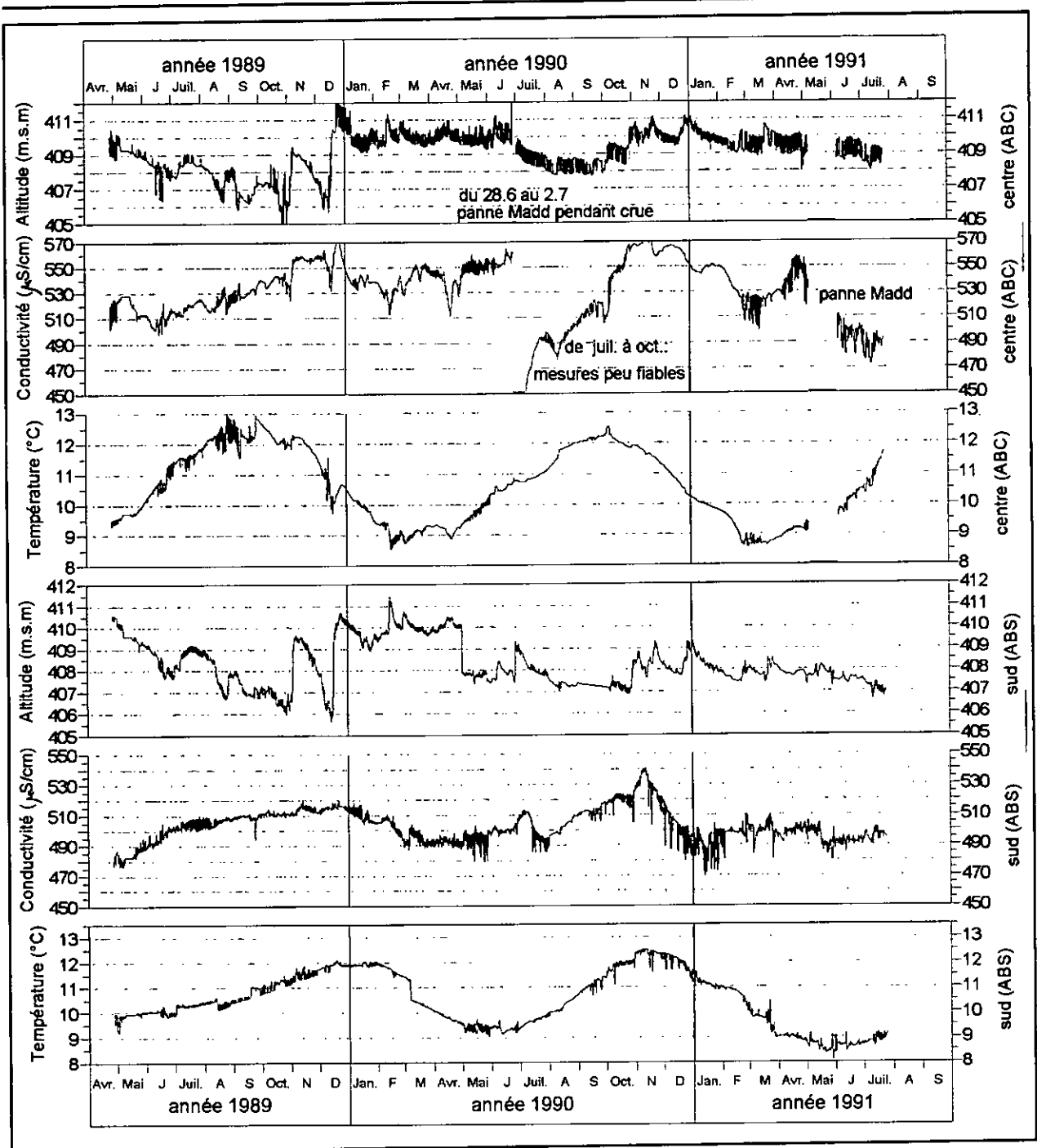
Issu des eaux usées, l'EDTA est un paramètre typique de l'influence de l'Allaine. Il ne se dégrade pratiquement pas. Sa présence dans tous les puits du Pont d'Able et de Courtemaîche confirme donc l'alimentation des aquifères alluviaux par l'Allaine. Cette influence se marque le plus dans le puits central du Pont d'Able, qui reçoit des apports doubles de l'Allaine.

De même provenance, le NTA est assez rapidement biodégradable. Sa présence dans les nappes alluviales souligne donc un transit rapide entre l'Allaine et la nappe. Seuls les puits Nord et central du Pont d'Able montrent une concentration moyenne relativement élevée en NTA, à savoir 1 et 3  $\mu\text{g/l}$  (3 à 7  $\mu\text{g/l}$  dans l'Allaine et 33  $\mu\text{g/l}$  dans l'effluent de la STEP de Porrentruy).

### 3.4 Analyse des réactions rapides et lentes par la température et la conductivité

Les réactions d'une nappe alluviale aux apports allochtones sont de deux types:

- 1) Réaction rapide au cours d'un événement particulier;
- 2) Réaction lente dans une évolution à long terme.



**Figure C.48**

Nappe alluviale du Pont d'Able (Porrentruy). Evolution des niveaux piézométriques, des températures et des conductivités dans les puits central et sud, entre 1989 et 1991.

1) Les réactions rapides sont bien illustrées par la mise en route de l'alimentation artificielle (Courtemai-che). La température (et la conductivité) de l'eau de trois des quatre puits subit l'influence quasi immédiate de l'alimentation artificielle. Au cours des crues, les variations de température sont rapides et parfois importantes (1-2°C), avec l'arrivée massive d'eau plus froide ou plus chaude.

Deux types d'événements sont responsables de ces apports:

- Les précipitations
- L'alimentation artificielle (assimilée à des précipitations très localisées)

- PARTIE C: Interprétation et fonctionnement des aquifères étudiés -

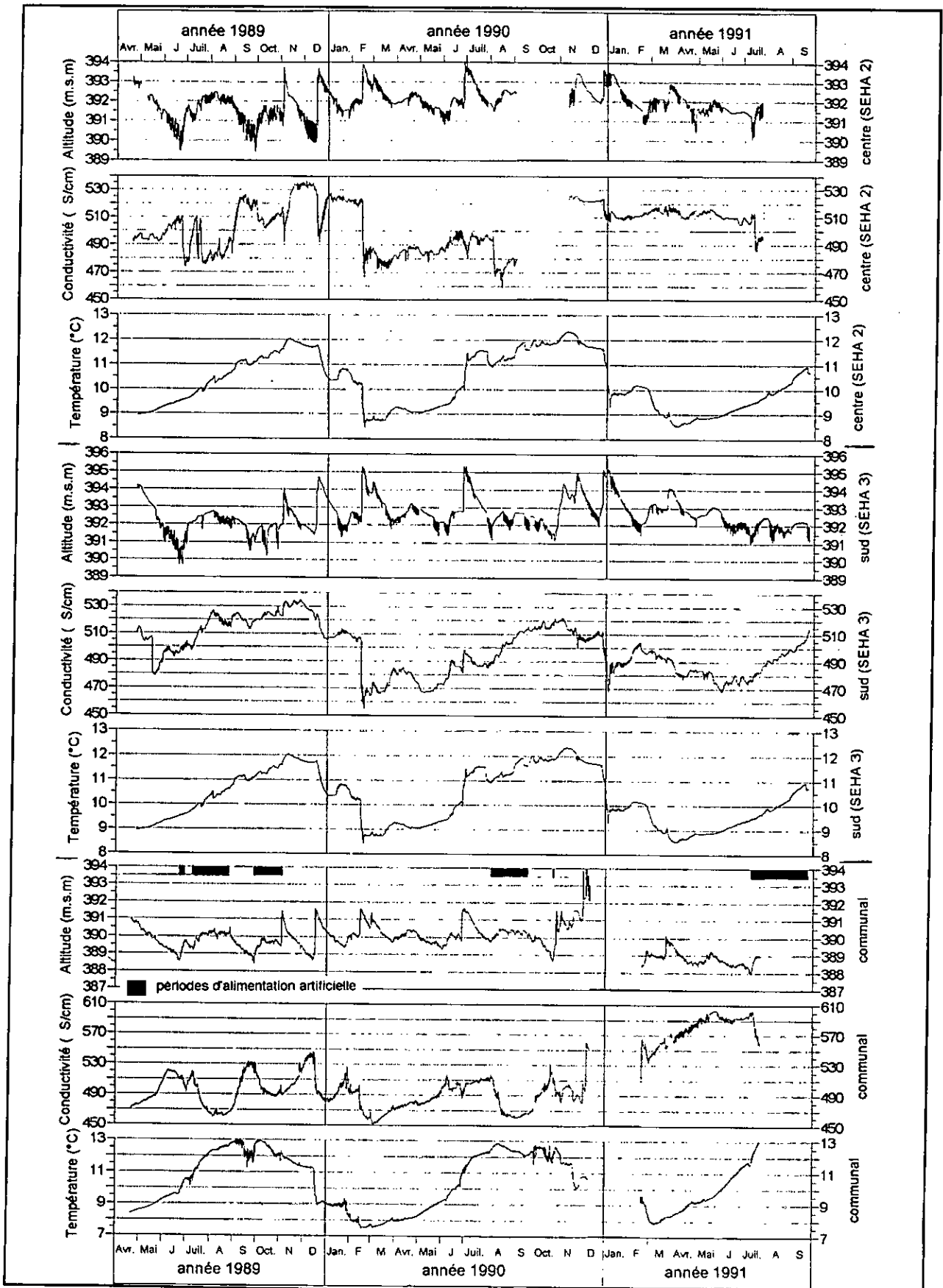


Figure C.49

Nappe alluviale de Courtemaiche. Evolution des niveaux piézométriques, des températures et des conductivités dans les puits communal, central (SEHA2) et sud (SEHA3) entre 1989 et 1991.

**A Courtemaîche**, les puits de la zone centrale sont les plus sensibles aux deux types d'événements. En revanche, les cycles annuels y sont moins nets et plus facilement perturbés.

Les crues de décembre 1989, février et juin 1990 conduisent à des modifications importantes et durables de la températures (1 à 2 °C) et de la minéralisation de la nappe (fig. C.48). Les crues permettent de rééquilibrer les températures de la nappe dont l'évolution est décalée dans le temps. L'effet des crues et leur amplitude pour chacun des puits montrent un mode de fonctionnement différent qui ne peut s'expliquer que par la nature des apports extérieurs, les apports atmosphériques étant homogènes dans le temps et dans l'espace. Ce sont essentiellement entre le puits sud et les autres puits qu'on peut observer des différences importantes. Au cours des crues les plus importantes, l'apport d'eaux superficielles (mélange d'eau de l'Allaine et d'eau karstique venant du trou émissif de Dô Mottié) dans la zone centrale de la nappe (site de réalimentation) amplifie encore la réaction dans les puits.

L'effet de la réalimentation sur la nappe (pour la minéralisation et la température) peut être assimilé à celui des crues: même type de signal d'entrée.

Lorsque cette dernière est mise en route, la minéralisation baisse aussitôt (en quelques heures) dans les eaux des puits central (-35  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) et communal (-55  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Cette baisse se marque nettement sur les moyennes mensuelles d'août-septembre 1989 et septembre-octobre 1990, sauf pour le puits sud. En juillet 1991, une hausse de 1.5°C de la température est enregistrée, suite au réchauffement de l'eau amenée pour la réalimentation, avant infiltration. La dilution est plus importante dans le puits communal, malgré un plus grand éloignement de la zone de réalimentation, mais grâce à un régime de pompage plus élevé induisant une dépression piézométrique permanente, donc des vitesses d'écoulement supérieures.

La conductivité moyenne du puits sud est nettement plus faible au printemps (1990 et 1991 au cours de la recharge des aquifères), indiquant probablement des **apports karstiques plus importants en moyennes à hautes eaux dans la zone amont** de la nappe où se trouve le puits sud. Rappelons que le puits sud est davantage alimenté par l'Allaine dans les autres périodes de l'année, en basses à moyennes eaux.

Notons encore que lorsque les pompages reprennent après un arrêt d'une certaine durée (1 à 2 semaines), un nouvel équilibre physico-chimique se réalise parfois de manière sensible, visible sur l'évolution de la minéralisation. Par exemple, l'arrêt des pompages de février 91 au SEHA3 (Courtemaîche) provoque une baisse sensible de la minéralisation, baisse qui pourrait être interprétée, à tort, comme l'effet rapide de la fonte de la neige sur l'eau du puits.

**Au Pont d'Able**, les puits sud et central ont un comportement très différent l'un de l'autre. Dans le premier les circulations sont plus lentes et les réactions aux événements très atténuées alors que le second réagit de manière similaire à la source karstique du Betteraz (fig. C.49). La nappe alluviale du Pont d'Able peut être séparée en deux parties: la partie orientale est déterminée à proximité de l'Allaine par les puits Nord et Centre et la partie occidentale par les puits Sud et Est (non exploité).

2) Les réactions lentes sont le fait des apports de l'Allaine, du karst et dans une plus faible mesure, de l'essuyage des sols:

a) les arrivées d'eau karstique sont signalées à Courtemaîche par une faible minéralisation (450  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), contrairement au Pont d'Able (plus de 520  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) et par une température entre 9.5 et 11°C. Une situation du puits éloignée des apports karstiques atténue l'effet d'une faible minéralisation de l'eau karstique (à Courtemaîche).

La prédominance de ces apports entraîne de faibles fluctuations de température (1-1.5°C à Boncourt), en atténuant celles résultant de la surface.

b) les infiltrations de l'Allaine à travers l'aquifère (par convection) renforce les fluctuations annuelles de la température de l'air. L'effet de cette dernière (conduction) est difficile à évaluer, mais il est probablement plus lent et se superpose à celui de l'Allaine. La prédominance des infiltrations de l'Allaine est donc soulignée par les amplitudes importantes de la température: 3.5 à 5°C à Porrentruy, Courtemaîche et Buix. L'influence thermique de l'Allaine se fait le plus sentir sur le puits communal de Courtemaîche, le plus proche de la rivière.

Le retard le plus grand dans l'évolution de la température est enregistré au puits sud (SEHA3), éloigné de l'Allaine et des venues karstiques.

#### **En résumé**

**Au Pont d'Able** (Porrentruy), le système alluvial comprend deux parties distinctes:

- Partie NE du système alluvial, proche de l'Allaine, avec des réactions de type karstique, rapides et importantes au cours des crues;
- Partie SW du système, avec des réactions lentes voire souvent négligeables lors des crues:

#### **A Courtemaîche:**

- Les réactions sont relativement rapides et importantes au cours des crues;
- Les réactions causées par la réalimentation sont similaires à l'effet des crues (dans la zone centrale);

#### **A Buix:**

- Les réactions sont très atténuées lors des crues.

### **3.5 Ressources**

En l'absence de pluie, la baisse du niveau général de la nappe de Courtemaîche est très rapide: après la crue du 27 juin 1990 le niveau a chuté de plus de 3 m en 1 mois dans le SEHA3! Il n'a été stabilisé que grâce à la mise en route de l'alimentation artificielle. Une telle baisse des niveaux s'est aussi produite en mai 1989, mars 1990 et janvier 1991 pour les puits SEHA3 et SEHA2 (voir fig. E.22 et E.23). Au cours de ces périodes, les débits pompés surpassent nettement l'alimentation naturelle de la nappe. Le problème est moindre dans le puits communal, où les baisses sont plus faibles grâce aux apports de l'Allaine. Par son régime de pompage élevé, ce puits soutire une part importante des réserves de la nappe et accélère le phénomène de tarissement du puits SEHA2.

Ainsi, en l'absence de précipitations et d'alimentation artificielle, la nappe voit ses réserves diminuer rapidement à la suite des importants débits soutirés par les pompes.

Les débits annuels moyens pompés au Pont d'Able atteignent environ 1500 l/min contre 1200 à 1500 l/min à Courtemaîche (600'000 à 700'000 m<sup>3</sup>/an). Ils n'englobent probablement pas la totalité des débits transitant par les aquifères alluviaux, mais la plus grande partie. L'impluvium de chaque aquifère est réduit et ne fournit qu'une faible proportion de ces débits:

- Les infiltrations directes (précipitations) ne couvrent qu'environ 10-15% de l'alimentation de la nappe alluviale de Courtemaîche et seulement 5-10% de celle du Pont d'Able à Porrentruy;
- Les apports allochtones constituent ainsi la plus grande part de l'eau exploitée des nappes de Courtemaîche et du Pont d'Able.

La nappe de Courtemaîche est encore alimentée artificiellement par les eaux karstiques de La Fontaine pour une part de 5 à 10%, variant selon l'ampleur des étiages et de l'évapotranspiration. Le pourcentage restant se partage entre les apports du karst et de l'Allaine (30 à 50% chacun). Dans un essai pour quantifier les apports de l'Allaine nous admettons que:

- le lit est colmaté par 5 cm (au maximum) de limon de  $10^{-7}$  m/s;
- la rivière s'infiltre sur une longueur de 1100 m;
- il y a 1 m d'eau dans la rivière sur une largeur de 4 m.

Les débits infiltrés dans la nappe alluviale sont ainsi estimés à plus de 500 l/min (ordre de grandeur) selon un petit calcul basé sur les valeurs précitées. Ces 500 l/min représentent près de 40% des débits exploités à Courtemaîche et semblent donc assez réalistes.

L'exploitation de la nappe alluviale de Courtemaîche en particulier est parvenue au maximum de son rendement. Seule une profonde amélioration de l'alimentation artificielle permettra à l'avenir d'augmenter les volumes pompés. Il s'agira de mettre en oeuvre des sites prévus pour un entretien régulier: création par exemple, de deux bassins suffisamment en amont des puits, utilisés en alternance pour éviter un colmatage rapide de la couche superficielle et une chute de rendement de la station de réalimentation. La qualité des eaux de la nappe va donc dépendre essentiellement de l'occupation du sol dans la zone d'influence des puits, de la qualité des eaux souterraines du versant occidental (bassin de la Fontaine, réalimentation et sous-alimentation karstique) et du versant oriental de la vallée ainsi que de la qualité des eaux de l'Allaine.

Pour la nappe du Pont d'Able, les mêmes critères peuvent être appliqués, à la différence près que la nappe est désormais gardée en réserve comme alimentation de secours ou d'appoint.

### 3.6 Synthèse

Les 4 aquifères alluviaux situés entre Porrentruy et Boncourt, possèdent des caractéristiques géologiques comparables:

- alluvions de même type, graviers limoneux hétérogènes;
- couverture limoneuse peu perméable de 1 à 3 m d'épaisseur;
- dimensions de l'aquifère (extension hectométrique et épaisseurs variables de 3 à 8 m);
- substratum calcaire du Rauracien (Séquanien inf.).

Des conditions aux limites similaires ont également été constatées:

- pluies efficaces semblables;
- cours d'eau permanent (L'Allaine) traversant l'aquifère;
- niveau de l'Allaine généralement supérieur à la nappe durant l'année;
- relations probables avec un aquifère karstique situé en amont;
- exploitation des nappes par un (Buix) ou plusieurs puits;
- réalimentation avec de l'eau karstique pour les nappes de Porrentruy (jusqu'en 1991), Courtemaîche et Boncourt;

Ces nappes alluviales sont pelliculaires et dépendent de ce fait beaucoup des apports extérieurs: rivière et karst.

A Porrentruy, Courtemaîche et Buix, l'amplitude thermique annuelle des eaux de la nappe est importante (3.5 à 5°C);

A Boncourt l'eau de la nappe subit de faibles variations thermiques (1 à 2.5°C) indiquant une influence marquée du karst à l'opposé des trois autres nappes influencées principalement par l'Allaine.

A Buix on observe une faible amplitude de la piézométrie (1.2 m) et des conductivités (40  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

A Porrentruy, plusieurs essais de traçage ont démontré des relations rapides entre un système karstique (Betteraz) et le système alluvial (partie orientale).

Les nappes alluviales de Porrentruy et de Courtemaîche sont alimentées par 4 types d'apport, le premier type n'amenant que des volumes inférieurs à 20% de la totalité du volume d'eau exploité:

- 1° précipitations;
- 2° infiltrations de l'eau de l'Allaine;
- 3° apports karstiques préférentiels dans certaines zones;
- 4° alimentation artificielle à partir d'un forage implanté dans le système de La Fontaine.

### ***Relations avec l'Allaine et le karst***

Pour comprendre les relations complexes qui lie l'aquifère alluvial au karst et à l'Allaine, nous devons tout d'abord considérer quel peut être l'impact de chaque type d'apport (1° à 3°).

#### **1) Pluies:**

- effet rapide de dilution
- forte variation de température
- pas de turbidité (dans les plaines alluviales);

#### **2) Allaine:**

- dilution éphémère et forte turbidité en crue, très atténuées lors du transit par les alluvions, excepté lors du débordement de l'Allaine;
- fluctuation thermique annuelle importante (jusqu'à 20°C entre les extrêmes), variable selon la proximité des affluents de l'Allaine;
- concentrations élevées en sodium, atrazine, EDTA;
- beaucoup de sulfates, surtout en amont de Porrentruy;

#### **3) Karst:**

- fluctuations faibles de température, dont le minimum est situé à 9.0 °C environ;
- en crue, effet très rapide sur le puits situé près d'une fissure (compte tenu de la réaction propre du karst), similaire à la réalimentation effectuée à Courtemaîche: dilution et variation de température ne dépassant pas 0.6°C par événement;
- concentrations élevées en solvants chlorés, surtout dans la région de Porrentruy;

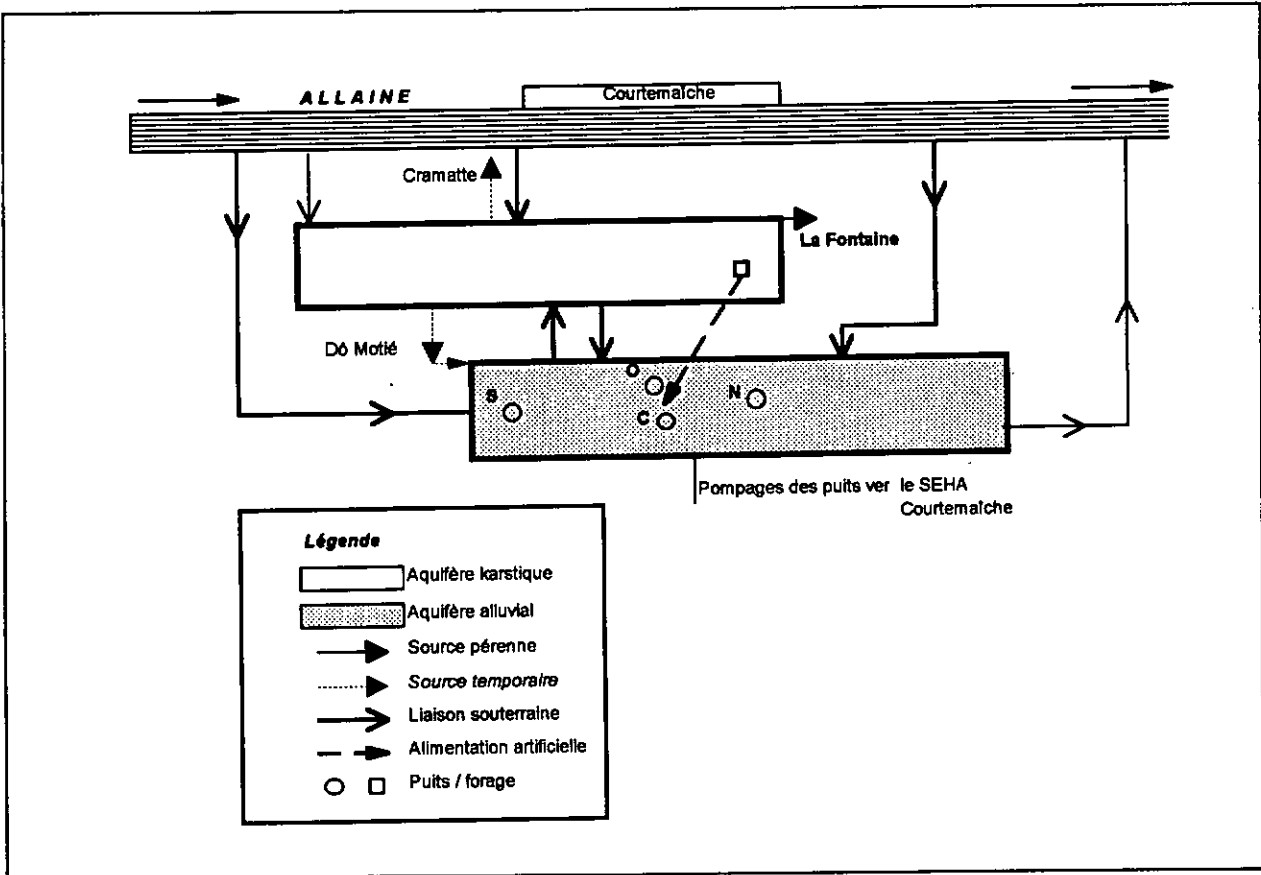
Notons que les eaux karstiques alimentant les nappes du Pont d'Able et de Courtemaîche contiennent une part sensible des eaux de l'Allaine, ce qui ne facilite guère la distinction entre les différents apports.

#### **4) Température de l'air:**

- impact par conduction, variations très lentes dans le temps par rapport à la convection, de l'ordre de 1-3 jusqu'à 50 cm de profondeur
- amplitude annuelle, dans un sol "sec", de l'ordre de 20% de celle de l'air, à 5 m de profondeur, soit environ 5 à 6°C.

Nous avons utilisé préférentiellement les paramètres physiques enregistrés en continu, en particulier la température, pour mettre en évidence les relations complexes entre l'Allaine, le karst et les aquifères alluviaux (fig. C.51). Les volumes d'eau autochtones sont faibles en regard des volumes allochtones. Les apports externes ont donc une influence prédominante sur la nappe.

Les aquifères alluviaux sont sous-alimentés par les systèmes karstiques, dans des proportions variables selon l'endroit et l'état hydrologique.



**Figure C.50**

**Figure 3.55**  
**Schéma des relations entre l'Allaine, le karst (système de La Fontaine) et la nappe alluviale de Courtemaîche.**

**A Porrentruy**, nous avons vu que les apports karstiques ont été mis en évidence par la chimie. Ils sont mixtes:

- apports karstiques venant du SW (système de la Beuchire?), déterminés par le perchloréthylène;
- apports karstiques issus du système du Betteraz, à l'est, caractérisés par le trichloréthylène; ces apports proviennent aussi directement de l'Allaine en amont de Porrentruy (liaison directe avec la nappe alluviale via le karst).

Les apports de l'Allaine (sulfates) se produisent donc via le karst. Ils sont plus rapides que ceux de l'Allaine (température, nitrates) en contact avec les alluvions au niveau du Pont d'Able .

**A Courtemaîche**, les apports de l'Allaine se répercutent de manière beaucoup plus rapide sur La source de La Fontaine que sur les puits de la nappe alluviale de Courtemaîche. L'influence de l'Allaine est atténuée par la lenteur des écoulements en milieu poreux. Il est difficile de mettre en évidence un type d'apport pour chaque puits. Pour le puits communal, par exemple, l'interprétation de l'évolution de la température nous amène à favoriser les apports de l'Allaine alors que l'interprétation de la chimie privilégie davantage les apports karstiques.

La température de l'Allaine n'a pas une influence prédominante sur les nappes de la Basse-Allaine (p.ex. SEHA3 et SEHA2 ont des amplitudes similaires mais SEH2 est plus éloigné et différents paramètres chimiques typiques de l'Allaine ne se retrouvent que dans SEHA3).

L'effet de la température de l'air se superpose à celui de la température de l'Allaine pour marquer les amplitudes saisonnières de la température des nappes alluviales. Cette amplitude est plus ou moins atténuée par l'importance des apports karstiques, à Boncourt davantage qu'ailleurs.

A Courtemaîche, les apports prédominants de l'Allaine sur le puits communal sont tamponnés par des apports karstiques, avec en crue des arrivées massives d'eaux karstiques turbides.

Les apports importants de l'Allaine sur le puits sud sont également tamponnés par des apports karstiques.

En crue, les changements rapides intervenant dans les puits sont provoqués d'une part par les précipitations efficaces, d'autre part par les apports karstiques, ainsi que par ceux de l'Allaine, surtout lorsqu'elle sort de son lit et s'écoule dans la plaine.

**A Porrentruy**, les apports karstiques sont plus faciles à mettre en évidence qu'à Courtemaîche. Le puits central du Pont d'Able a en effet été atteint à plusieurs reprises par des traceurs fluorescents. Cela n'a jamais été le cas des puits de Courtemaîche où la dispersion des traceurs les empêche d'être décelés dans les puits. Les arrivées karstiques sont probablement plus proches du puits central au Pont d'Able. Les pompages ne semblent pas être en cause, le régime des puits (puits central surtout) étant comparable à celui du puits communal de Courtemaîche.

## 4. SYNTHESE

### 4.1 Principaux enseignements

Les systèmes karstiques ajoulots sont généralement très bien drainés. Ceux de La Beuchire et du Saivu possèdent des rivières souterraines visitables alors que celui du Betteraz a également un chenal à écoulement comparable à celui d'une rivière. Les sources réagissent toutes avec une extrême rapidité aux précipitations, généralement dans l'heure qui suit.

La rapidité de la décrue donne une image de la bonne connexion entre les conduits et de l'évacuation d'un volume d'eau important vers les exutoires. Le milieu capacitif fournit assez rapidement l'essentiel des débits à la fin de la décrue. Dès que le maximum de dilution est atteint, le milieu capacitif ne se recharge plus mais commence de nouveau à se décharger. Il y a donc une courte période, dès la montée de la crue (inversion des gradients) au cours de laquelle le milieu capacitif ne fournit plus d'eau mais l'emmagasine. Le début de la recharge doit correspondre au début de l'effet piston, s'il est observé. Ce qu'on nomme débit de base ne correspond pas à une réalité physique, si ce débit de base s'applique bien au débit du milieu capacitif. En suivant ce raisonnement, la part de l'eau fraîchement infiltrée devrait être essentielle. Nous avons vu au chapitre 1.2.3 que la part d'eau fraîche est bien marquée avec l'oxygène-18 mais qu'elle ne représente pas le principal apport.

Lorsque conductivité et température retrouvent rapidement leurs valeurs initiales après la crue, le milieu capacitif n'a pratiquement pas été rechargé. Ce sont généralement les crues de la fin de l'hiver et du printemps (février à avril) qui rechargent les aquifères et provoquent durablement des changements de température et de conductivité. Le tableau C.16 donne une rapide synthèse des systèmes étudiés.

**Tableau C.13:**  
*Aperçu synthétique des principaux systèmes karstiques d'Ajoie*

|                          | Beuchire                        | Bonne-Fontaine      | Voyeboeuf           | Betteraz                        | La Fontaine | Pâquis          | Saivu                        |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|-------------|-----------------|------------------------------|
| Aquifère(s)              | Malm/<br>Dogger                 | Malm/<br>Dogger     | Malm/<br>Dogger     | Malm sup.<br>Tertiaire          | Malm inf.   | Malm            | Malm inf.                    |
| Minéralis.               | moy.                            | basse               | moy.                | élevée                          | basse       | élevée          | moy.                         |
| Tempér.                  | basse                           | basse               | moy.                | élevée                          | élevée      | élevée          | moy.                         |
| Type                     | JT + JP                         | JT + JP             | JT + JP             | JT                              | JT          | JT (+JP)        | JT                           |
| Précip.                  | élevées                         | élevées             | moyennes            | faibles                         | faibles     | faibles         | moy.                         |
| Autres apports           | —                               | —                   | —                   | Allaine                         | Allaine     | Allaine         | —                            |
| Occup. principale du sol | forêts<br>cultures<br>pâturages | forêts<br>pâturages | forêts<br>pâturages | forêts<br>cultures<br>industrie | forêts      | zone<br>urbaine | forêts<br>cultures<br>pâtur. |
| Sce tempor.              | Creugenat                       | Mavalau             | Cbe Vatelín         | 1è Combe                        | Dô Motié    | —               | La Bârne                     |

Les termes basse, moyens et élevés sont relatifs à une tendance moyenne  
JP: Jura plissé JT: Jura tabulaire

### La température réagit différemment selon le type de réservoir

Une modification sensible de la température à l'exutoire est observée au cours d'une crue lorsque la différence entre le signal d'entrée (température des précipitations) et la température de l'eau du système est importante: pluie chaude lors d'un orage ou fonte de neige pour les exemples extrêmes. Lors d'entrées "chaudes", des anomalies thermiques:

- chaudes ont été mesurées pour les exutoires de La Beuchire et du Saivu;
- froides sont observées pour les sources du Betteraz et de La Fontaine alors que ces anomalies sont chaudes en cas d'augmentation de la température de l'eau d'infiltration de l'Allaine.

Un certain retard thermique a été constatée au cours des crues, en particulier lors de l'arrivée massive d'eau fraîche, la dilution maximale a précédé le minimum (ou le maximum) de température.

L'étude du transfert de certains polluants (solvants chlorés) dans les systèmes karstiques ne permet pas d'apporter des informations univoques sur le fonctionnement (polluants déposés dans des parties superficielles à écoulement lent du système voire dans des blocs capacitifs plus profonds).

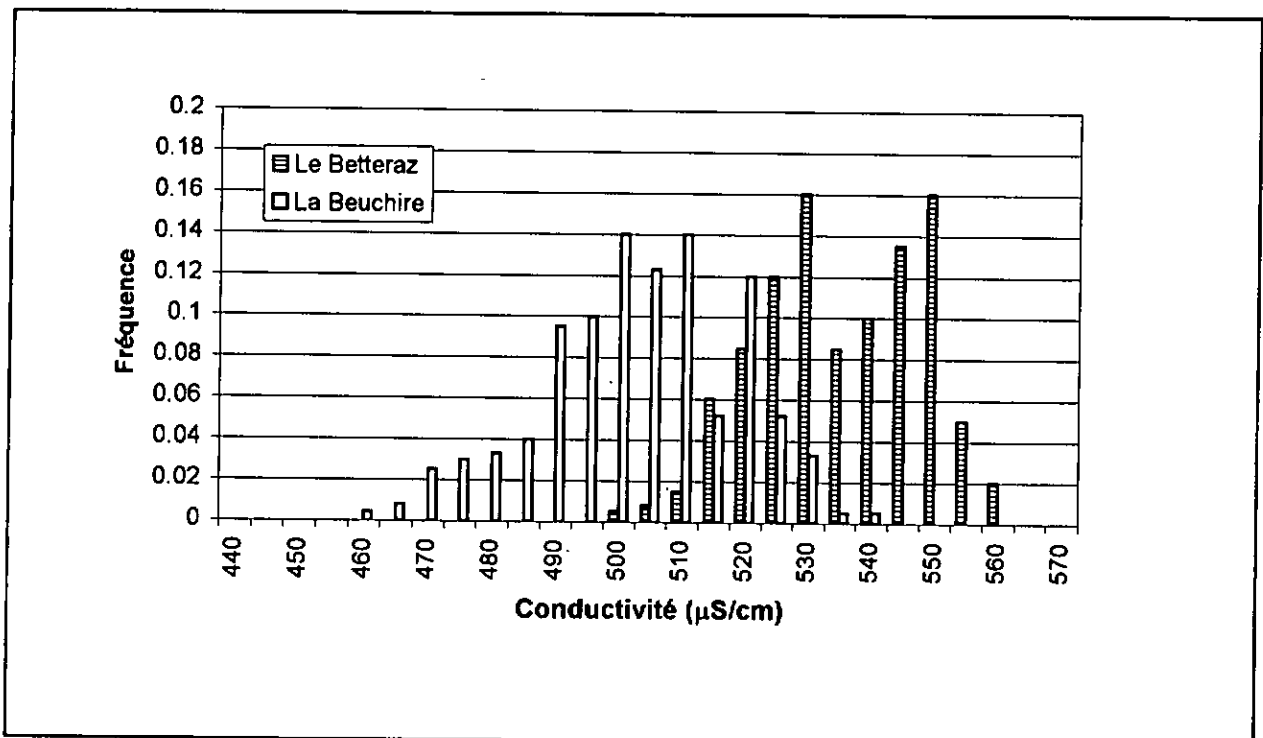
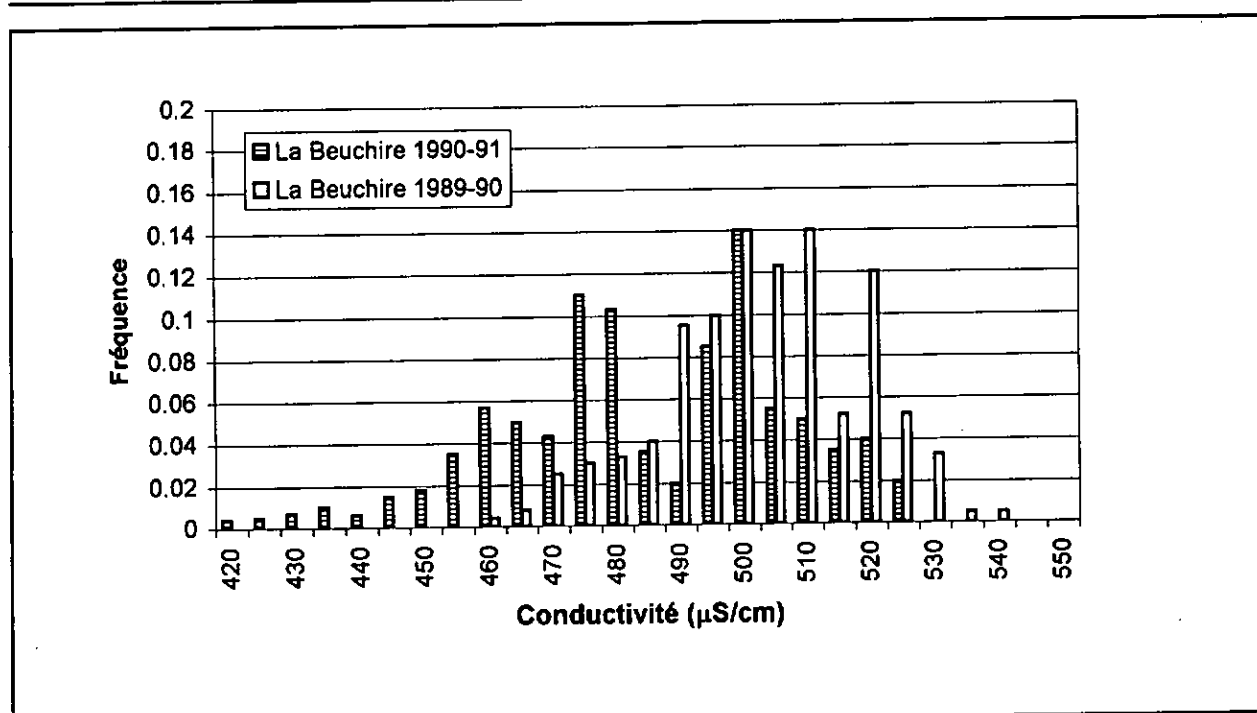


Figure C.51

Sources karstiques du Betteraz et de la Beuchire. Distribution fréquentielle (histogrammes) des conductivités moyennes journalières (juin 89-août 90).

L'analyse fréquentielle des conductivités est intéressante dans la comparaison des différentes sources, pour autant qu'il existe un nombre suffisamment important de mesures. Ainsi, elle s'applique mal aux sources ayant fait l'objet d'un suivi ponctuel (Voyeboeuf, Chaumont, St-Nicolas) et à celles dont l'enregistrement est douteux (conductivité au Pâquis et au Saivu). Selon le principe émis par Bakalowicz (1979), la variation dans le temps de la minéralisation des eaux d'une source karstiques dépend du degré de développement du réseau de drainage souterrain (karstification de l'aquifère). Les travaux de Bakalowicz montrent que la distribution des fréquences des paramètres chimiques des eaux karstiques est généralement plurimodale. Une karstification bien développée et fonctionnelle se marque par des courbes plus étalées et très complexes, comme dans le cas des aquifères de grande dimension. Les aquifères non karstiques (poreux) présentent généralement une courbe unimodale serrée. Au chapitre 3, nous avons vu



**Figure C.52**

Sources karstiques de la Beuchire. Distribution fréquentielle (histogrammes) des conductivités moyennes journalières en 1989-90 et en 1990-91 (nov.-oct.).

que ce principe ne s'appliquait pas du tout aux aquifères alluviaux de Courtemaîche et de Porrentruy. L'allure des courbes des sources karstiques de la Beuchire et du Betteraz est bimodale (fig. C.52) et celle de la Fontaine plurimodale (fig. C.47). La dispersion des conductivités de la Beuchire est bien plus grande (120 µS/cm) que celles du Betteraz (70 µS/cm) et montre une karstification plus développée (selon l'abaque de Bakalowicz). D'une année à l'autre, les courbes peuvent changer selon l'ampleur des événements météorologiques. Pour la Beuchire, la différence est nette entre 1989-90 et 1990-91 (fig. C.53).

## 4.2 Apport des essais de traçage dans la délimitation des systèmes karstiques

Les nombreux essais effectués dans la région de Porrentruy (une vingtaine dans un rayon de 3 km!) ont permis de relever la complexité des écoulements souterrains. Dans cette zone de convergence des écoulements (depuis le nord, l'est et l'ouest), on constate, paradoxalement de nombreuses divergences entre les différents systèmes karstiques. Tous les systèmes ont des interconnexions entre eux, par deux ou par trois, compliquées par les cours d'eau superficiels. Les systèmes connectés entre eux sont les suivants:

- Betteraz - Pâquis/ Allaine/ aquifère alluvial du Pont d'Able
- Beuchire - Pâquis
- Bonne-Fontaine (par le ruisseau du Bacavoine) - Pâquis
- Beuchire - Chaumont - Bonne-Fontaine
- Bonne-Fontaine - Voyeboeuf

En dépit de ces connexions, chaque exutoire possède ses caractéristiques propre: Betteraz, Pâquis et Chaumont sont très minéralisés, La Beuchire et le Voyeboeuf moyennement et La Bonne-Fontaine l'est

faiblement. Chaque exutoire est pollué de manière différente et un même polluant ne réagissent pas la même chose à une crue. Un certain mélange des eaux se produit sans que cela les homogénéise

### **Interprétation des essais de traçage**

Nous avons essayé d'interpréter un certain nombre d'essais de traçages par le modèle de Sauty, en écoulement unidimensionnel. Le nombre de Peclet, qui quantifie la forme de la courbe de restitution, a été calculé pour tous les essais de traçages dont les données de base étaient suffisantes et pour autant que les conditions hydrologiques étaient relativement stables. Les résultats pour une même source sont relativement divergents et l'on en peut guère tirer de conclusion sur les caractéristiques des systèmes karstiques étudiés. Les résultats de l'étude pilote de Nathalie Doerfliger (1994) vont dans ce sens. Trois de nos essais y ont été traités de manière plus approfondie afin d'en déterminer une fonction de transfert par déconvolution des courbes de restitution. Les essais ont été sélectionnés en fonction d'un certain nombre de critères similaires: surface d'impluvium des systèmes karstiques, débits, conditions stables (tarissement). Il ressort de cette étude que les fonctions de transfert varient en fonction:

- des conditions d'injection (lieu et état hydrologique);
- de la connexion directe ou non avec le réseau de drainage de l'aquifère karstique;
- du taux de restitution.

Si on admet que beaucoup de choses se passent avec le traceur à l'injection, une courbe de restitution très aplatie avec un temps de déplacement long ne va pas nécessairement signifier l'absence de circulations rapides dans un système karstique. En revanche, les courbes avec des pics étroits (nombre de Peclet élevé) et des vitesses rapide va évidemment révéler un système karstique très transmissif et un faible amortissement des entrées. Un nombre de Peclet relativement élevé pour la plupart des essais (plus de 100) a été constaté. Etonnamment, des vitesses lentes coïncident parfois avec un nombre de Peclet très élevé. C'est le cas extrême de l'essai du 26.5.89 qui a atteint La Bonne-Fontaine: avec une vitesse très faible de 5.5 m/h, ce qui est lent pour le karst ajoulot en particulier, et un nombre de Peclet de 2000, le contraste est grand. Avec un tel nombre de Peclet, la dispersion est extrêmement faible et ne peut s'expliquer avec une vitesse faible et un temps de parcours aussi élevé (648 h). Le traceur a forcément été piégé lors de l'injection avant de subir une poussée lors d'un événement pluvieux postérieur. On rejoint ainsi l'hypothèse selon laquelle les conditions à l'injection sont souvent déterminantes pour la réponse à l'exutoire: il peut y avoir dispersion à ce moment-là mais pas systématiquement.

## **4.3 Vulnérabilité et ressources des principaux aquifères**

Les secteurs clés de l'alimentation en eau de l'Ajoie (Lièvre & al, 1992) sont concentrés en fait sur une zone qui longe l'Allaine, entre Alle et Boncourt. Cette zone alimente partiellement ou totalement près de 19'000 hab., soit 80 % de la population d'Ajoie (en 1990):

- La Vendline (SEV: Vendlincourt, Coeuve, Dampfreux, Lugnez, Bonfol, Beurnevesin, Montignez)
- Le Betteraz + nappe du Pont d'Able (Porrentruy et Courgenay)
- La nappe de Courtemaîche réalimentée par La Fontaine (Commune de Courtemaîche + 9 communes de Haute-Ajoie groupées dans le SEHA)
- La nappe de Buix (Commune de Buix)
- La nappe de Boncourt réalimentée par Le Saivu (Commune de Boncourt)

### **Systèmes karstiques**

Le Betteraz et la nappe de Courtemaîche à eux seuls alimentent plus de la moitié de la population. Ce chiffre est important, car ses deux sources d'alimentation ont une vulnérabilité relativement élevée, en partie causée par des infiltrations importantes de L'Allaine.

Les systèmes situés en amont de Porrentruy (Beuchire, Betteraz, Betteraz, Voyeboeuf et Bonne-Fontaine) appartiennent à un aquifère puissant (200-300 m). Pourtant, leurs exutoires sont situés dans la partie supérieure de l'aquifère. Les systèmes "pelliculaires" sont situés dans la partie aval du bassin de l'Allaine (Saivu, la Fontaine,...). Ces systèmes ne comprennent souvent qu'une zone saturée ne dépassant guère 20-50 m.

Le système de la Beuchire possède donc un aquifère d'une puissance de 150 à 250 m, cette puissance augmentant de l'amont vers l'aval. Le profil B de la carte hydrogéologique montre bien la position de l'exutoire principal par rapport à celle du toit des marnes oxfordiennes, qui constitue la limite inférieure du système. La plus grande partie de l'aquifère de Malm appartenant au système de La Beuchire ne peut s'écouler librement, le niveau de la source se trouvant environ 250 m au-dessus de la base de l'aquifère. En l'absence de forage profond, on ne connaît pas de quelle manière les eaux souterraines de La Beuchire sont renouvelées ou remises en circulation. Le volume effectif ou volume écouable ne concerne donc que la partie supérieure du système et il est de l'ordre de 1.5 million de m<sup>3</sup> (réserves totales estimées à environ 30 millions de m<sup>3</sup>). Ces réserves ne représentent, en lame d'eau annuelle, que 30 mm, soit à peine 6% du volume total annuel.

Nous admettons que l'ensemble des aquifères karstiques est saturée à une altitude de 420 m en amont de Porrentruy (390 m dans la région de Courtemaîche).

#### **Systèmes alluviaux**

A Courtemaîche, la nappe alluviale permet, en étiage et avec alimentation artificielle, de pomper environ 30 l/s, débit suffisant pour alimenter plus de 5000 habitants. L'amélioration du système de réalimentation permettrait d'augmenter ce débit. Au Pont d'Able (Porrentruy), il est aussi possible de pomper un tel débit, mais la nappe n'est plus utilisée actuellement que pour des cas d'urgence, depuis 1992. La réserve écouable de l'aquifère alluvial de Courtemaîche a été estimée à environ 100'000 m<sup>3</sup> contre un peu plus de 70'000 m<sup>3</sup> pour celui du Pont d'Able.

## **4.4 Réflexions sur quelques directions d'écoulements**

L'anticlinal du Cras d'Hermont a servi de barrage aux écoulements venant du sud, avant que ceux-ci ne trouvent un point faible dans la région du Voyeboeuf et de Fontenais. A Courgenay, le plongement de l'anticlinal permet aux écoulements venant du sud de se diriger vers le nord (en direction de la source du Betteraz). Pour sa part, l'anticlinal du Pont d'Able a constitué un second obstacle. Les écoulements ont été déviés vers le NW (et pas à l'W), par la **confluence des écoulements issus de l'est, du sud et de l'ouest**.

A l'extrémité occidentale de l'Ajoie (Haute-Ajoie), les eaux souterraines s'écoulaient initialement en direction de Porrentruy à partir de Grandfontaine et Damvant. Peu à peu, avec l'approfondissement des vallées du Gland et du Doubs, une partie de ces écoulements a été captée souterrainement par ces deux cours d'eau, grâce à des gradients d'écoulement de plus en plus importants. On tend ainsi vers une diminution du bassin versant de la Beuchire, au profit du bassin versant de la Doue (Gland) et de Ronde Fontaine (Doubs). Ce dernier pourrait même entamer celui de la Doue, étant donné la diffluence observée depuis Rocourt et le très fort gradient existant en direction du Doubs.

Le Doubs constitue le niveau de base régional à une altitude d'environ 400 à 450 m au nord de l'Ajoie. Le profil d'un de ses affluents, l'Allaine, en est bien entendu tributaire et, par la force des choses, l'altitude des principales sources karstiques.

## 5. LA CARTE HYDROGEOLOGIQUE DE L'AJOIE

Au fur et à mesure de l'acquisition des données s'est imposé l'idée de les rassembler de façon à ce qu'elles puissent être utilisées facilement pour différencier les différents systèmes d'écoulement. Dans un premier temps, nous avons repris les données existantes concernant la géologie. Tout en gardant un maximum d'informations provenant des cartes géologiques existantes, mais en préservant une place importante pour tous les éléments hydrogéologiques et de gestion des eaux, nous avons interprété chaque formation géologique en terme de perméabilité, en fonction des normes établies par l'Unesco en 1983 ainsi que des travaux de Kiraly (1973) et Paloc (1975). Les couleurs suivantes ont attribuées:

- le bleu pour les roches non consolidées (quaternaires) perméables; par exemple, les bons aquifères poreux sont indiqués en bleu foncé, les moins bons en bleu clair.
- le vert pour les roches consolidées, fissurées et karstiques, schématisées par des briques;
- le brun (plusieurs intensités) pour les roches peu ou très peu perméables, toutes formations confondues.

La vision de la structure géologique donnée par la succession lithostratigraphique est préservée grâce à l'attribution pour chaque formation calcaire située entre deux formations peu perméables (brun) d'une orientation différente des briques (45° de rotation d'une formation à l'autre). Des briques de plus petite taille ont été utilisées pour les formations géologiques du Dogger. En l'état des connaissances actuelles sur la distribution des perméabilités dans les calcaires, une seule classe de perméabilité a été utilisée. Nous qualifierons les calcaires de globalement homogènes dans leur hétérogénéité! Nous avons cependant mis en évidence un certain nombre d'éléments donnant des indices sur la présence de zones plus karstifiées: cavités, tracé reconnu de cours d'eau souterrains, dolines, vallées sèches.

Le brun, qui regroupe en fait tout ce qui n'est pas perméable, représente des catégories de roches très différentes les unes des autres, avec comme seul point commun leur perméabilité. On y trouve des formations tant superficielles (récentes) que profondes (anciennes). Un figuré spécifique accompagne le brun pour éviter les confusions. L'épaisseur de la formation peu perméable joue aussi un rôle dans l'attribution de la couleur claire (peu perméable) ou foncée (très peu perméable). Données en brun foncé, les marnes oxfordiennes constituent avec une puissance de 80 à 90 m un aquiclude régional. En revanche, les marnes à Natica sont nuancées en brun clair, étant trop peu importante (moins de 20 m de puissance) pour former une barrière aux écoulements régionaux (aquiclude local).

Pour les formations superficielles récentes, l'attribution de la perméabilité était difficile. La nature des terrains représentés sur la carte géologique était parfois ambiguë, des termes différents étant utilisés d'une carte à une autre. Les épaisseurs de ces formations étaient aussi mal connues. Ponctuellement, quelques sondages mécaniques et des mesures géophysiques ont contribué à confirmer ou à infirmer les relevés géologiques existant. Les loess, les colluvions, les limons et les formations de sables vosgiens ont certes été distingués par un figuré noir différent, mais une nuance identique leur a été assignée, le brun clair. Aucune formation ne pouvait être considérée comme réellement une barrière aux écoulements en raison de leur superficialité (tranche d'altération - activité biologique). On distinguera cependant les zones situées à l'ouest de Porrentruy, avec des formations quaternaires peu importantes, de celles de l'est de Porrentruy, où elles sont davantage représentées et en partie responsables des cours d'eau superficiels permanents.

Une carte de base a ainsi été élaborée, sur laquelle est venu s'ajouter un certain nombre d'informations. La partie C de ce travail a conduit à la délimitation de la plupart des bassins versants karstiques d'Ajoie grâce aux méthodes utilisées: base géologique antérieure à l'étude et complétée par les travaux de reconnaissance de la N16, essais de traçage, mesures de débits notamment. Ces informations précieuses dans l'élaboration de la carte sont annexées à celle-ci (annexes 2.1 à 2.3). Elles ont été à la base de la partie interprétative de la carte. La carte représente la synthèse illustrée de cette étude. C'est ainsi qu'on

peut y distinguer plusieurs niveaux de lecture, qui devaient à la fois intéresser les spécialistes (bureaux d'ingénieurs, chercheurs) et les autorités cantonales et communales responsables de la gestion des eaux.

Le premier niveau regroupe un ensemble d'informations ponctuelles sur la position

- des principales sources et captages publics avec les débits extrêmes;
- des sondages de reconnaissance géologiques et hydrogéologiques
- des décharges;
- des points d'infiltrations d'eaux usées.

Le second niveau rassemble tous les paramètres géologiques, structuraux et morphologiques (vallées sèches, dolines, ...).

Le troisième niveau donne une interprétation hydrogéologique des différents types d'aquifères: milieu poreux, milieu poreux-fissuré et milieu fissuré-karstique, avec pour chacun d'eux plusieurs classes de perméabilité. Ces aquifères comprennent plusieurs systèmes d'écoulement interconnectés ou pas, dont les relations les plus complexes n'ont pu être représentées sur la carte, mais qui ont fait l'objet de la partie C. Il s'agit essentiellement des systèmes du Betteraz - Pont d'Able et La Fontaine - Courtemaîche. L'aspect des nappes alluviales ne peut être que succinct à l'échelle de la carte.

Une synthèse cartographie présente de nombreux avantages, à commencer par la concentration élevée d'informations. A l'heure de l'informatique, ces informations peuvent être encore multipliées grâce à des bases de données puis triées et choisies en fonction des besoins particuliers de l'utilisateur potentiel. Une telle carte, et c'est déjà le but de notre carte, est son accessibilité à tous ceux qui ont besoin d'un maximum d'informations en un minimum de temps. C'est important pour le praticien qui est confronté à des budgets calculés au plus juste pour des clients privés ou des collectivités devant faire face à des restrictions budgétaires.

**La carte hydrogéologique de l'Ajoie, annexée à la présente étude (plan hors texte, vol. 2) est accompagné d'une notice explicative** qui devrait permettre de répondre aux attentes des principaux utilisateurs potentiels. **La notice (Vol. 2) contient un texte présentant une situation générale pour les aspects géologiques, hydrogéologiques, hydrologiques et une présentation des problèmes de polluants propres à cette région.** Des figures (cartes tectonique, structurale, hypsométrique, de pluviosité et un log lithostratigraphique) accompagnent le texte. **La notice contient encore des tableaux complets sur les points d'eau représentés sur la carte, les sondages géologiques (de plus de 20 m) et enfin les essais de traçages réalisés en Ajoie.** Cette dernière liste a été remise à jour au 1.5.1995 et comprend une douzaine d'essais effectués après le tirage de la carte hydrogéologique de l'Ajoie en décembre 1992.

Six ans ont passé depuis la parution de la carte hydrogéologique. Nous nous sommes aperçus qu'elle répondait véritablement à un besoin, par les nombreux échos reçus et pas uniquement provenant d'une seule catégorie d'utilisateurs. Un de nos objectifs est donc atteint et devrait nous encourager à poursuivre l'élaboration de telles cartes en favorisant une utilisation interactive, plus souple, par l'intermédiaire de l'informatique (choix d'informations nécessaires pour une utilisation spécifique) ainsi qu'une mise à jour régulière des informations dynamiques (gestion des eaux en particulier).

# **PARTIE D: CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

*Page*

|     |                                                                      |
|-----|----------------------------------------------------------------------|
| 151 | <b>1. FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE</b>                                |
| 151 | <b>1.1 Entrées</b>                                                   |
| 151 | 1.1.1 Les pluies                                                     |
| 152 | 1.1.2 Les pollutions                                                 |
| 152 | 1.1.3 Les traçages                                                   |
|     | <b>1.2 Sorties</b>                                                   |
| 152 | 1.2.1 Le karst                                                       |
| 153 | 1.2.2 Les alluvions                                                  |
| 154 | <b>2. GESTION DES RESSOURCES EN EAU<br/>ET CARTE HYDROGEOLOGIQUE</b> |
| 154 | <b>3. SYNTHESE = CARTE HYDROGEOLOGIQUE</b>                           |
| 154 | <b>4. PERSPECTIVES</b>                                               |

## PARTIE D: CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### 1. FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE

#### 1.1 Entrées

L'étude d'un système karstique nécessite l'emploi de plusieurs méthodes hydrogéologiques complémentaires. Cette étude doit démarrer par la caractérisation du **signal d'entrée**, à savoir :

1° les pluies

2° les pollutions

3° les traçages

On devrait ainsi impérativement connaître:

- la répartition spatiale des précipitations, d'autant mieux que l'étendue du bassin versant est importante;
- la répartition temporelle des précipitation; un événement bref mais intense n'a pas le même impact qu'un événement étalé sur plusieurs jours, mais globalement de même importance;
- la température de l'air au cours de l'événement, afin d'estimer les infiltrations efficaces par le calcul de l'évapotranspiration et de quelle manière le signal thermique est transformé lors de son passage dans le karst; une pluie chaude peut autant provoquer une augmentation qu'une diminution temporaire de la température de la source;
- l'occupation du sol et le type de l'activité humaine: surfaces forestières, agricoles ou urbaines; présence de rejets liquides (et ce qu'ils contiennent) dans le karst ou dans un cours d'eau, situation des décharges publiques ou sauvages avec leur contenu et le type de substratum sous la décharge (calcaires ou argiles, doline ou carrière,...).

Quand le **signal d'entrée** et des conditions qui lui sont liées sont bien définis, on peut démarrer avec l'interprétation sur le fonctionnement du système étudié.

##### 1.1.1 Les pluies

Une part importante de ce travail a été consacrée à l'**acquisition de ces données** et leur interprétation. A cet effet, nous nous sommes appuyés sur un réseau pluviométrique dense (1 station pour 15 km<sup>2</sup>), ce qui nous a permis de mettre en évidence deux phénomènes essentiels:

- dans une région comme l'Ajoie, avec un relief peu prononcé (90% du bassin situé à moins de 650 m), les précipitations sont peu dépendantes de l'altitude; des microclimats ont aussi été mis en évidence par la température;
- la répartition des précipitations sur le bassin versant de l'Allaine est très hétérogène, dans le temps certes, mais dans l'espace surtout; la zone située au NE de Porrentruy reçoit en moyenne 20 à 30% de précipitations en moins que la lame d'eau tombée sur l'ensemble de l'impluvium; cette observation est reproductible d'une année à l'autre, voire même d'un événement pluvieux à un autre, à peu de chose près; il arrive même qu'un événement touche un bassin versant et pas le voisin ou seulement une partie du bassin.

### 1.1.2 Les pollutions

Le suivi des **paramètres de pollution** dans les sources karstiques a mis en évidence plusieurs éléments intéressants:

- les assainissements les plus rapides à réaliser le sont pour les eaux usées domestiques (amélioration rapide de la qualité des eaux superficielles et souterraines après la mise en service de la STEP de Porrentruy);
- une pollution agricole importante par l'azote et les micropolluants de la famille de l'atrazine a comme effets une évolution beaucoup plus lente, que ce soit dans le sens d'une amélioration ou d'une dégradation; des cycles saisonniers liés aux épandages sont aussi visibles pour le chlorure et le nitrate, en particulier sur La Beuchire suivie hebdomadairement sur la chimie (cf. Dubreucq, 1987); d'autres paramètres chimiques montrent aussi une évolution saisonnière, mais plus liée aux débits qu'à un cycle biologique (Mg, K, Na).
- une pollution industrielle préoccupante par les solvants chlorés dans les systèmes karstiques contenant des décharges (sauvages surtout); les assainissements de ce type de pollution sont lourds (volumes importants) et difficiles à réaliser; la pollution persiste durant des décennies (Betteraz et Pâquis essentiellement).

### 1.1.3 Les traçages

Le catalogue des signaux d'entrée est fort bien rempli. Plusieurs éléments mis en évidence ci-dessus constituent de bons traceurs des eaux souterraines dans certaines situations. L'importance des **essais de traçage** a été relevée dans ce travail. Avec les traceurs artificiels utilisés, il a été possible d'effectuer la délimitation des bassins versants de la plupart des exutoires karstiques d'Ajoie et de les reporter sur la carte hydrogéologique, à côté de tous les éléments concernant la gestion des eaux. Ainsi, le bassin versant hydrogéologique de L'Allaine (182 km<sup>2</sup>) est plus petit (de 11%) que son bassin versant géographique (215 km<sup>2</sup>). La différence provient essentiellement de l'extrémité occidentale de l'Ajoie. Par rapport à la délimitation des systèmes alluviaux (y compris les zones d'influence des puits exploités), la délimitation des systèmes karstiques est beaucoup plus délicate à aborder et le travail plus conséquent.

Les conditions à l'injection des traceurs sont souvent déterminantes pour la réponse à l'exutoire, notamment dans les vitesses de transit.

Dans le Jura plissé, les structures géologiques permettent dans de nombreux cas de définir des limites hydrogéologiques. En revanche, dans le Jura tabulaire, nous avons remarqué que la délimitation est essentiellement hydraulique. Les gradients d'écoulement peuvent s'inverser lors d'un changement d'état hydrologique, voire dans le temps. Ainsi une partie du système de La Beuchire a été capturée par les systèmes de La Doue (Le Gland) et de Ronde-Fontaine (Le Doubs). Les diffusions observées dans le Jura tabulaire ont également été plus nombreuses, permettant à des systèmes possédant des exutoires distincts d'avoir une partie commune de leurs systèmes respectifs.

## **1.2 Sorties**

### 1.2.1 Le karst

A partir des bassins versants et des **débits** qui ont été mesurés dans quelques exutoires (Allaine, Beuchire, Bonne-Fontaine et Voyeboeuf), des **bilans** ont été établis et ont permis, par un bon équilibre hydrique, de vérifier les résultats de la délimitation. Le bilan de l'Allaine à Boncourt peut cependant être

qualifié de déficitaire (10-20%), consécutivement à des pertes localisées en aval de Buix, non comptabilisées à la station limnigraphique de Boncourt.

Une importante hétérogénéité a été constatée pour la répartition spatiale du signal d'entrée. Lors de l'infiltration des eaux dans un système karstique, un deuxième niveau d'hétérogénéité se superpose au premier avec des zones à infiltration concentrée (dolines) et des zones à infiltration dispersée (lente).

Les exutoires des systèmes karstiques étudiés réagissent très rapidement aux précipitations et aux impulsions thermiques. Cela concerne aussi les systèmes en relation avec un cours d'eau superficiel, L'Allaine. Les variations de la température de l'air se marquent très rapidement sur les exutoires karstiques lors d'événements pluvieux et même en dehors de ces événements pour les systèmes en relation avec un cours d'eau superficiel. Même les fluctuations journalières de température et de conductivité de la rivière se répercutent de manière sensible (en moins de 24h) aux exutoires karstiques (Betteraz et La Fontaine).

L'effet atténuateur du karst et de ses importantes réserves d'eau s'est relativement peu manifestée dans la déformation des signaux d'entrée. Le schéma d'un karst à deux vitesses s'est effectivement confirmé dans les systèmes karstiques étudiés en Ajoie.

Une situation paradoxale a été relevée dans le système de La Beuchire entre:

- une réaction extrêmement rapide, une forte amplitude sur les débits et les paramètres physico-chimique au cours d'une crue;
- une faible fluctuation saisonnière des principaux paramètres physiques et chimiques, montrant une inertie importante due à la taille du système et à un milieu capacitif prédominant hormis les périodes de crue.

Cette situation va dans le même sens que l'hypothèse de l'inversion des gradients entre milieu capacitif et milieu transmissif lors de la crue. Le milieu capacitif qui a un rôle atténuateur voit son influence diminuer au profit du milieu transmissif rapidement alimenté par les infiltrations récentes. Au cours de cette phase, certaines parties du système s'écoulent prioritairement à d'autres, surtout si les événements sont aigus. Le système est très bien drainé et hiérarchisé, mais une partie importante du système ne peut s'écouler librement (plus de 90% du système se trouve sous le niveau de l'exutoire). Les vitesses d'écoulement sont élevées et augmentent vers l'aval du système.

### 1.2.2 Les alluvions

Avec des caractéristiques géologiques et des conditions aux limites comparables les quatre **systèmes alluviaux** de la Basse-Allaine fonctionnent différemment. Si les apports par les précipitations sont proportionnellement faibles (10-20%), les apports allochtones ont une influence prédominante sur chaque système. Ces apports se répartissent entre les eaux de l'Allaine et les eaux karstiques, dans des proportions qui varient dans le temps et selon l'endroit (dans un système et d'un système à un autre). A Boncourt et au Pont d'Able, les apports karstiques sont beaucoup plus nets qu'à Courtemaîche ou à Buix. Au Pont d'Able, les apports karstiques sont issus de deux systèmes karstiques différents et ceux de l'Allaine également, par la traversée du système alluvial et depuis l'amont, par le système karstique du Betteraz. A Courtemaîche, les eaux karstiques qui sont en relation avec le système alluvial contiennent également une proportion variable des eaux de l'Allaine.

## 2. GESTION DES RESSOURCES EN EAU ET CARTE HYDROGEOLOGIQUE

La mise en service de la STEP de Porrentruy en 1987 et du captage de la source du Betteraz (1992) sont les événements majeurs survenus dans la gestion des eaux en Ajoie. La qualité des eaux superficielles (surtout l'Allaine) s'est nettement améliorée et la plupart des rejets d'eaux usées dans le karst ou dans un cours d'eau ont été supprimés. Avant 1992, la proportion d'eau alluviale et d'eau karstique exploitée pour l'eau potable était équivalente. Après 1992, la proportion a passé à 1/3 pour l'eau alluviale et à 2/3 pour l'eau karstique. Le Betteraz et le système alluvial de Courtemaîche à eux seuls alimentent plus de la moitié de la population d'Ajoie. Ce chiffre est important, car ces deux sources d'alimentation ont une vulnérabilité relativement élevée, en partie causée par des infiltrations importantes de L'Allaine et des décharges délicates à assainir. D'autres systèmes représentent des ressources potentielles importantes pour l'avenir. Ainsi, le système de La Beuchire, relativement épargné par les divers types de pollution, renferme une grande proportion d'eau non-écoulable librement ( $30.10^6 \text{ m}^3$ ). Les réserves écoulables ne représentent qu'environ 6% du volume des précipitations efficaces annuelles, soit une lame d'eau de 30 mm ( $1.5.10^6 \text{ m}^3$ ).

## 3. SYNTHESE = CARTE HYDROGEOLOGIQUE

Les éléments de gestion qui figurent sur la carte hydrogéologique permettent de se faire une idée assez précise du travail remarquable déjà accompli par les collectivités publiques dans l'assainissement des eaux usées (forte diminution du volume global des infiltrations d'eaux usées dans le karst) et des problèmes qu'il reste à résoudre, essentiellement dans le domaine des déchets industriels (décharges publiques et sauvages). La superposition de ces éléments de gestion avec l'hydrogéologie générale permet de les replacer dans un contexte plus global. A l'inverse, ces éléments, qui sont à l'origine des principales pollutions, viennent appuyer l'interprétation hydrogéologique.

Les données accumulées au cours des années n'ont pas toutes été utiles ni utilisées. Nous les classerons dans deux catégories:

- les données peu utiles par un manque de réflexion au départ ou en cours d'étude (par exemple les analyses chimiques, isotopiques ou des mesures géophysiques);
- les données inutilisables par manque de fiabilité ou des perturbations extérieures (mesures de tritium, mesures limnigraphiques, mesures de température d'une source trop éloignée de l'exutoire).

En revanche, un certain nombre de données nous a manqué à plusieurs niveaux de l'interprétation (mesures précises de la température de l'air à Porrentruy ou Courtemaîche, forages et caractéristiques de perméabilités, évolution des niveaux piézométriques dans quelques forages existant du bassin de La Beuchire notamment).

## 4. PERSPECTIVES

Nous avons eu l'opportunité d'étudier plusieurs systèmes karstiques plus ou moins indépendants les uns les autres, avec des spécificités propres, notamment liées à la mixité des structures (Jura plissé - Jura tabulaire) et à la présence d'un cours d'eau traversant l'impluvium de quelques systèmes. Nous avons ainsi dispersé nos efforts en multipliant les mesures dans un maximum de systèmes, sans pour autant en maîtriser l'ampleur ni en tirer une compréhension globale du fonctionnement du système karstique régional. Dans ce foisonnement de données, il a fallu en faire le tri pour satisfaire aux

objectifs pratiques, les plus importants pour les collectivités qui ont financé le projet. Ces dernières devaient impérativement avoir en leur possession des outils leur permettant de mener à bien une gestion optimale et cohérente des eaux souterraines et superficielles. Une synthèse des principaux résultats, principalement sur la gestion des eaux a déjà été publiée (Lièvre et al. 1992). Mais un document essentiel illustre l'ensemble des résultats obtenus: **la carte hydrogéologique de l'Ajoie (1992)**, comprenant l'indispensable notice explicative avec l'état des données en 1995 (essais de traçage).

Certains résultats ont mis en évidence l'importance des relations entre L'Allaine et les systèmes karstiques et alluviaux, lorsque ces systèmes sont exploités. De manière générale, il convient de réduire au maximum les risques de pollution des cours d'eau en récoltant et traitant prioritairement l'ensemble des eaux usées qui s'y jettent. Vers l'aval, il convient également de prendre des mesures préventives en:

- légalisant et en faisant appliquer efficacement les zones de protection (valable pour tous les types d'aquifères);
- installant un système d'alarme pour éviter qu'une partie du polluant éventuel ne parvienne dans le réseau d'eau de boisson (surtout pour les sources karstiques du type Betteraz);
- prévoyant une installation de traitement de l'eau potable pour pallier aux pollutions les plus courantes;
- en connectant le réseau d'eau de boisson sur une autre source d'alimentation, indépendante.

Pour les nappes alluviales, importantes pour l'alimentation de l'Ajoie notamment, les apports importants de la rivière parlent en faveur du maintien des zones inondables pour favoriser la recharge des systèmes.

Lorsque les captages sont trop vulnérables ou lorsque la qualité des eaux est trop mauvaise, on doit malheureusement envisager l'abandon du captage, pour autant qu'il n'existe aucun moyen d'améliorer la qualité naturelle de l'eau. Certes, de très nombreux captages sont menacés par les activités humaines (décharges, zones industrielles, routes et cultures). La plupart des zones de protection de ces captages sont en voie de légalisation. Mais, l'application des mesures reste souvent théorique car irréalisable pour certaines activités. Il n'y a pas de solution miracle, mais une délimitation des zones de protection basée sur une meilleure connaissance des aquifères karstiques et alluviaux devrait encore permettre d'améliorer la situation et de mieux gérer les dangers. Le dimensionnement des zones de protection dans le karst doit être basé sur un maximum d'informations de ce type en intégrant des critères de vulnérabilité. La nouvelle ordonnance fédérale sur la protection des eaux tend à attribuer à l'ensemble du bassin versant karstique d'un captage une zone de protection S3, tout en limitant la zone de protection S2 aux zones les plus sensibles dudit bassin. En limitant ainsi l'extension des zones S2, on favorise:

- une meilleure application des limitations à l'utilisation des bien-fonds
- une meilleure prise de conscience au niveau des propriétaires de captage pour la surveillance des ZPE
- une meilleure motivation pour respecter les règles, de la part des utilisateurs des terrains situés en ZPE.

Dans toute application d'une zone de protection, l'apport de l'information est primordial. L'un des meilleurs supports demeure encore l'illustration des problèmes par une carte qui devrait refléter une certaine dynamique et surtout une facilité d'accès à toutes les personnes concernées.

La carte hydrogéologique de l'Ajoie telle qu'elle a été conçue représente un pas dans cette direction, entre les cartes hydrogéologiques classiques et les cartes générées en totalité sur support informatique. Les cartes classiques ne possèdent que des données limitées, des échelles rigides et des

informations qui ne sont destinées généralement qu'à des spécialistes. Avec sa base de données, la carte hydrogéologique de l'Ajoie montre un échantillon de la richesse d'informations que pourrait fournir une carte "à la carte". Les multiples intérêts suscités par une carte hydrogéologique ne convergent pas forcément pour les spécialistes ou pour les représentants de la collectivité. Une divergence d'intérêt nécessite l'élaboration d'un grand nombre d'informations sur une carte, ce qui ne rime guère avec lisibilité. La carte de l'Ajoie a été conçue autant pour l'une que pour l'autre catégorie de destinataires. C'est ainsi qu'elle contient un maximum d'informations au-delà desquelles la lecture deviendrait impossible. Le système de cartographie doit donc changer et être repensé: il faut une carte répondant au besoin de chaque utilisateur. Seule l'informatique permettrait d'offrir un système de cartes ou d'extrait de carte pour un secteur déterminé suffisamment souple. On peut déterminer le type d'information qui nous intéresse. Il en faut pour tous les niveaux: scientifique, bureaux privés, autorités de surveillance, d'aménagement, le propriétaire d'un terrain, du captage, etc...

Mais que pourrait bien contenir de telles cartes? Les informations contenues dans la carte de l'Ajoie seraient un minimum. D'autres informations devraient également y être insérées en fonction des besoins et être rapidement accessibles:

- les cartes de vulnérabilité (zones vulnérables selon des critères géologiques et d'occupation du territoire: routes importantes, industries à risque, etc...);
- les cartes des zones de protection légalisées avec possibilités d'y apporter les modifications;
- toutes les mesures effectuées à disposition dans une base de données (géologie, géophysique, sondages, débits (données, courbes de tarage, interprétation), chimie (évolution à compléter au fur et à mesure); pour chaque point, on donne le type de données disponibles avant d'en faire le choix (système de menus)

Dans ce but, nous avons fourni dans les annexes toutes les données en notre possession. Compte tenu de l'importance du signal d'entrée, le nouveau type de carte devrait pouvoir contenir toutes informations utiles pour connaître la répartition spatiale des précipitations/températures/couverture neigeuse lorsque c'est possible, sur l'année mais aussi sur des périodes plus courtes, de l'échelle d'un événement (orage).

Plusieurs exemples répondant à une grande partie des critères énumérés ci-dessus ont été élaborés ou sont en cours d'élaboration au CHYN, sur un support informatique (système d'informations géographiques et banque de données Oracle):

- carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel;
- carte des essais de traçage du canton de Neuchâtel.

De telles cartes ("multicartes") ont comme principale qualité d'être évolutive car, grâce à un système souple, on peut y apporter des données supplémentaires, des précisions ou des corrections d'études ultérieures. Rassembler ces données peut paraître extrêmement lourd. Chaque intéressé devrait fournir un effort particulier. Cela implique notamment un accès facilité aux données pour autant que les informations puissent être véritablement échangées. Quel organisme devrait se charger de la compilation de l'amélioration, de la distribution bref de la gestion d'un tel travail? cantonal ou fédéral? Le service fédéral de la carte géologique ou l'Office fédéral de topographie devraient-ils être développés dans ce sens? Toutes ces questions méritent d'être approfondies pour établir la faisabilité d'un tel projet.

# **BIBLIOGRAPHIE**

- *Bibliographie* -

**BIBLIOGRAPHIE**

- ADATTE, P. (1993): Etude des zones d'infiltration de l'Allaine entre Alle et Porrentruy (JU). Bassin versant de la source du Betteraz. Travail de diplôme cours postgrade, CHYN.
- ALLEMAND, TIECHE & BADERTSCHER (1968): Le problème de l'eau de consommation en Ajoie. Propositions et suggestions. Rapport inédit du 22.7.68.
- BAILLY, C. (1979): Etude géologique de la vallée du Doubs et de ses abords à l'est de St-Hippolyte (Doubs). Thèse. Université de Franche-Comté Besançon.
- BIDER, M. (1978): Nordöstlicher Jura und Juranordfuss In: Regionale Klimabeschreibungen - Klimatologie der Schweiz Band II, 1. Teil Beiheft zu Annalen d. Schweiz. Meteor. Zentralanst., pp. 115-178.
- BLAVOUX, B. (1978): Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. Thèse de doctorat d'état ès Sciences naturelles, Paris 6. 333 p.
- BOUVIER, J.C. (1978): Les cours d'eau et leurs relations avec les réseaux souterrains; essai d'un bilan sur des bases hydrobiologiques dans le Jura septentrional. Actes 6<sup>ème</sup> Congrès national de Spéléologie. Porrentruy.
- BOUVIER, J.-C. (1984): Aspects quantitatifs de la protection des eaux dans le Canton du Jura. Actes de la Société jurassienne d'émulation, 1984.
- BOUVIER, J.-C. (1989): Essai sur le régime hydrologique du Doubs en référence à la période 1973-1988 (Biaufond-Ocourt, JU). Actes soc. juras. d'Emulation, 1989, Porrentruy.
- BRANDT, C. (1975): Une rivière souterraine devenue égoûts: l'Ajoulote. Nature information 9/1975.
- BRANDT, C., ISLER, O. & PAHUD, A. (1981): La Grotte du Creugenat. Stalactite. (Neuchâtel) 31 (1), pp. 18-21.
- BRGM. (1985): Etude hydrogéologique préliminaire des sources du Val St-Dizier et de son bassin d'alimentation. Rapport inédit.
- BURGER, A. (1975): Etude des causes de la pollution des sources de Buix, rapport général: hydrogéologie, chimie et bactériologie des eaux de sources, 6 essais de traçage. CHYN. Rapport inédit.
- BURGER, A. (1979): Vérification de l'étanchéité de la canalisation des eaux épurées reliant la STEP de Bure à l'Allaine. CHYN. Rapport inédit.
- BURGER, A., MARCE, A., MATTHEY, B. & OLIVE, P. (1971): Tritium et oxygène-18 dans les bassins de l'Areuse et de la Serrière (Jura Neuchâtelois). Actes 1er coll. Hydrol. en Pays calcaire, Besançon, pp. 79-87.
- BUXTORF, A. (1915): Wasserversorgung der Ortschaften im Bezirk Pruntrut. Basel.
- CALAME, P. (1960): L'alimentation en eau de Porrentruy et de son château. Les Intérêts du Jura n°11/1960.
- CHAUVE, P., DUBREUCQ, F., FRACHON, J.C., GAUTHIER, A., METTETAL, J.P. & PEQUERET, J. (1987): Inventaire des circulations souterraines reconnues par traçage en Franche-Comté. Annales scientifiques de l'Université de Besançon, géologie, mémoire n° 2.
- CHAUVE, P., JACQUEMIN, P. & MANIA, J. (1986): Représentation des écoulements en milieu karstique de zone plissée: exemple des hauts bassins du Doubs et de la Loue. Bull. Soc. géol. France, 8, t II/4, pp. 645-652.
- CHRISTE, R., FLURY, F., HESSENAUER, M., JEANNIN, P.-Y. & TURBERG, P. (1995): Groundwater impact assessment for the N16-motorway project in northwestern Switzerland. Groundwater quality: Remediation and Protection (Proceedings of the Prague Conference, May 1995). IAHS Publ., n°225.

### **- Bibliographie -**

- COLOMBI, SCHMUTZ, DORTHE SA - CSD (1972a): Essai de pompage de Pré Voigny. Rapport inédit.
- COLOMBI, SCHMUTZ, DORTHE SA - CSD (1972b): Etude hydrogéologique de Courgenay; prospection géophysique de Pré Genez et Pré Voigny. Rapport inédit.
- COLOMBI, SCHMUTZ, DORTHE SA - CSD (1972 & 1973): Hydrogéologie de la Plaine du Pont d'Able. Propositions pour des zones de protection. Rapports inédits. B. Schindler.
- COLOMBI, SCHMUTZ, DORTHE SA - CSD (1973):  
a) Etude hydrogéologique de la source de la Fontaine à Courtemaîche.  
b) Coupe des forages et du puits de captage à la source de la Fontaine. Rapport inédit. B. Schindler.
- COLOMBI, SCHMUTZ, DORTHE SA - CSD (1984): Projet d'extension de la carrière de Miécourt. Essai de traçage à la fluorescéine. Rapport inédit. J.-P. Dorthe.
- COLOMBI, SCHMUTZ, DORTHE SA - CSD (1991): Essai de traçage sur le site du projet de décharge pour gros matériaux du "Champ St-Pierre" à Alle. Rapport inédit. J.-A. Jossen et V. Schouwey.
- CONRAD, R.: Rapport technique de pompage d'eau de fond dans la plaine du Pont d'Able. Rapport pour la Commune de Porrentruy.
- DELAROZIERE, O. (1968): Contribution à l'étude du bassin du Doubs. Climatologie, hydrologie et déficit d'écoulement rapportés aux unités géologiques.  
Thèse, Lyon. BRGM, Paris, n° 68 SGL 162 JAL. 99 p. (2 vol.).
- DIEBOLD, P. (1960): Geologie des Gebieten von Siegfriedblatt Ocourt.  
Mat. carte géol. de la Suisse, NS 111/1960.
- DOERFLIGER, N. (1994): Interprétation des essais de traçage en milieu karstique; Etude pilote: application du programme DYEBOS basé sur le modèle Boîte Noire. SHGN, Berne, rapport inéd. CHYN.
- DOERFLIGER, N. (1996): De la protection des eaux souterraines en milieu karstique à partir des essais de traçages artificiels et de la cartographie multicritère de la vulnérabilité (méthode EPIK).  
Thèse, Université de Neuchâtel.
- DOERFLIGER, N. & TACHE, E. (1995): Vulnérabilité des eaux dans les régions karstiques et délimitation des zones de protection. Méthodologie EPIK. Contribution à des travaux de recherche sur la protection des eaux en terrain karstique. Rapport intermédiaire CHYN du 30.9.95, OFEFP.
- DOMON, G. (1975): Le Creugenat. Cavernes 19/1, pp. 4-10.
- DOMON, G. (1978): Le Creugenat (Courtedoux, Jura).  
Actes 6<sup>ème</sup> Congrès de spéléologie, Porrentruy, pp.195-200.
- DUBREUCQ, F. (1987): Le chimisme des eaux de la Cuisance en amont d'Arbois (Jura). Influence du karst, des sols et des activités humaines. Thèse. Annales scientifiques de l'Université de Besançon. Géologie, Mém. n°3.
- DUBREUCQ, F., CHAUVE, P., MANIA, J., BRUCKERT, S., MIGNOT, CH., MOINDROT, D. & TRUCHE, CL. (1988): Rôle de l'interface sol-roche sur l'acquisition du chimisme des eaux.  
Actes quatrième coll. d'hydrol. en pays calcaire, pp. 221-228. Besançon.
- EFRAHNEY, N. & HERTIG, J.-A. (1993): Traitement et analyse, possibilités et limites, champs d'application. Cahier de l'Institut de géographie de l'Université de Fribourg n°9.
- ERZINGER, E. (1943): Die Oberfläche der Ajoie (Inaugural dissertation). Druck und Verlag Zbinden & Hügin, Basel 130 p., 16 fig, carte 1:100'000.
- ERZINGER, E. (1946): Die Quelltöpfe der Ajoie. Leben und Umwelt n°3/1946.
- FLURY, F. (1984): Multitraçage sur le plateau de Bure (Ajoie, JU) à l'aide de bactériophages et de traceurs fluorescents. Bull. du CHYN n° 5. pp. 91-105, Neuchâtel.

### **- Bibliographie -**

- FREIBURHAUS, S. (1994): Impact hydrogéologique d'une décharges en milieu karstique - l'Oiselier, Porrentruy (Jura). Travail de diplôme postgrade, CHYN.
- GIGER W., SCHAFFNER, C., KARI, F.-G., PONUSZ, H., REICHERT, P. & WANNER, O. (1992): Présence et comportement du NTA et de l'EDTA dans les rivières suisses. Nouvelles de l'EAWAG n° 32F, pp. 27-31.
- GIGON, R. & WENGER, R. (1986): Inventaire spéléologique de la Suisse. Tome II: Canton du Jura. Porrentruy.
- GRANDGIRARD, V. & BOYER, L. (1993): Evaluation des vallées sèches de l'Ajoie, avec carte 1:25'000. Complément EIE pour la N16. Service des Ponts et Chaussées du Jura, section route nationale, Delémont. Rapport inédit.
- GRASSO, D.A. (1993): Comparaison de différentes méthodologies appliquées à l'étude des systèmes karstiques: application au site de Bure (JU). Mém. de dipl. 3è cycle interuniversitaire en hydrogéologie, Université de Neuchâtel. Inédit.
- GRASSO, D.A. & JEANNIN, P.-Y. (1993): Etude critique des méthodes d'analyse de la réponse globale des systèmes karstiques. Application au site de Bure (Jura, Suisse). Bull. CHYN n°13, Neuchâtel.
- GRASSO, D.A. & JEANNIN, P.-Y. (1995): Essai d'estimation des pertes dans la partie aval du réseau karstique de la Milandrine: bilan hydrique au sein d'un aquifère karstique. Bull. CHYN n°14, Neuchâtel.
- GRETILLAT, P.-A. (1987): Essai de coloration dans la carrière Doyon à Courtemaîche. CHYN. Rapport inédit.
- GRETILLAT, P.-A. (1990): Prospection microsismique de la nappe alluviale de Courtemaîche. Bull. du CHYN n° 9, pp. 103-111. Neuchâtel.
- GRETILLAT, P.-A. (1996): Aquifères karstiques et poreux de l'Ajoie (Jura, Suisse). Eléments pour la carte hydrogéologique au 1:25'000. Vol. 2 : Notice explicative de la carte hydrogéologique. Thèse, Université de Neuchâtel.
- GRETILLAT, P.-A., SCHUTZ, F., SCHINDLER, B. & LIEVRE, A. (1988a): Multitraçage en Haute Ajoie. Bull. du CHYN n°8, pp. 121-149.
- GRETILLAT, P.-A., SCHINDLER, B., SCHUTZ, F. & LIEVRE, A. (1988b): Coloration des eaux souterraines de Haute Ajoie. Bull. de l'ADIJ n°4/1988, pp. 44-64, Les Intérêts de nos régions.
- GRETILLAT, P.-A., LIEVRE, A. & FERNEX, J. (1992): Le Jura tabulaire d'Ajoie. Excursion du 18 octobre 1992. 5<sup>ème</sup> colloque d'hydrologie en pays calcaire et en milieu fissuré, Neuchâtel. Annales scientifiques de l'Université de Besançon. Géologie, Mém. hors série n°11.
- GUENIAT, E. (1946): Description agrologique d'un profil dans les sols d'alluvions de l'Allaine (Porrentruy).
- GUNZIGER, M. (1953): L'alimentation en eau potable de la Haute Ajoie. Revue technique suisse 23 et 24.
- JEANNIN, P.-Y. (1990): Températures dans la zone vadose du karst. Bull. CHYN n° 9, pp. 89-102. Neuchâtel.
- JEANNIN, P.-Y. (1996): Structure et comportement hydraulique des aquifères karstiques. Thèse, Université de Neuchâtel.
- JEANNIN, P.-Y. & Grasso, A. (1995): Permeability and hydrodynamic behaviour of a karstic environment. COST65, Université de Neuchâtel.
- KIRALY, L., MATTHEY, B. & TRIPET, J.P. (1971): Fissuration et orientation des cavités souterraines. Région de la Grotte de Milandre. Bull. Soc. neuchâteloise des Sciences naturelles. Tome 94, pp. 99-114.
- KIRALY, L. & MULLER, I. (1979): Hétérogénéité de la perméabilité et de l'alimentation dans le karst: effet sur la variation du chimisme des sources karstiques. Bull. du CHYN n° 3, pp. 236-285. Neuchâtel.

**- Bibliographie -**

- KIRCHHOFER, W. (1982): Klimaatlas der Schweiz. Schweiz. Meteor. Anstalt.
- KOBY, F. (1885): Hydrographie et hydrologie des environs de Porrentruy. Extrait du rapport adressé à la Commission des eaux en février 1886. Actes Soc. jurassienne d'Emulation, pp.1-54.
- LAUBSCHER H-P. (1948): Geologie des gebietes von Siegfriedblatt St-Ursanne. Mat. carte géol. de la Suisse, NS 92/1948.
- LAUBSCHER H-P. (1963): Erläuterungen zu Blatt 1085 St.Ursanne des Geol. Atlas der Schweiz 1: 25 000.
- LEIBUNDGUT, CH. (1987): Naphtionate-another fluorescent tracer. Berner Hydrograph, 4, pp. 5-8.
- LEVY, I. (1934): Commune de Courtemaîche; extension du service des eaux par captage de la nappe souterraine.
- LEVY, I. (1944-1969): Rapports sur les essais de pompages effectués en 1944, 1949, 1950, 1952 à 1957, 1959 à 1961 et 1969
- LEVY, I. (1956): Rapport final d'exécution des puits du SEHA à Courtemaîche.
- LEVY, I. & R. (1974): SEHA; source de la Fontaine.  
a) Mesures de débits et essais de pompage.  
b) Analyses chimiques et bactériologiques.
- LIECHTI, H. (1948a): Etude hydrologique de la région de Courgenay. Les Intérêts du Jura n°5/1948.
- LIECHTI, H. (1948b): Recherches d'eau potable dans le district de Porrentruy. Les Intérêts du Jura n°5/1948.
- LIECHTI, H. (?): Rapport sur les recherches d'eau dans la plaine du Pont d'Able (Ajoie). Rapport pour la Commune de Porrentruy.
- LIECHTI, M. (1971): Rapport géologique et hydrogéologique sur la pollution de la source de la Valletaine. Rapport inédit.
- LIEVRE, A. (1978): Analyses physico-chimiques et bactériologiques de quelques infiltrations d'eaux usées dans le karst du Jura Nord. Actes 6<sup>ème</sup> Congrès de spéléologie, Porrentruy.
- LIEVRE, A. (1982): Alimentation en eau du Jura. Gaz-Eaux-Eaux usées pp.77-84, 1982.
- LIEVRE, A. (1989): Evolution de la qualité chimique de la source karstique du Betteraz à Porrentruy. Gaz-Eaux-Eaux usées pp. 5-14, 1/1989.
- LIEVRE, A. & FERNEX, J. (1988): Les ressources en eau du Canton du Jura: aspects qualitatifs et quantitatifs. Bull. de l'ADIJ n°4/1988, pp. 33-43, les Intérêts de nos régions.
- LIEVRE, A., FERNEX, J. & GRETILLAT, P-A. (1992): Les eaux souterraines du Jura tabulaire d'Ajoie. Evolution de la qualité bactério-chimique, évaluation et protection des ressources. Actes de la soc. jur. d'émulation.
- LIEVRE, A., FERNEX, J. & GRETILLAT, P-A. (1993): Etude des eaux souterraines dans le Jura tabulaire. Rapport final, OEPN, République et canton du Jura et CHYN, Université de Neuchâtel.
- LIEVRE, L. (1916): Le problème hydrologique de la Haute Ajoie et le Creux-Genaz. Actes soc. jur. d'émulation, 1916.
- LIEVRE, L. (1936): La découverte d'une rivière souterraine en Ajoie. Les Intérêts Economiques du Jura n°4, 1936.
- LIEVRE, L. (1940): Le karst jurassien. Hydrogéologie de la Haute-Ajoie et découverte d'une rivière souterraine du Jura bernois. Le Jura S.A., 159 p., Porrentruy.

### **- Bibliographie -**

- LIEVRE, L. (1945): Alimentation en eau de la Haute Ajoie: étude géologique et hydrogéologique. Les Intérêts du Jura 1 et 2, 1945.
- LIEVRE, L. (1948): Travaux entrepris en Haute Ajoie dans le but de ramener à la surface les eaux de la rivière souterraine (l'Ajoulate). Les Intérêts du Jura n°9, 1948.
- LIEVRE, L. (1955): Etudes, recherches et travaux dans différents domaines des sciences naturelles en Ajoie, dans le Jura et les régions avoisinantes. pp. 113-170.
- MATTHEY, B. SA. - BUREAU (1994): Essai de traçage dans l'Areuse à St-Sulpice. Rapport intermédiaire pour la Communauté de travail pour la détermination des zones de protection des captages des Gorges de l'Areuse
- MASSEREY, C., ESCHENLOHR, C. & OTHENIN-GIRARD, B. (1990): Archéologie et transjurane. Sondages dans la vallée de Delémont et en Ajoie. Porrentruy, Office du Patrimoine Historique, doc. n°8.
- MEMBREZ, A. (1942): Sources, puits et fontaines de Porrentruy et d'Ajoie. C. Frossard, imprimerie - lithographie, Porrentruy, 63 p.
- MEURY, P. (1985): Relevé géologique des alluvions de l'ancien lit de l'Allaine en amont de Porrentruy. OEPN. Rapport inédit.
- MEURY, P. (1988): Effondrement de terrain à Chevenez. Prospection géophysique. OEPN. Deux rapports inédits.
- MEURY, P. & FLURY, F. (1989): N16, sct.1-3, impact sur les eaux souterraines. Installation de piézomètres le long de la vallée de l'Allaine. Dossier d'exécution. Rapport inédit.
- MEURY, P. & FLURY, F. (1990a): N16, sct.1-3, impact sur les eaux souterraines. Multitraçage du 15 novembre 1988. OEPN et Service des Ponts et Chaussées, Delémont. Rapport inédit.
- MEURY FLURY RIEBEN SA. (1990b): Etude d'impact sur les eaux souterraines, projet général N16, sections 1,2,3. OEPN et service des Ponts et Chaussées, section route nationale. Rapport inédit.
- MEURY FLURY RIEBEN SA. (1991a): Syndicat d'améliorations foncières de Cornol. Etude hydrogéologique du secteur de drainage de la région de Cornol. Rapport inédit.
- MEURY FLURY RIEBEN (MFR) SA. (1991b): N16 Transjurane section 1-2/ frontière française-Creugenat. Etudes géologique et géophysique, reconnaissances indirectes. Rapport géologique n°3 du 25.7.91. Service des Ponts et Chaussées du Jura, section route nationale, Delémont. Rapport inédit.
- MFR GEOLOGIE-GEOTECHNIQUE SA. (1992a): N16 Transjurane section 1-2/ frontière française-Creugenat. Forages de reconnaissances. Rapport géologique n°4 en préparation. Service des Ponts et Chaussées du Jura, section route nationale, Delémont. Rapport inédit.
- MFR GEOLOGIE-GEOTECHNIQUE SA. (1992b): SEHA et commune de Courtemaîche. Zone de protection des captages à Courtemaîche. Rapport inédit.
- MFR GEOLOGIE-GEOTECHNIQUE SA. (1994): Rapport d'impact, version pour le rapport "Zace". N16, section 3, Projet définitif, EIE sur les eaux souterraines. Service des Ponts et Chaussées du Jura, section route nationale, Delémont. Rapport inédit.
- MFR GEOLOGIE-GEOTECHNIQUE SA. (1995a): EIE-Impact sur les eaux souterraines: multitraçage du 13 mars 1995. Service des Ponts et Chaussées du Jura, section route nationale, Delémont. Rapport inédit.
- MFR GEOLOGIE-GEOTECHNIQUE SA. (1995b): EIE-Impact sur les eaux souterraines, section 3. Service des Ponts et Chaussées du Jura, section route nationale, Delémont. Rapport inédit.
- MONBARON, M. (1975): Contribution à l'étude des cluses du Jura septentrional. Thèse, 208 p., Université de Neuchâtel.

**- Bibliographie -**

- MONBARON, M. (1984): Géothermie du pied sud du Jura; le problème de l'anomalie géothermique du Fossé rhénan méridional et de sa prolongation à travers le Jura. NEFF-CHYN. Rapport inédit.
- MONBARON, M. (1991): Etude géomorphologique du Noir-Bois. Routes nationales suisses N16, Service des Ponts et Chaussées du canton du Jura, Delémont. Rapport inédit.
- MONBARON, M. (1992): Etude géomorphologique du déversoir occasionnel du Voyeboeuf. Service des Ponts et Chaussées du canton du Jura, Delémont. Rapport inédit.
- MONTANDON, P.-E., MAGES, J.-F. & MISEREZ, J.-J. (1995): Etude de l'écoulement et de l'autoépuration du système karstique. COST65, Projet 3.1 La Ronde. Université de Neuchâtel.
- MOREL, G. (1976): Bilans hydrologiques mensuels (et leurs applications aux bassins karstiques). Bull. du CHYN n° 1, pp. 101-106. Neuchâtel.
- MUDRY, J. & BLAVOUX, B. (1987): Le tarissement des aquifères karstiques: période non influencée? Bull. du CHYN n°7, pp. 193-204. Neuchâtel.
- MUDRY, J. & BLAVOUX, B. (1988): Quelques propriétés des courbes flux chimiques-débit dans les aquifères karstiques. Actes troisième coll. d'hydrol. en pays calcaire, pp. 91-98. Besançon.
- MULLER, I. (1979): Premiers essais micro-sismiques appliqués à l'étude hydrogéologique du Karst Jurassien. Bull. du CHYN n° 3, pp. 41-53, 1979. Neuchâtel.
- MULLER, I. (1987): Rapport sur la prospection géophysique dans la commune de Rocourt. OEPN. Rapport inédit.
- MULLER, I. (1981): Prospection géophysique dans la commune de Grandfontaine (JU). Rapport inédit du CHYN pour l'OEPN.
- MULLER, I. (1982a): Première prospection électromagnétique VLF (Very Low Frequency) dans le karst en Suisse. Actes congr. nat. spéléol., Schwytz, 24-26.9.1982, pp. 173-181.
- MULLER, I. (1984): Rapport préliminaire concernant les problèmes hydrogéologiques soulevés par la construction de l'autoroute sur le territoire de la République et Canton du Jura.
- MULLER, I. (1986a): Rapport sur la prospection géophysique VLF-R et géoélectrique à Chevenez (JU). Rapport inédit.
- MULLER, I. (1986b): Rapport sur la prospection géophysique VLF-R et géoélectrique sur le territoire de la Commune de Montignez (JU). Geoconsulting SA., Grundbau Beratung AG., Berne. Rapport inédit.
- MULLER, I. & VOUILLAMOZ, P. (1971): Prospection sismique et spéléologique, grotte de Milandre. Cavernes n°1, avril 1971; Bull. de la section neuchâteloise de la Soc. suisse de spéléologie.
- MULLER, I. & TURBERG, P. (1989): Syndicat des améliorations foncières de Comol (SAF). Prospection géophysique dans la région Comol-Alle-Miécourt (JU). CHYN. Rapport inédit.
- MULLER, I. & CHRISTE, R. (1990): Prospection géophysique sur les sections 1 et 2 de la N16. CHYN. Rapport inédit.
- MUSY, A. (1994, 1995a, 1995b): Rapports intermédiaires d'expertise sur le contrôle des données pluviométriques et hydrométriques des bureaux RWB et MFR. N16 (sections 2,3,4). EIE-Impact sur les eaux souterraines, EPFL, Département de Génie rural, 1015 Lausanne. Rapports inédits.
- PALMER, J. & HOFFMEYER, P. (1994): Contrôle de données débitométriques sur plusieurs stations le long de la rivière Allaine (Ajoie, JU). Travail court, inédit, 3<sup>ème</sup> cycle en hydrologie et en hydrogéologie, CHYN.
- PANTILLON, P. (1993): Etude hydrogéologique du site expérimental du Maira. Travail de diplôme, CHYN.

### **- Bibliographie -**

- PARRIAUX, A. (1973): Prospection hydrogéologique par méthode électrique dans la région Alle - Frégiécourt - Charnaille, Ajoie. Rapport inédit.
- PAUPE, P. & AUBRY, D. (1995): Sondages des sections 2 et 3, communes de Boncourt et Porrentruy. Fouilles 1994. Document 32, Office du Patrimoine Historique, Porrentruy.
- PERRITAZ, L., MONBARON, M. & BRASEY, J. (1993): Géomorphologie et études d'impact: trois cas pratiques en Ajoie. Cahier de l'Institut de géographie de l'Université de Fribourg n°9, pp.131-156.
- POCHON, M. & SIMEONI, J.P. (1976): Comportement hydrodynamique, nature et rôle traceur des troubles argileux dans deux sources karstiques (Jura tabulaire, Suisse). Deuxième colloque d'Hydrologie en pays calcaire. Annales scientifiques de l'Université de Besançon, Géologie 3<sup>ème</sup> série, fascicule 25, p. 321.
- RWB SA (ROBADEY, WALTHER & BEUCHAT) (1991): Représentations graphiques de quelques événements pluvieux remarquables de 1990 à 1991 en Ajoie. N16 Transjurane, sections 1,2,3. EIE sur les eaux souterraines. Rapport inédit Service des Ponts et Chaussées, Delémont.
- RWB SA (ROBADEY, WALTHER & BEUCHAT) (1990-1992): Mesures des précipitations et des températures en Ajoie de 1989 à 1991. N16 Transjurane, sections 1,2,3. EIE sur les eaux souterraines. Rapport inédit Service des Ponts et Chaussées, Delémont.
- RWB SA (ROBADEY, WALTHER & BEUCHAT) (1994): Essai sur la pluie comme traceur naturel. N16 Transjurane, sections 1,2,3. EIE sur les eaux souterraines. Rapport inédit Service des Ponts et Chaussées, Delémont.
- RWB SA (ROBADEY, WALTHER & BEUCHAT) (1994): Mesures limnimétriques et débitmétriques sur les seuils de l'Allaine et du Voyeboeuf entre Alle et Porrentruy. Années 1992 et 1993. N16 Transjurane, section 4. EIE sur les eaux souterraines. Rapport inédit Service des Ponts et Chaussées, Delémont.
- ROSSI, P. (1994): Advances in biological traceurs technics for hydrology and Hydrogeology using by bacteriophages. Thèse, Université de Neuchâtel.
- ROSSI, P., GRETILLAT, P-A., MULLER, I. & ARAGNO, (1996, à paraître): Double essai de traçage dans l'Areuse à St-Sulpice (NE). Comparaisons de comportement des bactériophages et de la fluorescéine.
- SCHINDLER, B. -BUREAU (1974): Hydrogéologie et ressources en eau de l'Ajoie orientale. Données pour l'aménagement en eau potable du canton de Berne. DTEE, Berne.
- SCHINDLER, B. -BUREAU (1975): Données pour l'aménagement en eau potable du canton de Berne. Hydrogéologie et ressources en eau de l'Ajoie orientale. Direction des transports, de l'énergie et de l'économie hydraulique du canton de Berne (DTEE). Rapport inédit.
- SCHINDLER, B. -BUREAU (1977a & 1984): Commune de Boncourt. Zones de protection des puits, Les Lômennes, a) Rapport intermédiaire: plaine alluviale de l'Allaine, b) Rapport final: domaine karstique.
- SCHINDLER, B. -BUREAU & GROBET, D. (1977b): Commune de Comol. Essai de coloration à la décharge communale. Rapport inédit. B. Schindler.
- SCHINDLER, B. -BUREAU & GROBET, D. (1978): Pollution de la source de la Valletaine. Etude hydrogéologique. Rapport inédit. B. Schindler.
- SCHINDLER, B. -BUREAU & GROBET, D. (1980): Etude géologique; route T6, détournement de Grandgourt. Service des Ponts et Chaussées du Canton du Jura. Rapport inédit.
- SCHINDLER, B. -BUREAU (1982a): Commune de Frégiécourt. Zone de protection de la source de la Valletaine. Etude hydrogéologique. Rapport inédit. F. Flury.
- SCHINDLER, B. -BUREAU (1982b): Mise sous protection des captages communaux d'Asuel. Etude hydrogéologique, Commune d'Asuel. Rapport inédit. F. Flury.
- SCHINDLER, B. -BUREAU (1982c): Recherche d'eau par forage profond. Etude hydrogéologique. Commune de Bressaucourt. Rapport inédit. F. Flury.

**- Bibliographie -**

SCHINDLER, B. -BUREAU (1983): Etude hydrogéologique. Multitraçage sur le plateau de Bure. Rapport inédit. F. Flury.

SCHINDLER, B. -BUREAU (1984a): Etude hydrogéologique; zone de protection de la source du Betteraz. Rapport inédit. F. Flury.

SCHINDLER, B. -BUREAU (1984b): Etude géophysique pour un nouveau captage de la source du Betteraz. Rapport inédit. F. Flury et I. Müller.

SCHINDLER, B. -BUREAU (1985a): Projet de carrière à la Combe de Varu, Commune de Chevenez. Avis hydrogéologique. Rapport inédit. J.-P. Rey.

SCHINDLER, B. -BUREAU (1985b): Commune de Bressaucourt. Puits d'exploitation, Nappe karstique de Sous Chété. Etude hydrogéologique. Bureau Buchs et Plumey, Porrentruy. Rapport inédit. M. Borreguero.

SCHINDLER, B. -BUREAU (1985c): Avis sur le développement et la mise en valeur d'un réseau hydrométrique et météorologique dans le Canton du Jura (réseau d'observation N16).

SCHINDLER, B. -BUREAU (1986a): Assainissement de la place d'armes de Bure; traçage de la carrière de Mormont. Etude hydrogéologique. Rapport inédit. F. Schütz.

SCHINDLER, B. -BUREAU (1986b): Etude hydrogéologique; zone de protection de la source de la Vendline. Rapport inédit. F. Schütz.

SCHINDLER, B. -BUREAU (1986c): Mise sous protection de la source de la Golatte à Asuel. Etude hydrogéologique, Syndicat des Eaux de la Vendline (SEV). Rapport inédit. F. Schütz.

SCHINDLER, B. -BUREAU (1987a): Etudes géologique générale du tracé. Rapport N16, section 4.

SCHINDLER, B. -BUREAU (1987b): N16 Transjurane section 4. Reconnaissances géologiques et hydrogéologiques complémentaires 1987. Rapport inédit.

SCHINDLER, B. -BUREAU (1987c): Projet de construction d'une STEP, Commune de Montignez. Recherche de site d'injection des eaux usées. Essai de traçage à l'est de Montignez: Etude hydrogéologique. Rapport inédit. F. Schütz.

SCHINDLER, B. -BUREAU (1988a): Commune de Cornol. Zone de protection des captages. Etude hydrogéologique. Bureau d'ingénieurs Hofmann, Robadey et Walther SA., Porrentruy. Rapport inédit.

SCHINDLER, B. -BUREAU (1988b): N16 Transjurane section 4. 2ème étude géologique et hydrogéologique complémentaire janvier-mars 1988. Rapport inédit.

SCHINDLER, B. -BUREAU (1990): N16 Transjurane section 4, décharge de matériaux inertes Combe Vatelin. Etude hydrogéologique. Essais de traçage multiples. Rapport inédit. J.-F. Mages.

SCHINDLER, B. -BUREAU (1992a): N16 Transjurane sections 2 (Creugenat-Porrentruy W) et 3. Forages de reconnaissances. Rapport géologique en préparation. Service des Ponts et Chaussées du Jura, section route nationale, Delémont. Rapport inédit (en préparation).

SCHINDLER, B. -BUREAU (1992b): N16 Transjurane, section 4. Deux essais de traçage à Porrentruy: au Noir-Bois et à La Perche. Rapport inédit.

SCHINDLER, B. -BUREAU (1992c): Zones de protection de Fontenais. Etude hydrogéologique. Rapport inédit.

SCHMIDT, C. & KOBAYASHI, F.L. (1917): Geologisches Gutachten über das Projekt einer Tiefbohrung auf Steinkohle in der Gegend von Pruntrut. Basel, 1917.

SCHMIDT, C., BRAUN, L., PALTZER, G., MUELBERG, M., CHRIST, P. & JACOB, F. (1924): Die Bohrungen von Buix bei Porrentruy und Allschwil bei Basel. Beitr. Geol. Schweiz, geotechn. Serie (10. Lief.).

## - Bibliographie -

- SCHNEIDER, A. (1960): Geologie des gebietes von Siegfriedblatt Porrentruy (Berner Jura). Mat. carte géol. de la Suisse, NS 109/1960.
- SCHOTTERER, U. (1979): Tritium und 18-O Variationen einiger Quellen im Schweizer Jura. Bericht über die Herbsttagung 1979, Gruppe der schweizerischen Hydrogeologen, pp. 909-913.
- SCHOTTERER, U., OESCHGER, H., SIEGENTHALER, U. & STICHLER, W.: (1991): Environmental isotopes in precipitation and shallow aquifers. A sensitivity study of the impact of climate change on the water balance of small catchment areas in Switzerland.
- SCHUEPP, M. (1960): Klimatologie der Schweiz. C: Lufttemperatur. Beiheft zu den Annalen d. Schweiz. Meteor. Zentralanst.
- SCHWEIZER, H.U. (1968): Colorations dans la région de Boncourt-Bure. Le Jura 12 (2), pp. 22-27
- SCHWEIZER, H.U. (1969): Bericht über die im Dezember 1968 in der Ajoie bei Buix und Coeuve durchgeführten Kernbohrungen in Coeuve und Buix. Das Höhlensystem zwischen Boncourt und Bure. Analyses chimiques et niveaux piézométriques dans la nappe de Courtemaître.
- SCHWEIZER, H.U. (1970): Beiträge zur Hydrologie der Ajoie (Berner Jura). Beitr. zur Geol. der Schweiz-Hydrologie, 17/1970.
- SRAE (1982): Territoire de Belfort, Commune de Croix. Travaux de recherche d'eau. Rapport inédit. J.-P. Mettetal.
- SRAE (1991): Etude préliminaire à la restauration du Gland et de sa vallée. Service régional de l'aménagement des eaux de Franche-Comté, 136 p.
- STAHL GRETSCH, L.I. (1995): Le site moustérien de Pré Monsieur à Alle. travaux 1994. Document 35. Office du Patrimoine Historique, Porrentruy.
- TRIPET, J.-P., BRECHTBÜHLER, Y.-A., HAARPAINTNER, R.-T. & SCHINDLER, B. (1990): Hydrogéologie des milieux à faible perméabilité: étude des marnes aléniennes dans la galerie de reconnaissance du Mont-Terri (Jura). Bull. Soc. Neuch. Sci. Nat., t.113, pp. 179-189.
- TSCHOPP R. (1960): Geologie des Gebietes von Siegfriedblatt Miécourt (Berner Jura). Mat. carte géol. de la Suisse, NS 110/1960.
- TURBERG, P. (1991a): Quelques observations sur la prospection géophysique du milieu karstique par électromagnétisme "very low frequency-resistivity" (VLF-R 12 à 240 KHz). Bull. du CHYN n° 10, pp. 11-26. Neuchâtel.
- TURBERG, P. (1991b): Note brève. Modes d'utilisation de la prospection géophysique électromagnétique. Bull. du CHYN n° 10, pp. 27-34. Neuchâtel.
- TURBERG, P. (1993): Apport de la cartographie radiomagnétotellurique à l'hydrogéologie des milieux fracturés. Thèse, Université de Neuchâtel.
- TURBERG, P. & MULLER, I. (1992): La méthode inductive VLF-EM pour la prospection hydrogéologique en continu du milieu fissuré. 5<sup>ème</sup> colloque d'hydrologie en pays calcaire et en milieu fissuré, Neuchâtel. Annales scientifiques de l'Université de Besançon. Géologie, Mém. hors série n°11.
- VERNEAUX, J., BOUCHERON, G. & FAESSEL B. (1971): Etudes hydrobiologiques; I) Etude de l'Allaine; II) Etude du Doubs. Inventaire faunistique. Paris, 1971.
- WEA (1945): Etude hydrogéologique de Courgenay. Rapport inédit.
- WEA (1968): Sondages à Boncourt de 1965 à 1968. Rapport inédit.
- WEA (1978): Rapport hydrogéologique sur la construction d'un puits d'eau souterraine à Buix. Rapport inédit. G. Della Valle.

## **- Bibliographie -**

### **CARTES GEOLOGIQUES**

CHAUVE, P., MARTIN, J. & BAILLY, C. (1985): Carte géologique de la France 1:50 000, n° 475 Delle avec notice explicative. BRGM, Orléans.

DIEBOLD, P., LAUBSCHER, H.P., SCHNEIDER, A. & TSCHOPP, R. (1963): Atlas géologique de la Suisse 1:25 000. Feuille 1085 St-Ursanne. Notice explicative de H.P. Laubscher. Commission géologique suisse.

LINIGER, M. (1969): Atlas géologique de la Suisse 1.25 000. Feuille 1065 Bonfol. Notice explicative. Commission géologique suisse.

### **CARTES HYDROGEOLOGIQUE**

ALLER, L., BENETT, T., LEHR, J.H., PETTY, R.J. & HACKETT, G. (1987): DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK, EPA/600/2-87-036, 455 p.

BEAUDUC, P., CORNET, J. & JAVET, C. (1981): Carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. Delle 1:50'000 et 1:25:000, Service géol. régional de Franche-Comté.

BOUZELBOUDJEN, M. (1993): Cartographie hydrogéologique et systèmes d'écoulement souterrain. Rapport inédit du CHYN, février 1993, SHGN, OFEFP, Berne.

BOUZELBOUDJEN, M. (1994): Apport des systèmes d'information géographique dans le traitement et la restitution des cartes hydrogéologiques. Rapport inédit du CHYN, Juin 1994, SHGN, Berne.

BOUZELBOUDJEN, M. & ORNSTEIN, P. (1995a): Carte des essais de traçage des eaux souterraines du Canton de Neuchâtel 1:60'000. Développement d'une application sous ARC/INFO - ORACLE. Rapport Inédit, Centre d'Hydrogéologie, Groupe GIS Université de Neuchâtel, novembre 1995.

BOUZELBOUDJEN, M. & ORNSTEIN, P. (1995b): Cartographie hydrogéologique et ARC/INFO : Application à la carte hydrogéologique du Canton de Neuchâtel au 1:50'000 (réalisation et perspectives). Rapport Inédit, CHYN, Groupe GIS Université de Neuchâtel, novembre 1995.

CIVITA, M. (1990a): La valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Proc. 1st Conv. Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologia e Obiettivi", Marano sul Panaro, v.3, pp. 39-86.

CIVITA, M. (1990b): Legenda unificata per le carte della vulnerabilità all'inquinamento dei corpi idrici sotterranei/Unified legend for the aquifer pollution vulnerability maps. G.N.D.C.I.-C.N.R. Pubbl. n. 276, Pitagora Editrice Bologna, 13 p.

CIVITA, M. (1993): Ground water vulnerability maps: a review. Proc. IX symp. on Pesticide Chemistry "Degradation and Mobility of Xenobiotics", Piacenza, Italy, October 11-13, 1993, Edizioni "Biagini", Lucca, Italy, pp. 587-631.

CIVITA, M., FISSO, G., GOVERNA, M.E. & ROSSANIGO, P. (1992): Carta della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento, Pianura di Vercelli. Sistema informat. territor. e ambient. Provincia di Vercelli, edizione via ARC/INFO, CSI Piemonte (5 maps 1: 50 000).

DODO, A. & BOUZELBOUDJEN, M. (1992): Eléments pour la carte hydrogéologique du bassin de l'Irhzer, Niger. Bulletin BRGM Hydrogéologie, Orléans, n°1-2.

JACOBSON, G., LAU, G.C., MCDONALD, P.S. & JANKOWSKI, J. (1988): Hydrogeology and groundwater resources of the Lake Amadus and Ayers Rock region, Northern Territory. Bureau of Mineral resources, geology and geophysics, Canberra, Australia, bull. 230.

KIRALY, L. (1973): Notice explicative de la carte hydrogéologique du Canton de Neuchâtel. Supplément du Bull. Soc. Neuch. Sci. Nat., 96.

### **- Bibliographie -**

- KÜNDIG, R., LINIGER, M., PFIRTER, U & LAUBER, L (1992): Carte hydrogéologique de la Suisse au 1:100 000, Bienne, feuille 31 de la carte nationale Suisse. Commission Géotechnique Suisse, ETH Zentrum, Zürich.
- PALOC, H (1972): Carte hydrogéologique de la région des grands Causses. Notice explicative. Atlas hydrogéologique du Languedoc-Roussillon au 1: 200 000, BRGM.
- PALOC, H. (1975): Cartographie des eaux souterraines en terrains calcaires. Hydrogeology of Karstic terrains, chap.XI, pp. 137-148. IAH, Burger et Dubertret.
- STRUCKMEIER, W.F. & MARGAT, J. (1995): Hydrogeological Maps. A Guide and a Standard Legend. International Contributions to Hydrogeology, AIH, vol. 17.
- TOLLO, D., BOUZELBOUDJEN, M. & ORNSTEIN, P. (1995): Banque de données des essais de traçage des eaux souterraines du Canton de Neuchâtel: développement d'une application sous Oracle. Rapport Inédit, CHYN, Groupe GIS Université de Neuchâtel, mars 1995.
- VRBA, J. & ZAPOROZEC, A. (1994): Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International Contributions to Hydrogeology, Vol. 16.
- WEA (1981): Hydrogeologie Laufenthal
- UNESCO (1983): International legend for hydrogeological maps. Revised edition Paris, 1983

### **AUTRES REFERENCES NON-SPECIFIQUES A L'AJOIE**

- BALDERER, W.(1986): Signification de l'âge moyen de l'eau souterraine donné par les isotopes radioactifs. Bull. CHYN n°6, pp. 43-66. Neuchâtel, 1986.
- BEAUDOING, G., ASTRUC, J.-G., BARADAT, J.-M., BOUZIGUES, M., COUSTOU, J.-C., GETTO, D., RICARD, J., SAUTY, J.-P., TARISSE, A. & VICENTE, A. (1988): Méthodologie des traceurs appliquée à la détermination des paramètres de transfert de l'eau et du pouvoir auto-épurateur des réseaux karstiques. Actes quatrième coll. d'hydrol. en pays calcaire, pp. 1-8. Besançon.
- BLAVOUX, B. & MUDRY, J. (1990): Les teneurs en oxygène-18 en fonction de l'altitude des impluviums des réservoirs karstiques du Jura et du Vaucluse. Mém. du 22ème congrès de l'AIH, vol. XXII, Lausanne, 1990, pp.331-338.
- DODGE, E.D. (1983): Hydrogéologie des aquifères karstiques du Causse Comtal (Aveyron, France). Thèse Université libre de Bruxelles.
- EISENLOHR, L. (1995): Variabilité des réponses naturelles des aquifères karstiques. De l'identification de la réponse globale vers la connaissance de la structure de l'aquifère. Thèse, Université de Neuchâtel.
- FLURY, F., ALLEMANN, R. & LACHAT, R. (1991): Recherche d'eau par forages à Delémont. Résultats de la phase d'exploitation. Gaz, Eaux, Eaux usées, 12/91, pp. 841-849.
- GRETILLAT, P.-A., BOUYER, Y. & MULLER, I. (1986): Un exemple d'utilisation de la géophysique électromagnétique pour l'étude de la fracturation au nord de la source karstique de la Noiraigue (Jura neuchâtelois). Bull. du CHYN n°7, pp. 335-346. Neuchâtel.
- HARUM, T., LEDITZKY, H.P. & ZOJER, H. (1990): Utilisation de traceurs naturels pour la caractérisation de l'hydrodynamique et des changements temporaires dans deux systèmes aquifères karstiques. Mém. du 22ème congrès de l'AIH, vol. XXII, Lausanne, 1990, pp. 392-404.
- ITTY, J. & VINTAER, J. (1987): Contribution à l'étude géologique et hydrologique du haut bassin de l'Ain (Jura). Thèse, Besançon
- JACQUEMIN, P. (1984): Réponses hydrodynamiques des hauts bassins du Doubs et de la Loue. Simulation des écoulements; influence de l'enneigement et de la traversée du lac St-Point; étude des pertes du Doubs. Thèse, Sciences, Besançon, 462, 169 p.

**- Bibliographie -**

- KIRALY, L. & MOREL, G. (1976): Remarques sur l'hydrogramme des sources karstiques simulés par modèles mathématiques. Bull. du CHYN n° 1, pp. 37-60. Neuchâtel.
- KUBLER, B. (1987): Minéralogie des suspensions et des colmatages dans les karsts jurassiens: circulation, filtre naturel, interprétation. Bull. du CHYN n° 7, pp. 1-12. Neuchâtel.
- KUBLER, B., POCHON, M. & SIMEONI, J-P. (1978): Les troubles des eaux karstiques: implication de l'hydrogéologie et de la minéralogie, pédologie, sédimentologie et géochimie. Symp. I.H.E.S., Montpellier.
- KULLIN, M. & SCHMASSMANN, H. (1990): Continental and altitude (temperatures) effects on  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$  in Switzerland and adjacent regions. Mém. du 22ème congrès de l'AIH, vol. XXII, Lausanne, 1990, pp. 339-346.
- LAUBSCHER H-P. (1966): Zur Kinematik und Dynamik des nördlichen Rheintalischen Juras. Eclogae geol. Helv. 59/2, pp. 957-959.
- LEPILLER, M. & MONDAIN, P.H. (1986): Les traçages artificiels en hydrogéologie karstique. Mise en oeuvre et interprétation. BRGM, Hydrogéologie n° 1, pp 33-52, 1986.
- MANGIN, A. (1975): Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse. Annales de spéléol., n° 29, pp. 285- 332 et 495-601, n° 30, pp. 21-124.
- MANGIN, A. (1977): Le karst et son originalité définie à partir des résultats obtenus par l'hydrodynamique. Spéléon, n°23, pp. 59-65.
- MARIOTTI, A. & LANDREAU, A. (1985): Etude du transfert et de l'évolution des nitrates dans les aquifères au moyen du traçage isotopique naturel  $^{15}\text{N}$ . Hydrogéologie n°1, 1986, p.77-86.
- MIJATOVIC, B.F. (1975): Exploitation rationnelle des eaux karstiques. Hydrogeology of Karstic terrains, chap. X, pp. 123-135. IAH, Burger et Dubertret.
- MISEREZ, J-J. & SIMEONI, G-P. (1976): Essai sur le pouvoir d'autoépuration des eaux karstiques. CHYN. Rapport inédit.
- MUDRY, J. (1982): Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère karstique de la Fontaine de Vaucluse (S:E: de la France) à partir des analyses physico-chimiques hebdomadaires (cycle 1981-82). Actes troisième coll. d'hydrol. en pays calcaire, pp. 191-203. Besançon.
- MUET P. (1989): Hydrogéologie du nord-est du causse de Martel (Corrèze). Hydrogéologie, 1989/1, pp. 27-44.
- MULLER, I. (1982b): Résultats préliminaires de sondages géophysiques pluridirectionnels (résistivité, polarisation instantanée) à la Baume (Jura neuchâtelois). Bull. soc. neuch. sci. nat., vol. 105, pp. 191-204.
- MULLER, I., FISCHER, G. & LE QUANG, B.V. (1983): Vlf ground surveys, a powerful tool for the study of shallow two-dimensional structures. Geophysical Prospecting, 31, pp. 977-991.
- OESCHGER (1972): Die Möglichkeiten der Isotopen Hydrologie, Datierung mit Hilfe von Edelgasisotopen. Gaz-Eaux-Eaux usées, 52<sup>ème</sup> année, 9/1972.
- OPHORI, D.U. & TOTH, J. (1990): Relationships in Regional Groundwater Discharge to Streams: an Analysis by Numerical Simulation. Journal of Hydrology, 119, pp. 215-244.
- PARRIAUX, A., LISZKAY, M., MULLER, I. & DELLA VALLE, G. (1988): Guide pratique pour l'usage des traceurs artificiels en hydrogéologie. Société Géologique Suisse-Groupe des Hydrogéologues.
- PARRIAUX, A., DUBOIS, J-D & MANDIA, Y. (1990): Persistance des traceurs fluorescents dans les nappes d'eaux souterraines. Hydrogéologie n°3, 1990, pp. 183-194.
- PASQUIER, F. (1982): Inventaire des sources les plus importantes du Jura NW. Bull. du CHYN n°4, pp. 259-270. Neuchâtel.

**- Bibliographie -**

- ROSSIER, Y & FISCH, H. (1991): Modélisation du transport de matière par l'utilisation d'un modèle "boîte noire". Bull. du CHYN n°10, pp. 63-72.
- ROSSIER, Y & KIRALY, L. (1992): Effet de la dilution sur la détermination des dispersivités par interprétation des essais de traçage dans les aquifères karstiques.
- SCHOTTERER, U., MULLER, I. & OESCHGER, H. (1987): Réflexions sur le comportement des "blocs" capacitifs, peu perméables, dans le karst, étudié en période d'étiage à la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois). Bull. CHYN n° 7, pp. 247-252. Neuchâtel.
- SCHOUWEY, V. (1990): Comparaison des paramètres physico-chimiques de quatre sources karstiques (Préalpes fribourgeoises et Jura neuchâtelois). Bull. du CHYN n° 9, pp. 67-80. Neuchâtel.
- SEGUIN, J.-J. (1986): Cartographie automatique en hydrochimie. Application aux teneurs en nitrates de la nappe de la Craie du département de l'Aisne. Hydrogéologie n°3, 1986, pp. 269-280.
- SIEGENTHALER, U. (1972): Bestimmung der Verweildauer von Grundwasser im Boden mit radioaktiven Umweltisotopen ( $^{14}\text{C}$ , Tritium). Gaz-Eaux-Eaux usées, 52<sup>ème</sup> année, 9/1972.
- THIERRIN, J. & MULLER, I. (1988): La méthode VLF-résistivité multifréquence, un exemple d'exploration hydrogéologique dans un synclinal crétacé à la Brévine (Jura NE). Quatrième colloque d'hydrologie en pays calcaire. Besançon, 1988, in Ann. sci. Univ. Besançon.
- THIERRIN, J. (1990): Contribution à l'étude des eaux souterraines de la région de Fribourg (Suisse occidentale). Thèse, Université de Neuchâtel.
- VEUTHEY, F. (1986): Méthodes d'investigation et de surveillance des pollutions liées aux décharges. Verband Schweizerischer Abwasserfachleute, Verbandbericht Nr. 314, 6.86.
- ZWAHLEN, F., BURGER A., THIERRIN, J., LAVANCHY, Y., OESCHGER, H. & SCHOTTERER, U. (1990): ISHYDRO, projet de recherche sur l'application des traceurs hydrochimiques et isotopiques naturels à l'étude des écoulements souterrains. Mém. du 22ème congrès de l'AIH, vol. XXII, Lausanne, 1990, pp. 263-272.

# **A N N E X E S**

- 1. Description des méthodes utilisées en Ajoie**
- 2. Présentation des résultats géophysiques  
et isotopiques**
- 3. Listes descriptives des réseaux d'observation  
hydrologiques**
- 4. Annuaire des débits journaliers de trois  
sources karstiques de 1989 à 1991**

## ***ANNEXE 1***

### **1. DESCRIPTION DES MÉTHODES UTILISÉES EN AJOIE**

- 1.1 Méthodes géophysiques**
- 1.2 Acquisiteurs de données Madd**
- 1.3 Jaugeages**
- 1.4 Interprétation des hydrogrammes**
- 1.5 Principes des méthodes isotopiques**
- 1.6 Interprétation des paramètres physiques**
- 1.7 Interprétation des essais de traçage**

## ANNEXE 1

### DESCRIPTION DES METHODES UTILISEES EN AJOIE

#### 1. DESCRIPTION DES METHODES GEOPHYSIQUES

##### 1.1 Méthodes électromagnétiques

###### 1.1.2 Introduction

Les méthodes électromagnétiques sont utilisées dans les études de la karstification dans les calcaires ainsi que dans la prospection des formations quaternaires. Certains problèmes sont rencontrés avec les équivalences électriques: des graviers superposant des calcaires ne sont pas toujours différenciables. D'autres méthodes (sismique) permettent souvent de lever les doutes, mais ce n'est pas toujours le cas. La présence de conduites métalliques et électriques, enterrées ou non, perturbe régulièrement les mesures électromagnétiques.

###### 1.1.2 VLF-R

Cette méthode utilise les propriétés des ondes électromagnétiques de basses et très basses fréquence (Very Low Frequency), de 12 à 240 khz, pour mesurer la résistivité apparente du sous-sol, à différentes profondeurs. Le VLF-R est un récepteur permettant de capter plus de 70 émetteurs répartis dans toute l'Europe. Le signal reçu comporte une composante électrique et une composante magnétique. La composante magnétique est captée par une bobine d'induction de 50 cm de diamètre. La composante électrique est mesurée perpendiculairement au champ magnétique, par deux électrodes plantées dans le sol et toujours séparées de 5 m. On en déduit la résistivité apparente et la phase. Ce dernier paramètre est déterminé par le décalage de phase entre les champs électrique et magnétique.

Dans un sol homogène la phase atteint 45°. Si un terrain conducteur surmonte un terrain résistant, la phase mesurée sera inférieure à 45° et supérieure dans le cas inverse. Les calcaires et les graviers sont considérés comme terrains résistants (150-1000 ohm.m) alors que les argiles et les marnes sont de bons conducteurs électriques (20-80 ohm.mètres).

Les mesures VLF-R peuvent être effectuées de deux manières selon le but de la prospection:

- sondages multifréquences pour déterminer ponctuellement la lithologie du sous-sol;
- sondages pluridirectionnels pour étudier la fissuration des roches sous-jacentes.

Les mesures peuvent être effectuées dans plusieurs directions (2-5) selon le lieu où se trouve l'émetteur. Les fissures, accidents tectoniques,..., sont détectés par les contrastes de résistivité avec la roche encaissante. L'exemple le plus courant est une roche résistante (calcaire) traversée par des fractures ouvertes, partiellement ou totalement colmatées par des dépôts conducteurs. On parle de polarisation H si la mesure est faite perpendiculairement à la fracture et de polarisation E si elle est faite parallèlement. On recherche la direction de la polarisation E pour déterminer la direction d'un réseau de fissures karstifiées. La profondeur d'investigation (P) du VLF est proportionnelle à la fréquence de l'onde (F) et à la résistivité apparente mesurée (Ra):

$$P = 503 \cdot (Ra/F)^{0.6}$$

Pour de marnes à 20 ohm.m et un émetteur à 20 khz, P avoisine 16 m alors que pour un calcaire de 500 ohm.m, P peut atteindre 80 m.

###### 1.1.3 Bipôle (EMB)

A la différence du VLF-R, le bipôle est indépendant d'émetteurs extérieurs (propre production de courant) et il n'y a aucun contact au sol. Le bipôle produit un courant alternatif envoyé sur la bobine émettrice. Le champ magnétique primaire (Hp) qui en résulte pénètre dans la roche et y induit de faibles courants qui créent à leur tour un champ secondaire (Hs), détecté par la bobine réceptrice. Les fréquences utilisées pour engendrer le courant inducteur varient de 128 à 8192 Hz. Le bipôle établit la relation entre les champs primaire et secondaire. Ce rapport est exprimé en pourcent de in-phase et out-phase.

Moins mobile que le VLF-R, le bipôle permet d'atteindre des profondeurs d'investigation de l'ordre de 100 à 180 m, indépendamment de la nature de la roche. Avec un sondage de fréquence, on augmente la distance entre les bobines émettrice et réceptrice tout en diminuant la fréquence, on atteint ainsi la profondeur voulue. Cette profondeur vaut 1.5 fois la séparation des bobines (en situation horizontale). La résistivité apparente est ainsi donnée pour huit profondeurs différentes.

Le bipôle peut aussi être utilisé comme les trainés géoélectriques, en maintenant fixe la distance entre les bobines. Ce dispositif est très efficace dans les régions karstiques pour déceler les accidents tectoniques. Le bipôle mesure deux paramètres qui sont les pourcents de in-phase et de out-phase. Dans une roche homogène, la différence entre ces deux paramètres est pratiquement nulle.

La présence d'une faille augmente l'écart de ces paramètres (méthode de Slingram).

## 1.2 Méthodes sismiques

### 1.2.1 Introduction

Si la sismique est couramment utilisée pour évaluer l'épaisseur, la nature et l'extension des formations quaternaires (aquifères alluviaux), elle permet également de localiser des zones particulièrement karstifiées. La proximité d'activités plus ou moins intenses (avions, travaux agricoles, trafic routier et ferroviaire) entraînent des perturbations très désagréables sur les signaux sismiques.

### 1.2.2 Sismique réfraction

Cette méthode est basée sur la vitesse de propagation d'ondes longitudinales dans le sous-sol. Le principe réside dans la mesure du temps de déplacement des ondes réfractées entre un impact ponctuel au sol (marteau, explosion, etc...) et un récepteur de choc (géophone). L'onde de choc se déplacera plus rapidement dans un calcaire compact (3000 m/s) que dans un sol (400 m/s) ou un gravier (1500 m/s).

Lors d'un tir sismique, le dispositif de mesures comprend une série de géophones (6, 12 ou plus), implantés à des distances croissantes de l'impact. Chaque géophone est relié à un sismographe portable (OYO, Mc SEIS-150 (6 pistes) et 170 (24 pistes) qui intègre et enregistre toutes les données: départ de l'impact, arrivées des ondes de tous les géophones. Cet impact peut être fourni de plusieurs manières selon la profondeur d'investigation désirée: masse de plus de 5 kg sur plaque de fonte, tir avec une arme à feu de type Buffalo-Gun, calibre 10.

**Tableau 1:**

*Vitesses sismiques de quelques types de roches*

| FORMATION            | VITESSE (m/s) |
|----------------------|---------------|
| Terrain meuble (sol) | 220-400       |
| Alluvions sèches     | 600-1200      |
| Alluvions humides    | 1600-2400     |
| Argiles              | 1800-2200     |
| Marnes               | 2000-3000     |
| Calcaires            | 3000-6000     |

La dromochronique est la représentation graphique des différents temps de déplacement. On en tire les vitesses de propagation des ondes dans les couches et leur épaisseur.

Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs des vitesses de propagation des ondes élastiques rencontrées dans les formations les plus courantes.

## 2. SYSTEME D'ACQUISITION DE DONNEES MADD

### 2.1 Introduction

Deux systèmes ont permis d'effectuer des mesures en continu. Le système "classique" permet l'enregistrement des hauteurs d'eau sur papier (limnigrammes). L'appareil est de marque Ott et les hauteurs d'eau sont données par un flotteur relié à l'enregistreur. Un nouveau système de mesures prend une place de plus en plus importante depuis quelques années avec le développement de l'informatique. Ce système permet l'enregistrement des mesures sur support magnétique (disquette ou cassette) et le traitement directement sur ordinateur. Les appareils de type MADD (Etrélec) ont été choisis et ont largement équipé le réseau d'observation hydrométéorologique.

### 2.2 Description des Madd

Le système Madd offre deux possibilités:

a) la première permet d'effectuer des mesures avec un pas de temps choisi;

b) la deuxième fonctionne sur le mode événement, où chaque impulsion extérieure (pluie p.ex.) est enregistrée avec la date et l'heure.

a) Pour l'hydrométrie (cours d'eau superficiels et eaux souterraines) le Madd comprend une ou plusieurs sondes (conductivité, température et pression: CTP) reliée(s) à un acquiiseur de données fonctionnant sur piles. Les mesures sont stockées sur une cassette mémoire, vidangées chaque mois sur ordinateur et traitées. Les mesures sont effectuées toutes les 15 minutes (pour les trois paramètres simultanément). Cependant, sur les sites où le niveau d'eau fluctue rapidement (en rivière), une moyenne de 10 mesures effectuées sur 15 minutes est calculée et enregistrée sur la cassette.

b) Pour la pluviométrie, le Madd est relié à un pluviomètre à auget basculant d'une contenance de deux dixièmes de mm, alors que l'ouverture du pluviomètre est de 400 cm<sup>2</sup>. Un système de chauffage réglé par un thermostat (entre 4 et 6 °C) a été installé sur chacun des pluviomètres.

### 3. JAUGEAGES

#### 3.1. Jaugeages chimiques ou méthodes de dilution

Une quantité donnée de substance est injectée dans le cours d'eau à jauger. Le débit est ensuite calculé en fonction du degré de dilution de la substance, mesurée à l'aval. Parmi les substances utilisées, on trouve le sel de cuisine (NaCl), le chlorure de potassium (Kl) et des traceurs fluorescents (uranine). Notre choix s'est porté sur le NaCl, plus facile et plus rapide à mettre en oeuvre. L'augmentation de la concentration de sel dans l'eau est facilement mesurée par un conductivimètre. Le cours d'eau doit comporter suffisamment de turbulence ou être assez long pour permettre un mélange homogène du sel dans l'eau.

Il existe deux méthodes de dilution.

**1° Injection de sel à débit constant.** Une solution de sel, de concentration ( $C_1$ ) connue, est injectée à un débit ( $q_1$ ) maintenu constant. A l'aval, la concentration de sel mesurée ( $C_2$ ) doit atteindre un palier pendant un certain temps. Le débit  $Q_2$  est calculé par l'équation

$$Q_2 = q_1 \cdot C_1 / C_2$$

**2° Injection instantanée** (méthode par intégration). Un volume connu de sel ( $P$ ) est injecté dans le cours d'eau. A l'aval, le passage du sel peut être contrôlé de deux manières:

- a) pompage continu dans le cours d'eau: le temps de passage est réglé par un conductivimètre; puis on mesure la concentration moyenne (conductivité moyenne) de la résultante du pompage (mélange);
- b) enregistrement continu de la conductivité (par un Madd par exemple) puis intégration des conductivités.

Les paramètres à mesurer sont la quantité de sel (en kg), la conductivité avant l'injection du sel ( $K_0$ ), la conductivité moyenne ( $K_m$ ) lors du passage du sel et le temps de passage du sel  $T$  (temps décimal en minutes). Sachant qu'un gramme de sel dans 10 litre d'eau entraîne une augmentation de la conductivité électrique de l'eau de 173  $\mu$ S (étalonnage en laboratoire pour des eaux entre 400 et 600  $\mu$ S), on calcule le débit  $Q$  avec la formule:

$$Q \text{ (l/min)} = P \cdot 1.73 \cdot 10^6 / (K_m \cdot K_0) / T$$

Cette formule est tirée de la relation  $Q_1 \cdot C_1 = Q_2 \cdot C_2$  où  $C_1$  et  $C_2$  sont les concentrations de sel en amont et en aval. Les débits maxima qui peuvent être mesurés par cette méthode de jaugeage au sel sont de l'ordre de 50 000 l/min. Avec des débits supérieurs, les quantités de sel utilisées sont trop élevées pour obtenir de bons mélanges.

#### 3.2 Canne de Jens

La canne de Jens se compose d'un axe autour duquel s'articule un bâton vertical indiquant la profondeur de l'eau et d'un balancier qui lui est perpendiculaire. La méthode consiste à mesurer les vitesses moyennes sur un certain nombre de verticales situées sur un profil perpendiculaire au courant. Chaque vitesse est déterminée à l'aide d'une abaque où figurent la hauteur d'eau et la force exercée sur la canne par le courant. Cette force est obtenue en déplaçant le balancier de la canne jusqu'à ce que le moment de rotation ramène la canne à la verticale (principe de l'équilibre des moments de rotation).

#### 3.3 Moulinet

A la différence de la canne de Jens (qui intègre les vitesses sur une verticale), on mesure des vitesses ponctuelles. Pour tenir compte de la répartition inégale des vitesses sur une section de mesure, celles-ci doivent être mesurées en un certain nombre de points. Ces points seront disposés sur des verticales bien choisies dans la largeur du profil. La vitesse ponctuelle est déterminée par le comptage des tours effectués par l'hélice du moulinet et par une fonction propre au moulinet. Cette fonction est établie dans une installation spéciale. Le débit cherché sur la section choisie sera ensuite calculé par l'intégration des vitesses sur chaque verticale puis sur toute la section mouillée.

## 4. INTERPRETATION DES HYDROGRAMMES

Un certain nombre de paramètres permettent de caractériser les aquifères karstiques. Le débit est un élément très important, mais il est souvent entaché d'une plus ou moins grande erreur. Cette erreur provient de plusieurs facteurs:

- appareil de mesure (Madd ou conventionnel à flotteur);
- établissement de la courbe de tarage (jaugeages et lissage de la courbe);
- complexité de l'exutoire (plusieurs sorties, pertes ou apports variables).

La distribution des débits classés renseigne sur le mode de décharge des eaux souterraines aux exutoires. L'utilisation des courbes de débits classés (Mangin, 1975) permet de discerner notamment la présence de trop-pleins ou d'apports par des pertes de cours d'eau: ces phénomènes se signalent au niveau de la courbe par une rupture de pente. Pour obtenir ce mode de représentation, on reporte les débits classés en abscisse (échelle logarithmique ou linéaire) et la fréquence de ces débits en ordonnée, d'après une loi probabiliste tirée de Laplace; les points devraient donc s'aligner sur une droite. Il faut cependant rester très prudent avec cette méthode. En travaillant sur des cycles isolés, des situations particulières (tarissement marqué, piégeage momentané de réserves) peuvent se produire et créer des discontinuités sur la courbe qui ne reflètent pas le fonctionnement du système sur plusieurs cycles. Seules les observations directes ou indirectes peuvent venir confirmer ou non l'interprétation de ces courbes.

Une autre approche consiste à étudier l'hydrogramme (enregistrement continu des débits) et en particulier celui de la décroissance des débits (Q). Désignée comme une courbe de tarissement, elle exprime l'hétérogénéité de l'alimentation et l'effet des réservoirs. Cette courbe peut être approchée mathématiquement par une équation (Maillet) de la forme:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

où  $\alpha$  est le coefficient de tarissement et vaut:  $\alpha = \log Q_0 - \log Q_t / (0.4343.t)$

$\alpha$  est exprimé en 1/j.

Le coefficient de tarissement d'une source varie au cours du temps, d'une crue à l'autre, selon l'état des réserves. Dans la comparaison entre plusieurs sources, le coefficient de tarissement est d'autant plus faible que les réserves sont plus grandes. Un grand déficit d'alimentation peut influencer l'état des réserves sur plusieurs années; la valeur de  $\alpha$  sera ainsi plus élevée qu'en situation normale et les débits diminueront plus rapidement à partir d'un débit donné. A partir de ces éléments, il est possible de faire une approximation grossière des réserves écoulables au début de chaque période de tarissement (temps t). Ces réserves (R) sont exprimées en mètres cubes dans l'équation suivante:

$$R = Q_0 \cdot 86400 / \alpha t$$

Le calcul du volume écoulable est sujet à une erreur importante. Mangin (1975) a calculé pour des coefficients de tarissements faibles, qu'une erreur de 3% sur les débits amenait une erreur de près de 70% sur le volume dynamique.

Les résultats acquis dans cette étude seront très relatifs étant donné la courte durée d'observation de l'ensemble des sources: cette durée n'atteint même pas deux cycles complets. Seul le cours d'eau principal, l'Allaine, comprend 6 cycles entiers.

## 5. PRINCIPES DES METHODES ISOTOPIQUES

### 5.1. Introduction

Certains corps simples possèdent plusieurs isotopes différents, stables ou radioactifs, de masse différente. L'oxygène-18 est un isotope stable de l'oxygène alors que le tritium est un isotope radioactif (instable) qui se désintègre avec le temps (demi-vie de 12.43 ans: la quantité de tritium diminue de moitié durant cette période).

### 5.2 Isotope $^{18}\text{O}$

L'oxygène-18 est un isotope lourd de l'oxygène, en proportion d'environ 1‰ de l'oxygène-16. Toutes les mesures d' $^{18}\text{O}$  sont exprimées par rapport au standard de l'eau de mer (SMOW (Standard Mean Ocean Water) selon la formule:

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}\{\text{éch.}\}) - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O}\{\text{standard}\})}{^{18}\text{O}/^{16}\text{O}\{\text{standard}\}} \cdot 1000 \text{ [‰]}$$

$^{18}\text{O}$  étant plus lourd que  $^{16}\text{O}$ , il se comporte différemment lors des changements d'état: évaporation condensation de l'eau. Lors de la formation des nuages au-dessus de l'océan, il s'effectue un fractionnement isotopique qui modifie le rapport oxygène-18 et oxygène-16. Le  $\delta^{18}\text{O}$  diminue dans la pluie avec l'éloignement des océans. Au même endroit, l'oxygène-18 étant plus lourd, sera en plus grande concentration dans la pluie que dans le nuage responsable de la pluie. Les nuages s'appauvrissent ainsi de plus en plus en oxygène-18 à l'intérieur des continents.

L'oxygène-18 dépend également de la température, il décroît avec la diminution de la température. L'oxygène-18 se raréfie ainsi avec l'altitude selon une relation le plus souvent linéaire. Cette relation n'est pas constante et varie d'une région à l'autre selon de nombreux facteurs (morphologie, microclimats, saisons, nature du terrain). On observe également des cycles annuels de concentrations en oxygène-18: valeurs basses en hiver et plus élevées en été. Ces valeurs peuvent aussi varier d'une année à l'autre selon l'évolution des températures (années froides alternant avec des années chaudes).

Les entrées d'oxygène-18 dans les eaux souterraines par l'effet des pluies permet ainsi d'obtenir des informations précieuses sur différents types d'aquifères. Des comparaisons peuvent donc être faites entre les entrées (pluies) et les sorties (sources) pour caractériser ces aquifères (notamment par l'altitude moyenne du bassin versant). Contrairement aux pluies, le suivi de l'oxygène dans les eaux souterraines ne doit pas nécessairement être mensuel, mais chaque période (chaude et froide) doit être représentée pour se caler sur les cycles atmosphériques.

### 5.3 Tritium ( $^3\text{H}$ )

La méthode du tritium est généralement utilisée pour déterminer le temps de séjour moyen des eaux souterraines. Nous verrons au chapitre 7 que pour l'Ajoie, cette possibilité est difficilement applicable. Par contre, la méthode nous permet de connaître les sources ou captages pollués par une décharge contenant du tritium, issu de l'industrie horlogère.

Le tritium est un isotope lourd radioactif de l'hydrogène. Sa concentration est exprimée en unité Tritium (UT) où 1 UT équivaut à un atome de Tritium pour  $10^{18}$  atomes d'hydrogène. La concentration de tritium diminue de moitié en 12 ans 5 mois. Les teneurs en tritium de l'atmosphère ont fortement augmenté suite aux explosions nucléaires entre 1953 et le début des années soixante. Les concentrations dans l'atmosphère ont atteint un maximum en 1963 (3000 UT). Avant 1953, les concentrations moyennes de tritium se situaient de 3 à 6 TU, alors que les valeurs actuelles ont atteint 20-30 TU. Localement, ces valeurs peuvent être plus importantes (pollution industrielles des régions de Berne, Neuchâtel, La Chaux-de-Fonds).

Les eaux souterraines contenant des valeurs inférieures à 10 TU peuvent donc être considérées d'âge antérieur à 1950.

On observe également des fluctuations saisonnières de Tritium avec des maxima au printemps et des minima en hiver. Ces variations sont causées par les échanges, qui ont lieu au printemps dans nos régions, entre la troposphère (réservoir de Tritium) et l'atmosphère.

## 6. INTERPRETATION DES PARAMÈTRES PHYSIQUES

La conductivité électrique de l'eau et la température figurent parmi les paramètres les plus importants dans la compréhension du fonctionnement d'un aquifère. La conductivité représente la minéralisation globale de l'eau.

Lorsque la conductivité diminue, l'aquifère est généralement alimenté par de l'eau fraîchement tombée et rapidement infiltrée. Cette eau n'a pas eu le temps de se charger chimiquement et va se mélanger au débit de base comprenant l'eau plus ancienne de l'aquifère. L'effet de la dilution et sa rapidité dépendent de l'importance de l'aquifère, de sa perméabilité, de la couverture (nature et épaisseur) que traverse l'eau de pluie en s'infiltrant dans le sol; la répartition spatiale et temporelle des précipitations détermine aussi sensiblement la minéralisation de l'eau à l'exutoire de l'aquifère. Un orage violent très localisé n'aura pas le même impact qu'une pluie répartie sur plusieurs jours dans l'ensemble du bassin. Le premier cas n'a souvent qu'un effet limité dans le temps, tant pour la conductivité que pour le débit.

L'augmentation de la conductivité se produit fréquemment au cours d'un étiage. Les circulations d'eau souterraine se font plus lente et l'eau s'enrichit (chimiquement) davantage au contact de la roche.

Sur un cycle annuel, l'amplitude des fluctuations de conductivité traduit aussi la sensibilité de l'aquifère aux diverses pollutions. Les aquifères karstiques sont ainsi plus exposés que les aquifères graveleux. Les vitesses d'écoulement y sont très différentes.

Bakalowicz (1979) indique dans sa thèse une approche intéressante dans l'interprétation de la conductivité. Sa méthode de distribution des fréquences permet de caractériser la nature de l'aquifère de chacune des sources étudiées, voire le degré de karstification. Elle donne une approche descriptive de l'aquifère par la comparaison de courbes. Celles-ci sont obtenues à partir des mesures de la conductivité sur une période donnée.

L'interprétation de la température est complémentaire à celle de la conductivité. Il y a généralement simultanément des maxima ou minima de température avec la dilution maximale. L'amplitude annuelle des températures montre aussi l'importance de l'aquifère et de son effet tampon. L'influence de la température de l'air sur celle de l'eau se fait avec un certain retard, dû à la structure de l'aquifère mais aussi à certains événements. Lorsqu'un aquifère est alimenté par les pertes d'un cours d'eau, sa température en subit nettement les effets, de manière plus ou moins retardée.

## 7. INTERPRETATION DES TRAÇAGES

Les essais de traçage nous apportent un autre type d'information sur les aquifères karstiques. Les résultats immédiats ("bruts") nous renseignent sur:

- l'étendue des bassins versants et de l'influence possible de foyers de pollution sur une source ou un captage public;
- l'éventuelle présence de liaisons hydrauliques entre ces bassins;
- le temps minimal de transfert d'après la date de réapparition;
- les vitesses de transit des eaux souterraines entre deux endroits, pour une situation donnée (hautes eaux, basses eaux, etc...);
- le taux de restitution du traceur pour autant que l'on possède le débit de l'exutoire lors de sa réapparition;
- la multiplicité de cheminements (courbes plurimodales en l'absence de crues).

L'interprétation des courbes de restitution des traceurs nous apportent des informations chiffrées sur la manière dont s'est effectué le transit. La structure et le fonctionnement de l'aquifère sont approchés par cette méthode. Le traceur se comporte très différemment si l'aquifère possède des conduits de grande dimension (type rivière souterraine) ou si l'aquifère n'est drainé que par un réseau de petites fissures. Dans le premier cas, le traceur arrivera à l'exutoire de manière concentrée dans le temps alors que dans le second, il sera dispersé et très étalé dans le temps, sa concentration maximale à l'exutoire sera d'autant plus faible.

La méthode d'interprétation est décrite en détail dans un rapport du CHYN sur la méthodologies des traceurs (Rossier, 1990). Les paramètres suivants peuvent être déduits d'un traçage effectué dans des conditions optimales

- $P_e$ , le nombre de Peclet (intensité de l'étalement du traceur dans le temps);
- $a$ , le coefficient de dispersion (quotient du trajet du traceur sur  $P_e$ );
- $u$ , la vitesse moyenne de transfert de l'eau;
- $L$ , la macro-dispersion (complexité géométrique du réseau perméable); ce paramètre est faible dans le cas d'un petit nombre de conduits bien développés; une abaque permet de comparer les différents aquifères ou un même aquifère dans des conditions hydrodynamiques différentes.

Dans le cas de courbes dissymétriques ou plurimodales (le traceur a emprunté plusieurs chemins distincts), la méthode permet leur décomposition en sous-courbes de restitution simples. Pour une courbe bi-modale, la première sous courbe pourra caractériser le déplacement dans des conduits karstiques (aspect convectif) et la seconde montrera l'importance des phénomènes de dispersion.

## **ANNEXE 2**

### **PRÉSENTATION DES RÉSULTATS GÉOPHYSIQUES ET ISOTOPIQUES**

**2.1 Présentation des résultats des mesures géophysiques**

**2.2 Présentation des résultats des mesures isotopiques**

## ANNEXE 2.1: PRESENTATION DES RESULTATS DES MESURES GEOPHYSIQUES

### 1. Prospection géophysique électromagnétique

#### 1.1 VLF-R: Very Low Frequency Resistivity

Les principaux secteurs de mesures VLF-R effectuées en Ajoie ont été reportés sur une carte au 1:100'000 (plus de 3300 mesures bi- ou tridirectionnelles (fig. 1 et tab. 1) à l'exception des mesures faites par Turberg dans le cadre de sa thèse (1993).

Les mesures effectuées exclusivement dans le cadre de cette étude sont présentées en annexe 5.3. Elles concernent les secteurs 1, 2, 3, 5, 6, 8 et 9 du tableau B.1. Plusieurs éléments qui ne facilitent pas la comparaison entre les mesures doivent être pris en compte:

- dans la plupart des cas (80 %), seules des mesures bidirectionnelles, NS et EW ont été effectuées (les deux principales directions de failles);
- les mesures n'ont pas toujours pu être faites avec les mêmes émetteurs. Selon l'émetteur choisi, la direction varie. La karstification n'est pas nécessairement la même à 20 m ou à 100 m de profondeur. Sachant que la profondeur d'investigation dépend de la nature de la roche, les mesures faites dans des mamo-calcaires (mames à Natica) engloberont un plus petit volume de roche que celles faites dans des calcaires plus compacts (Kimméridgien);
- la direction donnée par le VLF-R n'indique pas forcément la principale direction de drainage.

Le drainage peut aussi emprunter un petit nombre de fractures, dont la probabilité d'être recoupées par le VLF est faible;

- la mesure n'a pas la même valeur à proximité d'un accident ou à une certaine distance;
- d'après les constatations de Turberg (1991a), seules les mesures réalisées à des intervalles suffisamment serrés (moins de 25 m) sont à même de donner l'information nécessaire à une interprétation correcte des directions de karstification et de drainage.

Un certain nombre de forages liés à la transjurane ont été implantés d'après la géophysique, pour tester et calibrer les méthodes d'interprétation. Même si la localisation de nos stations de mesures n'a que très partiellement respecté les suggestions de Turberg (1991a), nous tenterons une rapide analyse des résultats (analyse de la fracturation par secteur).

#### **Principales directions de fracturation**

Sur certains secteurs (comme celui de Momont), si aucune direction principale n'est mise en évidence, un accident important apparaît et la zone révèle ainsi une fracturation généralement complexe. L'indication de la principale fracturation est fournie tout d'abord par la direction de la plus petite phase ( $\phi$  min), ensuite par la direction de la plus grande résistivité ( $\rho$  max). Mais l'hétérogénéité d'un calcaire sera plus facilement mise en évidence par la résistivité directionnelle. Les sites de mesures sont trop irrégulièrement dispersés en Ajoie pour donner une image représentative de l'anisotropie et des directions de karstification. Une carte de synthèse (peu illustrative) figure dans le rapport final de Lièvre et al. (1993).

Statistiquement et très grossièrement, la fracturation la plus fréquente mise en évidence par la géophysique est orientée E-W, alors que pour les grands accidents, la direction N-S est la plus fréquente.

#### **Plateau de Bure**

Sur une ligne allant du nord du Creugenat à l'ouest de Boncourt (tracé de la future N16), près de deux tiers des mesures montraient une fracturation principale dans la direction EW. Essentiellement situées sur le bassin du Saivu, ces mesures montrent une discordance certaine avec la direction principale de drainage N-S. On ne peut donc prendre l'ensemble des mesures toutes confondues et faire un bilan statistique global. En identifiant les zones les plus anisotropes, nous pensons mettre en évidence les secteurs clés de la vulnérabilité des eaux souterraines. Ils ne sont, hélas, déterminés que pour une surface réduite par rapport à l'ensemble du bassin de l'Allaine. Nous nous référons d'autre part aux résultats de Turberg pour le bassin du Saivu afin d'avoir une image plus correcte de la complexité de la fracturation. Les forages implantés sur des anomalies conductrices présentent tous des fractures perméables. Les traceurs injectés à ces endroits ont tous été retrouvés (Turberg, 1993).

**Dans des situations plus locales, le VLF-R a donné les résultats suivants (secteurs donnés d'après la figure 2):**

#### **Région de Courtemaîche (secteur 9)**

Pour la fracturation, l'interprétation des données de cette zone se révèle très délicate à cause de l'ampleur des perturbations recensées: ligne CFF, lignes électriques aériennes et souterraines, conduites d'eau du SEHA et autres conduites non identifiées. Un accident majeur, de direction N-S a cependant été localisé sur le versant ouest de la vallée, grâce à des anomalies décelées sur plusieurs profils et s'alignent selon une direction NS.

Dans la zone d'accidents de direction N-S, les mesures montrent paradoxalement une direction de fracturation perpendiculaire, soit E-W! Le même phénomène s'est produit pour d'autres accidents, à Rocourt notamment.

**Tableau 1**

*Inventaire des campagnes de mesures VLF-R en Ajoie  
dont la situation est reportée sur la carte au 1:100 000 de la figure 1*

| secteur | LIEU                       | responsable   | date    | AJ | * |
|---------|----------------------------|---------------|---------|----|---|
| 1       | Grandfontaine NE           | CHYN          | 1989    | AJ | * |
| 2       | Rocourt W                  | CHYN          | 1989    | AJ | * |
| 3       | Rocourt SE                 | CHYN          | 1989    | AJ | * |
| 4       | Chevenez S                 | Müller        | 1986    | -  | * |
| 5       | Courtedoux E               | CHYN          | 1989    | AJ | * |
| 6       | Bressaucourt W             | CHYN          | 1989    | AJ | * |
| 7A-B    | Porrentruy-Creugenat       | Schindler-A16 | 1990    | -  | - |
| 7B-C    | Creugenat-Boncourt         | MFR-A16       | 1990    | -  | - |
| 8       | Mormont                    | CHYN          | 1989    | AJ | * |
| 9A-9B   | Courtemaîche               | CHYN          | 1988-89 | AJ | * |
| 10      | Porrentruy N               | CHYN-camp     | 1990    |    | * |
| 11      | A16 Fontenais N            | Schindler-A16 | 1990    | -  | - |
| 12      | Porrentruy S               | CHYN-camp     | 1990    | -  | * |
| 13      | Courgenay NW               | CHYN-camp     | 1990    |    | * |
| 14      | Cornol-Miécourt            | CHYN-(MFR)    | 1989    | -  | - |
| 15      | Cornol                     | CHYN          | 1989    | AJ | * |
| 16      | Combe Vaumacon (W de Alle) | CHYN          | 1993    | TD |   |

*AJ: mesures effectuées dans le cadre de cette étude*

*TD: mesures effectuées dans le cadre du travail de diplôme 3è cycle de P. Adatte (1993)*

*\*: mesures annexées, effectuées par le prof. I. Müller*

*Les autres mesures figurent dans les rapports spécifiques pour la N16 (MFR et Schindler) et pour les améliorations foncières de Cornol (MFR). Les mesures effectuées par P. Turberg dans le cadre de sa thèse ont été indiquées par des carrés vides délimitant les secteurs prospectés.*

Nous avons tenté de déterminer des zones isodirectionnelles (phi min et rho max, cf. Turberg, 1991a, p.20), dans la plaine. Nous constatons qu'une partie importante des stations indique une direction de karstification E-W au milieu de la plaine, autour du puits central. Les zones de direction N-S sont plus localisées, notamment vers le puits sud.

Les résultats les plus intéressants de la prospection de Courtemaîche sont cependant fournis par les mesures de la phase:

- Les phases mesurées avec des fréquences de 200 Khz nous indiquent, par leurs faibles valeurs, une proportion importante de matières argileuses, tout au moins dans la tranche superficielle. Cette situation assure une certaine protection de la nappe alluviale contre les infiltrations indésirables.
- Les phases élevées mesurées avec des fréquences de 20 Khz signalent de leur côté la présence des marnes oxfordiennes à des profondeurs voisines de 30-50 m, moins profondes à l'ouest (village de Courtemaîche) qu'à l'est. Cette constatation va dans le sens de la présence d'une faille NS au milieu de la plaine, avec rejet vertical (remontée) d'un compartiment de l'Oxfordien dans le village.

#### **Région de Courtedoux (secteur 5)**

Le VLF-R n'a fait que confirmer la géologie (succession lithologique et failles E-W). Le seul élément marquant est la détection probable d'un des chenaux de l'Ajoulot, en amont du Creugenat. Des mesures effectuées à travers une vallée sèche (Combe-Ronde) ont certes indiqué des dépôts quaternaires plus importants dans le fond de la combe plutôt que latéralement, mais aussi de faibles anisotropies (calcaires peu karstifiés). **La genèse des vallées sèches ne passe donc pas forcément par une fracturation importante.** Les zones isodirectionnelles E-W prédominent largement entre Chevenez et Bressaucourt. Seules deux zones N-S sont localisées un peu à l'W et au SW du Trou du Creugenat

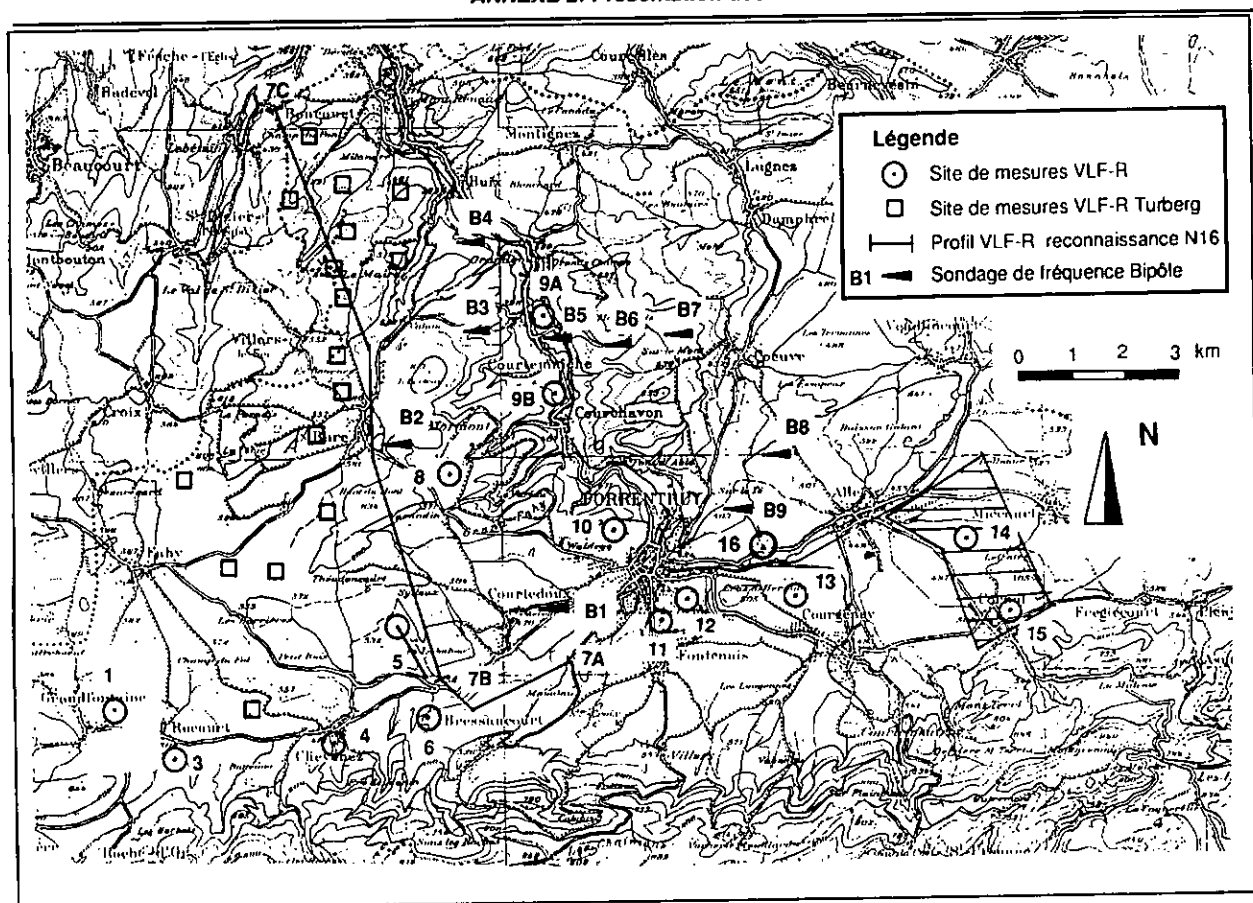


Figure 1

Emplacements des stations de mesures électromagnétiques VLF-R et Bipôle en Ajoie (profils, zones et sondages)

### Région de Rocourt (secteurs 1,2 et 3)

Les mesures ont été effectuées en juillet 1989, dans une zone sensée appartenir au bassin de l'Allaine. Des traçages ultérieurs (septembre 1990) ont révélé l'appartenance de toute la zone au bassin de la Doue. Plusieurs accidents N-S ont été détectés, dont un ne figure pas sur la carte de Delle, dans la semi-cluse de Rocourt - Réclère. Les mesures sont trop localisées pour établir des zones isodirectionnelles. Les faibles résistivités rencontrées notamment à l'est de Grandfontaine (combe latérale, La Ferouse) sont certainement dues aux marnes à Natica plutôt qu'à des dépôts quaternaires. En revanche, à l'est de Rocourt (vallée principale), des dépôts de 15-20 m d'alluvions argileuses sont détectés par le VLF-R.

### Région de Mormont (secteur 8)

L'interprétation des mesures confirme la présence d'une importante faille à rejet vertical (carte géologique Bonfol) traversant la "carrière-décharge" située dans la partie supérieure de la vallée sèche. Le compartiment sud (plus grande partie de la décharge) est abaissé par rapport au compartiment nord. Au sud de la faille, les marnes sont effectivement détectées à un niveau inférieur. Cette zone est particulièrement vulnérable, la décharge repose directement sur les calcaires karstifiés.

### Région de Cornol (secteur 15)

Les mesures faites dans cette région n'avaient qu'un intérêt lithologique, étant donnée la présence uniforme de Tertiaire peu perméable. La prospection avait pour but de vérifier l'hypothèse d'écoulements verticaux rapides vers le Malm sous-jacent en direction de l'exutoire probable du Betteraz. Le VLF-R et surtout le bipôle n'ont à aucun moment touché des calcaires, qu'ils soient du Malm ou d'une autre origine (calcaires d'eau douce du Tertiaire), sur les cents premiers mètres. Dans l'ensemble, les mesures (voir aussi Müller et Turberg, 1989) n'ont rencontré que des terrains très peu perméables recoupés parfois de chenaux un peu plus perméables (sables).

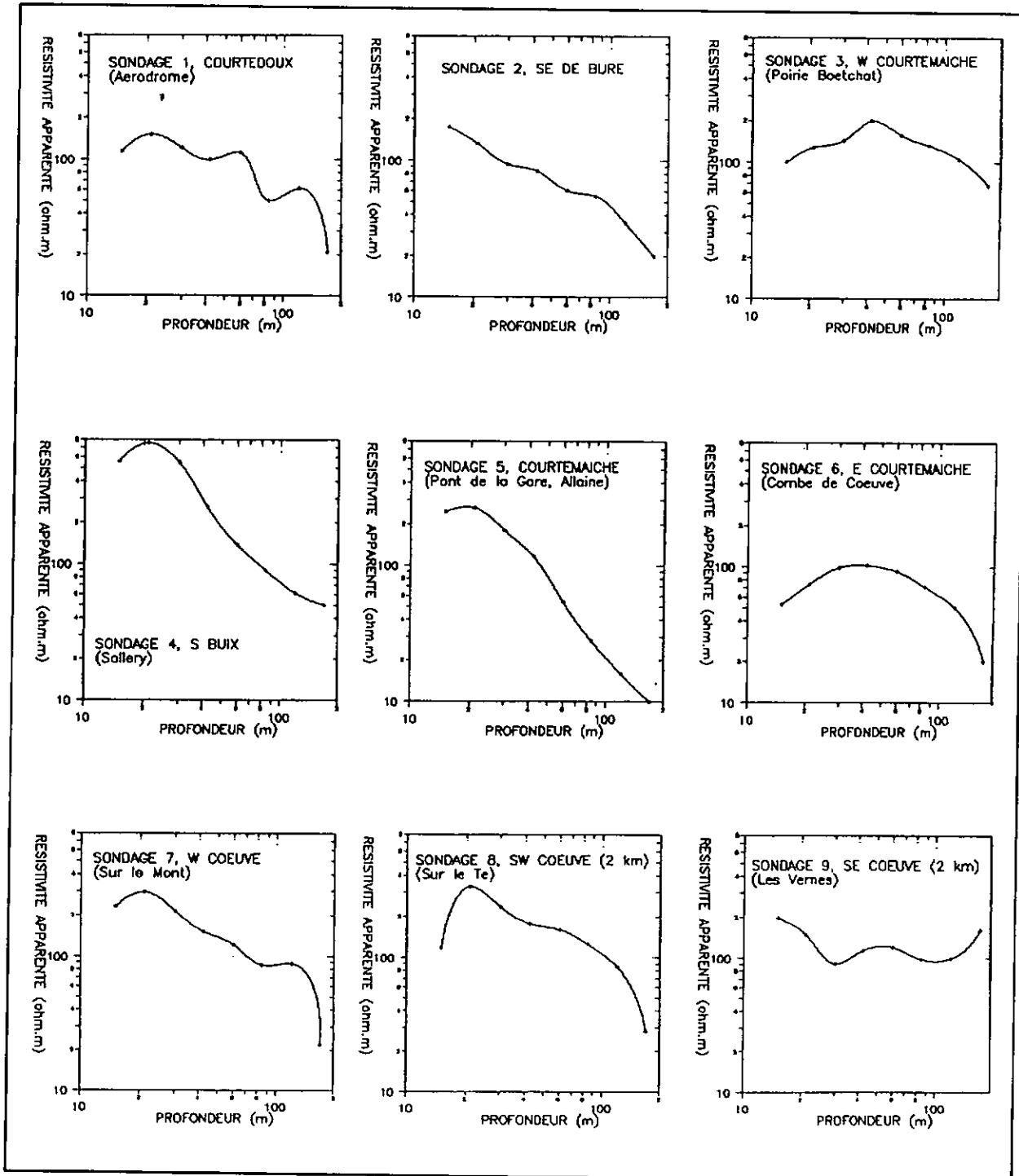
### Remarques

Les mesures électromagnétiques ont confirmé un certain nombre d'accidents NS mais ont également mis en évidence l'importance de la fracturation dans la direction EW. Ces deux remarques vont dans le même sens que les mesures de fracturation abordées au paragraphe 1.3.3 [failles et accidents majeurs]. Nous essaierons de voir dans la partie C dans quelle mesure la prospection VLF-R nous apporte des éléments essentiels à la compréhension du fonctionnement des aquifères karstiques.

## 1.2. Bipôle

La méthode du bipôle n'a pas été utilisée pour la fracturation (des trainés au bipôle auraient été nécessaires) mais uniquement pour la lithologie, avec des indications de la compacité des calcaires. La prospection bipôle devait apporter des informations complémentaires à l'élaboration de la carte structurale du toit de l'Oxfordien.

Neuf sondages bipôle ont été effectués en Ajoie (fig. 1) pour déterminer la présence de niveaux peu perméables (marnes à Ptérocères ou à Natica) ou imperméables (marnes oxfordiennes). Reportés en échelle semi-log, la plupart des sondages ont des résistivités apparentes décroissantes, montrant pour chacun la présence nette de terrains électriquement très conducteurs et hydrauliquement peu perméables (fig. 2).



**Figure 2**

Résultats graphiques des neuf sondages de fréquence bipôle effectués en Ajoie (juillet 1990).  
Evolution des résistivités apparentes en fonction de la profondeur

La plupart des sondages bipôle traversent le Séquanien inférieur et le Rauracien. Les résistivités atteignent 10 à 40  $\Omega$ m en fin de sondage. Les mames oxfordiennes sont détectées pour les sondages n° 2, 4, 5, 6, 7 et 8. Recoupées par un forage sur 20 m (TJBUR3, cf. vol.II, chap. 5.2), les mames à Natica n'apparaissent pratiquement pas sur le sondage bipôle n° 2, pourtant implanté à proximité.

Les sondages n° 4 (Sud de Buix) et n° 5 (plaine de Courtemaîche) atteignent rapidement les mames oxfordiennes (env. 40-50 m). Dans le sondage n° 6, situé un peu plus à l'est, la courbe en cloche indique la présence de calcaires (rauraciens) entre deux unités mameuses (l'une en surface pour les mames à Natica, l'autre en profondeur pour les mames oxfordiennes à plus de 120 m).

Les résistivités apparentes dans les calcaires sont relativement basses: 200-300  $\Omega$ m, sauf pour le sondage n° 4. Les calcaires sont donc peu compacts, probablement très fissurés voire bien karstifiés. Le sondage n° 4 (sud de Buix) traverse des calcaires plus compacts (résistivités entre 600 et 800  $\Omega$ m). De plus, les mames oxfordiennes sont déjà détectées à partir de 40 m de profondeur. Dans cette zone, aucun traceur n'a été retrouvé et les essais de traçage un peu plus éloignés de cette zone ont révélé des vitesses d'écoulement des eaux souterraines relativement basses pour le karst.

Le sondage n° 1, situé entre Courtedoux et Porrentruy, à proximité de la zone d'exutoire de la Beuchire, indique l'alternance de calcaires (en surface) et de mames (3 niveaux). La fin du sondage (20  $\Omega$ m) atteint probablement les mames à Natica (dès 120 m de prof.). Le premier niveau rencontré correspond aux mames à Ptérocéras, quant au second (env. 70 m), il est situé à la limite Kimméridgien - Séquanien (Oolithe de Ste-Vèrène).

Le sondage n° 9 (N Combe Vaumacon) est situé stratigraphiquement plus haut que le n°1. Tout en restant au-dessus des mames à Natica, il touche les deux niveaux mameux rencontrés dans le sondage n°1.

## Conclusion

Les méthodes électromagnétiques ont confirmé les principales directions de fissuration observées dans les affleurements, avec cependant une plus grande importance de la direction EW. Les anomalies VLF-R ne correspondent pas toujours aux vallées sèches; elles peuvent cependant expliquer pourquoi certains traceurs injectés dans des calcaires peu karstifiés n'ont pas été retrouvés. Les mesures géophysiques ont souligné l'importance des dépôts tertiaires de Comol et mis en relief la vulnérabilité des eaux souterraines dans le cas d'une décharges implantée sur une forte anisotropie VLF-R (Mormont).

## 2. Prospection sismique

### 2.1 Situation et méthode

Un article parut dans le bulletin du CHYN est consacré aux résultats des mesures sismiques effectuées dans la plaine de Courtemaîche. Nous allons reprendre ici les principales conclusions et la carte d'interprétation des épaisseurs d'alluvions quaternaires recouvrant les calcaires de l'Oxfordien.

Une cinquantaine de profils sismiques ont été effectués dans la plaine de Courtemaîche, la nappe alluviale sous-jacente étant l'une des principales ressources en eau de l'Ajoie. Les quantités d'eau pompées nécessitent cependant une alimentation artificielle (provisoire) mise en place depuis 1974. La prospection géophysique VLF-R s'est avérée peu appropriée à l'étude de ce type d'aquifère alluvial: les faibles épaisseurs d'alluvions (2 à 8 m) sur des calcaires résistants karstifiés ont constitué des équivalences électriques.

Lors des crues, on peut observer des phénomènes karstiques sur la bordure ouest de l'aquifère alluvial. La prospection microsismique avait pour but

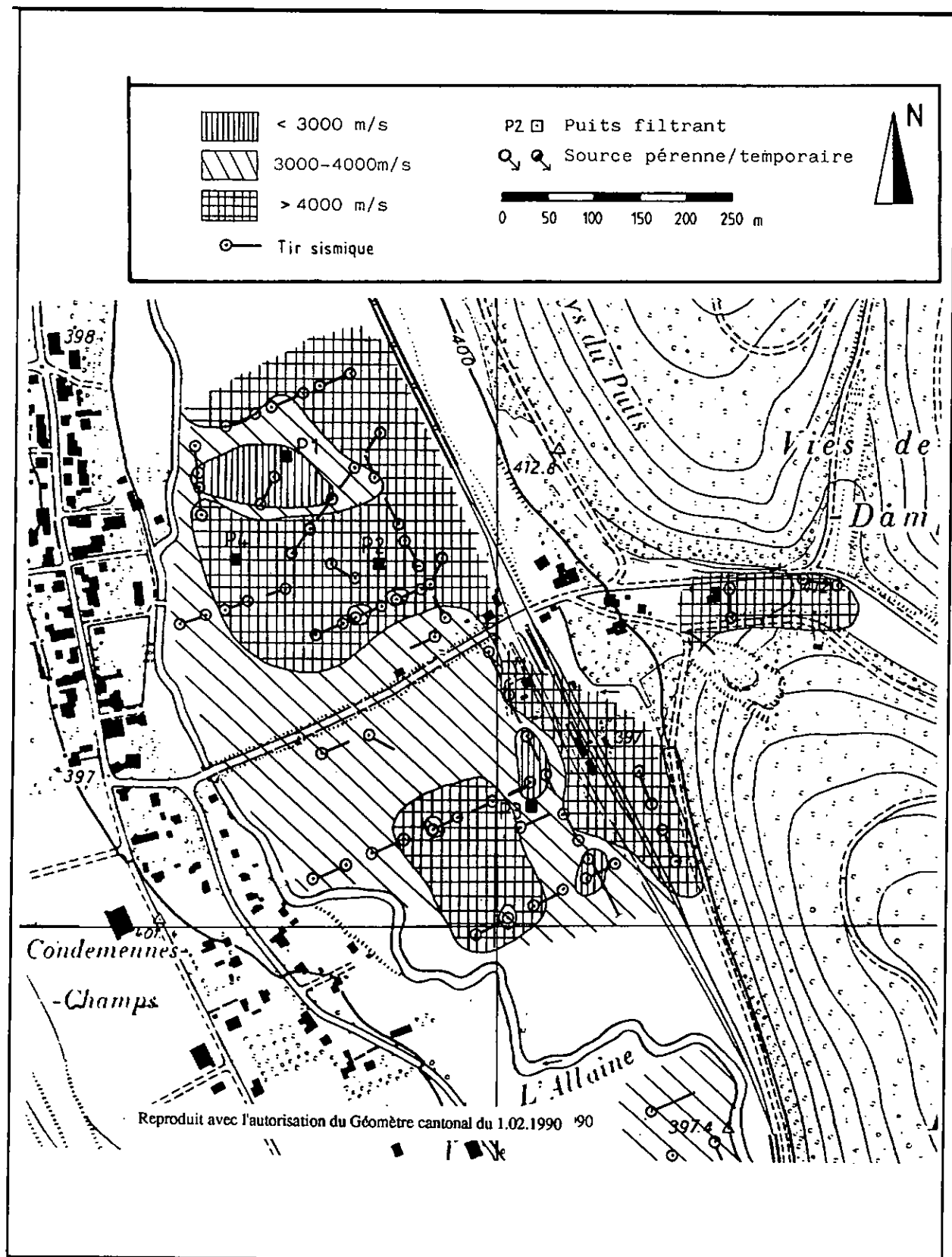
- 1) d'estimer l'épaisseur et l'extension de la couverture alluviale sur les calcaires;
- 2) de localiser des zones karstifiées (le signal sismique est ralenti à travers une fissure plus ou moins karstifiée).

La sismique marteau (avec géophone fixe) et la méthode avec le size-gun (arme à feu de calibre 10 magnum et 6 géophones espacés de 5 m) ont été utilisées (cf. Muller, 1979 et Burger, 1983). Sur la totalité des profils sismiques, vingt-six ont été implanté en tirs aller-retour. Certains tirs ont été implantés sur des sites connus par forages pour l'étalonnage.

### 2.2. Interprétation

Une carte des isopaches des alluvions a été dressée à partir des septante-cinq tirs sismiques et des relevés lithologiques de neuf forages. Nous avons ainsi dessiné la carte du substratum calcaire sous les alluvions, qui se trouve à la figure C.29. Une grande hétérogénéité spatiale des alluvions caractérise l'aquifère alluvial. Les puits paraissent bien implantés dans d'anciens méandres de l'Allaine, laquelle a provoqué des zones de surcreusement des calcaires.

Une carte des vitesses sismiques dans les calcaires a encore été dressée (fig. 3). Cette carte montre les zones les plus compactes (vitesses de 4000 à 10'000 m/s) et celles qui sont plus karstifiées (2500 à 3500 m/s). Les zones d'émissions karstiques et des puits (P1 et P3) répondent le mieux au second critère et correspondent effectivement à des zones d'alimentations plus rapides. Les dromochroniques des profils situés à proximité des deux autres puits montrent un autre phénomène: les vitesses subissent un ralentissement dans le signal sismique traversant les calcaires. Il y a soit une rupture dans le toit des calcaires, soit une fissure karstifiée qui alimente les alluvions. Mais ces deux interprétations coexistent à proximité des puits P4 et P2.



**Figure 3**

Carte des vitesses sismiques dans le substratum calcaire des alluvions de la plaine de Courtemaiche (avec situation des profils sismiques)

### 3. Télédétection

Un autre aspect de la géophysique a été abordé dans la dernière phase de l'étude. Il s'agissait d'interpréter une série de photos satellites prises dans les domaines du visible et de l'infra-rouge. Notre choix s'est porté sur le satellite français SPOT qui fournit une résolution au sol jusqu'à 10 m. Le document fourni est un support magnétique sur lequel figure une zone allant de Bâle à Neuchâtel, photographiée dans des bandes spectrales différentes entre le visible (4 bandes) et l'infra-rouge (3 bandes).

Le traitement de l'image a été réalisé avec un équipement informatisé, en collaboration avec l'Institut de Géographie de l'Université de Fribourg. La qualité d'impression des images reste cependant insuffisantes pour illustrer nos propos.

Certains linéaments ne correspondant à aucun accident géologique connu ont été mis en évidence. Le principal relie la source de la Doue (à l'W) à Allie (à l'E) via Porrentruy (fig. 4 et B.4). Ce linéament de direction N80°, parallèle au chevauchement du Jura plissé sur le Jura tabulaire, sépare deux zones nord et sud au niveau des principales directions d'écoulement: au nord, les écoulements superficiels et souterrains sont de direction N160-N170° (env. S-N) alors qu'au sud, ces écoulements sont orientés au N80-N110° (env. E-W et W-E). La direction N160-N170° est la composante des directions principales des accidents: N150° et NS. Les deux compartiments correspondent également (fig. B.4) pour le compartiment nord (aquifère peu épais) à une position haute des marnes oxfordiennes et pour le compartiment sud (aquifère puissant) à une position basse pour ces marnes. Ainsi, l'Allaine s'écoule parallèlement au linéament de Charmoille à Porrentruy puis le franchit à la faveur de l'accident NS de Fontenais.

En élargissant la zone, ce linéament, s'il se poursuit vers l'est et l'ouest, correspond principalement à des changements radicaux de direction d'écoulement du Doubs (vers St-Hippolyte) et du Rhin à Bâle. Il pourrait exister un accident majeur au niveau régional (dans le socle ?) déterminant deux blocs distincts, chacun ayant une direction principale de fracturation différente. Une ligne parallèle au linéament mis en évidence pourrait être tracée 4-5 km au nord, entre Hérimoncourt et Bonfol, via les dolines du Maira (fig. 4). Un nouveau changement de direction vers le N140° des écoulements superficiels est également visible (Le Gland, L'Allaine, La Coeuvalle et La Vendline). Un second linéament a été repéré entre Bure et Buix, via la Grande Vallée. De direction N20°, ce linéament correspond à un changement de direction des vallées sèches: N65° au sud-est et N40° au nord-ouest. Le bassin du Saïvu-La Font (Milandre) est pratiquement situé en totalité au NW du linéament. Un troisième linéament de direction N75° relie le sud de Courtemaître à Bure. Il détermine avec le deuxième linéament un secteur comprenant les bassins des sources de La Fontaine, de La Favergeatte et des Côtais. Ces bassins sont liés entre eux par des diffuïsses.

Les grandes structures de drainage karstique n'ont pas pu être relevées par la télédétection. En revanche, nous avons mis en évidence de grands compartiments à l'intérieur desquels la plus forte karstification est répartie de manière homogène pour une même direction. Il en va de même pour les directions d'écoulement, généralement dépendantes de la karstification.

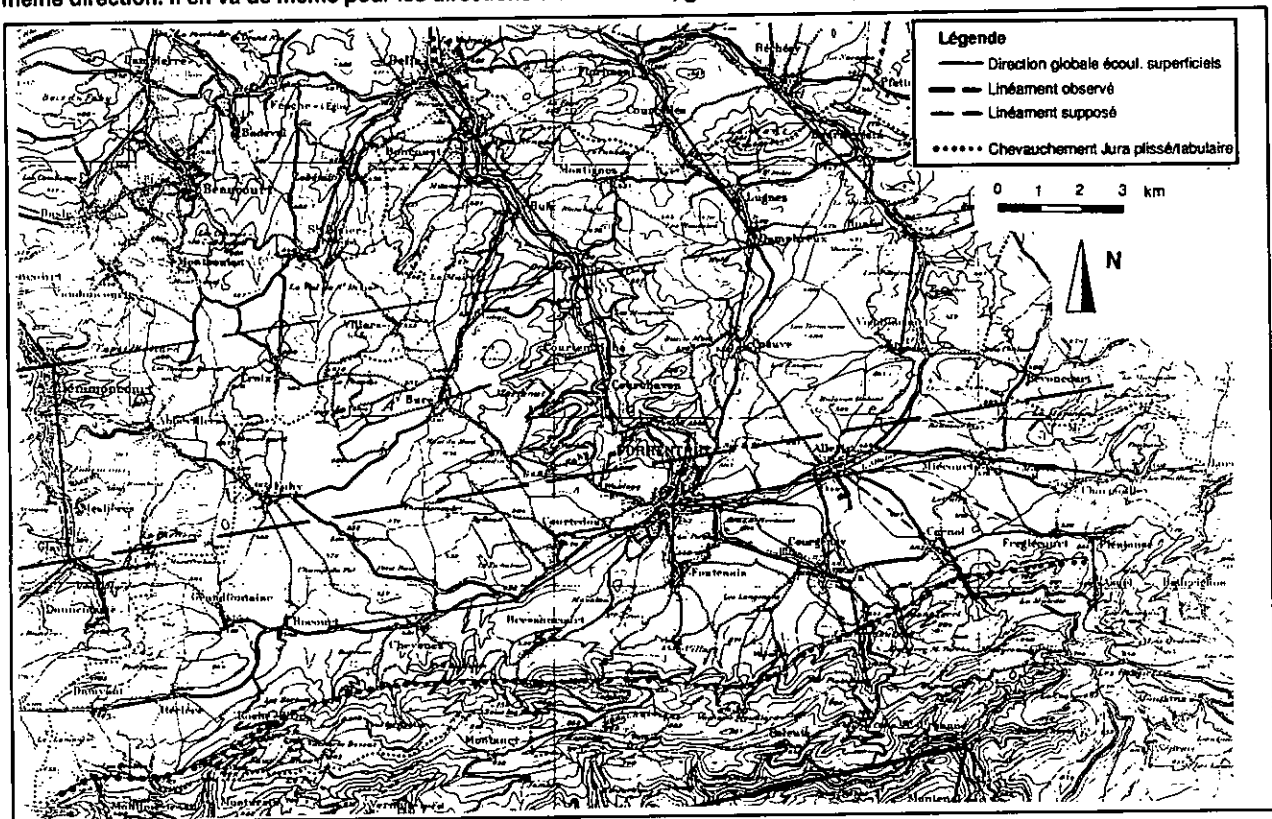


Figure 4

Situation des principales directions d'écoulement et position des linéaments déterminés par télédétection (satellite "spot").

## ANNEXE 2.2: PRESENTATION DES RESULTATS DES MESURES ISOTOPIQUES

### 1. Le Tritium dans les eaux météoriques

Les mesures de tritium effectuées dans les eaux de pluies de Mormont montrent des valeurs élevées en avril (plus de 50 TU), surtout en 1988 et des valeurs minimales en décembre (moins de 20 TU). Sur les trois années d'observation, la tendance est à la baisse (fig. 1), avec cependant des valeurs plus élevées lors de l'hiver 90-91 que lors de l'hiver plus doux de 89-90. Les échanges entre la troposphère et l'atmosphère s'effectuent au printemps et provoquent une concentration plus élevée en tritium lors de cette période (annexe 1.5). La valeur très élevée d'avril 1988 est en partie expliquée par ce phénomène. Mais, nous devons également tenir compte d'une certaine proportion due à des pollutions locales ou plus régionales (industries de Montbéliard, à 18 km à vol d'oiseau de la station de Mormont, sous un vent dominant).

### 2. L'Oxygène-18 dans les eaux météoriques

L'oxygène-18 connaît des cycles saisonniers (Blavoux, 1978) avec un maximum (supérieur à  $-4\text{‰}$ ) en août et un minimum en hiver (fig. 2). Le cycle se superpose assez bien à la température de l'air, ce qui n'est guère étonnant vu la relation étroite entre ces deux paramètres.

**Tableau 1 :**

*Valeurs moyennes des isotopes du tritium et de l'oxygène-18 dans les pluies de Mormont*

| PERIODE    | TRITIUM | OXYGENE-18 |
|------------|---------|------------|
|            | [TU]    | [‰]        |
| 1988       | 39.5    | -9.28      |
| 1989       | 31.2    | -8.03      |
| 1990       | 24.0    | -9.01      |
| 1988-1989* | 32.1    | -7.73      |
| 1989-1990* | 21.6    | -7.8       |
| 1988-90    | 31.1    | -8.18      |

Moyennes pondérées des pluies de Mormont

\* année hydrologique

Les chutes de neige de décembre 1990 et février 1991 sont bien visibles du point de vue de l'appauvrissement en oxygène-18 (entre  $-15.4\text{‰}$  et  $-14.1\text{‰}$ ). Des valeurs aussi basses sont de très bons traceurs des eaux souterraines: lors de la fonte de neige de la mi-février 1991, la crue qui en est résultée a pu être suivie au niveau des infiltrations d'eau très récente. Ce signal peut ainsi être confronté à la baisse de température et à la dilution (repérée par la conductivité électrique) des eaux souterraines.

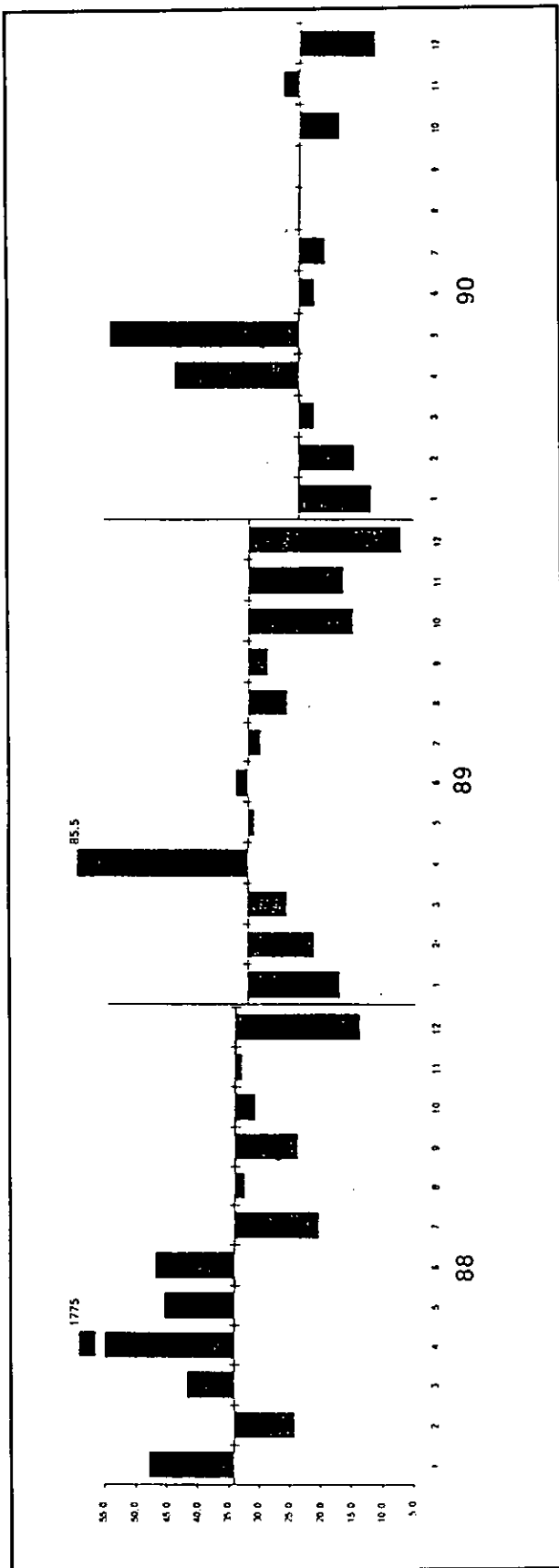
La valeur moyenne annuelle de l'oxygène-18 varie passablement au cours du temps (moyennes mobiles, fig. 3), avec un minimum à  $-8.9\text{‰}$  pour 1988 et un maximum à  $-7.2\text{‰}$  pour la période mi-1989 à mi-1990.

Les isotopes sont d'un emploi limité et délicat en Ajole, ainsi que nous le verrons dans la partie C. Au niveau régional, nous n'avons aucune idée de la représentativité de la station de Mormont pour l'oxygène-18. Nous avons déjà constaté une distribution hétérogène des précipitations et de la température sur l'ensemble de l'Ajole, peu dépendants de l'altitude.

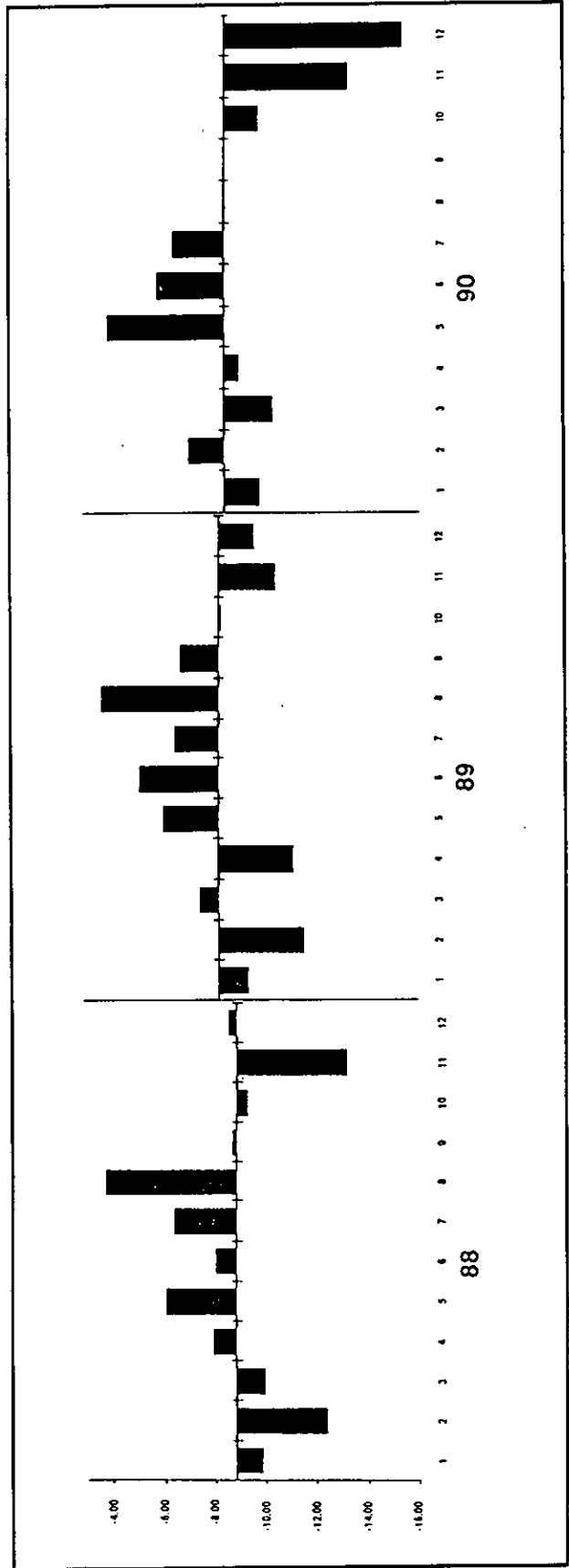
Faute de mieux, nous admettons que la station de Mormont, située à 540 m d'altitude, fournira la base de nos analyses isotopiques sur les différents points d'eau.

Pour le calcul de la moyenne annuelle de l'oxygène-18 infiltré dans le karst, nous avons utilisé la moyenne pondérée sur les précipitations annuelles de Mormont (tab. 1). Nous avons également séparé l'année hydrologique en deux:

-hiver où les pluies efficaces sont les plus importantes, avec pour conséquence un plus grand poids des valeurs d'oxygène-18; -été, avec une évapotranspiration prépondérante (60-80%, voir tab. 2).



**Figure 1**  
Analyses de tritium dans les eaux de pluies de Mormont entre 1988 et 1990. Déviation mensuelle de la moyenne annuelle (TU)



**Figure 2**  
Analyses de 18-O (‰) (eaux de pluies de Mormont de 1988 à 1990). Déviation mensuelle de la moyenne annuelle (‰)

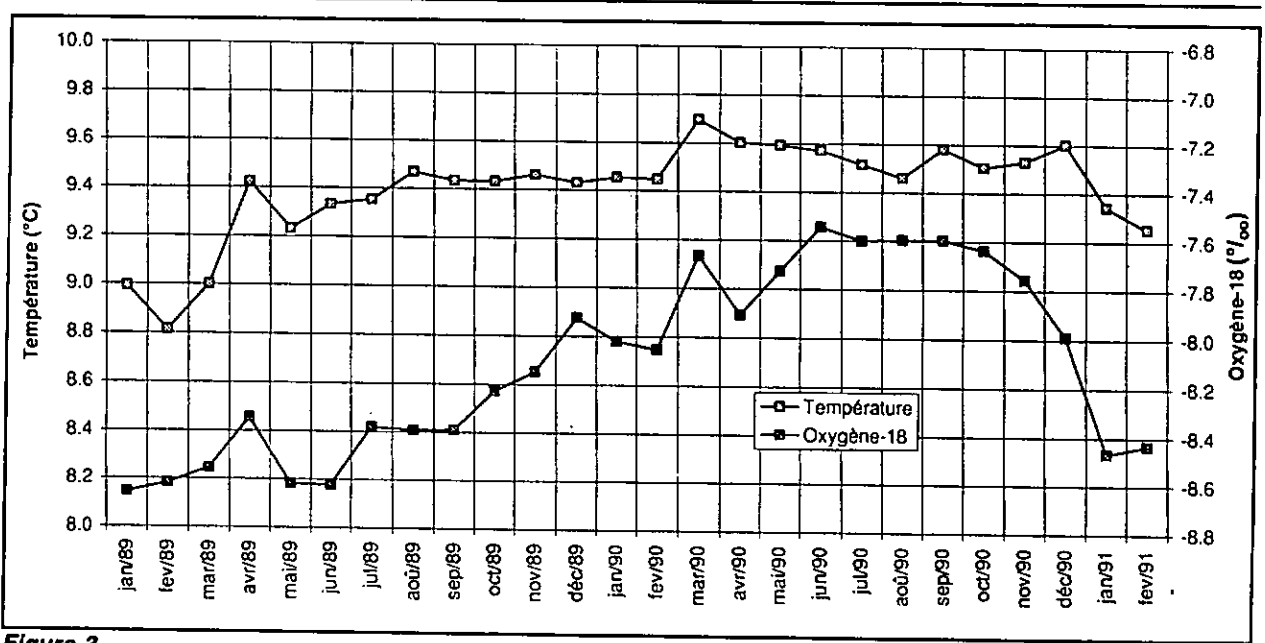


Figure 3

Oxygène-18 dans les eaux de pluie de Mormont. Evolution de la moyenne annuelle par moyennes mobiles sur 12 mois.

Tableau 2:

Valeurs moyennes de l'oxygène-18 dans les pluies de Mormont

| PERIODE       | OXYGENE-18<br>[‰] |
|---------------|-------------------|
| été 1988      | -7.74             |
| hiver 1988-89 | -10.0             |
| été 1989      | -5.65             |
| hiver 1989-90 | -8.65             |
| été 1990      | -6.77             |

### 3. L'oxygène-18 dans les eaux souterraines

L'oxygène-18 est un bon traceur des eaux souterraines, à la fois indépendant des vitesses de réaction chimique (dissolution des carbonates) et des influences anthropogènes (polluants). Le signal d'entrée est donné par la concentration de l'isotope mesurée dans les précipitations de Mormont.

Les valeurs du tableau 3 confirment des impluviums élevés pour les systèmes de La Bonne-Fontaine, de La Beuchire et du Pâquis. D'autres valeurs sont étonnantes comme celle du Saïvu, comparable à celle de La Bonne-Fontaine (impluvium élevé). A l'opposé, des valeurs très élevées au Voyeboeuf correspondent à un impluvium de basse altitude contrairement aux données acquises par d'autres méthodes, en particulier celle des essais de traçage. En comparant les valeurs des exutoires aux valeurs d'entrées (pluies Mormont), on observe des valeurs systématiquement trop faibles pour les sources. L'écart est le plus grand avec les pluies d'été, riches en 18-O, mais avec une faible lame d'eau infiltrée. **Les pluies d'hiver qui rechargent les aquifères ont une influence prépondérante.** Les analyses ont essentiellement été effectuées en 1989 et les pluies de l'hiver précédant ont des valeurs moyennes d'oxygène-18 très proches de celles mesurées dans les sources. Les différences étonnantes constatées d'une source à une autre ne s'expliquent que si l'on considère:

- une hétérogénéité importante des entrées d'une année à une autres (voir tableaux 1 et 2)
- une inertie différente d'un système à un autre, selon l'importance du milieu capacitif dans sa participation aux écoulements à l'exutoire.

Ainsi, les années précédant l'étude, des températures moyennes inférieures de 2 à 3°C durant 4 hivers ont appauvri les réservoirs capacitifs des systèmes karstiques en oxygène-18. Le mélange d'eaux récentes n'ont pas encore permis de rétablir l'équilibre dans chaque système.

**Tableau 3**

*Valeurs extrêmes d'oxygène-18 mesurées sur les eaux  
des principales sources karstiques d'Ajoie de 1988 à 1991.*

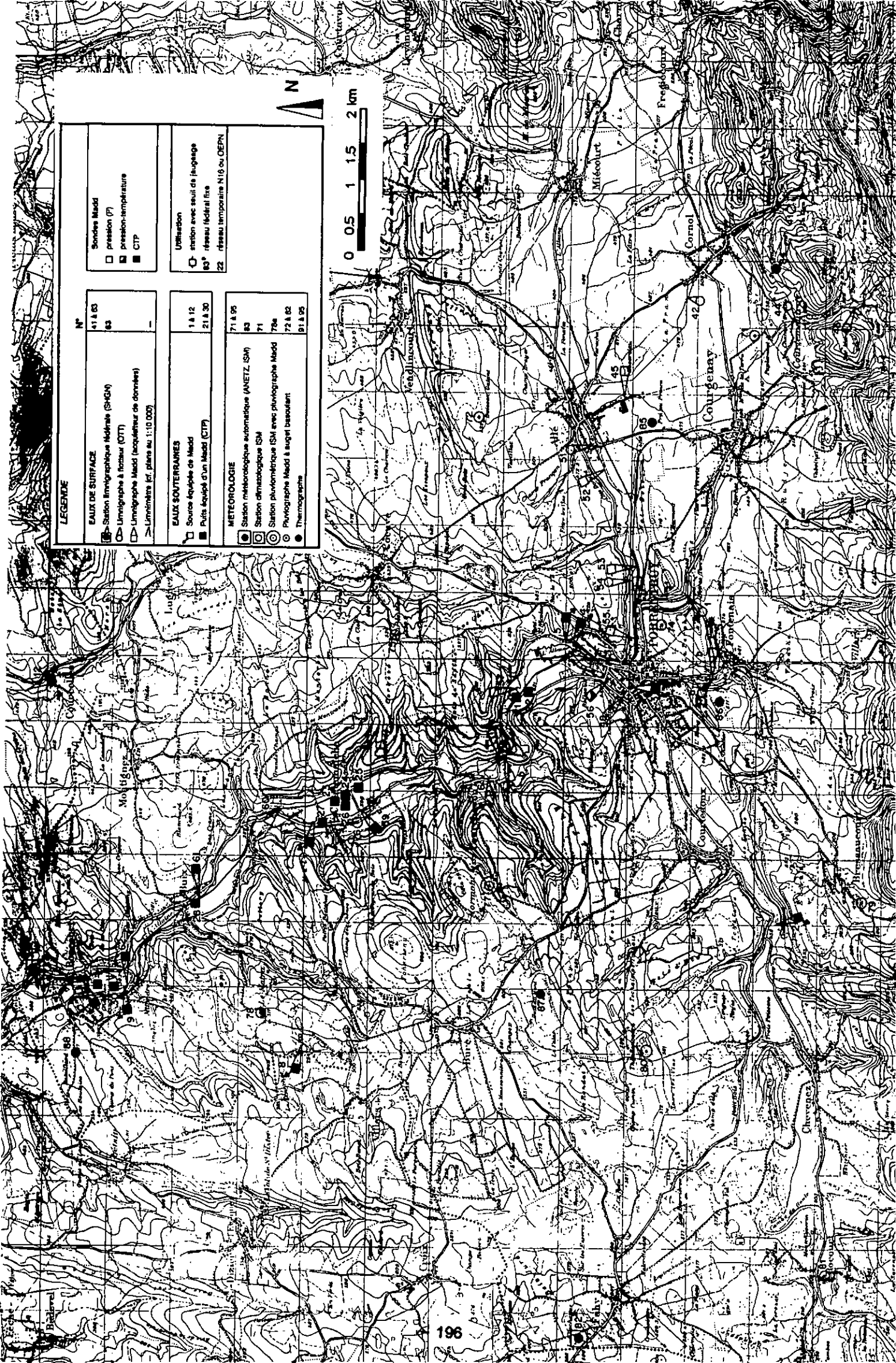
|                   | Min     | Max   | Max-min | 24.1.91 | crue fév.91   |
|-------------------|---------|-------|---------|---------|---------------|
| La Beuchire       | -9.33   | -8.89 | -0.44   | -8.89   | -9.94 à -9.01 |
| Le Creugenat      | -9.36   | -9.01 | -0.35   | -9.01   |               |
| La Bonne-Fontaine | -9.44   | -9.02 | -0.42   | -9.02   | --            |
| Le Saivu          | -9.46   | -9.17 | -0.29   | -9.27   | --            |
| Le Betteraz       | -9.15   | -8.59 | -0.56   | -9.00   | --            |
| La Fontaine       | -9.24   | -9.02 | -0.22   | -9.02   | -10.2 à -8.98 |
| Le Pâquis         | -9.30   | -8.95 | -0.35   | -8.95   | --            |
| La Vendline       | -9.29   | -9.21 | -0.08   | -9.21   | --            |
| Le Voyeboeuf      | (-8.84) | -8.76 | --      | -8.76   | --            |

Les plus faibles fluctuations (La Vendline par exemple), sans tendance saisonnière montrent une plus grande inertie, même si certaines parties du système sont très bien drainées, comme démontré par des traçages. Bien que le nombre de mesures soit faible, on constate que les fluctuations saisonnières sont peu importantes si l'on compare les mesures effectuées au cours d'une seule crue en février 1991 à La Beuchire et à la Fontaine (plus de 10 % de la fluctuation météorique annuelle). Les fluctuations météoriques oscillent entre -4 et -15 ‰. En dehors de cet événement, les analyses ont toutes été réalisées dans des situations de tarissement (basses eaux, voire en décrue (moyennes et hautes eaux).

## **ANNEXE 3**

### **LISTES DESCRIPTIVES DES RÉSEAUX D'OBSERVATION MÉTÉOROLOGIQUE, HYDROLOGIQUE, HYDROGÉOLOGIQUE ET PIÉZOMÉTRIQUE**

- 3.1 Réseau d'observation hydrométéorologique d'Ajoie (état 1.12.98)**
- 3.2 Réseau d'observation piézométrique de Courtemaîche (1989-1991)**
- 3.3 Réseau d'observation piézométrique de Porrentruy (1989-1991)**



LEGENDE

| EAUX DE SURFACE                                   |  | N°      |
|---------------------------------------------------|--|---------|
| Station hydrographique fédérale (SH-F)            |  | 41 & 63 |
| Limnigraphe à flotteur (LTF)                      |  | 63      |
| Limnigraphe Mado (acquéreur de données)           |  |         |
| Limnigraphe Mado (plan au 1:10 000)               |  |         |
| EAUX SOUTERRAINES                                 |  |         |
| Source équipée de Mado                            |  | 1 & 12  |
| Puits équipé d'un Mado (CTP)                      |  | 21 & 30 |
| METEOROLOGIE                                      |  |         |
| Station météorologique automatique (ANETZ ISM)    |  | 71 & 95 |
| Station climatologique ISM                        |  | 83      |
| Station pluviométrique ISM avec pluviographe Mado |  | 71      |
| Pluviographe Mado à auge basculant                |  | 78a     |
| Thermographe                                      |  | 72 & 82 |
|                                                   |  | 91 & 95 |

| Sondes Mado                   |  |
|-------------------------------|--|
| pression (P)                  |  |
| pression-température          |  |
| CTP                           |  |
| Utilisation                   |  |
| station avec saut de jaugeage |  |
| réseau fédéral fine           |  |
| réseau temporaire N16 ou OEPN |  |



| N°                                                                                                                          | Stige | Coordonnées |         | Cote repère | Type appareil/ sonde | Mesure débits | Limnim. fonction | Responsable         | Description                     | Commune        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|---------|-------------|----------------------|---------------|------------------|---------------------|---------------------------------|----------------|
| x                                                                                                                           | y     |             |         |             |                      |               |                  |                     |                                 |                |
| EAUX SOUTERRAINES                                                                                                           |       |             |         |             |                      |               |                  |                     |                                 |                |
| Sources karstiques (Repère: tube sonde ou limnimètre)                                                                       |       |             |         |             |                      |               |                  |                     |                                 |                |
| 1                                                                                                                           | VOY   | 573.950     | 251.070 | 435         | OTT/Madd-P           |               | limn.            | 1987-1993/ 1.99 -   | Voyeboeuf source                | Porrentruy     |
| 2                                                                                                                           | CRE   | 568.950     | 249.575 | 439/451     | Madd/ CTP            |               | tube             | 3 - 6.90/ 4.98 -    | Creugenat                       | Chevenez       |
| 3                                                                                                                           | BEU   | 572.590     | 251.860 | 424.39      | Madd/ CTP (+)        | 4 seuils      | tube             | 6.89 -              | Bauchire                        | Porrentruy     |
| 4                                                                                                                           | PAQ   | 573.200     | 252.820 | 418.12      | Madd/ CTP            | canal         | tube             | 7.90 - 1994         | Paquis                          | Porrentruy     |
| 5                                                                                                                           | BET   | 573.260     | 252.890 | 417.51      | Madd/ CTP (+)        | seuil         | tube             | 6.89-9.90/4.92-1998 | Batteraz                        | Porrentruy     |
| 6                                                                                                                           | DOM   | 571.225     | 254.100 | 405         | Madd/P               |               | tube             | 10.89 - 1991        | Domont                          | Courchavon     |
| 7                                                                                                                           | FONC  | 570.515     | 256.830 | 391.83      | Madd/ CTP            | canal         | tube             | 8.89 -              | La Fontaine                     | Courtemaître   |
| 8                                                                                                                           | MIL   | 567.100     | 257.175 | 475         | Madd/ CTP            | seuil         | tube             | 8.89 -              | puits du Maira (Milandre)       | Buix           |
| 9                                                                                                                           | SAI   | 567.980     | 259.690 | 374.72      | Madd/ CTP (+)        | seuil         | tube             | 8.89 -              | Saivu                           | Boncourt       |
| 9b*                                                                                                                         | BAM   | 568.160     | 259.540 | 375         | Madd/ CTP            |               | tube             | 1992 -              | La Bâme                         | Boncourt       |
| 10                                                                                                                          | FONB  | 568.015     | 260.305 | 370.29      | Madd/ CTP            | canal         | tube             | 9.89 -              | La Font                         | Boncourt       |
| 11                                                                                                                          | DOU   | 560.615     | 250.850 | 440         | Limnig.floiteur      | seuil         | limn.            | 9.88 -              | la Doue                         | Glav (F)       |
| 12                                                                                                                          | FRO   | 572.425     | 261.500 | 398         | Madd/CTP             | seuil         | tube             | 6.90 - 10.90        | Fontaine de la Roche            | Courcelles (F) |
| 13*                                                                                                                         | BURA  | 567.900     | 254.980 | 570         | Madd/ CTP            |               |                  | 1992-1996           | abreuvoir                       | Bure           |
| * pas localisé sur la carte                                                                                                 |       |             |         |             |                      |               |                  |                     |                                 |                |
| (+*) Mesure continue de la turbidité à BEU (dès mars 1993), à SAI (dès janvier 1992) et à BET (de juillet 1992 à mars 1996) |       |             |         |             |                      |               |                  |                     |                                 |                |
| Puits (Repère: margelle)                                                                                                    |       |             |         |             |                      |               |                  |                     |                                 |                |
| 21                                                                                                                          | ABC   | 572.400     | 253.713 | 412.44      | Madd/ CTP            |               |                  | 4.89 -              | captage Pont d'Able             | Porrentruy     |
| 22                                                                                                                          | ABS   | 572.504     | 253.573 | 413.12      | Madd/ CTP            |               |                  | 4.89 - 1996         | captage Pont d'Able             | Porrentruy     |
| 23                                                                                                                          | 1SEH  | 570.776     | 256.511 | 394.23      | Madd/ CTP            |               |                  | 4.89 - 6.90         | captage SEHA (nord)             | Courtemaître   |
| 24                                                                                                                          | 2SEH  | 570.866     | 256.389 | 394.77      | Madd/ CTP            |               |                  | 4.89 -              | captage SEHA (centre)           | Courtemaître   |
| 25                                                                                                                          | 3SEH  | 571.042     | 256.133 | 396.39      | Madd/ CTP            |               |                  | 4.89 - 1993         | captage SEHA (sud)              | Courtemaître   |
| 26                                                                                                                          | 4SEH  | 570.720     | 256.401 | 393.28      | Madd/ CTP            |               |                  | 4.89 -              | captage communal                | Courtemaître   |
| 27                                                                                                                          | PFO   | 570.505     | 256.750 |             | Madd/ CTP            |               |                  | 2.90 - 1992         | Puits Fontaine (réalimentation) | Courtemaître   |
| 28                                                                                                                          | BUIX  | 569.240     | 258.658 | 381.4       | Madd/ CTP            |               |                  | 4.89 -              | captage communal                | Buix           |
| 29                                                                                                                          | LOM1  | 567.963     | 260.172 | 371.34      | Madd/ CTP            |               |                  | 4.89 -              | captage communal                | Boncourt       |
| 30                                                                                                                          | LOM2  | 567.914     | 259.840 | 373.65      | Madd/ CTP            |               |                  | 4.89 -              | captage communal                | Boncourt       |
| 31*                                                                                                                         | PBUR  | 567.825     | 253.975 | 368         | Madd/ CTP (+)        |               |                  | 1996 -              | eaux refroidissement Burnus     | Boncourt       |
| * pas localisé sur la carte                                                                                                 |       |             |         |             |                      |               |                  |                     |                                 |                |
| (+*) mesure continue de la turbidité à PBUR (dès avril 1996)                                                                |       |             |         |             |                      |               |                  |                     |                                 |                |
| EAUX DE SURFACE : Cours d'eau (sauf Allaine)                                                                                |       |             |         |             |                      |               |                  |                     |                                 |                |
| 41                                                                                                                          | CORM  | 579.825     | 249.825 | 544         | OTT/floiteur         |               |                  | 5 - 8.1991          | La Creuse amont Comol           | Comol          |
| 42                                                                                                                          | CORV  | 578.480     | 251.200 | 490         | OTT/floiteur         | canal         |                  | 5 - 6.1991          | La Creuse aval Comol            | Comol          |
| 43                                                                                                                          | JON3  | 578.300     | 248.520 | 580         | OTT/floiteur         |               |                  | 5.91 - 1992         | le Jonc derrière Mont Terri     | Courgenay      |
| 44                                                                                                                          | JON2  | 578.100     | 249.500 | 548         | OTT/floiteur         |               | limn.            | 5.91 - 1992         | le Jonc à Champs Grains         | Courgenay      |
| 45                                                                                                                          | JON1  | 576.945     | 252.100 | 459         | Madd/ P              |               |                  | 7.89 - 6.90         | le Jonc, au S de Alle           | Alle           |
| 46                                                                                                                          | VOP   | 573.780     | 251.890 | 429         | Madd/ P              | seuil         | limn.            | 3-11.90/ 4.92-9.93  | Voyeboeuf patinoire             | Porrentruy     |
| 47a                                                                                                                         | BAC0  | 572.710     | 250.650 |             | OTT/floiteur         | seuil         | limn.            | 1987 - 9.1991       | Bacavoine/Bonne-Fontaine        | Fontenais      |
| 47b                                                                                                                         | BAC   | 572.710     | 250.650 | 437.13      | Madd/ P              | seuil         | limn.            | 11.88 -             | Bacavoine/Bonne-Fontaine        | Fontenais      |
| 48                                                                                                                          | AJO   | 572.430     | 252.010 | 422         | Madd/ P              | seuil         | tube 45°         | 2.90 - 12.90        | Affluent Ajoïote                | Porrentruy     |
| 49                                                                                                                          | CREU  | 572.275     | 251.785 | 423         | Aquis. crue          |               |                  | 1990 -              | Débordement Creugenat (> 1m³/s) | Porrentruy     |

LEGENDE

COTE

- La cote repère est située au haut de l'échelle limnimétrique ou du tube contenant la sonde madd
- Les cotes avec nombres entiers sont des cotes approximatives
- TYPE D'APPAREIL ET DE SONDE
- Les acquisteurs de données Madd ont été réglés pour effectuer 4 mesures par heure
- Le type de sonde comprend:
  - P sonde pression seule
  - CTP sonde triple conductivité-température-pression
  - CTP-P sonde triple et sonde pression selon la période
  - PT ou PTT 1 sonde pression et 1(2) sonde(s) de température
- Les pluviographes munis d'augets basculant enregistrent chaque événement de 0.2 mm de pluie
- MESURE DES DEBITS

Pour les jaugages, certains points d'eau sont équipés de seuils, d'autres se trouvent dans un canal ou en amont d'un pont

LIMNIMETRIE

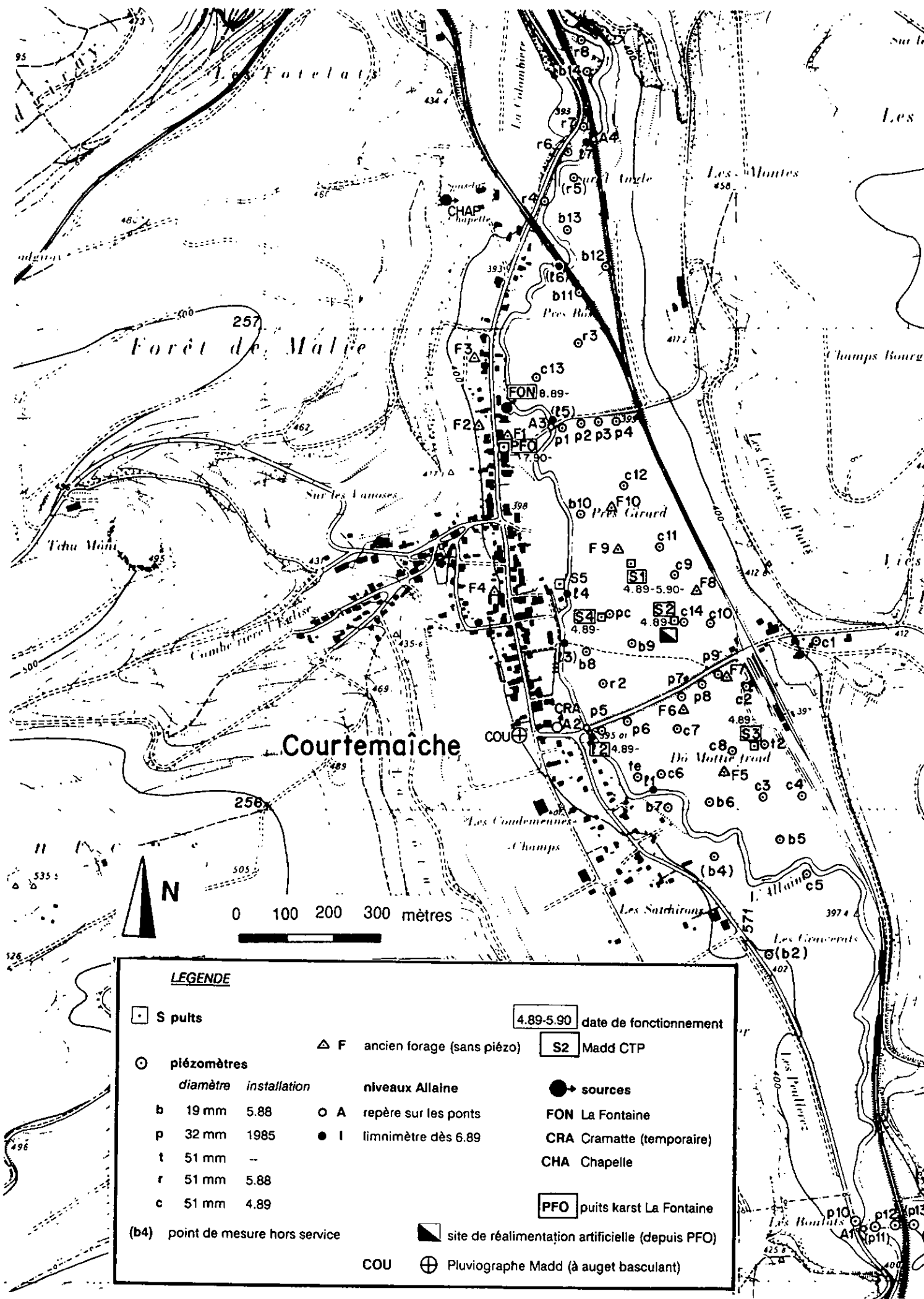
La référence des mesures de pression est l'échelle limnimétrique ou le tube contenant la sonde Madd

RESPONSABLES

- A16: Etude d'impact pour la construction de la transjurane
- RWB SA.: Bureau d'ingénieur SIA/ASIC, à Porrentruy
- MFR : Géologie, Géotechnique SA., à Delémont
- OEPN: Laboratoire des Eaux à St-Ursanne
- OEPN: Laboratoire des Eaux à St-Ursanne
- Schindler: Bureau d'études géologiques à Prêles

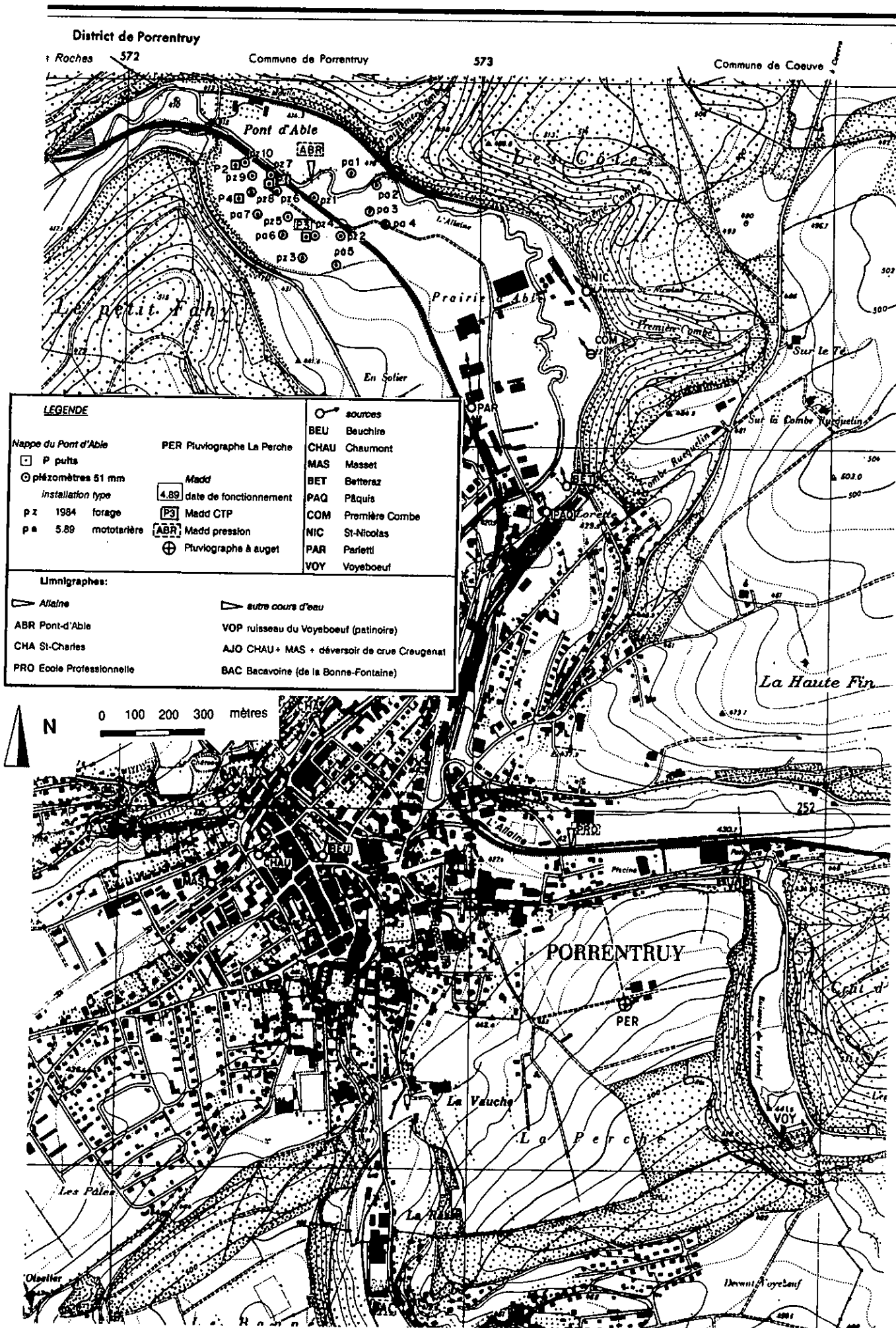
| N°                                                                                                                            | Stige | Coordonnées |         |        | Cote repère | Type appareil/ sonde | Mesure débits   | Limnim.      | Période fonction                      | Responsable     | Description                  | Commune      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|---------|--------|-------------|----------------------|-----------------|--------------|---------------------------------------|-----------------|------------------------------|--------------|
| EAUX DE SURFACE : Allaine                                                                                                     |       |             |         |        |             |                      |                 |              |                                       |                 |                              |              |
| 51                                                                                                                            | PAL   | 576.200     | 252.590 | 444    |             | OTT/floiteur         |                 | limn.        | 1985 - 1992/ 1998 - 3.90 - 12.98 (**) | OEPN/A16-Biotec | pont W de Alle               | Alle         |
| 52                                                                                                                            | ALA   | 573.730     | 252.400 | 442    |             | Madd/ P              | seuil           | tube         | 3.90 - 12.98 (**)                     | A16/RWB         | aval de Alle (BDE)           | Alle         |
| 64*                                                                                                                           | MON   | 574.750     | 252.080 | 440    |             | Madd/ P              |                 | tube         | 8.89-3.90/10.92-5.95 (**) A16/RWB     |                 | pont face à Combe Vaumacon   | Alle         |
| 53                                                                                                                            | MAR   | 574.380     | 251.920 | 434    |             | Madd/ P              | seuil           | tube         | 3.90 - 12.98 (**) A16/RWB             | OEPN            | Roche de Mars                | Porrentruy   |
| 54                                                                                                                            | PCO   | 574.150     | 251.960 | 431    |             | OTT/floiteur         | seuil           | limn.        | 1985 - 9.1991                         |                 | Pont Courtet                 | Porrentruy   |
| 55                                                                                                                            | PRO   | 573.280     | 251.890 | 425    |             | Madd/ P              | seuil           | tube         | 2.90 - (**) A16/RWB                   |                 | Ecole Professionnelle EHMP   | Porrentruy   |
| 56                                                                                                                            | PROb  | 573.280     | 251.890 | 425    |             | OTT/floiteur         | seuil           | limn.        | 9.98 - A16/Biotec                     |                 | Ecole Professionnelle EHMP   | Porrentruy   |
| 56                                                                                                                            | CHA   | 572.620     | 252.230 | 420.67 |             | Madd/ PT             | seuil           | limn.        | 11.88 - 12.98                         | A16/RWB         | Collège St-Charles           | Porrentruy   |
| 57                                                                                                                            | ABR   | 572.500     | 253.710 | 412.0  |             | Madd/ CTP-P          |                 | limn.        | 8.89 - 3.95                           | A16/RWB         | Pont d'Able                  | Porrentruy   |
| 57b*                                                                                                                          | ABL   | 572.225     | 253.875 | 410    |             | OTT/floiteur         | pont            | limn.        | 10.98 -                               | A16/Biotec      | Aval Pont d'Able             | Courchavon   |
| 58a                                                                                                                           | PAM0  | 571.510     | 253.840 | 407    |             | OTT/floiteur         | pont            | limn.        | 1987 - 1992                           | OEPN            | pont amont Courchavon        | Courchavon   |
| 58b                                                                                                                           | PAM   | 571.510     | 253.840 | 407.29 |             | Madd/ P              | pont            | limn.        | 4.89 -                                | A16/RWB         | pont amont Courchavon        | Courchavon   |
| 59                                                                                                                            | PGA   | 570.690     | 256.150 | 396.06 |             | Madd/ CTP            | pont            | limn.        | 4.89 - 1992                           | A16/MFR         | pont gare Courtemaiche       | Courtemaiche |
| 60                                                                                                                            | GRA   | 570.690     | 257.390 | 389.76 |             | Madd/ P              | pont            | limn.        | 6.89 - 4.90                           | A16/RWB         | pont amont Grandgourt        | Courtemaiche |
| 61                                                                                                                            | BUIR  | 569.415     | 258.560 | 382.22 |             | Madd/ CTP            | pont            | limn.        | 9.89 -                                | A16/MFR         | pont amont, sud              | Buix         |
| 62                                                                                                                            | BONR  | 568.045     | 259.665 | 372.67 |             | Madd/ PTT            | pont            | limn.        | 9.89 -                                | A16/MFR         | pont amont Sauvu             | Boncourt     |
| 63                                                                                                                            | BOND  | 568.875     | 261.500 | 364.00 |             | Limnigr. Bulles      | seuil           | limn.        | 1984 -                                | SHGN            | douane Boncourt              | Boncourt     |
| * pas localisé sur la carte                                                                                                   |       |             |         |        |             |                      |                 |              |                                       |                 |                              |              |
| (+ ) mesure continue de la turbidité (rive droite BOND (dès avr. 98) (**) pas de mesures en 1991 ni en hiver jusqu'en 1994-95 |       |             |         |        |             |                      |                 |              |                                       |                 |                              |              |
| METEOROLOGIE                                                                                                                  |       |             |         |        |             |                      |                 |              |                                       |                 |                              |              |
| Pluviométrie                                                                                                                  |       |             |         |        |             |                      |                 |              |                                       |                 |                              |              |
| 70                                                                                                                            | RAN   | 582.400     | 248.250 | 856    |             | totalisateur j.      | autres mesures  |              | 1967 - 1998                           | ISM             | Rangiers (météo. dès 1981)   | Asuel        |
| 71                                                                                                                            | PAP   | 577.870     | 250.090 | 528    |             | Madd auget (++)      | météorologiques | temp.min/max | 8.89 -                                | A16/RWB         | Paplemont                    | Courgenay    |
| 72                                                                                                                            | BUI   | 576.590     | 254.350 | 527    |             | Madd auget           | temp.min/max    | temp.min/max | 8.89 - 12.98                          | A16/RWB         | Buisson-Galant               | Alle         |
| 73                                                                                                                            | VAM   | 574.250     | 246.950 | 810    |             | Madd auget (++)      | temp.min/max    | temp.min/max | 4.89 -                                | A16/RWB-> ISM?  | Vacherie Mouillard           | Courgenay    |
| 74                                                                                                                            | PER   | 573.420     | 251.470 | 470    |             | Madd auget           | temp.min/max    | temp.min/max | 3.89 - 12.98                          | A16/RWB         | La Perche                    | Porrentruy   |
| 75                                                                                                                            | MOC   | 573.300     | 255.600 | 537    |             | Madd auget           | temp.min/max    | temp.min/max | 8.89 - 9.98                           | A16/RWB         | Mont-de-Coeuve               | Coeuve       |
| 76                                                                                                                            | COU   | 570.520     | 256.150 | 400    |             | Madd auget           | ---             |              | 4.89 - 12.98                          | A16/RWB         | Courtemaiche                 | Courtemaiche |
| 77                                                                                                                            | MOR0  | 569.680     | 254.200 | 535    |             | totalisateur j.      | temp.min/max    | temp.min/max | 1901 -                                | ISM             | Mormont                      | Courchavon   |
| 78                                                                                                                            | MOR   | 569.680     | 254.200 | 535    |             | Madd auget           | temp.min/max    | temp.min/max | 6.89 -                                | A16/RWB         | Mormont                      | Courchavon   |
| 79                                                                                                                            | BRE   | 567.500     | 257.600 | 519    |             | Madd auget (++)      | temp.min/max    | temp.min/max | 6.89 -                                | A16/RWB         | Maira                        | Buix         |
| 79                                                                                                                            | BRE   | 569.370     | 248.270 | 550    |             | Madd auget (++)      | temp.min/max    | temp.min/max | 8.89 -                                | A16/RWB         | Bressaucourt                 | Bressaucourt |
| 80                                                                                                                            | TEO   | 566.960     | 251.660 | 579    |             | Madd auget (++)      | temp.min/max    | temp.min/max | 10.89 -                               | A16/RWB         | Théodoncourt                 | Chevèze      |
| 81                                                                                                                            | ROC   | 563.450     | 248.820 | 509    |             | Madd auget           | temp.min/max    | temp.min/max | 11.89 - 12.98                         | A16/RWB         | Rocourt                      | Rocourt      |
| 82                                                                                                                            | FAH   | 562.450     | 252.650 | 535    |             | pluviographe         | météorologiques | temp.min/max | 1957 -                                | ISM             | douane Fahy (ANETZ dès 1981) | Fahy         |
| (+++) totalisateurs journalier et totalisateur de neige (sauf PAP et BRE) dès 1999                                            |       |             |         |        |             |                      |                 |              |                                       |                 |                              |              |
| Température de l'air                                                                                                          |       |             |         |        |             |                      |                 |              |                                       |                 |                              |              |
| 91*                                                                                                                           | COR   | 578.900     | 249.700 | 625    |             | thermographe         |                 |              | 11.87 - 12.88 et 11.89 - 12.90        | A16/OEPN        | Sur-Coeudret                 | Comol        |
| 92*                                                                                                                           | PRI   | 576.500     | 251.650 | 466    |             | Acquis. météo        | vent            |              | 5.89 - 4.91                           | A16/OEPN        | Pré-au-Prince                | Courgenay    |
| 93*                                                                                                                           | BAN   | 572.350     | 250.450 | 505    |             | thermographe         |                 |              | 11.89 - 12.90                         | A16/OEPN        | Le Banné                     | Porrentruy   |
| 94*                                                                                                                           | BUR   | 567.850     | 253.300 | 632    |             | Acquis. météo        | vent            |              | 1.88 -                                | A16/OEPN        | Haut-le-Mont                 | Bure         |
| 95*                                                                                                                           | OAL   | 566.925     | 260.500 | 387    |             | thermographe         |                 |              | 11.89 - 12.90                         | A16/OEPN        | Queue au Loup (Bataillard)   | Boncourt     |

| LEGENDE                                                                                                                    |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| COTE                                                                                                                       |  |
| -La cote repère est située au haut de l'échelle limnimétrique ou du tube contenant la sonde madd                           |  |
| -Les cotes avec nombres entiers sont des cotes approximatives                                                              |  |
| TYPE D'APPAREIL ET DE SONDE                                                                                                |  |
| -Les acquéreurs de données Madd ont été réglés pour effectuer 4 mesures par heure                                          |  |
| -Le type de sonde comprend:                                                                                                |  |
| P sonde pression seule                                                                                                     |  |
| CTP sonde triple conductivité-température-pression                                                                         |  |
| CTP-P sonde triple et sonde pression selon la période                                                                      |  |
| PT ou PTT 1 sonde pression et 1(2) sonde(s) de température                                                                 |  |
| -Les pluviographes munis d'augets basculant enregistrent chaque événement de 0.2 mm de pluie                               |  |
| MESURE DES DEBITS                                                                                                          |  |
| Pour les jaugeages, certains points d'eau sont équipés de seuils, d'autres se trouvent dans un canal ou en amont d'un pont |  |
| LIMNIMETRIE                                                                                                                |  |
| La référence des mesures de pression est l'échelle limnimétrique ou le tube contenant la sonde Madd                        |  |
| RESPONSABLES                                                                                                               |  |
| A16: Etude d'impact pour la construction de la transjurane                                                                 |  |
| RWB SA.: Bureau d'ingénieur SIA/ASIC, à Porrentruy                                                                         |  |
| MFR: Géologie, Géotechnique SA., à Delémont                                                                                |  |
| OEPN: Laboratoire des Eaux à St-Ursanne                                                                                    |  |
| Schindler: Bureau d'études géologiques à Prêles                                                                            |  |



**ANNEXE 3.2 : Réseau d'observation piézométrique de Courtemaître (1989-1991)**

| no                                                                                 | COORDONNEES |                                              | COTE<br>REPERE | COTE<br>SOL | PROF.<br>dans<br>sol | NIVEAU RELATIF        |      |      | NIVEAU<br>ABSOLU<br>MOYEN | nbre de<br>mesures<br>piézom. | Date<br>install. | Diamètre<br>(drains)<br>[mm] | MADD en<br>fonction |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------|----------------|-------------|----------------------|-----------------------|------|------|---------------------------|-------------------------------|------------------|------------------------------|---------------------|
|                                                                                    |             | *: 1 / **: 2 niveau(x) de drains horizontaux |                |             |                      |                       |      |      |                           |                               |                  |                              |                     |
| S1*                                                                                | 570.776     | 256.511                                      | 394.23         | 392.83      | 7.4                  | -0.15                 | 3.95 | 1.28 | 391.55                    | 41                            | 1989             | 3000 (200)                   | 4.89-6.90           |
| S2 **                                                                              | 570.866     | 256.389                                      | 394.77         | 393.66      | 7.1                  | -0.12                 | 4.17 | 1.74 | 391.92                    | 41                            | 1951             | 3000 (150)                   | 4.89-               |
| S3 **                                                                              | 571.042     | 256.133                                      | 396.39         | 395.15      | 8.0                  | -0.09                 | 4.07 | 2.47 | 392.68                    | 41                            | 1960             | 3000 (145)                   | 4.89-               |
| S4                                                                                 | 570.720     | 256.401                                      | 393.28         | 393.1       | 7.6                  | 1.30                  | 4.17 | 3.03 | 390.07                    | 30                            | 1934             | 1000                         | 4.89-               |
| S5                                                                                 | 570.631     | 256.462                                      | 394.85         | 394         | ?                    | 1.15                  | 2.97 | 2.27 | 391.73                    | 27                            | ?                | 1000                         |                     |
| PIEZOMETRES      (): hors d'usage au cours de la période de mesures                |             |                                              |                |             |                      |                       |      |      |                           |                               |                  |                              |                     |
| p1                                                                                 | 570.635     | 256.800                                      | 393.15         | 391.83      | 3.5                  | 0.05                  | 1.42 | 1.02 | 390.81                    | 40                            | 1985             | 32                           |                     |
| p2                                                                                 | 570.675     | 256.805                                      | 392.43         | 391.51      | 3.0                  | 0.03                  | 1.39 | 0.95 | 390.56                    | 40                            | 1985             | 32                           |                     |
| p3                                                                                 | 570.715     | 256.810                                      | 392.61         | 391.77      | 3.0                  | 0.09                  | 1.70 | 1.18 | 390.59                    | 42                            | 1985             | 32                           |                     |
| p4                                                                                 | 570.765     | 256.810                                      | 393.37         | 392.78      | 3.7                  | 1.07                  | 2.67 | 2.14 | 390.64                    | 42                            | 1985             | 32                           |                     |
| p5                                                                                 | 570.715     | 256.185                                      | 395.90         | 395.01      | 3.4                  | 0.30                  | 3.02 | 2.40 | 392.61                    | 42                            | 1985             | 32                           |                     |
| p6                                                                                 | 570.770     | 256.185                                      | 395.32         | 394.47      | 3.0                  | -0.17                 | 3.03 | 2.02 | 392.45                    | 42                            | 1985             | 32                           |                     |
| p7                                                                                 | 570.885     | 256.235                                      | 395.55         | 394.28      | 3.5                  | -0.29                 | 3.05 | 1.87 | 392.41                    | 43                            | 1985             | 32                           |                     |
| p8                                                                                 | 570.930     | 256.260                                      | 395.61         | 394.28      | 3.4                  | -0.29                 | 3.16 | 1.94 | 392.34                    | 42                            | 1985             | 32                           |                     |
| p9                                                                                 | 570.965     | 256.280                                      | 395.33         | 394.43      | 2.8                  | -0.03                 | 2.83 | 1.94 | 392.49                    | 38                            | 1985             | 32                           |                     |
| p10                                                                                | 571.255     | 255.120                                      | 400.54         | 399.37      | 3.4                  | 0.95                  | 1.84 | 1.56 | 397.81                    | 16                            | 1985             | 32                           |                     |
| (p11)                                                                              | 571.300     | 255.125                                      | 400.47         | 399.56      | 3.5                  | 1.08                  | 1.91 | 1.58 | 397.98                    | 4                             | 1985             | 32                           |                     |
| p12                                                                                | 571.340     | 255.130                                      | 400.61         | 399.61      | 4.9                  | 0.44                  | 1.89 | 1.23 | 398.38                    | 14                            | 1985             | 32                           |                     |
| (p13)                                                                              | 571.380     | 255.120                                      | 399.96         | 399.17      | ?                    |                       |      |      |                           |                               | 1985             | 32                           |                     |
| (p14)                                                                              | 571.410     | 255.135                                      | 400.13         | 399.31      | 3.1                  | 0.07                  | 1.51 | 0.84 | 398.47                    | 15                            | 1985             | 32                           |                     |
| (b2)                                                                               | 571.068     | 255.674                                      | 402.02         | 401.21      | 4.0                  | toujours sec          |      |      |                           |                               | 5.1988           | 19                           |                     |
| (b4)                                                                               | 570.968     | 255.891                                      | 396.77         | 395.99      | 2.5                  | 4 mesures, 3 fois sec |      |      |                           | 1                             | 5.1988           | 19                           |                     |
| b5                                                                                 | 571.089     | 255.934                                      | 396.82         | 395.97      | 3.4                  | -0.15                 | 3.24 | 2.21 | 393.76                    | 35                            | 5.1988           | 19                           |                     |
| b6                                                                                 | 570.939     | 256.010                                      | 396.35         | 395.52      | 2.8                  | -0.10                 | 2.73 | 1.79 | 393.73                    | 20                            | 5.1988           | 19                           |                     |
| b7                                                                                 | 570.848     | 256.004                                      | 396.07         | 395.32      | 3.0                  | -0.32                 | 1.17 | 0.72 | 394.60                    | 42                            | 5.1988           | 19                           |                     |
| b8                                                                                 | 570.685     | 256.336                                      | 394.45         | 393.66      | 3.0                  | -0.12                 | 2.74 | 1.69 | 391.97                    | 41                            | 5.1988           | 19                           |                     |
| b9                                                                                 | 570.779     | 256.350                                      | 394.36         | 393.57      | 2.7                  | 0.01                  | 2.80 | 1.52 | 392.05                    | 40                            | 5.1988           | 19                           |                     |
| b10                                                                                | 570.670     | 256.619                                      | 392.91         | 392.15      | 2.6                  | -0.20                 | 1.27 | 0.71 | 391.44                    | 41                            | 5.1988           | 19                           |                     |
| b11                                                                                | 570.667     | 257.080                                      | 390.61         | 390.01      | 2.1                  | -0.33                 | 0.58 | 0.27 | 389.74                    | 34                            | 5.1988           | 19                           |                     |
| b12                                                                                | 570.730     | 257.130                                      | 390.72         | 390.074     | 1.8                  | -0.29                 | 0.81 | 0.40 | 389.67                    | 39                            | 5.1988           | 19                           |                     |
| b13                                                                                | 570.645     | 257.205                                      | 390.22         | 389.64      | 1.0                  | -0.16                 | 0.86 | 0.64 | 389.00                    | 39                            | 5.1988           | 19                           |                     |
| b14                                                                                | 570.684     | 257.533                                      | 392.24         | 391.5       | 1.4                  | toujours sec          |      |      |                           |                               | 5.1988           | 19                           |                     |
| r2                                                                                 | 570.720     | 256.264                                      | 395.06         | 394.21      | 2.8                  | 0.24                  | 2.85 | 1.84 | 392.37                    | 34                            | 5.1988           | 51                           |                     |
| r3                                                                                 | 570.664     | 256.971                                      | 391.51         | 390.75      | 2.0                  | -0.01                 | 1.24 | 0.75 | 390.00                    | 39                            | 5.1988           | 51                           |                     |
| r4                                                                                 | 570.596     | 257.265                                      | 392.63         | 391.65      | 5.0                  | 1.91                  | 3.92 | 2.98 | 388.67                    | 39                            | 5.1988           | 51                           |                     |
| (r5)                                                                               | 570.661     | 257.310                                      | 389.70         | 389.03      | 1.5                  | -0.29                 | 0.59 | 0.35 | 388.68                    | 38                            | 5.1988           | 51                           |                     |
| r6                                                                                 | 570.651     | 257.373                                      | 390.48         | 389.47      | 3.0                  | 0.00                  | 1.28 | 1.03 | 388.44                    | 39                            | 5.1988           | 51                           |                     |
| r7                                                                                 | 570.682     | 257.425                                      | 390.07         | 389.12      | 1.9                  | -0.05                 | 0.97 | 0.74 | 388.38                    | 39                            | 5.1988           | 51                           |                     |
| r8                                                                                 | 570.673     | 257.604                                      | 389.34         | 388.82      | 8,5/4,9              | 0.13                  | 0.77 | 0.61 | 388.21                    | 13                            | 1980             | 51                           |                     |
| Pc                                                                                 | 570.728     | 256.410                                      | 394.43         | 393.17      | 3.1                  | -0.02                 | 2.37 | 1.40 | 391.77                    | 39                            | 1949             | 51                           |                     |
| c1                                                                                 | 571.166     | 256.351                                      | 403.25         | 402.3       | 5.1                  | toujours sec          |      |      |                           |                               | 4.1989           | 51                           |                     |
| c2                                                                                 | 571.019     | 256.254                                      | 396.85         | 395.7       | 3.4                  | 1.07                  | 3.05 | 2.24 | 393.46                    | 9                             | 4.1989           | 51                           |                     |
| c3                                                                                 | 571.053     | 256.025                                      | 396.39         | 395.4       | 2.8                  | -0.15                 | 2.66 | 1.70 | 393.70                    | 15                            | 4.1989           | 51                           |                     |
| c4                                                                                 | 571.134     | 256.028                                      | 396.89         | 395.8       | 3.4                  | -0.05                 | 3.21 | 2.22 | 393.58                    | 24                            | 4.1989           | 51                           |                     |
| c5                                                                                 | 571.144     | 255.865                                      | 397.88         | 396.8       | 2.1                  | 0.10                  | 2.07 | 1.11 | 395.69                    | 6                             | 4.1989           | 51                           |                     |
| c6                                                                                 | 570.834     | 256.072                                      | 396.22         | 394.8       | 3.1                  | -0.11                 | 2.91 | 1.97 | 392.83                    | 29                            | 4.1989           | 51                           |                     |
| c7                                                                                 | 570.871     | 256.174                                      | 395.47         | 394.8       | 3.1                  | 0.46                  | 2.91 | 2.07 | 392.73                    | 22                            | 4.1989           | 51                           |                     |
| c8                                                                                 | 570.988     | 256.122                                      | 396.37         | 395.2       | 3.3                  | 0.01                  | 3.18 | 2.12 | 393.08                    | 24                            | 4.1989           | 51                           |                     |
| c9                                                                                 | 570.864     | 256.485                                      | 394.43         | 393.4       | 2.7                  | -0.03                 | 2.50 | 1.45 | 391.95                    | 28                            | 4.1989           | 51                           |                     |
| c10                                                                                | 570.945     | 256.383                                      | 394.80         | 393.9       | 2.9                  | 0.07                  | 2.55 | 1.63 | 392.27                    | 26                            | 4.1989           | 51                           |                     |
| c11                                                                                | 570.834     | 256.545                                      | 394.33         | 393.1       | 2.5                  | -0.15                 | 2.29 | 1.30 | 391.80                    | 28                            | 4.1989           | 51                           |                     |
| c12                                                                                | 570.760     | 256.874                                      | 393.49         | 392.3       | 2.6                  | 0.00                  | 1.64 | 0.96 | 391.34                    | 29                            | 4.1989           | 51                           |                     |
| c13                                                                                | 570.576     | 256.901                                      | 392.21         | 390.8       | 2.3                  | -0.13                 | 1.00 | 0.65 | 390.15                    | 27                            | 4.1989           | 51                           |                     |
| c14                                                                                | 570.872     | 256.392                                      | 394.64         | 393.8       | 2.9                  | 0.02                  | 2.44 | 1.62 | 392.18                    | 24                            | 4.1989           | 51                           |                     |
| t2                                                                                 | 571.057     | 256.134                                      | 396.43         | 395.3       | 8,8/3,17             | 0.04                  | 3.13 | 2.24 | 393.06                    | 25                            | 1949             | 51                           |                     |
| te                                                                                 | 570.785     | 256.070                                      | 396.21         | 395.2       | ?                    | -0.12                 |      |      | 394.94                    | 7                             | 4.1989           | 51                           |                     |
| NIVEAUX ALLAINÉ      (): limnimètre hors d'usage au cours de la période de mesures |             |                                              |                |             |                      |                       |      |      |                           |                               |                  |                              |                     |
| A1                                                                                 | 571.265     | 255.110                                      | 400.47         |             |                      |                       |      |      |                           |                               |                  |                              |                     |
| I1                                                                                 | 570.815     | 256.040                                      | 396.17         |             |                      |                       |      |      |                           |                               | 6.1989           |                              |                     |
| I2                                                                                 | 570.690     | 256.150                                      | 396.06         |             |                      |                       |      |      | 394.60                    |                               | 6.1989           |                              | 4.89-               |
| A2                                                                                 | 570.690     | 256.175                                      | 396.08         |             |                      |                       |      |      |                           |                               |                  |                              |                     |
| (I3)                                                                               | 570.630     | 256.350                                      | 395.19         |             |                      |                       |      |      |                           |                               | 6.1989           |                              |                     |
| I4                                                                                 | 570.640     | 256.450                                      | 393.95         |             |                      |                       |      |      |                           |                               | 6.1989           |                              |                     |
| A3                                                                                 | 570.620     | 256.800                                      | 392.69         |             |                      |                       |      |      |                           |                               |                  |                              |                     |
| (I5)                                                                               | 570.610     | 256.810                                      | 392.61         |             |                      |                       |      |      |                           |                               | 6.1989           |                              |                     |
| (I6)                                                                               | 570.625     | 257.125                                      | 390.62         |             |                      |                       |      |      |                           |                               | 6.1989           |                              |                     |
| I7                                                                                 | 570.690     | 257.390                                      | 389.76         |             |                      |                       |      |      |                           |                               | 6.1989           |                              | 6.89-4.90           |
| A4                                                                                 | 570.700     | 257.930                                      | 392.73         |             |                      |                       |      |      |                           |                               |                  |                              |                     |



ANNEXE 3.3 : Réseau d'observation piézométrique du Pont d'Able (Porrentruy) avec les sources de Porrentruy

| N°          | COORDONNEES |         |             | COTE                                     |      | PROF.<br>dans le<br>sol | NIVEAU RELATIF |      |        | NIVEAU<br>ABSOLU<br>MOYEN | nbre de<br>mesures<br>piézom. | Date<br>Install | Diamètre<br>(mm) | MADD en<br>fonction |
|-------------|-------------|---------|-------------|------------------------------------------|------|-------------------------|----------------|------|--------|---------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|---------------------|
|             |             |         |             | REPERE                                   | sol  |                         | MAX            | MIN  | MOY    |                           |                               |                 |                  |                     |
| PUITS       |             |         |             |                                          |      |                         |                |      |        | ponct/madd                |                               |                 |                  |                     |
| P1          | 572.400     | 253.713 | 412.44      | 411.5                                    | 7.6  | -0.44                   | 5.19           | 2.74 | 409.30 | 36                        |                               |                 | 4.89-            |                     |
| P2          | 572.307     | 253.764 | 411.78      | 411                                      | 8    | -1.62                   | 4.90           | 2.18 | 409.32 | 37                        |                               |                 |                  |                     |
| P3          | 572.504     | 253.573 | 413.12      | 412.6                                    | 10.2 | 1.47                    | 6.38           | 3.37 | 409.60 | 37                        |                               |                 | 4.89-            |                     |
| PIEZOMETRES |             |         |             |                                          |      |                         |                |      |        |                           |                               |                 |                  |                     |
| P4          | 572.317     | 253.671 | 412.27      | 411.8                                    | 8    | 0.34                    | 4.53           | 2.08 | 409.42 | 38                        |                               | 300             |                  |                     |
| pa1         | 572.632     | 253.745 | 414.39      | 413                                      | 4.5  | 0.82                    | 3.01           | 2.18 | 410.82 | 25                        | 4.89                          | 51              |                  |                     |
| pa2         | 572.704     | 253.712 | 414.38      | 413.2                                    | 4.5  | 0.42                    | 2.83           | 2.08 | 411.12 | 29                        | 4.89                          | 51              |                  |                     |
| pa3         | 572.686     | 253.637 | 414.17      | 413.2                                    | 3.6  | 0.3                     | 2.57           | 1.97 | 411.23 | 16                        | 4.89                          | 51              |                  |                     |
| pa4         | 572.731     | 253.603 | 414.69      | 413.6                                    | 3.4  | 0.33                    | 2.28           | 1.77 | 411.83 | 11                        | 4.89                          | 51              |                  |                     |
| pa5         | 572.593     | 253.492 | 414.03      | 413                                      | 5.95 | 1.15                    | 4.81           | 3.33 | 409.67 | 28                        | 4.89                          | 51              |                  |                     |
| pa6         | 572.440     | 253.574 | 413.26      | 412.1                                    | 3.5  | 0.77                    | 2.29           | 1.84 | 410.26 | 12                        | 4.89                          | 51              |                  |                     |
| pa7         | 572.366     | 253.629 | 412.9       | 411.9                                    | 2.9  | 0.68                    | 2.11           | 1.62 | 410.28 | 10                        | 4.89                          | 51              |                  |                     |
| pz1         | 572.528     | 253.677 | 412.73      | 412.6                                    | 4.5  | 0.97                    | 3.54           | 2.70 | 409.90 | 39                        | 1984                          | 51              |                  |                     |
| pz2         | 572.603     | 253.572 | 413.38      | 413.1                                    | 5.7  | 1.09                    | 5.09           | 3.29 | 409.81 | 40                        | 1984                          | 51              |                  |                     |
| pz3         | 572.496     | 253.512 | 412.95      | 413.7                                    | 7.3  | 2.18                    | 7.14           | 4.28 | 409.42 | 41                        | 1984                          | 51              |                  |                     |
| pz4         | 572.531     | 253.571 | 413.25      | 412.7                                    | 6.6  | 1.23                    | 5.45           | 3.22 | 409.48 | 41                        | 1984                          | 51              |                  |                     |
| pz5         | 572.454     | 253.624 | 412.07      | 411.8                                    | 3.45 | 0.49                    | 2.86           | 2.00 | 409.80 | 23                        | 1984                          | 51              |                  |                     |
| pz6         | 572.422     | 253.694 | 412.15      | 411.9                                    | 7.2  | 0.72                    | 4.93           | 2.49 | 409.41 | 41                        | 1984                          | 51              |                  |                     |
| pz7         | 572.403     | 253.735 | 412.5       | 411.6                                    | 6.7  | 0.27                    | 3.81           | 2.02 | 409.58 | 40                        | 1984                          | 51              |                  |                     |
| pz8         | 572.350     | 253.688 | 411.66      | 411.5                                    | 5.8  | 0.37                    | 4.72           | 2.13 | 409.37 | 41                        | 1984                          | 51              |                  |                     |
| pz9         | 572.351     | 253.735 | 411.86      | 411.6                                    | 6.05 | 0.52                    | 4.74           | 2.24 | 409.36 | 40                        | 1984                          | 51              |                  |                     |
| pz10        | 572.329     | 253.772 | 411.64      | 411.2                                    | 6.7  | 0.24                    | 4.37           | 1.85 | 409.35 | 41                        | 1984                          | 51              |                  |                     |
| ALLAINE     |             |         |             |                                          |      |                         |                |      |        |                           |                               |                 |                  |                     |
|             |             |         | Description |                                          |      |                         |                |      |        |                           |                               |                 |                  |                     |
| PRO         | 573.280     | 251.890 |             | amont Porrentruy (école professionnelle) |      |                         |                |      |        | 425                       |                               |                 |                  | 2.90-?              |
| CHA         | 572.620     | 252.230 | 420.67      | Porrentruy, collège St-Charles           |      |                         |                |      |        | 418.8                     |                               | 6.89            |                  | 11.88-              |
| ABR         | 572.500     | 253.710 | 412.00      | Pont-d'Able                              |      |                         |                |      |        | 410.7                     |                               | 6.89            |                  | 8.89-               |
| AJO         | 572.430     | 252.010 |             | Affluent de l'Ajoulote + CHAU + MAS      |      |                         |                |      |        | 421                       |                               |                 |                  | 2.90-               |
| SOURCES     |             |         |             |                                          |      |                         |                |      |        |                           |                               |                 |                  |                     |
|             |             |         | Description |                                          |      |                         |                |      |        |                           |                               |                 |                  |                     |
| MAS         | 572.275     | 251.785 | 421.56      | Masset, dans déversoir de crue du Creu   |      |                         |                |      |        | 422                       |                               |                 |                  |                     |
| BEU         | 572.590     | 251.860 | 424.39      | Beuchire                                 |      |                         |                |      |        | 423.0                     |                               |                 |                  | 6.89-               |
| CHAU        | 572.410     | 251.865 |             | Chaumont, sortie dans déversoir de crue  |      |                         |                |      |        | 423                       |                               |                 |                  |                     |
| PAQ         | 573.200     | 252.820 | 418.12      | Pâquis                                   |      |                         |                |      |        | 417                       |                               |                 |                  | 7.90-               |
| BET         | 573.260     | 252.890 | 417.51      | Betteraz                                 |      |                         |                |      |        | 416.2                     |                               |                 |                  | 6.89-9.90           |
| PAR         | 572.980     | 253.110 |             | Parietti                                 |      |                         |                |      |        | 420                       |                               |                 |                  |                     |
| COM         | 573.320     | 253.260 |             | Première Combe (temporaire)              |      |                         |                |      |        | 420                       |                               |                 |                  |                     |
| NIC         | 573.310     | 253.430 |             | St-Nicolas                               |      |                         |                |      |        | 422                       |                               |                 |                  |                     |

## **ANNEXE 4**

### **ANNUAIRES DES DÉBITS DE 3 SOURCES KARSTIQUES AJOULOTES DE 1989 À 1991**

**4.1 Source de La Beuchire (Porrentruy)**

**4.2 Source du Betteraz (Porrentruy)**

**4.3 Source de la Bonne-Fontaine (Fontenais)**

DEBITS JOURNALIERS LA BEUCHERE (l/s)

|    | 1989 |      |      | 1990 |      |       |     |      |       |      |       |      |      |      |      | 1991 |      |       |      |      |       |      |    |  |  |  |  |
|----|------|------|------|------|------|-------|-----|------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|----|--|--|--|--|
|    | NOV. | DEC. | JAN. | FEB. | MARS | AVRIL | MAI | JUIN | JUIL. | AOUT | SEPT. | OCT. | NOV. | DEC. | JAN. | FEB. | MARS | AVRIL | MAI  | JUIN | JUIL. | AOUT |    |  |  |  |  |
| 1  | 201  | 99   | 439  | 970  | 2937 | 785   | 480 | 243  | 1742  | 276  | 139   | 410  | 1228 | 802  | 1535 | 326  | 1354 | 805   | 711  | 318  | 241   | 93   | 1  |  |  |  |  |
| 2  | 135  | 96   | 387  | 949  | 2824 | 701   | 441 | 335  | 1660  | 278  | 113   | 768  | 1197 | 717  | 1563 | 281  | 1140 | 739   | 849  | 301  | 226   | 87   | 2  |  |  |  |  |
| 3  | 1782 | 97   | 349  | 1266 | 2562 | 572   | 409 | 374  | 1650  | 278  | 108   | 440  | 1250 | 676  | 1563 | 270  | 1028 | 671   | 734  | 287  | 208   | 86   | 3  |  |  |  |  |
| 4  | 4601 | 98   | 306  | 957  | 2656 | 458   | 385 | 390  | 1660  | 269  | 106   | 379  | 1482 | 623  | 1532 | 229  | 940  | 613   | 672  | 276  | 195   | 85   | 4  |  |  |  |  |
| 5  | 4362 | 96   | 273  | 870  | 2777 | 479   | 363 | 380  | 1646  | 262  | 105   | 483  | 1541 | 572  | 1501 | 272  | 820  | 569   | 596  | 264  | 186   | 84   | 5  |  |  |  |  |
| 6  | 3732 | 94   | 250  | 814  | 2522 | 597   | 350 | 362  | 1616  | 256  | 94    | 356  | 1511 | 523  | 1480 | 343  | 749  | 500   | 541  | 294  | 174   | 84   | 6  |  |  |  |  |
| 7  | 3191 | 93   | 225  | 720  | 1955 | 685   | 364 | 342  | 1592  | 245  | 132   | 286  | 1394 | 510  | 1480 | 495  | 676  | 458   | 490  | 296  | 166   | 83   | 7  |  |  |  |  |
| 8  | 1915 | 92   | 206  | 626  | 1596 | 610   | 327 | 1258 | 1556  | 224  | 144   | 223  | 990  | 501  | 1517 | 283  | 616  | 427   | 439  | 311  | 162   | 83   | 8  |  |  |  |  |
| 9  | 1179 | 90   | 191  | 535  | 1304 | 738   | 324 | 1622 | 1420  | 209  | 98    | 192  | 736  | 475  | 1478 | 269  | 553  | 401   | 395  | 265  | 149   | 83   | 9  |  |  |  |  |
| 10 | 885  | 86   | 184  | 529  | 1064 | 723   | 352 | 1602 | 1138  | 206  | 88    | 176  | 616  | 444  | 1546 | 264  | 521  | 372   | 378  | 392  | 147   | 83   | 10 |  |  |  |  |
| 11 | 739  | 86   | 172  | 568  | 992  | 675   | 338 | 1519 | 955   | 202  | 83    | 166  | 542  | 392  | 1322 | 249  | 567  | 356   | 655  | 277  | 144   | 83   | 11 |  |  |  |  |
| 12 | 602  | 88   | 163  | 640  | 926  | 599   | 313 | 1152 | 854   | 197  | 77    | 161  | 571  | 357  | 1097 | 237  | 795  | 346   | 1301 | 225  | 140   | 83   | 12 |  |  |  |  |
| 13 | 481  | 114  | 156  | 799  | 826  | 630   | 309 | 865  | 782   | 188  | 75    | 151  | 558  | 342  | 954  | 227  | 689  | 328   | 1436 | 206  | 143   | 83   | 13 |  |  |  |  |
| 14 | 420  | 110  | 149  | 2637 | 705  | 589   | 500 | 750  | 713   | 181  | 73    | 141  | 580  | 310  | 1093 | 224  | 606  | 308   | 1353 | 192  | 167   | 82   | 14 |  |  |  |  |
| 15 | 371  | 454  | 166  | 3423 | 626  | 927   | 496 | 654  | 647   | 333  | 136   | 138  | 1153 | 302  | 1014 | 222  | 563  | 293   | 1137 | 192  | 152   | 82   | 15 |  |  |  |  |
| 16 | 340  | 1277 | 214  | 3303 | 575  | 1632  | 534 | 576  | 590   | 196  | 96    | 132  | 1434 | 289  | 852  | 249  | 536  | 291   | 1197 | 351  | 131   | 82   | 16 |  |  |  |  |
| 17 | 303  | 1371 | 203  | 2970 | 548  | 1313  | 473 | 526  | 553   | 175  | 75    | 129  | 1243 | 285  | 694  | 233  | 507  | 266   | 1425 | 665  | 125   | 82   | 17 |  |  |  |  |
| 18 | 273  | 1309 | 204  | 2853 | 488  | 1244  | 422 | 475  | 521   | 164  | 73    | 125  | 933  | 282  | 621  | 217  | 466  | 245   | 1393 | 717  | 122   | 82   | 18 |  |  |  |  |
| 19 | 243  | 2168 | 146  | 2771 | 437  | 1197  | 382 | 471  | 496   | 160  | 74    | 128  | 818  | 279  | 585  | 225  | 453  | 246   | 1252 | 547  | 119   | 82   | 19 |  |  |  |  |
| 20 | 221  | 2578 | 93   | 2605 | 468  | 1076  | 359 | 1388 | 487   | 155  | 76    | 124  | 832  | 283  | 455  | 279  | 712  | 275   | 981  | 442  | 115   | 82   | 20 |  |  |  |  |
| 21 | 207  | 2459 | 83   | 2059 | 451  | 865   | 354 | 1545 | 438   | 144  | 79    | 116  | 1530 | 302  | 511  | 350  | 859  | 315   | 811  | 465  | 111   | 82   | 21 |  |  |  |  |
| 22 | 166  | 2117 | 94   | 1574 | 425  | 711   | 339 | 1470 | 413   | 139  | 90    | 99   | 1608 | 610  | 510  | 741  | 1390 | 476   | 702  | 367  | 109   | 82   | 22 |  |  |  |  |
| 23 | 154  | 2452 | 157  | 1334 | 395  | 644   | 325 | 1072 | 386   | 136  | 619   | 95   | 1649 | 1145 | 438  | 1158 | 1542 | 684   | 633  | 307  | 108   | 82   | 23 |  |  |  |  |
| 24 | 137  | 2381 | 216  | 1158 | 372  | 512   | 324 | 800  | 366   | 133  | 664   | 89   | 1633 | 1316 | 445  | 1315 | 1502 | 921   | 573  | 280  | 111   | 82   | 24 |  |  |  |  |
| 25 | 122  | 1915 | 388  | 1057 | 345  | 398   | 317 | 681  | 353   | 130  | 390   | 89   | 1606 | 1098 | 443  | 1433 | 1465 | 946   | 516  | 260  | 110   | 82   | 25 |  |  |  |  |
| 26 | 114  | 1305 | 1514 | 973  | 339  | 1078  | 289 | 617  | 346   | 129  | 201   | 99   | 1559 | 1228 | 430  | 1462 | 1330 | 845   | 471  | 247  | 109   | 82   | 26 |  |  |  |  |
| 27 | 112  | 989  | 1192 | 1309 | 317  | 818   | 271 | 887  | 327   | 130  | 168   | 114  | 1524 | 1644 | 405  | 1441 | 1294 | 772   | 435  | 238  | 104   | 82   | 27 |  |  |  |  |
| 28 | 110  | 795  | 1017 | 2090 | 370  | 641   | 257 | 1864 | 313   | 119  | 150   | 100  | 1430 | 1570 | 409  | 1405 | 1268 | 791   | 409  | 252  | 101   | 82   | 28 |  |  |  |  |
| 29 | 105  | 664  | 2567 | 359  | 586  | 586   | 250 | 1720 | 303   | 117  | 142   | 609  | 1161 | 1543 | 418  | 1405 | 1153 | 688   | 383  | 407  | 100   | 82   | 29 |  |  |  |  |
| 30 | 103  | 560  | 2090 | 505  | 534  | 534   | 246 | 1658 | 289   | 114  | 160   | 1521 | 950  | 1521 | 401  | 1405 | 1017 | 585   | 355  | 276  | 99    | 82   | 30 |  |  |  |  |
| 31 |      | 494  | 1271 |      | 735  |       | 240 |      | 281   | 211  |       | 1409 |      | 1525 | 335  | 335  | 900  |       | 332  |      | 98    | 82   | 31 |  |  |  |  |

| Débits classés (jours) 1989-90 |          | année hydrologique 89-90 |  | année civile 1990 |  |
|--------------------------------|----------|--------------------------|--|-------------------|--|
| 9                              | 2850 l/s | 2660 l/s                 |  |                   |  |
| 18                             | 2560 l/s | 1955 l/s                 |  |                   |  |
| 55                             | 1390 l/s | 1435 l/s                 |  |                   |  |
| 91                             | 870 l/s  | 990 l/s                  |  |                   |  |
| 137                            | 575 l/s  | 640 l/s                  |  |                   |  |
| 182                            | 390 l/s  | 475 l/s                  |  |                   |  |
| 228                            | 303 l/s  | 350 l/s                  |  |                   |  |
| 274                            | 175 l/s  | 245 l/s                  |  |                   |  |
| 329                            | 105 l/s  | 129 l/s                  |  |                   |  |
| 347                            | 92 l/s   | 96 l/s                   |  |                   |  |

| Débits classés (mois) 1989-90 |          | année hydrologique 89-90 |  | année civile 1990 |  |
|-------------------------------|----------|--------------------------|--|-------------------|--|
| 1 mois                        | 1915 l/s | 1630 l/s                 |  |                   |  |
| 2 mois                        | 1310 l/s | 1390 l/s                 |  |                   |  |
| 3 mois                        | 870 l/s  | 990 l/s                  |  |                   |  |
| 6 mois                        | 390 l/s  | 475 l/s                  |  |                   |  |
| 9 mois                        | 175 l/s  | 245 l/s                  |  |                   |  |

| Débits annuels moyens |  | nov. 89 - oct. 90 |  | 692 l/s |  |
|-----------------------|--|-------------------|--|---------|--|
| déc. 89 - nov. 90     |  | 714 l/s           |  |         |  |
| 1.1 - 31.12.1990      |  | 702 l/s           |  |         |  |
| fév. 90 - jan. 91     |  | 740 l/s           |  |         |  |
| mar. 90 - fév. 91     |  | 664 l/s           |  |         |  |
| avr. 90 - mars 91     |  | 649 l/s           |  |         |  |
| mai 90 - avr 91       |  | 628 l/s           |  |         |  |
| juin 90 - mai 91      |  | 663 l/s           |  |         |  |
| juil 90 - juin 91     |  | 614 l/s           |  |         |  |
| août 90 - juil 91     |  | 560 l/s           |  |         |  |

| 1989 |      |      |      |      |       |      |      |       |      |       |      | 1990 |      |      |      |      |       |     |      |       |      |               |             | 1991 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-----|------|-------|------|---------------|-------------|------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| NOV. | DEC. | JAN. | FEB. | MARS | AVRIL | MAI  | JUIN | JUIL. | AOUT | SEPT. | OCT. | NOV. | DEC. | JAN. | FEB. | MARS | AVRIL | MAI | JUIN | JUIL. | AOUT | MOIS          |             |      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 910  | 859  | 486  | 1513 | 1077 | 767   | 359  | 920  | 841   | 192  | 154   | 305  | 1175 | 725  | 923  | 525  | 903  | 517   | 760 | 331  | 141   | 83   | Q moyen (l/s) |             |      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|      |      |      |      |      |       |      |      |       |      |       |      |      |      |      |      |      |       |     |      |       |      |               |             |      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| max  | 4601 | 2578 | 2567 | 3423 | 2937  | 1632 | 534  | 1864  | 1742 | 333   | 664  | 1521 | 1649 | 1644 | 1563 | 1462 | 1542  | 946 | 1436 | 717   | 241  | 93            | Q max (l/s) |      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| min  | 103  | 86   | 83   | 529  | 317   | 398  | 240  | 243   | 281  | 114   | 73   | 89   | 542  | 279  | 335  | 217  | 453   | 245 | 332  | 241   | 98   | 82            | Q min (l/s) |      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

DEBITS JOURNALIERS LE BETTERAZ (l/s)

| 1989 |       |      |      |      | 1990 |      |      |       |     |      |       |      |       |
|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-----|------|-------|------|-------|
|      | SEPT. | OCT. | NOV. | DEC. | JAN. | FEV. | MARS | AVRIL | MAI | JUIN | JUIL. | AOUT | SEPT. |
| 1    |       | 83   | 94   | 50   | 118  | 160  | 382  | 155   | 142 | 112  | 454   | 121  | 152   |
| 2    |       | 82   | 92   | 49   | 112  | 167  | 362  | 157   | 141 | 130  | 442   | 123  | 126   |
| 3    |       | 82   | 228  | 50   | 108  | 169  | 297  | 149   | 144 | 121  | 422   | 123  | 126   |
| 4    |       | 81   | 842  | 52   | 104  | 152  | 279  | 130   | 145 | 124  | 417   | 125  | 133   |
| 5    |       | 80   | 240  | 53   | 102  | 152  | 270  | 131   | 144 | 113  | 415   | 131  | 120   |
| 6    |       | 81   | 171  | 52   | 98   | 152  | 262  | 160   | 141 | 112  | 381   | 127  | 113   |
| 7    |       | 85   | 151  | 52   | 95   | 145  | 251  | 148   | 138 | 120  | 362   | 114  | 113   |
| 8    | 90    | 106  | 124  | 57   | 91   | 141  | 239  | 141   | 133 | 278  | 349   | 106  |       |
| 9    | 89    | 92   | 96   | 51   | 88   | 135  | 225  | 166   | 139 | 328  | 320   | 106  |       |
| 10   | 88    | 94   | 88   | 48   | 86   | 139  | 210  | 156   | 143 | 280  | 278   | 109  |       |
| 11   | 88    | 89   | 85   | 49   | 84   | 146  | 207  | 147   | 142 | 238  | 249   | 115  |       |
| 12   | 89    | 87   | 81   | 51   | 84   | 152  | 203  | 133   | 137 | 215  | 245   | 116  |       |
| 13   | 98    | 86   | 78   | 64   | 87   | 166  | 195  | 146   | 133 | 188  | 238   | 188  |       |
| 14   | 93    | 85   | 75   | 60   | 88   | 493  | 189  | 143   | 135 | 179  | 226   | 230  |       |
| 15   | 88    | 84   | 73   | 140  | 89   | 1338 | 181  | 178   | 150 | 167  | 208   | 341  |       |
| 16   | 87    | 85   | 71   | 191  | 95   | 877  | 175  | 186   | 153 | 161  | 191   | 236  |       |
| 17   | 87    | 85   | 67   | 432  | 95   | 516  | 171  | 173   | 148 | 161  | 186   | 168  |       |
| 18   | 85    | 85   | 64   | 334  | 101  | 487  | 166  | 185   | 144 | 149  | 178   | 152  |       |
| 19   | 86    | 83   | 62   | 442  | 91   | 467  | 163  | 188   | 140 | 144  | 176   | 148  |       |
| 20   | 87    | 81   | 61   | 375  | 89   | 444  | 155  | 185   | 142 | 157  | 166   | 142  |       |
| 21   | 88    | 82   | 62   | 239  | 87   | 421  | 151  | 171   | 140 | 176  | 163   | 123  |       |
| 22   | 98    | 81   | 65   | 217  | 88   | 384  | 148  | 159   | 136 | 155  | 160   | 113  |       |
| 23   | 121   | 79   | 62   | 253  | 89   | 347  | 139  | 158   | 133 | 128  | 155   | 110  |       |
| 24   | 98    | 78   | 58   | 209  | 103  | 304  | 139  | 152   | 147 | 117  | 154   | 117  |       |
| 25   | 99    | 79   | 54   | 193  | 118  | 283  | 133  | 142   | 141 | 119  | 153   | 114  |       |
| 26   | 97    | 78   | 58   | 175  | 237  | 264  | 130  | 140   | 116 | 135  | 155   | 117  |       |
| 27   | 106   | 79   | 56   | 162  | 155  | 260  | 129  | 139   | 111 | 203  | 143   | 109  |       |
| 28   | 97    | 89   | 54   | 147  | 181  | 259  | 148  | 144   | 99  | 517  | 137   | 101  |       |
| 29   | 85    | 127  | 51   | 137  | 267  | 233  | 144  | 152   | 102 | 448  | 127   | 143  |       |
| 30   | 83    | 102  | 52   | 130  | 191  | 238  | 159  | 146   | 111 | 434  | 123   | 141  |       |
| 31   |       | 97   |      | 123  | 174  |      | 155  |       | 106 |      | 122   | 195  |       |

Débits classés (jours)  
année hydrologique 89-90

|     |         |
|-----|---------|
| 9   | 454 l/s |
| 18  | 417 l/s |
| 55  | 236 l/s |
| 91  | 174 l/s |
| 137 | 15 l/s  |
| 182 | 139 l/s |
| 228 | 117 l/s |
| 274 | 94 l/s  |
| 329 | 79 l/s  |
| 347 | 58 l/s  |

Débits classés (mois)  
année hydrologique 89-90

|        |         |
|--------|---------|
| 1 mois | 328 l/s |
| 2 mois | 217 l/s |
| 3 mois | 174 l/s |
| 6 mois | 139 l/s |
| 9 mois | 95 l/s  |

Débit moyen (1989-90) : 162 l/s

| MOIS | SEPT. | OCT. | NOV.  | DEC.  | JAN.  | FÉV.  | MARS  | AVRIL | MAI   | JUIN  | JUIL. | AOUT  | SEPT. |
|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| moy. | 92.5  | 86.7 | 113.8 | 149.5 | 115.9 | 325.6 | 198.5 | 155.3 | 134.7 | 196.9 | 241.7 | 142.0 | 126.1 |
| max  | 121   | 127  | 842   | 442   | 267   | 1338  | 382   | 188   | 153   | 517   | 454   | 341   | 152   |
| min  | 83    | 78   | 51    | 48    | 84    | 135   | 129   | 130   | 99    | 112   | 122   | 101   | 113   |

DEBITS JOURNALIERS LA BONNE-FONTAINE (l/s)

|      | 1989 |      |      |       |     |     |       |      |       |      |      |      | 1990 |      |      |       |      |      |       |      |       |      |      |      | 1991 |      |      |       |     |     |       |      |       |      |                    |      |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------|------|------|------|-------|-----|-----|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-----|-----|-------|------|-------|------|--------------------|------|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|      | JAN. | FÉV. | MARS | AVRIL | MAI | JUN | JUIL. | AOUT | SEPT. | OCT. | NOV. | DEC. | JAN. | FÉV. | MARS | AVRIL | MAI  | JUN  | JUIL. | AOUT | SEPT. | OCT. | NOV. | DEC. | JAN. | FÉV. | MARS | AVRIL | MAI | JUN | JUIL. | AOUT | SEPT. | OCT. | NOV.               | DEC. |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1    | 111  | 67   | 507  | 126   | 322 | 67  | 50    | 61   | 68    | 37   | 81   | 42   | 89   | 169  | 1350 | 135   | 102  | 1470 | 43    | 49   | 320   | 323  | 234  | 1200 | 92   | 369  | 187  | 356   | 75  | 91  | 49    | 40   | 43    | 45   | 108                | 1    |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2    | 104  | 68   | 488  | 128   | 344 | 69  | 59    | 52   | 61    | 40   | 64   | 42   | 80   | 233  | 938  | 123   | 148  | 47   | 44    | 305  | 520   | 212  | 1210 | 87   | 309  | 189  | 367  | 73    | 77  | 48  | 45    | 36   | 46    | 96   | 2                  |      |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3    | 100  | 67   | 785  | 116   | 295 | 62  | 57    | 49   | 78    | 38   | 495  | 42   | 75   | 276  | 619  | 115   | 131  | 47   | 43    | 176  | 515   | 198  | 1300 | 86   | 344  | 150  | 290  | 70    | 89  | 44  | 30    | 34   | 53    | 85   | 3                  |      |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4    | 91   | 65   | 875  | 112   | 251 | 58  | 87    | 48   | 88    | 37   | 1260 | 42   | 69   | 196  | 513  | 171   | 110  | 168  | 46    | 47   | 210   | 568  | 176  | 824  | 90   | 282  | 138  | 243   | 66  | 64  | 43    | 25   | 37    | 859  | 80                 | 4    |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 5    | 90   | 62   | 676  | 136   | 213 | 50  | 89    | 59   | 67    | 37   | 538  | 42   | 65   | 170  | 408  | 151   | 103  | 157  | 45    | 48   | 192   | 862  | 167  | 592  | 79   | 236  | 128  | 194   | 60  | 81  | 43    | 23   | 43    | 502  | 77                 | 5    |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 6    | 110  | 60   | 460  | 132   | 189 | 53  | 62    | 59   | 59    | 37   | 331  | 41   | 82   | 155  | 334  | 311   | 103  | 290  | 45    | 48   | 139   | 587  | 148  | 570  | 79   | 207  | 110  | 184   | 69  | 55  | 42    | 23   | 203   | 285  | 70                 | 6    |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 7    | 122  | 60   | 354  | 119   | 169 | 55  | 79    | 98   | 59    | 43   | 200  | 40   | 59   | 133  | 287  | 495   | 132  | 206  | 44    | 49   | 115   | 365  | 151  | 1040 | 96   | 178  | 102  | 146   | 65  | 57  | 41    | 24   | 213   | 203  | 65                 | 7    |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 8    | 121  | 59   | 290  | 221   | 155 | 48  | 121   | 152  | 61    | 99   | 148  | 41   | 59   | 119  | 243  | 368   | 115  | 1050 | 41    | 44   | 84    | 265  | 148  | 1030 | 96   | 150  | 94   | 135   | 74  | 63  | 41    | 24   | 114   | 162  | 64                 | 8    |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 9    | 116  | 58   | 237  | 304   | 145 | 48  | 93    | 185  | 80    | 71   | 128  | 40   | 57   | 107  | 204  | 871   | 133  | 1090 | 34    | 42   | 65    | 200  | 146  | 652  | 83   | 132  | 87   | 121   | 67  | 80  | 41    | 21   | 68    | 478  | 82                 | 9    |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 10   | 108  | 56   | 194  | 238   | 140 | 62  | 86    | 96   | 56    | 59   | 114  | 39   | 56   | 105  | 172  | 578   | 126  | 812  | 34    | 43   | 61    | 172  | 137  | 520  | 107  | 122  | 84   | 113   | 107 | 56  | 41    | 21   | 55    | 560  | 59                 | 10   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 11   | 101  | 55   | 189  | 194   | 146 | 69  | 136   | 75   | 54    | 54   | 100  | 38   | 54   | 115  | 182  | 419   | 125  | 512  | 34    | 41   | 60    | 162  | 113  | 425  | 82   | 136  | 82   | 617   | 70  | 54  | 41    | 22   | 51    | 314  | 58                 | 11   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 12   | 96   | 55   | 153  | 174   | 188 | 54  | 96    | 68   | 55    | 48   | 89   | 41   | 53   | 182  | 149  | 340   | 111  | 374  | 30    | 40   | 60    | 195  | 109  | 363  | 77   | 152  | 79   | 676   | 64  | 56  | 40    | 34   | 200   | 244  | 56                 | 12   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 13   | 128  | 55   | 142  | 391   | 174 | 52  | 78    | 64   | 64    | 44   | 77   | 59   | 52   | 235  | 135  | 299   | 115  | 366  | 53    | 40   | 59    | 174  | 104  | 313  | 73   | 139  | 73   | 451   | 57  | 56  | 39    | 27   | 208   | 511  | 54                 | 13   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 14   | 126  | 73   | 132  | 1040  | 145 | 50  | 66    | 59   | 66    | 38   | 72   | 54   | 52   | 1200 | 123  | 303   | 177  | 387  | 42    | 39   | 57    | 214  | 90   | 298  | 69   | 128  | 69   | 346   | 54  | 84  | 40    | 26   | 110   | 1110 | 53                 | 14   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 15   | 118  | 62   | 146  | 1170  | 131 | 49  | 60    | 56   | 56    | 35   | 69   | 335  | 51   | 2130 | 115  | 1030  | 163  | 269  | 80    | 52   | 58    | 556  | 97   | 273  | 72   | 122  | 65   | 297   | 56  | 60  | 40    | 28   | 79    | 549  | 53                 | 15   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 16   | 114  | 98   | 536  | 700   | 124 | 47  | 56    | 56   | 53    | 29   | 66   | 486  | 53   | 1770 | 106  | 898   | 193  | 229  | 40    | 44   | 84    | 481  | 87   | 225  | 82   | 116  | 63   | 540   | 194 | 53  | 39    | 29   | 66    | 474  | 54                 | 16   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 17   | 108  | 117  | 473  | 504   | 118 | 49  | 54    | 51   | 53    | 30   | 81   | 1130 | 52   | 1250 | 98   | 638   | 154  | 188  | 48    | 42   | 69    | 373  | 89   | 207  | 85   | 108  | 56   | 533   | 479 | 52  | 39    | 29   | 63    | 561  | 56                 | 17   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 18   | 99   | 112  | 428  | 749   | 113 | 49  | 55    | 47   | 50    | 32   | 57   | 547  | 71   | 729  | 94   | 455   | 133  | 161  | 62    | 46   | 62    | 337  | 88   | 192  | 80   | 103  | 54   | 414   | 536 | 50  | 39    | 28   | 85    | 474  | 157                | 18   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 19   | 94   | 112  | 339  | 572   | 108 | 47  | 51    | 49   | 48    | 33   | 54   | 1140 | 57   | 492  | 92   | 363   | 119  | 146  | 60    | 46   | 43    | 61   | 325  | 86   | 176  | 82   | 101  | 55    | 335 | 293 | 50    | 39   | 25    | 118  | 833                | 532  | 19  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 20   | 91   | 97   | 279  | 507   | 99  | 47  | 50    | 49   | 47    | 32   | 51   | 639  | 51   | 376  | 308  | 114   | 208  | 55   | 45    | 44   | 62    | 408  | 82   | 183  | 88   | 263  | 64   | 273   | 245 | 48  | 40    | 26   | 136   | 566  | 1140               | 20   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 21   | 88   | 379  | 219  | 566   | 94  | 48  | 50    | 46   | 49    | 31   | 51   | 360  | 51   | 308  | 248  | 111   | 337  | 52   | 41    | 45   | 59    | 1340 | 132  | 155  | 126  | 256  | 85   | 219   | 225 | 47  | 39    | 26   | 113   | 990  | 1050               | 21   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 22   | 91   | 800  | 183  | 570   | 90  | 51  | 49    | 44   | 50    | 30   | 56   | 363  | 48   | 259  | 208  | 112   | 220  | 50   | 42    | 53   | 52    | 1240 | 515  | 150  | 298  | 1020 | 172  | 189   | 159 | 46  | 39    | 33   | 100   | 716  | 2060               | 22   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 23   | 83   | 502  | 231  | 489   | 88  | 49  | 50    | 43   | 50    | 31   | 60   | 540  | 50   | 218  | 317  | 125   | 166  | 48   | 42    | 204  | 52    | 1330 | 555  | 140  | 321  | 827  | 261  | 169   | 129 | 45  | 42    | 39   | 85    | 466  | 1620               | 23   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 24   | 82   | 1000 | 214  | 397   | 86  | 46  | 50    | 44   | 40    | 32   | 53   | 344  | 67   | 191  | 267  | 161   | 163  | 47   | 41    | 332  | 53    | 888  | 482  | 136  | 415  | 468  | 255  | 144   | 112 | 48  | 38    | 29   | 77    | 343  | 1110               | 24   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 25   | 82   | 858  | 187  | 406   | 85  | 48  | 50    | 45   | 32    | 32   | 49   | 265  | 105  | 177  | 230  | 374   | 145  | 48   | 42    | 117  | 51    | 648  | 342  | 130  | 538  | 346  | 272  | 130   | 99  | 47  | 39    | 28   | 70    | 260  | 595                | 25   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 26   | 80   | 592  | 175  | 494   | 84  | 47  | 48    | 55   | 32    | 32   | 48   | 189  | 427  | 173  | 225  | 233   | 137  | 46   | 50    | 70   | 54    | 562  | 705  | 122  | 508  | 335  | 325  | 118   | 99  | 51  | 38    | 34   | 84    | 218  | 448                | 26   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 27   | 78   | 409  | 161  | 526   | 84  | 49  | 48    | 585  | 31    | 33   | 47   | 184  | 191  | 535  | 184  | 163   | 522  | 42   | 46    | 54   | 55    | 453  | 1380 | 115  | 441  | 459  | 349  | 108   | 95  | 45  | 38    | 32   | 60    | 168  | 381                | 27   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 28   | 75   | 752  | 144  | 449   | 84  | 50  | 47    | 321  | 34    | 37   | 46   | 137  | 320  | 798  | 177  | 134   | 1580 | 41   | 46    | 51   | 61    | 384  | 918  | 112  | 424  | 388  | 413  | 103   | 93  | 45  | 38    | 35   | 54    | 144  | 303                | 28   |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 29   | 73   | 134  | 399  | 75    | 47  | 48  | 130   | 39   | 87    | 44   | 119  | 486  | 486  | 486  | 162  | 121   | 978  | 41   | 49    | 52   | 472   | 330  | 673  | 108  | 319  | 301  | 95   | 146   | 44  | 38  | 56    | 50   | 138   | 242  | 29                 |      |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 30   | 71   | 126  | 362  | 73    | 47  | 51  | 95    | 38   | 80    | 43   | 107  | 268  | 268  | 268  | 145  | 112   | 698  | 40   | 46    | 74   | 1060  | 301  | 1260 | 102  | 256  | 233  | 85   | 108   | 50  | 38  | 78    | 48   | 127   | 201  | 30                 |      |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 31   | 68   | 120  | 120  | 69    | 69  | 69  | 79    | 79   | 79    | 119  | 96   | 96   | 215  | 215  | 215  | 107   | 107  | 40   | 94    | 381  | 1070  | 95   | 1070 | 95   | 417  | 169  | 277  | 153   | 260 | 135 | 56    | 40   | 31    | 88   | 408                | 360  | moy |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|      |      |      |      |       |     |     |       |      |       |      |      |      |      |      |      |       |      |      |       |      |       |      |      |      |      |      |      |       |     |     |       |      |       |      | Débit moyen 1991 : |      |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|      |      |      |      |       |     |     |       |      |       |      |      |      |      |      |      |       |      |      |       |      |       |      |      |      |      |      |      |       |     |     |       |      |       |      | 200 l/s            |      |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| JAN. | 97   | 241  | 308  | 410   | 144 | 52  | 65    | 94   | 53    | 46   | 152  | 244  | 111  | 456  | 323  | 369   | 140  | 399  | 143   | 46   | 64    | 152  | 503  | 351  | 417  | 169  | 277  | 153   | 260 | 135 | 56    | 40   | 31    | 88   | 408                | 360  | max |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| min  | 128  | 1000 | 875  | 1170  | 344 | 69  | 136   | 585  | 88    | 119  | 1260 | 1140 | 488  | 2130 | 1350 | 1030  | 374  | 1580 | 1470  | 94   | 332   | 1060 | 1340 | 1380 | 1300 | 538  | 1020 | 413   | 676 | 536 | 91    | 49   | 78    | 213  | 1110               | 2060 | min |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Débites classés :  
(1989-1991)

|      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 3    | 9    | 18  | 55  | 91  | 137 | 182 | 228 | 300 | 329 | 347 | 355 |
| 1340 | 1070 | 769 | 380 | 225 | 137 | 98  | 67  | 48  | 42  | 37  | 32  |

|         |         |
|---------|---------|
| 1989-90 | 213 l/s |
| 1990-91 | 207 l/s |

# Extrait du Curriculum Vitae

## **Pierre-Alain Gretillat**

Centre d'hydrogéologie (CHYN),  
Institut de Géologie, Université de Neuchâtel,  
Chemin de Chantemerle 22  
CH-2000 NEUCHÂTEL  
tél. (0041) 32.718.26.00 fax. (0041) 32.718.26.01

Pierre-Alain Gretillat est marié et a 3 enfants. Il a obtenu ses diplômes de Géologue et d'Hydrogéologue (3<sup>ème</sup> cycle post-grade) en 1986, à l'Université de Neuchâtel.

Il y a soutenu sa thèse de doctorat en hydrogéologie en 1996.

De 1985 à 1987, il a effectué de nombreux travaux d'expertise pour le CHYN, tant dans les domaines des aquifères poreux du plateau suisse, que des aquifères karstiques du Valais et de la chaîne du Jura. De 1988 à 1992, le CHYN lui a confié la responsabilité d'une importante étude sur les eaux souterraines d'Ajoie (Jura), en collaboration avec le Laboratoire cantonal des eaux du Jura. Un rapport destiné aux autorités cantonales ainsi qu'une thèse de doctorat et une carte hydrogéologique au 1:25'000 résultent de cette étude.

De 1993 à 1995, il a travaillé comme hydrogéologue dans un bureau d'ingénieur du canton de Neuchâtel. Les zones de protections des captages, l'amélioration de captages, des études d'impact ainsi que des problèmes liés à des décharges ont constitué l'essentiel de ses activités. Depuis 1995, il a entrepris des études à la Faculté de théologie de l'Université de Neuchâtel. Parallèlement à cette activité, il travaille depuis 1996 dans un bureau d'ingénieurs de Porrentruy, en particulier sur l'exploitation du réseau d'observation hydrologique de la A16 (étude d'impact en vue de la construction d'une autoroute en Ajoie ).

## **PUBLICATIONS:**

GRETILLAT, P-A., BOUYER, Y. & MÜLLER, I. (1986): Un exemple d'utilisation de la géophysique électromagnétique pour l'étude de la fracturation au nord de la source karstique de la Noiraigue (Jura NE). Bulletin du CHYN n°7, pp. 335-346.

GRETILLAT, P-A., SCHÜTZ, F., SCHINDLER, B. & LIEVRE, A. (1988): Multitraçage en Haute-Ajoie. Bulletin du CHYN n°8, pp. 121-149.

GRETILLAT, P-A., SCHÜTZ, F. & SCHINDLER, B. (1988): Coloration des eaux souterraines de Haute-Ajoie. Bulletin de l'ADIJ (Assoc. développement Intérêts du Jura) n°4, pp. 44-64.

GRETILLAT, P-A. & MÜLLER I. (1990): Cartographie géologique dans la vallée des Ponts (Jura NE), assistée par la géophysique électromagnétique. Bulletin de la Soc. neuch. Sci. nat. n°113, pp.99-106.

GRETILLAT, P-A. (1990): Prospection microsismique de la nappe alluviale de Courtemaîche (Jura). Bull. du CHYN n°9, pp.103-112.

GRETILLAT, P-A., LIEVRE, A. & FERNEX, J. (1992): Le Jura tabulaire d'Ajoie. Excursion le 18 octobre 1992 du 5ème colloque d'hydrologie en pays calcaire. Annales scientifiques de l'Université de Besançon. Géologie. Mém. hors série n°11.

GRETILLAT, P-A. (1992): Carte Hydrogéologique de l'Ajoie (Canton du Jura, Suisse). Eléments pour la gestion et la protection des eaux. Ech. 1: 25 000. Office des Eaux et de la Protection de la Nature, St-Ursanne et Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel,

GRETILLAT, P-A. (1996): Aquifères karstiques et poreux de l'Ajoie (Jura, Suisse). Eléments pour la carte hydrogéologique au 1:25'000. Vol. 1 : Texte et annexes ; Vol. 2 : Notice explicative de la carte hydrogéologique. Thèse, Université de Neuchâtel.

ROSSI, P., GRETILLAT, P-A., KENNEDY, K., MULLER, I. & ARAGNO, M. (en préparation) : Use of a marine bacteriophage as a biological river tracer.

# **AQUIFÈRES KARSTIQUES ET POREUX DE L'AJOIE (JURA, SUISSE)**

## **Eléments pour la carte hydrogéologique au 1: 25'000**

**Par Pierre-Alain Gretillat**

Université de Neuchâtel, Institut de Géologie, Centre d'hydrogéologie

Rue de Chantemerle 22 – CH-2000 NEUCHÂTEL

Tél. (0041) 32.718.26.00 Fax. (0041) 32.718.26.01

*Volume 1 (texte et annexes) : 219 p., 82 figures, 24 tableaux, 4 annexes.*

### **RESUME**

L'Ajoie est située dans le prolongement méridional du Fossé Rhénan, au pied de la dernière chaîne du Jura plissé et à l'extrémité orientale du Jura tabulaire français. Les terrains ajoulots sont essentiellement karstiques. L'aquifère principal, celui du Malm (30 à 250 m d'épaisseur) a comme substratum de base les marnes très peu perméables de l'Oxfordien (80 m environ). Dans cet environnement karstique, les aquifères alluviaux ont cependant une importance primordiale, malgré leur extension limitée, dans l'exploitation des ressources en eau potable de l'Ajoie.

Les cours d'eau qui drainent l'Ajoie, en particulier l'Allaine, se jettent dans le Doubs, qui appartient au bassin du Rhône. Le cours d'eau principal, l'Allaine s'étend sur une longueur d'environ 30 km de sa source à sa sortie de Suisse (limnigraphe fédéral de Boncourt). La surface du bassin correspondant atteint 182 km<sup>2</sup>, inférieure à celle du bassin topographique (215 km<sup>2</sup>). Avec une altitude moyenne de 550 m d'altitude et environ 90% du bassin situé à moins de 650 m, le bassin de l'Allaine est considéré comme un bassin de relativement basse altitude. Les écoulements sont à la fois superficiels (forte densité de drainage dans la partie orientale couverte de Tertiaire) et souterrains (partie occidentale et septentrionale). Les principaux exutoires du Malm (Beuchire, Betteraz, La Fontaine) ont été étudiés.

On observe une mauvaise corrélation précipitations - altitude pour 4 cycles hydrologiques. Les méthodes de Thiessen et des isohyètes ont été très utiles pour le calcul de la lame d'eau annuelle. La répartition spatiale des précipitations montrent pour les 4 cycles étudiés une représentation similaire, pour des valeurs annuelles variant de 826 à 1182 mm. Des précipitations nettement plus faibles (20 à 30% de moins) ont été systématiquement mesurées au N-E de Porrentruy.

Les principales sources karstiques ont des débits moyens de 800 l/s (La Beuchire) à 200 l/s (Le Betteraz, Le Voyeboeuf, La Bonne-Fontaine), pour un débit moyen total de 3100 l/s (Allaine à Boncourt) et un débit spécifique moyen de 17 l/s.km<sup>2</sup>. Les exutoires étudiés réagissent très rapidement aux précipitations (pics des hydrogrammes atteints en quelques heures). Les vitesses d'écoulement des eaux souterraines, déterminées par des essais de traçages, peuvent passer de 10-20 à 300-400 m/h voire même 1000 m/h.

L'apport des traçages a été considérable pour délimiter les bassins versants des principales sources mais aussi pour définir l'origine des différentes pollutions (décharges avec solvants, rejets d'eaux usées) dans les sources, élément essentiel à une gestion des eaux optimale.

Pour leur part, les aquifères alluviaux sont des systèmes complexes. Les apports allochtones constituent ainsi la plus grande part de l'eau exploitée des nappes de Courtemaître et du Pont d'Able (Porrentruy). L'Allaine, le karst et la réalimentation des nappes alluviales (d'origine karstique) constituent la majorité de ces apports dans des proportions variant selon l'état hydrologique. Ces apports sont peu rapides étant donné une amplitude saisonnière élevée de la température (3 à 5 °C).

La mise en service de la STEP de Porrentruy en 1987 et du captage de la source du Betteraz (1992) sont les événements majeurs survenus dans la gestion des eaux en Ajoie. La qualité des eaux superficielles (surtout l'Allaine) s'est nettement améliorée et la plupart des rejets d'eaux usées dans le karst ou dans un cours d'eau ont été supprimés. Avant 1992, la proportion d'eau alluviale et d'eau karstique exploitée pour l'eau potable était équivalente. Après 1992, la proportion a passé à un tiers pour l'eau alluviale et à deux tiers pour l'eau karstique.

Point culminant de cette thèse, la carte hydrogéologique de l'Ajoie au 1:25'000 est incluse dans le volume 2 intitulé : « Notice explicative ». Par une lecture sur plusieurs niveaux, la carte est un outil précieux qui permet notamment d'obtenir une vision synthétique des caractéristiques des différents aquifères et des problèmes liés à la gestion des eaux (pollutions multiples). Des tableaux synthétiques regroupent les caractéristiques de 92 sources/puits, de 88 forages et de 112 essais de traçage.

### **Mots-clés**

Acquisition des données - Allaine - Carte hydrogéologique - Gestion des eaux - Hétérogénéité des précipitations - Système karstique - Système alluvial - Traçages.