

Zeitschrift: Actes de la Société jurassienne d'émulation

Herausgeber: Société jurassienne d'émulation

Band: 95 (1992)

Artikel: Les eaux souterraines du Jura tabulaire d'Ajoie : évolution de la qualité bactériologique : évaluation et protection des ressources

Autor: Lièvre, Ami / Fernex, Jean / Gretillat, Pierre-Alain

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-555238>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 26.04.2026

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

Les eaux souterraines du Jura tabulaire d'Ajoie

ÉVOLUTION DE LA QUALITÉ BACTÉRIO-CHIMIQUE, ÉVALUATION ET PROTECTION DES RESSOURCES

par Ami Lièvre, Jean Fernex et Pierre-Alain Gretillat

1. INTRODUCTION

L'Ajoie est une région dans laquelle les problèmes de gestion des eaux se posent d'une manière cruciale. Plusieurs éléments naturels et anthropogènes expliquent ce fait. La nature karstique du sous-sol, ainsi que le relief peu développé entraînent une infiltration rapide des eaux de pluie vers des sources situées dans la vallée de l'Allaine. De nombreuses communes ont dû se regrouper en syndicats d'alimentation en eau ou chercher leur eau à grande distance. La région est assez fortement industrialisée et son industrie est spécialisée (horlogerie et micromécanique). Pendant longtemps, des polluants industriels, en particulier les solvants chlorés volatils, ont été déversés dans les égouts et les décharges sauvages, causant une pollution des eaux souterraines. Dans bien des communes enfin, les eaux usées domestiques étaient et sont parfois toujours infiltrées dans des puits perdus, contaminant également les eaux souterraines.

D'importants investissements ont été consentis pour garantir l'approvisionnement en eau et améliorer la qualité des eaux: mise en place de systèmes de traitement des eaux de boisson, épuration des eaux usées domestiques, meilleur contrôle des déchets industriels. A ce jour, aucune étude n'avait pourtant été réalisée pour s'assurer que ces efforts allaient réellement dans la bonne direction et permettaient une amélioration de la situation des eaux dans la région.

C'est la raison pour laquelle le Parlement jurassien a chargé le Laboratoire cantonal des eaux, rattaché à l'Office des eaux et de la protec-

tion de la nature (OEPN), de mener à bien une étude sur les eaux souterraines du Jura tabulaire. Cette étude, subventionnée par l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, a reçu l'appui scientifique du Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel (CHYN); elle a débuté en 1988 pour s'achever au cours de l'année 1992. Elle a été réalisée sous la direction d'Ami Lièvre, chef du Laboratoire cantonal des eaux; Jean Fernex, biologiste, s'est chargé de la synthèse des données physico-chimiques et hydrologiques alors que Pierre-Alain Gretillat, hydrogéologue détaché au Laboratoire des eaux par le CHYN, s'est particulièrement occupé des questions de géologie et de géophysique.

Les buts visés sont les suivants:

- connaissance des circulations souterraines et du fonctionnement des aquifères; délimitation précise des bassins versants d'alimentation des sources;
- évaluation des ressources potentiellement exploitables, tant dans les aquifères karstiques (eaux souterraines se trouvant dans les fissures et fractures des roches calcaires) qu'alluviaux (eaux souterraines contenues dans les graviers accumulés dans la plaine de l'Allaine);
- 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;
- connaissance du comportement des micropolluants dans les eaux souterraines, évaluation des assainissements potentiels.

La réponse à ces questions doit nous permettre de proposer aux pouvoirs publics les éléments de décision pour mener une politique de gestion globale et cohérente des eaux et des déchets dans une région karstique. Ces conclusions devraient être applicables en dehors de notre stricte zone d'étude et s'étendre à toute région de géologie et d'hydrogéologie comparable.

Parallèlement à nos propres investigations, nous avons eu la chance de pouvoir coordonner en grande partie la mise en place des stations de mesure des précipitations et du débit des sources et des cours d'eau

dans le cadre de l'étude d'impact de la route nationale 16 (Transjurane); nous avons également bénéficié des résultats de plusieurs essais de traçage des eaux souterraines effectués dans ce cadre. Nous avons de plus pu profiter de très nombreux résultats analytiques des eaux usées, cours d'eau, sources et puits, effectués par le Laboratoire des eaux entre 1981 et 1992 dans le cadre de ses activités habituelles.

















Les travaux ont été menés grâce aux infrastructures disponibles au Laboratoire cantonal des eaux à Saint-Ursanne (analyses physico-chimiques) et au Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel (études de géophysique, analyses des traceurs fluorescents). Une commission scientifique a suivi le déroulement des travaux, y compris la rédaction finale. Elle était présidée par M. Jean-Claude Bouvier, chef de l'OEPN, et composée des membres suivants: MM. André Burger, professeur honoraire et ancien directeur du CHYN, Daniel Hartmann, géologue à l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Imre Müller, professeur et géophysicien au CHYN, Hans-Ulrich Schweizer, chef de la division Protection des eaux et pêche de l'OFEFP, Philippe Zahner, géologue à Fribourg et François Zwahlen, professeur et directeur du CHYN.

L'étude des eaux souterraines se conclut par un rapport final comprenant l'ensemble des résultats détaillés. Ce rapport peut être en tous temps consulté à l'Office des eaux et de la protection de la nature à Saint-Ursanne, ou à la bibliothèque du CHYN. Il est accompagné de la totalité des analyses chimiques, des mesures hydrologiques, des mesures géophysiques, etc.

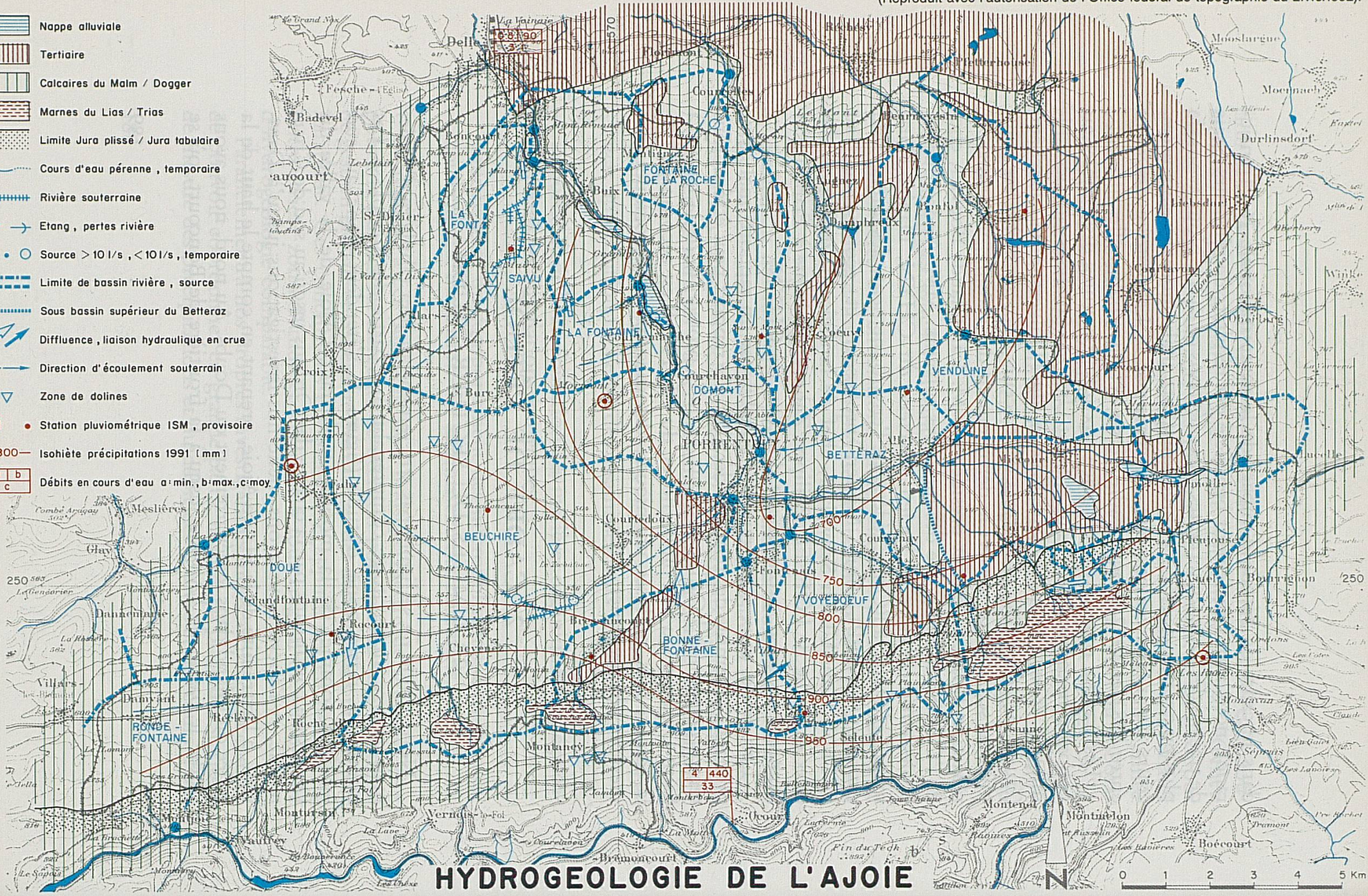
2. CADRE DE L'ÉTUDE

2.1 LIMITES DU SECTEUR ÉTUDIÉ

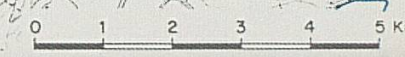
Notre étude ne se limite pas strictement au Jura tabulaire d'Ajoie, mais couvre un territoire comprenant une partie du Jura plissé. Les limites de notre zone d'étude (figure 1) s'étendent donc au sud jusqu'au sommet de la montagne séparant l'Ajoie de la vallée du Doubs, se continuant par la chaîne des Ordons jusqu'au sud de Charmoille. A l'ouest, nous avons mené nos investigations jusqu'à Damvant, à l'extrémité de la Haute-Ajoie, prenant en compte le haut de la vallée du Gland dans le département du Doubs. Au nord, nous avons étudié le bassin de l'Allaine jusqu'à la frontière de Boncourt, où se

-  Nappe alluviale
-  Tertiaire
-  Calcaires du Malm / Dogger
-  Marnes du Lias / Trias
-  Limite Jura plissé / Jura tabulaire
-  Cours d'eau pérenne, temporaire
-  Rivière souterraine
-  Etang, pertes rivières
-  Source > 10 l/s, < 10 l/s, temporaire
-  Limite de bassin rivière, source
-  Sous bassin supérieur du Betteraz
-  Diffuence, liaison hydraulique en crue
-  Direction d'écoulement souterrain
-  Zone de dolines
-  Station pluviométrique ISM, provisoire
-  Isohète précipitations 1991 [mm]
- | | |
|---|---|
| a | b |
| c | |

 Débits en cours d'eau a: min., b: max., c: moy.



HYDROGEOLOGIE DE L'AJOIE



trouve la station de mesure des débits du cours d'eau installée par le Service hydrologique et géologique national (SHGN), mais en nous centrant particulièrement sur le plateau de Bure et la région de Courtemaîche. A l'est, nous avons peu pris en compte les vallées de la Cœuvatte et de la Vendline, arrêtant notre domaine d'étude principal au versant de la rive droite de l'Allaine, et au secteur s'étendant entre Alle et Charmoille.

2.2 CADRE GÉOGRAPHIQUE

Le secteur principal de notre étude est composé d'un plateau au relief peu marqué, profondément entaillé par la vallée de l'Allaine et plusieurs de ses affluents, en liaison au sud avec la dernière chaîne du Jura plissé.

Naissant des pentes du Jura plissé à Charmoille, l'Allaine serpente d'abord dans la large plaine située entre Miécourt, Alle, Courgenay et Fregiécourt, où elle récolte les eaux de plusieurs affluents. A Porrentruy, son débit s'augmente de l'exutoire de quatre grandes sources, avant de s'écouler dans la vallée de la Basse-Allaine à travers les territoires des communes de Courchavon, Courtemaîche, Buix et enfin Boncourt.

La partie occidentale de la région, au contraire, est caractérisée par l'absence de cours d'eau permanents. Les eaux de ruissellement des pentes du Jura s'écoulent par des rus pérennes qui s'infiltrent progressivement au contact des calcaires de la plaine. Les structures caractéristiques de ce paysage sont les dolines (ou emposieux), entonnoirs plus ou moins profonds où les eaux de pluie s'infiltrent rapidement, et les vallées sèches dont la principale s'étend d'ouest en est, depuis Damvant jusqu'à Porrentruy, en passant par Réclère, Rocourt, Chevenez et Courtedoux. La description de ces structures serait incomplète si on ne parlait pas du Creugenat: ce vaste entonnoir situé entre Chevenez et Courtedoux, d'une profondeur de 15 à 20 mètres et au fond duquel l'eau est toujours présente, représente un élément très important dans la perception qu'a la population de la Haute-Ajoie des circulations souterraines: lors de fortes précipitations, le niveau de l'eau se met à monter dans l'entonnoir, où elle bouillonne furieusement jusqu'à atteindre le niveau du terrain et créer un cours d'eau temporaire parcourant les prés jusqu'à Porrentruy, avec une soudaineté étonnante et des débits parfois très élevés.

2.3 ACTIVITÉS HUMAINES ET COUVERTURE VÉGÉTALE

La population du district de Porrentruy (comprenant l'Ajoie et une partie du Clos du Doubs) s'élève à 23 900 habitants en 1990. Dans notre secteur d'étude, la population est relativement dispersée: Porrentruy, chef-lieu de district, compte un peu moins de 7000 habitants, les autres communes rassemblant entre 53 habitants (Montenol) et plus de 2000 (Courgenay).

En 1985 (recensement fédéral des entreprises de 1985), le secteur secondaire occupait plus de 50% de la population active, dont 30% environ dans le domaine de l'horlogerie (plus de 40% en 1975). Le secteur tertiaire représentait 35% et le secteur primaire environ 10%. Les industries d'Ajoie sont en moyenne relativement petites, et réparties dans toutes les communes.

La figure 2 indique les principales sources utilisées par les collectivités comme eau de boisson. Nous y avons reporté également les deux syndicats d'alimentation en eau: le syndicat des eaux de Haute-Ajoie (SEHA), regroupant neuf communes de la Haute-Ajoie et de la Basse-Allaine et pompant les eaux de la nappe alluviale de Courtemaîche; le syndicat des eaux de la Vendline (SEV), utilisant les eaux de la source de la Vendline et de la source de la Golatte située à Asuel.

Nous avons également reporté sur la figure 2 les deux syndicats d'épuration des eaux: le SEPE, syndicat d'épuration de Porrentruy et environs, qui exploite la station d'épuration régionale de Porrentruy; le SEBA, syndicat d'épuration de Basse-Allaine, qui procède actuellement à la construction du collecteur intercommunal qui conduira prochainement les eaux usées à la station d'épuration de Grandvillars en France; actuellement, les eaux usées de ces communes sont rejetées dans l'Allaine.

Les surfaces agricoles, où dominant l'élevage bovin pour la production laitière et les grandes cultures (céréales), représentent environ 60 à 70% de la superficie totale.

Les forêts se développent essentiellement sur les flancs assez raides du Jura plissé, ainsi que sur les versants ouest et est de la plaine de l'Allaine.

2.4 CLIMAT

Le climat de l'Ajoie est de type tempéré, avec une température moyenne de 9 degrés et des précipitations de l'ordre de 1100 mm par

an. Les pluies sont réparties sur toute l'année, avec un maximum entre mai et août et un minimum en hiver. Les précipitations proviennent essentiellement des masses d'air humide atlantiques poussées par les vents dominants du sud-ouest. La répartition des précipitations est hétérogène, comme l'indique la carte de la figure 1 (pluies de 1991: 700 à 900 mm); les pluies sont plus importantes sur le Jura plissé et sur le plateau de Bure, et montrent une diminution sensible vers l'est.

2.5 HYDROLOGIE

Les précipitations sont enregistrées par les stations de mesure fédérales de Fahy, Mormont et des Rangiers, ainsi que, pour la durée des études d'impact de la Transjurane, par 11 stations supplémentaires réparties dans toute l'Ajoie. Le débit de l'Allaine est mesuré depuis 1984 à la station fédérale de Boncourt, station qui nous sert de référence pour les variations à moyen terme du débit.

La comparaison des précipitations et du débit annuels exprimés en mm/an sur la surface totale du bassin versant de l'Allaine à Boncourt (182 km²) indique un déficit moyen de 490 mm/an. Ce déficit correspond assez précisément à l'évapotranspiration calculée par la méthode de Turc, qui se base sur les précipitations et la température annuelles moyennes. Selon les années, entre 43 et 57% de l'eau de pluie est soustraite par évapotranspiration, ce phénomène prenant une importance plus grande lorsque la température est élevée. Le restant s'écoule dans les aquifères ou ruisselle en surface, pour atteindre l'Allaine dont le débit à Boncourt varie entre 2,1 m³/s (minimum annuel enregistré en 1989) et 4,0 m³/s (maximum annuel enregistré en 1987).

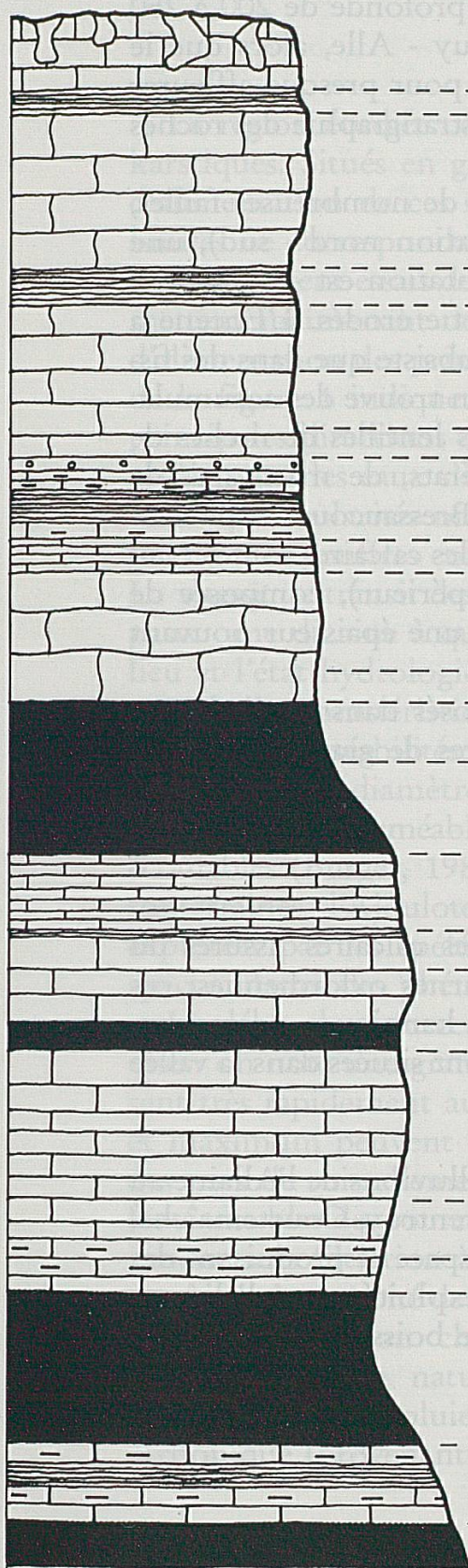
2.6 CADRE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Déjà bien connues grâce aux travaux de pionniers tels Perrone, Koby et Lucien Lièvre (voir en particulier Lièvre, 1945), puis aux levés géologiques dans le cadre de l'Atlas géologique suisse, et enfin par les travaux de Schweizer (1970), la géologie et l'hydrogéologie de l'Ajoie sont dominées par les phénomènes karstiques.

Les couches géologiques du **secondaire**, alternance de bancs calcaires plus ou moins fissurés et de niveaux marneux, reposent en strates sub-horizontales. Se succèdent de haut en bas les formations du Portlandien, du Kimméridgien, du Séquanien et du Rauracien. Le niveau

Figure 3

Lithostratigraphie de l'Ajoie.



Age [Ma]	Formations	Formations		Étages	Séries	
140	Portlandien	Portl.	Portl.	Portl.	MALM (Jurassique supérieur)	
	Marnes à Exogira Virgula	Kimméridgien	Kimméridgien	Kimméridgien		
	Marnes à Ptérocères					
	Oolithe Ste Vèrène Calcaires à Huméralis Marnes à Huméralis	Séquanien	Oxfordien			
	Couches à Natica	Rauracien				
	Couches de Vorbourg					
	Formation de St.-Ursanne	Oxfordien s.str.				
	Couches de Liesberg					
	Terrain à chailles					
160	Dalle nacrée	Hauptrogenstein	Bajocien	Bathonien		DOGGER (Jurassique moyen)
	Calcaire roux				Callovien	
	Hauptrogenstein supérieur					
	Marnes à Acuminata					
	Hauptrogenstein inférieur					
180	Couches à Murchisonae			Aal. sup.	LIAS (Jurassique inférieur)	
	Marnes à Opalines			Aalénien inférieur		
	Marnes et calcaires Lias moyen et inférieur			Toarcien Sinémud		
200	Marnes à gypse du Keuper			Keuper	TRIAS	

de l'Oxfordien, composé de marnes imperméables d'une épaisseur d'environ 80 mètres, représente la limite inférieure des aquifères karstiques régionaux. Nous avons dressé une carte de la profondeur de l'Oxfordien, qui met en évidence une cuvette profonde de 200 à 250 mètres dans la région Courtedoux - Porrentruy - Alle, alors que le niveau remonte vers la surface du sol au nord pour presque affleurer dans la région de Buix. La figure 3 indique la stratigraphie des roches de l'ère secondaire en Ajoie.

Ce plateau calcaire est fortement haché par de nombreuses failles, dont les principales sont méridiennes (orientation nord - sud), une famille de failles moins marquées étant d'orientation est - ouest.

Les dépôts **tertiaires** ont été en grande partie érodés. L'Eocène a totalement disparu de la région étudiée, et ne subsiste que dans des fissures des calcaires sous-jacents du Malm, où l'on trouve des accumulations de sables de quartz d'origine éocène. Des lentilles de roches de l'Oligocène inférieur, composés de conglomérats, de marnes et de grès, peuvent être observés dans les régions de Bressaucourt et de Porrentruy. Dans la plaine de l'Allaine supérieure, les calcaires sont recouverts par la molasse alsacienne (Oligocène supérieur), composée de marnes et de bancs décimétriques de grès, sur une épaisseur pouvant atteindre plus de 100 mètres.

Au **quaternaire**, des alluvions se sont déposés dans les thalwegs, formant des accumulations de 2 à 10-20 mètres de graviers calcaires surmontés de limons bruns sableux.

On distingue deux catégories d'aquifères:

- les aquifères karstiques, développés dans les calcaires fissurés du Malm et limités en profondeur par les marnes oxfordiennes; ces aquifères alimentent de nombreuses sources karstiques, permanentes ou temporaires; les principales sources sont situées dans la vallée de l'Allaine, de Porrentruy à Boncourt;
- les aquifères alluviaux, développés dans les alluvions de l'Allaine au niveau des élargissements de la vallée, à Porrentruy, Courtemâche, Buix et Boncourt; bien que limités dans l'espace et produisant des ressources peu étendues, ces aquifères sont exploités pour l'alimentation de nombreuses communes en eau de boisson.

3. EAUX SOUTERRAINES

3.1 LES EAUX SOUTERRAINES KARSTIQUES

3.1.1 Généralités

La région étudiée comprend de multiples sources, essentiellement karstiques. Situés en grande partie dans le Jura tabulaire, les bassins d'alimentation de ces sources sont souvent difficiles à préciser, leurs limites ne correspondant fréquemment pas aux lignes de crête.

Plus de cent essais de traçage, effectués entre 1914 et 1992, nous permettent maintenant de définir avec une bonne précision les bassins d'alimentation des principales sources karstiques de la région. La carte de la figure 1 indique les limites que nous proposons, ainsi que les principales directions d'écoulements régionaux.

Bien que les eaux s'infiltrent sur l'ensemble du bassin versant, certaines particularités morphologiques du karst, telles que les dolines, fractures et gouffres constituent des points d'infiltration préférentiels. La vitesse de transit des eaux est élevée dans les cheminements principaux: une dizaine à quelques centaines de mètres par heure selon le lieu et l'état hydrologique.

Une des caractéristiques des aquifères karstiques est la hiérarchisation des perméabilités: l'eau peut circuler rapidement dans des chenaux de grand diamètre, alors que certains blocs calcaires peu fissurés sont très peu perméables et constituent des réserves d'eau lentement écoulables (Burger, 1983). En Ajoie, nous connaissons deux rivières souterraines, l'Ajoulotte et la Milandrine (signalées sur la figure 1), explorées par les spéléologues (Gigon et Wenger, 1986) et témoins spectaculaires des phénomènes karstiques.

Le débit des sources karstiques reflète clairement ces caractéristiques: on note une grande nervosité du régime des sources, qui réagissent très rapidement aux pluies. Les variations entre débit minimum et maximum peuvent dépasser un facteur 100. L'infiltration massive des eaux de ruissellement dans des dolines provoque fréquemment de forts troubles des sources, les argiles et limons lessivés dans les sols parvenant sans filtration à l'exutoire. Les débits d'étiage sont donc aussi extrêmes, la capacité de stockage à long terme des aquifères étant basse.

La composition chimique des eaux karstiques est avant tout influencée par la nature calcaire du substrat géologique (Miserez, 1973). Les eaux de pluie s'infiltrent dans les sols et se chargent en acide carbonique (provenant de l'activité biologique des sols). Elles dissol-

vent le carbonate de calcium durant leur transit souterrain, atteignant un équilibre dynamique entre agressivité de l'eau et solubilité de la calcite. Les eaux sont donc de type bicarbonaté calcique, relativement dures, le taux de calcium variant entre 100 et 140 mg/l. Les autres sels minéraux se trouvent en concentration nettement plus basse, et peuvent être influencés également par la pollution agricole, domestique ou industrielle, voire par le salage des routes (chlorure et sodium). Du fait de la structure tabulaire de l'Ajoie, les variations de composition chimique des différentes sources sont assez faibles. On note cependant une minéralisation plus basse des sources dont le bassin d'alimentation est élevé, et des teneurs en nitrate inférieures dans les sources où l'influence agricole est moindre (bassins d'alimentation essentiellement forestiers).

Le tableau 1 indique les superficies, débits et altitudes moyennes des principaux bassins versants hydrogéologiques de la région étudiée.

Tableau 1

Caractéristiques des principaux bassins versants hydrogéologiques d'Ajoie (débits pour la période 1989 - 1990)

	SUPERFICIE	DÉBIT			ALTITUDE MOYENNE
		moyen	minimum	maximum	
	km ²	l/s	l/s	l/s	mètres
Beuchire	48.0	690	80	2000 ³⁾	557
Betteraz ¹⁾²⁾	10.0	180	50	1500	485
Voyebœuf	13.5	190	24	4000	593
Bonne-Fontaine	16.0	200	40	2500	611
Saivu-la Font ¹⁾	17.0	(250)	(30)		524
La Fontaine ¹⁾	5.2	(60)	(20)	(500)	497
Domont	2.0	40	2	500	510
Pâquis	1.0	10			430
Allaine amont de Alle	41.9	400	50	5000	
Divers	27.4				
Total Allaine à Boncourt	182	2540	480	33000	552

Les débits indiqués entre parenthèses sont *estimés* d'après des mesures ponctuelles.

¹⁾ Bassin alimentant aussi un aquifère alluvial

²⁾ Sans bassin à infiltration et écoulement lent: 15,5 km² situés dans le secteur de l'Allaine en amont de Alle

³⁾ Sans tenir compte du Creugenat: maximum estimé au Creugenat à 30 000 l/s

Les valeurs de débit indiquées dans le tableau ci-dessus sont valables pour la période 1989 - 1990, qui a été particulièrement sèche. A titre de comparaison, le débit moyen de l'Allaine à Boncourt durant la période 1984 - 1991 a été de 3060 l/s, soit 120% de la valeur 1989 - 1990. Ce rapport est approximativement valable pour les sources étudiées.

3.1.2 *Le système Creugenat - Beuchire*

Principale source d'Ajoie, la Beuchire émerge dans la ville de Porrentruy et rassemble les eaux d'un bassin versant de près de 50 km². Son bassin d'alimentation a fait l'objet de nombreuses conjectures et intéresse de près les Ajoulots, car le Creugenat, trou émissif spectaculaire que nous avons brièvement décrit plus haut, est la partie visible de la rivière souterraine l'Ajoulotte liée à l'aquifère de la Beuchire. De nombreuses hypothèses ont été émises, et c'est Lucien Lièvre (Lièvre, 1936), qui a prouvé la relation directe entre le trou du Creugenat et la source de la Beuchire: en pompant grâce à des pompes puissantes dans le trou du Creugenat, il mit à sec la source à Porrentruy. Jusqu'en 1988, toutes les études publiées considéraient que la rivière souterraine, l'Ajoulotte, drainait les eaux de toute la Haute-Ajoie, de Damvant à Porrentruy, un bras latéral rassemblant les eaux de Grandfontaine. Afin de lever définitivement les incertitudes restantes quant à la provenance de ces eaux, nous avons organisé depuis 1988 plusieurs essais de traçage dans ce secteur. Les résultats que nous avons obtenus permettent maintenant de réviser largement les conclusions de nos prédécesseurs.

Le bassin de la Beuchire est très bien drainé, son exutoire réagit très rapidement aux précipitations (voir la figure 4). La Beuchire est l'exutoire principal de l'Ajoulotte, alors que la source Chaumont, également à Porrentruy, est un exutoire secondaire qui rassemble une faible part des eaux de l'Ajoulotte, et possède un petit bassin versant indépendant. Le trou du Creugenat, exutoire de crue de l'Ajoulotte, se trouve dans la zone de confluence de trois drains principaux venant de Fahy, de Chevenez et du Jura plissé.

Le débit moyen de la Beuchire dépasse 700 litres/seconde, le minimum est d'environ 80 l/s et les pointes de crue atteignent 2000 l/s (30 000 l/s en tenant compte du débordement du Creugenat). Selon nos estimations, les réserves écoulables au début du tarissement peuvent être évaluées à 800 000 m³ (réservoir total: 30 millions de m³).

Les volumes d'eau écoulés sont les plus importants entre les mois de novembre et d'avril (deux tiers du débit annuel, pour 42% des pluies annuelles). Durant cette période, l'aquifère se recharge, et les eaux sont moins minéralisées. Entre avril et octobre, l'évapotranspiration est forte et les pluies efficaces en conséquence plus faibles; l'aquifère connaît alors une diminution importante de ses réserves. Les vitesses d'écoulement diminuent avec une participation de plus en plus active du réservoir capacitif (à faible perméabilité).

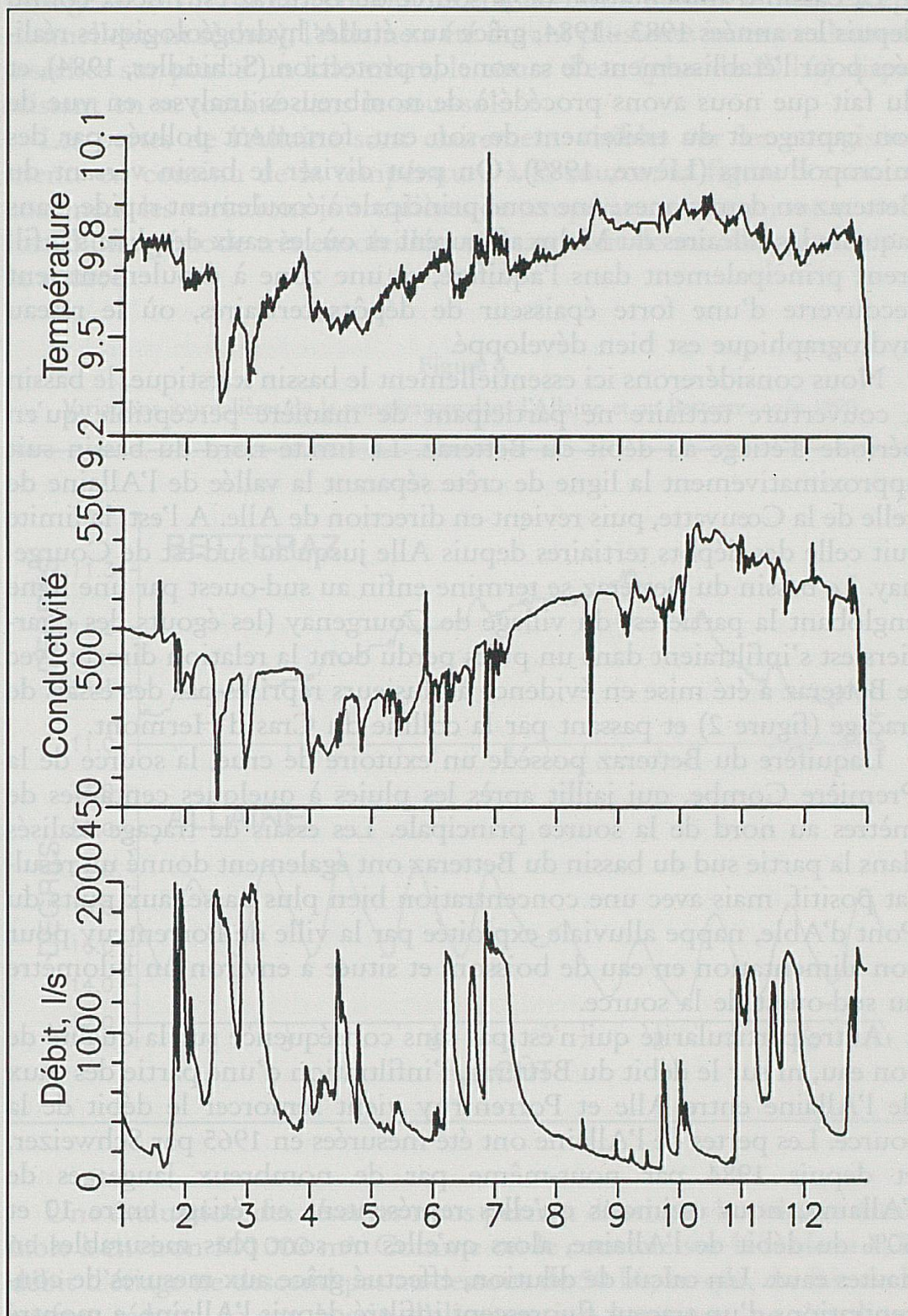
Les eaux s'infiltrant à Rocourt ne suivent pas la direction qu'indique la topographie de surface (pente vers l'est), mais s'écoulent en difflueance vers deux exutoires: en partie vers le nord-ouest, jusqu'à la source de la Doue sur territoire français, et vers le sud-ouest vers la source de la Ronde-Fontaine à Montjoie au bord du Doubs, ayant traversé de part en part l'anticlinal du Lomont en profitant probablement d'une faille principale faisant office de drain. Les eaux de Grandfontaine s'écoulent vers la source de la Doue, celles de Damvant et Réclère en direction de la source de la Ronde-Fontaine.

Nous avons ainsi pu redéfinir les grandes directions du parcours de l'Ajoulotte: cette rivière souterraine draine les eaux en provenance de Chevenez, du Jura plissé, et d'une région plus étendue au nord-ouest dans les plateaux de la Haute-Ajoie, de Fahy à Bure. Cette nouvelle interprétation du cours de l'Ajoulotte, ainsi que les limites du bassin versant de la Beuchire, apparaissent sur la carte de la figure 1. La limite ouest du bassin coïncide avec une faille méridienne traversant le village de Fahy, puis passe à l'est de Rocourt, pour rejoindre le Jura plissé vers Roche-d'Or.

Durant cette phase, les écoulements lents favorisent la concentration d'éléments chimiques provenant de la dissolution de minéraux peu solubles: magnésium, potassium et sodium. Les concentrations maximales sont donc observées à la fin de l'étiage. Malgré un volume d'eau élevé impliquant une grande inertie thermique, l'impact des précipitations sur la température de l'eau à l'exutoire est sensible durant les crues, et l'infiltration d'eaux froides (par exemple une fonte de neige) peut baisser temporairement la température à la source de 0,4 degré. La température moyenne de la source est de 9,75°C.

Figure 4

Evolution du débit, de la conductivité et de la température à la source de la Beuchire en 1990.



3.1.3 Le Betteraz

Le bassin d'alimentation de la source du Betteraz est mieux connu depuis les années 1983 - 1984, grâce aux études hydrogéologiques réalisées pour l'établissement de sa zone de protection (Schindler, 1984), et du fait que nous avons procédé à de nombreuses analyses en vue de son captage et du traitement de son eau, fortement polluée par des micropolluants (Lièvre, 1989). On peut diviser le bassin versant du Betteraz en deux zones: une zone principale à écoulement rapide, dans laquelle les calcaires du Malm affleurent et où les eaux de pluie s'infiltreraient principalement dans l'aquifère, et une zone à écoulement lent recouverte d'une forte épaisseur de dépôts tertiaires, où le réseau hydrographique est bien développé.

Nous considérerons ici essentiellement le bassin karstique, le bassin à couverture tertiaire ne participant de manière perceptible qu'en période d'étiage au débit du Betteraz. La limite nord du bassin suit approximativement la ligne de crête séparant la vallée de l'Allaine de celle de la Cœuvatte, puis revient en direction de Alle. A l'est, la limite suit celle des dépôts tertiaires depuis Alle jusqu'au sud-est de Courgenay. Le bassin du Betteraz se termine enfin au sud-ouest par une ligne englobant la partie est du village de Courgenay (les égouts des quartiers est s'infiltraient dans un puits perdu dont la relation directe avec le Betteraz a été mise en évidence à plusieurs reprises par des essais de traçage (figure 2) et passant par la colline du Cras d'Hermont.

L'aquifère du Betteraz possède un exutoire de crue, la source de la Première Combe, qui jaillit après les pluies à quelques centaines de mètres au nord de la source principale. Les essais de traçage réalisés dans la partie sud du bassin du Betteraz ont également donné un résultat positif, mais avec une concentration bien plus basse, aux puits du Pont d'Able, nappe alluviale exploitée par la ville de Porrentruy pour son alimentation en eau de boisson, et située à environ un kilomètre au sud-ouest de la source.

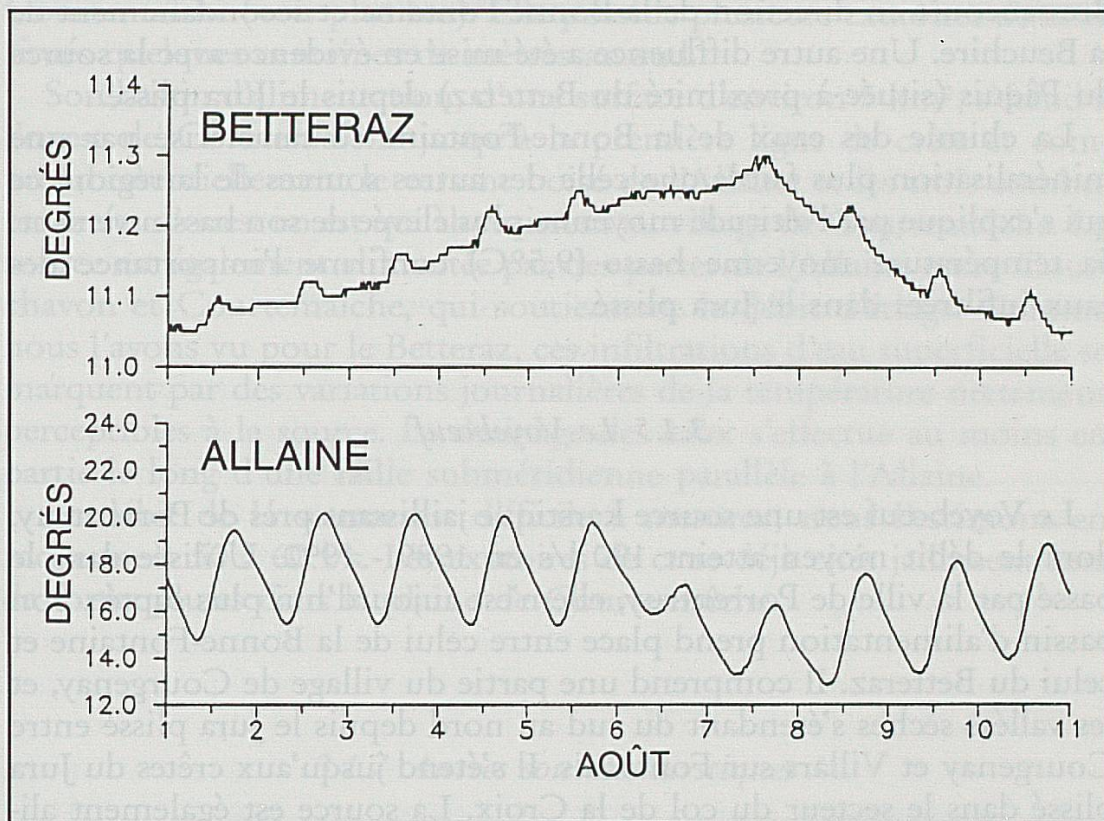
Autre particularité qui n'est pas sans conséquence sur la qualité de son eau, ni sur le débit du Betteraz, l'infiltration d'une partie des eaux de l'Allaine entre Alle et Porrentruy vient renforcer le débit de la source. Les pertes de l'Allaine ont été mesurées en 1965 par Schweizer, et depuis 1984 par nous-même par de nombreux jaugeages de l'Allaine; nous estimons qu'elles représentent en étiage entre 10 et 50% du débit de l'Allaine, alors qu'elles ne sont plus mesurables en hautes eaux. Un calcul de dilution, effectué grâce aux mesures de concentrations d'un traceur fluorescent infiltré depuis l'Allaine, a montré

qu'à ce moment les eaux d'infiltration de l'Allaine participaient pour environ 20% au débit de la source. Signalons encore que durant l'étiage de la fin du mois d'août 1991 (succédant à deux années exceptionnellement sèches), l'Allaine a été durant plusieurs jours totalement asséchée sur plus d'un kilomètre, le cours d'eau (plus de 20 l/s) disparaissant en sa totalité dans le sous-sol.

Les pertes de l'Allaine sont clairement visibles sur les enregistrements en continu de la température à la source: la figure 5 montre comment les variations journalières de température (entre jour et nuit lors d'une période très ensoleillée) se marquent de manière atténuée à la source.

Figure 5

Variations journalières de la température dans l'Allaine et au Betteraz, août 1990.



Une évaluation des réserves nous permet d'estimer le volume écoulable à environ 500 000 m³. Comme on le constate sur le tableau 1, le débit d'étiage ne descend pas au-dessous de 50 l/s, ce qui, du fait de la surface réduite de son bassin d'alimentation karstique, ne s'explique

que par l'infiltration de l'Allaine et par le grand volume de sédiments tertiaires, certes peu perméables, mais dont les écoulements très lents sont également moins liés aux précipitations et perdurent lors des périodes de sécheresse.

3.1.4 *La Bonne-Fontaine*

Emergeant sur la place du village de Fontenais, la source de la Bonne-Fontaine est utilisée par la commune pour son alimentation en eau de boisson. Elle donne naissance à un petit cours d'eau, le Bacavoine, qui rejoint l'Allaine à Porrentruy après avoir traversé la cluse de la Rasse. Le bassin d'alimentation de la Bonne-Fontaine prend place dans le synclinal de Bressaucourt et sur le versant sud de l'anticlinal du Mont-Terri. Nous avons déjà noté la diffluence existant depuis l'est de Bressaucourt en direction de la Bonne-Fontaine et secondairement de la Beuchire. Une autre diffluence a été mise en évidence avec la source du Pâquis (située à proximité du Betteraz) depuis le Jura plissé.

La chimie des eaux de la Bonne-Fontaine se caractérise par une minéralisation plus faible que celle des autres sources de la région, ce qui s'explique par l'altitude moyenne plus élevée de son bassin versant. Sa température moyenne basse (9,5°C) confirme l'importance des eaux infiltrées dans le Jura plissé.

3.1.5 *Le Voyebœuf*

Le Voyebœuf est une source karstique jaillissant près de Porrentruy, dont le débit moyen atteint 190 l/s en 1989 - 1990. Utilisée dans le passé par la ville de Porrentruy, elle n'est aujourd'hui plus captée. Son bassin d'alimentation prend place entre celui de la Bonne-Fontaine et celui du Betteraz. Il comprend une partie du village de Courgenay, et les vallées sèches s'étendant du sud au nord depuis le Jura plissé entre Courgenay et Villars sur Fontenais. Il s'étend jusqu'aux crêtes du Jura plissé dans le secteur du col de la Croix. La source est également alimentée par le ruisseau de Courtemautruy, qui s'infiltré en totalité (sauf en hautes eaux) pour parvenir par la voie souterraine au Voyebœuf. Lors de fortes crues, un déversoir occasionnel se met en activité; le ruisseau s'écoule alors en bonne partie dans son lit superficiel où il rassemble encore l'eau de trous émissifs jaillissant dans une vallée sèche.

Un récent essai de traçage effectué au sud de Fontenais, dans le Jura plissé, ayant donné un résultat positif au Voyebœuf vient compliquer la définition du bassin versant de cette source. En effet, sa trajectoire croise celle d'un essai ayant touché la Bonne-Fontaine. Ces résultats montrent que la limite peut varier dans le temps en fonction des conditions hydrologiques (le premier essai a été réalisé en période de sécheresse, le second en hautes eaux).

3.1.6 *La Fontaine*

La source de la Fontaine jaillit au centre du village de Courtemaîche, à quelques kilomètres en aval de Porrentruy. Elle est utilisée depuis 1974 pour alimenter artificiellement l'aquifère alluvial de Courtemaîche (voir plus bas). Elle possède plusieurs exutoires de crue situés quelques centaines de mètres au sud.

Son bassin d'alimentation, d'une surface d'environ 5 km², s'étend à l'ouest de Courtemaîche jusqu'à la première ligne de crête et comprend essentiellement le versant boisé de l'Allaine et les trois combes orientées d'ouest en est qui aboutissent au village de Courtemaîche. La source est également alimentée par des pertes de l'Allaine entre Courchavon et Courtemaîche, qui soutiennent le débit d'étiage. Comme nous l'avons vu pour le Betteraz, ces infiltrations d'eau superficielle se marquent par des variations journalières de la température nettement perceptibles à la source. Le drainage des eaux s'effectue au moins en partie le long d'une faille subméridienne parallèle à l'Allaine.

Le débit de la source est difficile à mesurer; nous l'estimons en moyenne à 50 à 60 l/s. Les exutoires de crue déjà cités jaillissent lors de fortes pluies dans la plaine de Courtemaîche.

3.1.7 *Autres sources karstiques*

Plusieurs autres sources karstiques ont été étudiées de manière moins exhaustives, soit que leur importance soit moindre, soit qu'elles ne concernent que marginalement notre domaine d'étude. Plusieurs d'entre elles ont néanmoins été citées dans le tableau 1, d'autres seront utilisées dans les chapitres suivants pour des recherches plus spécifiques.

Le Pâquis est une petite source située à Porrentruy à proximité du Betteraz. Son petit bassin versant (environ 1 km²) englobe une partie de la ville de Porrentruy et la colline située au sud nommée La Perche. Elle récolte également une partie des eaux d'infiltration de l'Allaine et probablement du Bacavoine, ainsi que de l'eau circulant dans les alluvions à Porrentruy, par le biais d'une faille méridienne faisant office de drain principal.

La source Saint-Nicolas, située au nord de Porrentruy, à environ 400 m du Betteraz, a un débit faible et un bassin versant essentiellement forestier s'étendant sur le versant de la rive droite de l'Allaine. Son eau très pure nous sert de référence pour connaître la composition des eaux non polluées.

La Chaumont est une source qui possède outre son bassin propre une participation à celui de la Beuchire. Lors d'un essai de traçage, nous avons estimé qu'environ le quart du débit de la source provenait du bassin de la Beuchire.

La source Masset qui, comme la précédente, se jette à Porrentruy dans le lit temporaire du Creugenat, est de composition chimique très similaire, indiquant des bassins versants comparables, probablement situés sur les versants de la plaine de Courtedoux.

La source Domont rejoint l'Allaine au sud de Courchavon. Son petit bassin versant a été utilisé comme bassin expérimental pour l'étude des solvants chlorés, une décharge polluante étant bien connue dans ce secteur.

Nous n'avons pas étudié **la source du Saivu**, qui est régionalement d'une grande importance: elle est l'exutoire principal de la plus grande rivière souterraine, la Milandrine, explorée sur pratiquement tout son trajet souterrain par les spéléologues jurassiens.

La Vendline a un bassin qui s'étend au nord et à l'ouest de celui du Betteraz. Son débit se situe entre 30 et 90 l/s.

La Doue, située en France au nord-ouest de Grandfontaine, rassemble dans son bassin versant plusieurs communes de la Haute-Ajoie, à savoir Rocourt et Grandfontaine. Son débit moyen (1989 - 1990) est d'environ 300 l/s.

La Ronde-Fontaine, comme la précédente, a été citée lors de la description de la Beuchire. En effet, elle est alimentée en partie par le synclinal de Damvant - Réclère, jusqu'à Rocourt (zone de diffluence entre la Ronde-Fontaine et la Doue). Elle jaillit au bord du Doubs près du village de Montjoie.

3.2 LES AQUIFÈRES ALLUVIAUX

3.2.1 *L'aquifère alluvial du Pont d'Able*

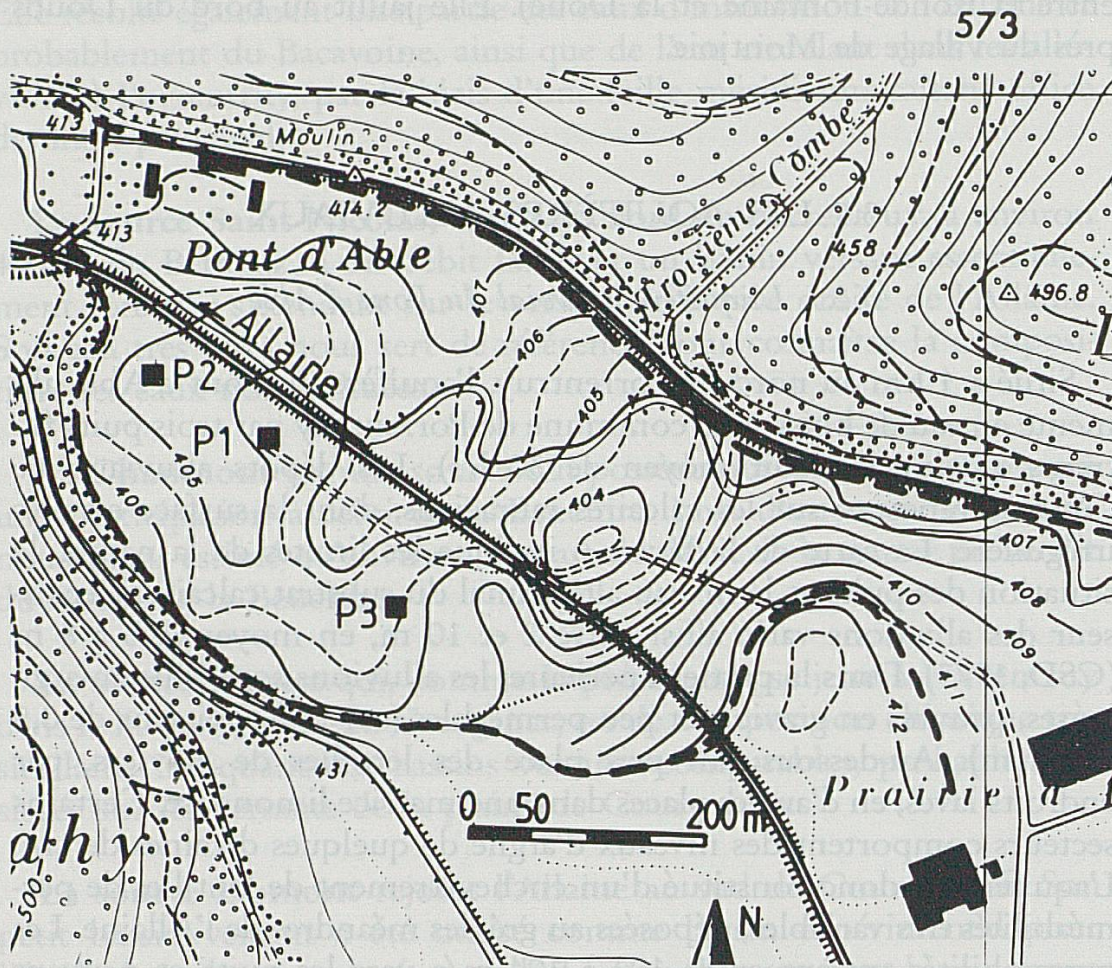
Situé à 1 km au nord de Porrentruy, l'aquifère du Pont d'Able alimente en eau de boisson la commune de Porrentruy par trois puits filtrants verticaux (débit moyen de 30 l/s). Les dépôts alluviaux de l'Allaine reposent sur les calcaires rauraciens, dont la surface est très irrégulière. La carte de la figure 6 indique les limites de la nappe, la situation des puits et le niveau altitudinal du substrat calcaire. L'épaisseur des alluvions varie ainsi entre 2 et 10 m, en moyenne 6 à 8 m (CSD, 1973). Dans la partie supérieure, les alluvions sont limono-argileuses, pauvres en graviers et peu perméables (sur une épaisseur de 0,5 à 1,5 m). Au-dessous ont pris place des lentilles de graviers, par endroits lavés, en d'autres places dans une matrice limoneuse. Certains secteurs comportent des niveaux d'argile de quelques dizaines de cm. L'aquifère est donc constitué d'un enchevêtrement de lentilles de perméabilités très variables, déposées au gré des méandres de l'Allaine. Les perméabilités varient entre 10^{-3} à 10^{-4} m/s vers les puits et peuvent descendre à 10^{-6} m/s dans les zones les plus limoneuses.

La complexité des dépôts alluviaux entraîne la présence de secteurs où la nappe est libre, d'autres où elle est captive. L'influence des pompes se marque surtout dans la zone des puits. Les écoulements s'effectuent selon une direction ENE-WSW en amont des puits. Excepté lors de fortes crues, le niveau de l'Allaine est toujours supérieur à celui de la nappe.

L'alimentation de l'aquifère du Pont d'Able est mixte: l'Allaine s'infiltré dans les alluvions et recharge l'aquifère, et d'autre part une alimentation par l'aquifère karstique sous-jacent est nettement perceptible. Plusieurs essais de traçage ayant touché le Betteraz ont également été détectés au Pont d'Able, avec des vitesses de transit caractéristiques des circulations karstiques et non alluviales (environ 40 m/h lors d'un traçage depuis Courgenay).

Figure 6

Aquifère alluvial du Pont d'Able: altitude du toit des calcaires. P1: puits central, P2: puits nord, P3: puits sud.



On peut distinguer les secteurs des puits nord et centre, alimentés par l'Allaine et par l'aquifère du Betteraz, et le secteur du puits sud, jamais clairement touché par un essai de traçage et dont la composition chimique des eaux (en particulier le sodium, le potassium et le sulfate) indique des apports différents, probablement du versant sud-ouest. Les réserves contenues dans l'aquifère peuvent être évaluées à un peu plus de 70 000 m³.

En conclusion, dans le secteur des puits, l'aquifère du Pont d'Able est exploité au maximum de ses capacités. Il est probable que de nouveaux puits en amont pourraient toutefois permettre d'augmenter la capacité exploitable.

3.2.2 L'aquifère alluvial de Courtemaîche

Avant les premières maisons de Courtemaîche, la vallée de l'Allaine s'élargit pour faire place à une plaine dans laquelle les alluvions du cours d'eau se sont déposées au cours du quaternaire. Ces alluvions, d'une grande hétérogénéité du point de vue de leur épaisseur comme de leur composition, sont exploitées par quatre puits, l'un appartenant à la commune de Courtemaîche, les trois autres au syndicat des eaux de Haute-Ajoie (SEHA) qui alimente en eau de boisson de nombreuses communes suisses et françaises (voir la figure 2).

Les alluvions sont composées de graviers calcaires roulés, centimétriques, dans une matrice parfois très limoneuse. En surface, on trouve une couche de limons d'épaisseur très variable (50 cm à quelques mètres). L'épaisseur de l'aquifère varie de 2 à 8 m, comme l'indique la figure 7 sur laquelle sont représentés les limites de la nappe, l'emplacement des puits et les cotes altitudinales du toit des calcaires rauraciens. Comme on peut le constater, deux des puits sont implantés dans un sillon de plusieurs mètres de profondeur au niveau de la petite vallée débouchant en rive droite.

Lors de la plupart des étiages estivaux, l'exploitation de l'aquifère dépasse sa capacité d'alimentation naturelle, et la source de la Fontaine est pompée (environ 25 l/s) pour alimenter artificiellement la nappe. La réserve peut être estimée grossièrement à environ 100 000 m³.

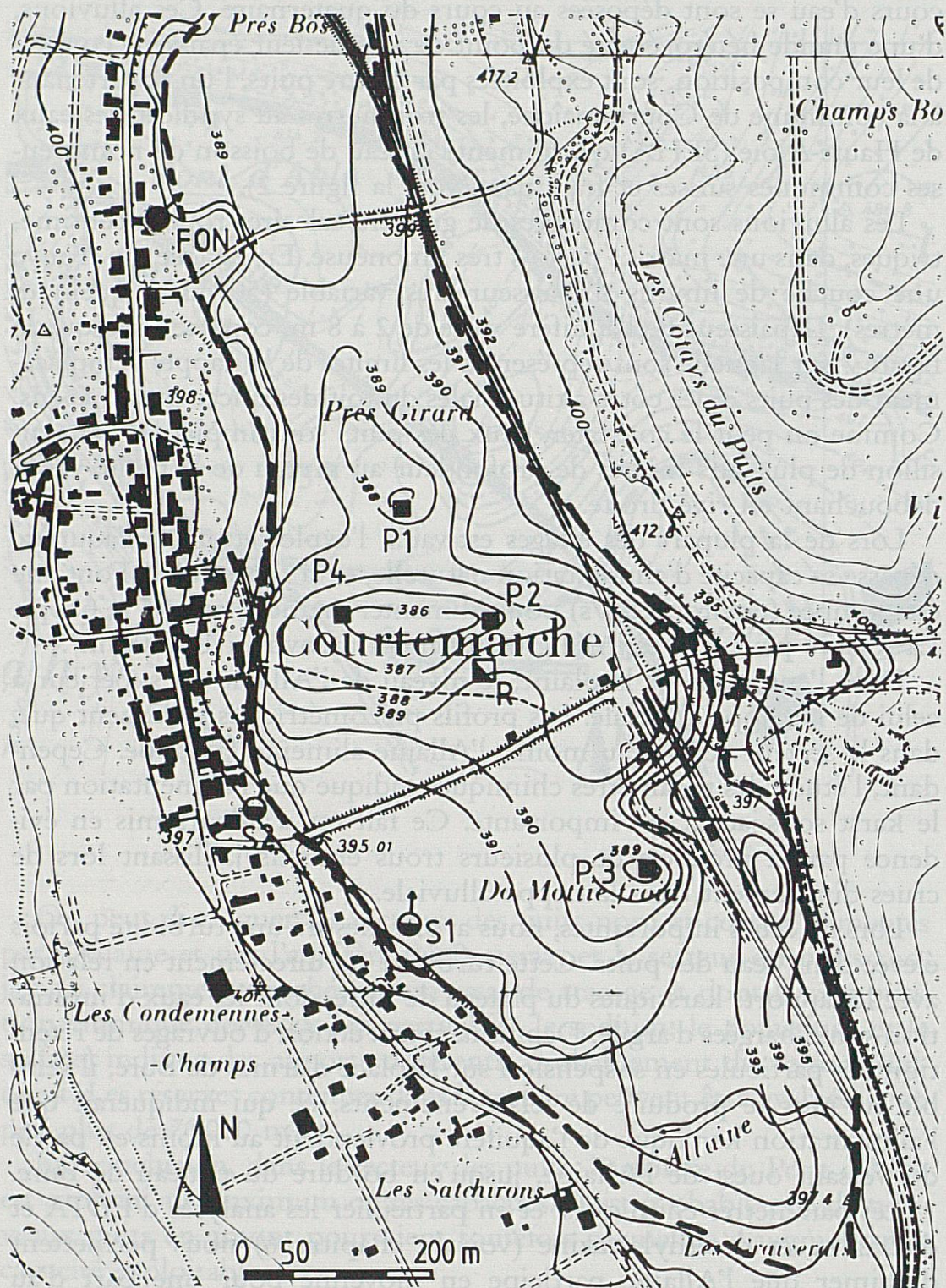
Dans l'ensemble de la plaine, le niveau de l'Allaine est supérieur à celui de la nappe alluviale. Les profils piézométriques indiquent que, dans le secteur central au moins, l'Allaine alimente la nappe. Cependant, l'étude des paramètres chimiques indique que l'alimentation par le karst sous-jacent est importante. Ce fait est d'ailleurs mis en évidence par la présence de plusieurs trous émissifs jaillissant lors de crues directement dans la nappe alluviale.

Lors de crues importantes, nous avons mesuré une turbidité parfois élevée dans l'eau des puits. Cette turbidité est directement en relation avec les apports karstiques du plateau de Bure, dont les eaux d'infiltration sont chargées d'argile. Depuis la construction d'ouvrages de rétention des particules en suspension sur la place d'armes de Bure, il semble ne plus se produire de tels événements, ce qui indiquerait que l'alimentation karstique de l'aquifère proviendrait au moins en partie du versant ouest de l'Allaine, jusqu'en bordure du plateau de Bure.

Les paramètres chimiques, et en particulier les analyses d'EDTA et d'atrazine et déséthylatrazine (voir le chapitre 6) nous permettent d'estimer que l'Allaine participe en moyenne pour une part d'au

Figure 7

Aquifère alluvial de Courtemâche: altitude du toit des calcaires. P1: puits du SEHA nord, P2: puits du SEHA centre, P3: puits du SEHA sud, P4: puits communal de Courtemâche, FON: source de la Fontaine, R: point d'alimentation artificielle par l'eau de la source de la Fontaine, S1 et S2: trous émissifs.



moins 35 à 50% au débit pompé dans les puits (concentration moyenne en triazines dans les puits: 0,11 à 0,15 $\mu\text{g/l}$, dans l'Allaine 0,32 $\mu\text{g/l}$), mais qu'en certaines périodes, cette part peut probablement dépasser 60%.

On peut noter que le puits sud est plus régulièrement alimenté par l'Allaine, ce que nous indique en particulier sa contamination en solvants chlorés, similaire à celle de la rivière alors que le karst de ce secteur n'est pas contaminé. Le puits communal de Courtemaîche, en revanche, montre une influence karstique plus élevée comme l'indiquent par exemple les poussées de turbidité lors des crues.

3.3 SYNTHÈSE

Nous avons évoqué dans les pages qui précèdent les ressources en eau de la région étudiée, tant karstiques qu'alluviales. Il apparaît rapidement que les aquifères alluviaux sont exploités au maximum de leur capacité, et ne peuvent fournir, sans une alimentation artificielle améliorée, de ressources supplémentaires. Notons qu'avec le pompage des eaux de la source du Betteraz, la ville de Porrentruy a cessé en 1992 d'utiliser les puits du Pont d'Able comme alimentation principale, les conservant comme eau de secours. Les sources karstiques fournissent des débits très importants, mais malheureusement mal répartis dans le temps, les étiages étant particulièrement prononcés du fait de la vidange rapide des circulations principales après les pluies. De plus, les principales sources karstiques se situent à Porrentruy ou dans les environs proches, et leur bassin versant est généralement constitué de surfaces cultivées et comprennent des villages, les rendant plus vulnérables à des pollutions accidentelles que les sources du Jura plissé dont le bassin d'alimentation est généralement forestier. Les ressources sont cependant loin d'être épuisées, la source de la Beuchire à elle seule pouvant offrir un débit très important et une eau de bonne qualité. Signalons qu'en dehors de toute pollution accidentelle, l'eau de quasiment toutes les sources karstiques doit être traitée: filtration lors des crues, désinfection en permanence.

La réalisation de forages relativement profonds, dans l'aquifère karstique situé sur la cuvette que forme l'Oxfordien (réserves estimées à plusieurs dizaines de millions de m^3) pourrait éventuellement permettre de mieux profiter des ressources disponibles, en étant moins soumis à la rigueur des étiages. Les réserves étant estimées à plusieurs dizaines de millions de m^3 , l'eau ainsi pompée devrait avoir une meil-

leure qualité chimique dans la mesure où le grand volume permet un grand temps de séjour des eaux souterraines (eaux plus âgées que celles des sources), à condition d'éviter la proximité d'éventuels sites contaminés par des solvants chlorés (voir chapitre 5).

4. POLLUTION PAR LES EAUX USÉES DOMESTIQUES ET L'AGRICULTURE

4.1 INTRODUCTION

La région que nous avons choisie est particulièrement favorable à l'étude du transfert des polluants, notamment d'origine domestique, dans les circulations souterraines. En effet, jusqu'en 1987, de nombreuses communes rejetaient leurs eaux usées dans les cours d'eau ou des trous perdus (Lièvre, 1988). Depuis, la région a fait l'objet de différents assainissements. Dans certains cas, les eaux usées d'origine domestique ont été enlevées de l'aquifère qu'elles polluaient, dans d'autres cas, elles ont été épurées sur place avant d'être infiltrées à nouveau dans le karst.

Les pouvoirs publics (Confédération, Cantons, Communes) ont consenti d'importants investissements qui, pour le périmètre de notre étude, se montent à plus de 50 millions de francs. Il nous paraît donc utile d'essayer d'apprécier, à travers nos résultats, si cette manière de gérer l'eau peut à l'avenir être appliquée aux systèmes karstiques dans lesquels les assainissements n'ont pas encore été effectués ou si, au contraire, l'expérience acquise nous permet de proposer d'autres solutions dans les domaines de:

- l'épuration des eaux usées
- l'alimentation en eau de boisson, la protection à long terme des ressources
- le fonctionnement biologique des cours d'eau
- la protection des eaux superficielles.

A cet effet, il convenait en particulier de répondre aux questions suivantes:

- La part des eaux usées domestiques est-elle prépondérante dans la pollution des sources ou la pollution agricole est-elle déterminante?
- Existe-t-il, à l'instar de ce que nous connaissons dans les cours d'eau, une autoépuration des matières polluantes durant leur transfert, et si oui, peut-elle être quantifiée?
- Les assainissements effectués sur les bassins-versants des différentes sources et cours d'eau étudiés ont-ils eu une influence sur la qualité des eaux et si oui, cette amélioration est-elle quantifiable?

Pour répondre à ces différentes questions, nous avons mesuré, pendant plusieurs années et en différentes conditions hydrologiques, la qualité bactériologique et, dans la mesure du possible, le débit de diverses résurgences karstiques importantes de la région (le Betteraz, la Beuchire, etc...). Le suivi de l'évolution des paramètres bactériochimiques, en relation avec les différents assainissements effectués, en particulier l'épuration des eaux usées domestiques, nous a permis dans un premier temps d'évaluer l'effet des mesures prises sur la qualité des eaux. Nous avons retenu en particulier les paramètres nous permettant de suivre l'évolution de la matière carbonée, azotée, phosphatée, de même que des teneurs en bactéries d'origine fécale.

En matière d'assainissement, c'est le raccordement progressif des communes à la station d'épuration de Porrentruy (22 000 EH), mise en service en 1987, qui a constitué le changement le plus notable dans le périmètre de notre étude.

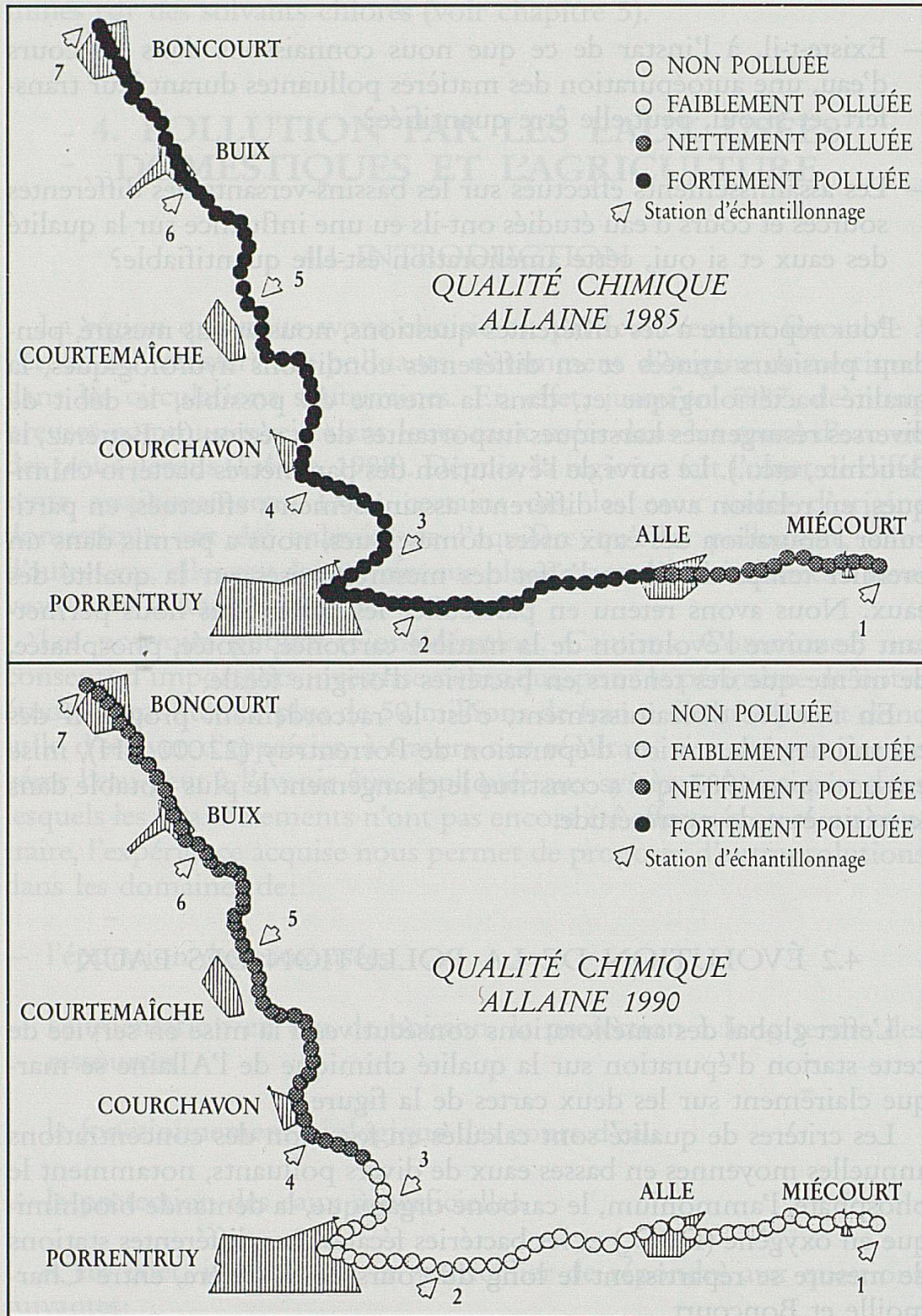
4.2 ÉVOLUTION DE LA POLLUTION DES EAUX

L'effet global des améliorations consécutives à la mise en service de cette station d'épuration sur la qualité chimique de l'Allaine se marque clairement sur les deux cartes de la figure 8.

Les critères de qualité sont calculés en fonction des concentrations annuelles moyennes en basses eaux de divers polluants, notamment le phosphate, l'ammonium, le carbone organique, la demande biochimique en oxygène (DBO_5) et les bactéries fécales. Les différentes stations de mesure se répartissent le long du cours de la rivière, entre Charmoille et Boncourt.

Figure 8

Qualité chimique de l'Allaine, 1985 et 1990.



De ces cartes se dégagent les conclusions suivantes: si la qualité de l'Allaine à l'amont de Porrentruy s'est nettement améliorée, il faut bien admettre que la situation de la Basse-Allaine, entre Courchavon et Boncourt (stations 4 à 7), est encore précaire. Pour atteindre la qualité souhaitée par les pouvoirs publics, il faudra procéder à différents aménagements complémentaires, dont les principaux sont les suivants:

- amélioration de la qualité de l'effluent de la station d'épuration de Porrentruy en assurant en particulier une nitrification efficace;
- canaliser au plus vite les eaux usées des villages de Courchavon, Courtemaître, Buix et Boncourt jusqu'à Grandvillars, où la station d'épuration est en service depuis deux ans déjà;
- retenir les argiles de la Place d'armes de Bure, qui colmatent le lit de la rivière entre Courchavon et Courtemaître.

Les tableaux 2 à 5 montrent l'évolution de la qualité des eaux souterraines pour quatre paramètres caractéristiques de la pollution organique.

Tableau 2
Oxydabilité dans les eaux souterraines

Oxydabilité mg KMnO ₄ /l	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Sources						
Betteraz	7,5	4,1	—	6,4	4,9	5,7
Pâquis	4,9	3,4	4,9	5,3	4,0	4,4
Saint-Nicolas	3,8	—	2,4	3,9	3,7	2,2
Voyebœuf	13,0	12,4	—	6,9	5,6	—
Beuchire	6,7	3,9	—	6,5	4,4	4,5
Creugenat	8,0	4,5	5,4	6,7	5,2	—
Chaumont	—	4,5	4,9	5,5	3,8	—
Masset	4,1	2,1	4,3	4,5	4,8	—
Bonne Fontaine	8,9	7,7	4,5	7,3	5,1	6,8
Fontaine	3,9	6,1	3,8	5,6	4,7	3,5
Puits						
Pont d'Able centre (1)	6,1	4,1	3,3	3,5	4,2	4,0
Pont d'Able nord (2)	5,4	6,5	8,2	4,0	3,6	4,4
Pont d'Able sud (3)	4,6	3,4	3,0	3,6	3,6	3,6
SEHA nord (1)	8,3	5,0	3,0	3,2	4,0	2,8
SEHA centre (2)	8,1	4,6	—	3,7	3,9	3,3
SEHA sud (3)	7,2	3,1	—	3,9	3,6	3,8
Puits communal de Courtemaître	5,7	3,9	—	6,0	5,4	5,0

Tableau 3
Ammonium dans les eaux souterraines

Ammonium mg NH ₄ ⁺ /l	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Sources						
Betteraz	0,18	0,07	0,04	0,03	0,03	0,04
Pâquis	0,04	0,06	0,07	0,05	0,03	0,08
Saint-Nicolas	0,01	—	0,02	0,02	0,04	0,02
Voyebœuf	2,60	0,42	0,22	0,03	0,03	—
Beuchire	0,04	0,05	0,04	0,04	0,02	0,03
Creugenat	0,28	0,13	0,24	0,07	0,03	—
Chaumont	0,15	0,06	0,03	0,03	0,02	—
Masset	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	—
Bonne Fontaine	0,17	0,19	0,08	0,03	0,03	0,03
Fontaine	0,11	0,11	0,04	0,05	0,02	0,03
Puits						
Pont d'Able centre (1)	0,28	0,07	0,02	0,03	0,02	0,03
Pont d'Able nord (2)	0,07	0,35	0,02	0,03	0,02	0,03
Pont d'Able sud (3)	0,05	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03
SEHA nord (1)	0,13	0,18	0,02	0,04	0,02	0,05
SEHA centre (2)	0,10	0,05	0,02	0,05	0,02	0,04
SEHA sud (3)	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04
Puits communal de Courtemaîche	0,04	0,05	0,02	0,04	0,03	0,05

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 agricoles augmente très fortement les concentrations de ces polluants dans la source, et la disparité des concentrations entre crues et basses eaux fausserait le calcul des moyennes.

Tableau 4
Phosphate dans les eaux souterraines

Phosphate mg PO ₄ ³⁻ /l	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Sources						
Betteraz	0,76	0,23	0,15	0,15	0,15	0,12
Pâquis	0,33	0,42	0,24	0,26	0,18	0,19
Saint-Nicolas	0,02	—	0,02	0,02	0,03	0,01
Voyebœuf	2,45	0,45	0,18	0,16	0,14	—
Beuchire	0,78	0,27	0,17	0,19	0,14	0,13
Creugenat	0,55	0,45	0,19	0,17	0,13	—
Chaumont	0,78	0,27	0,13	0,14	0,11	—
Masset	0,28	0,07	0,07	0,08	0,06	—
Bonne Fontaine	0,42	0,28	0,13	0,22	0,14	—
Fontaine	0,18	0,22	0,11	0,12	0,10	0,06
Puits						
Pont d'Able centre (1)	0,47	0,39	0,21	0,23	0,21	0,17
Pont d'Able nord (2)	0,53	0,54	0,16	0,23	0,24	0,16
Pont d'Able sud (3)	0,20	0,05	0,05	0,07	0,06	0,05
SEHA nord (1)	0,03	0,03	0,04	0,07	0,03	0,03
SEHA centre (2)	0,08	0,05	0,08	0,07	0,04	0,04
SEHA sud (3)	0,11	0,06	0,09	0,11	0,08	0,06
Puits communal de Courtemâche	0,07	0,05	0,07	0,11	0,05	0,05

Tableau 5
Entérocoques dans les eaux souterraines

Entérocoques germes/100 ml	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Sources						
Betteraz	60	200	300	300	100	300
Pâquis	40	200	500	700	400	300
Saint-Nicolas	70	—	20	2	10	0
Voyebœuf	2000	700	2000	900	100	—
Beuchire	1000	400	1000	700	200	400
Creugenat	1000	1000	900	1000	200	—
Chaumont	400	200	700	300	50	—
Masset	—	30	100	200	100	—
Bonne Fontaine	1000	400	100	400	100	—
Fontaine	—	500	600	600	700	100
Puits						
Pont d'Able centre (1)	8	0	40	6	20	3
Pont d'Able nord (2)	20	100	20	10	40	20
Pont d'Able sud (3)	10	2	40	10	20	4
SEHA nord (1)	10	50	300	14	110	17
SEHA centre (2)	50	10	90	12	50	3
SEHA sud (3)	60	90	80	5	30	2
Puits communal de Courtemaîche	3	2	500	200	40	27

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 agricoles augmente très fortement les concentrations de ces polluants dans la source, et la disparité des concentrations entre crues et basses eaux fausserait le calcul des moyennes.

A l'examen de ces tableaux, on peut faire les observations suivantes:

- A l'exception du Voyebœuf, l'ensemble de ces sources étaient, avant les assainissements, relativement peu polluées. On notait pourtant une charge organique (marquée par l'oxydabilité, tableau 2) relativement importante aux sources dans le bassin-versant desquelles étaient infiltrées directement des eaux usées domestiques (Voyebœuf, Betteraz, Beuchire et Bonne-Fontaine);
- Le phosphore diminue dans toutes les sources et les puits (à l'exception de la source Saint-Nicolas), en raison de l'interdiction de cette substance dans les produits de lessive (1^{er} juillet 1987) et des assainissements effectués. Une analyse de détail pour chaque aquifère indique clairement que ce fertilisant, du moins dans nos conditions d'observation, c'est-à-dire en dehors des périodes de forte pluviosité, provient essentiellement des eaux usées domestiques;
- Les teneurs en ammonium ont toujours été relativement faibles dans tous les points observés (à l'exception du Voyebœuf, qui recevait en 1985 et 1986 des déversements massifs d'eaux usées en provenance de Courgenay). Les assainissements n'ont en conséquence eu d'effet spectaculaire que sur cette source;
- La contamination bactériologique de l'eau de la région n'a pas évolué fondamentalement depuis 1985. La provenance dominante des bactéries fécales est donc là aussi à rechercher plutôt dans les pratiques agricoles régionales;
- Quant au nitrate, à l'exemple du Betteraz (figure 9), sa concentration tend à augmenter avec le temps; ce phénomène est certainement principalement dépendant de l'évolution des techniques agricoles et non pas d'une augmentation des pollutions d'origine domestique.

4.3 AUTOÉPURATION EN MILIEU KARSTIQUE

4.3.1 Problématique

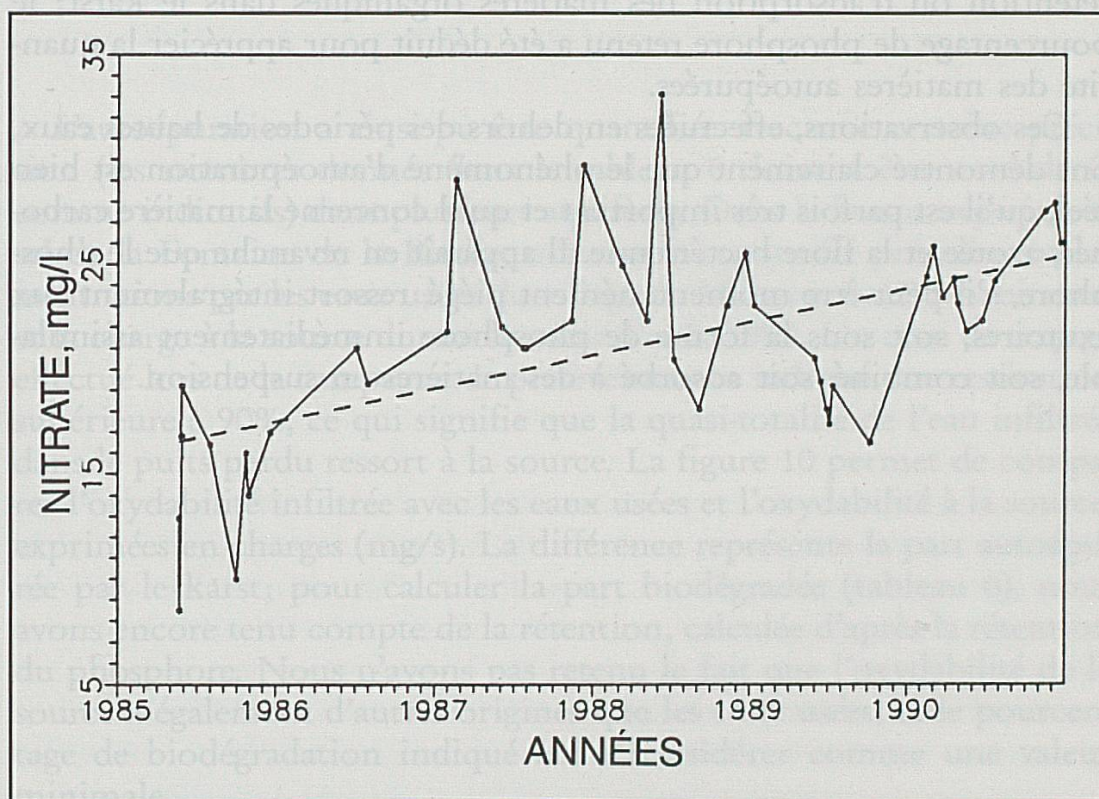
Les assainissements consentis jusqu'à présent ont donc permis une amélioration globale de la qualité des eaux, avec comme conséquence principale un meilleur fonctionnement des cours d'eau concernés,

l'Allaine en particulier. Pour ce qui concerne les sources et les aquifères alluviaux (Pont d'Able, Courtemaîche), les effets sont parfois moins perceptibles. Deux phénomènes nous semblaient, dans cette problématique, provoquer ces différences.

- Les matières carbonées et azotées, de même que les bactéries fécales et pathogènes, sont certainement autoépurées durant leur transfert souterrain (Beaudoin et al., 1988);
- Ce sont probablement les polluants d'origine agricole qui déterminent pour l'essentiel la charge polluante de certains aquifères.

Figure 9

Evolution du nitrate au Betteraz, 1985 à 1990. Le trait interrompu indique la tendance pluriannuelle.



4.3.2 Autoépuration dans les eaux souterraines karstiques

Pour appréhender ce phénomène, nous avons mesuré, pendant plusieurs années, la charge carbonée, azotée, phosphorée et bactérienne de différentes résurgences, avant et après l'épuration des eaux usées domestiques.

La charge polluante de chaque point d'infiltration a été calculée à partir d'une mesure de la qualité moyenne des eaux usées domestiques régionales (valeurs à l'entrée de la station d'épuration de Porrentruy pendant deux ans).

Nous avons considéré que, pour chaque aquifère dans lequel les eaux usées ont été sorties du système, la différence de charge polluante avant et après assainissement représentait la contribution des eaux usées à contamination de la source. Le rapport entre cette valeur et la charge réelle à l'entrée par les eaux usées permet de déduire le taux d'autoépuration dans les eaux souterraines.

Afin de nous assurer de la proportion des eaux usées qui ressortaient effectivement de l'aquifère, nous avons mesuré la charge d'entrée et de sortie d'un traceur non biodégradable, le phosphore. Si une partie du phosphore infiltré n'était pas retrouvé à l'exutoire, nous avons admis que nous devons prendre en compte les phénomènes de rétention ou d'adsorption des matières organiques dans le karst; le pourcentage de phosphore retenu a été déduit pour apprécier la quantité des matières autoépurées.

Ces observations, effectuées en dehors des périodes de hautes eaux, ont démontré clairement que le phénomène d'autoépuration est bien réel, qu'il est parfois très important et qu'il concerne la matière carbonée, azotée et la flore bactérienne. Il apparaît en revanche que le phosphore, s'il peut être momentanément piégé, ressort intégralement aux exutoires, soit sous la forme de phosphore immédiatement assimilable, soit combiné, soit adsorbé à des matières en suspension.

Tableau 6
Autoépuration bactério-chimique
dans quelques-unes des principales sources étudiées

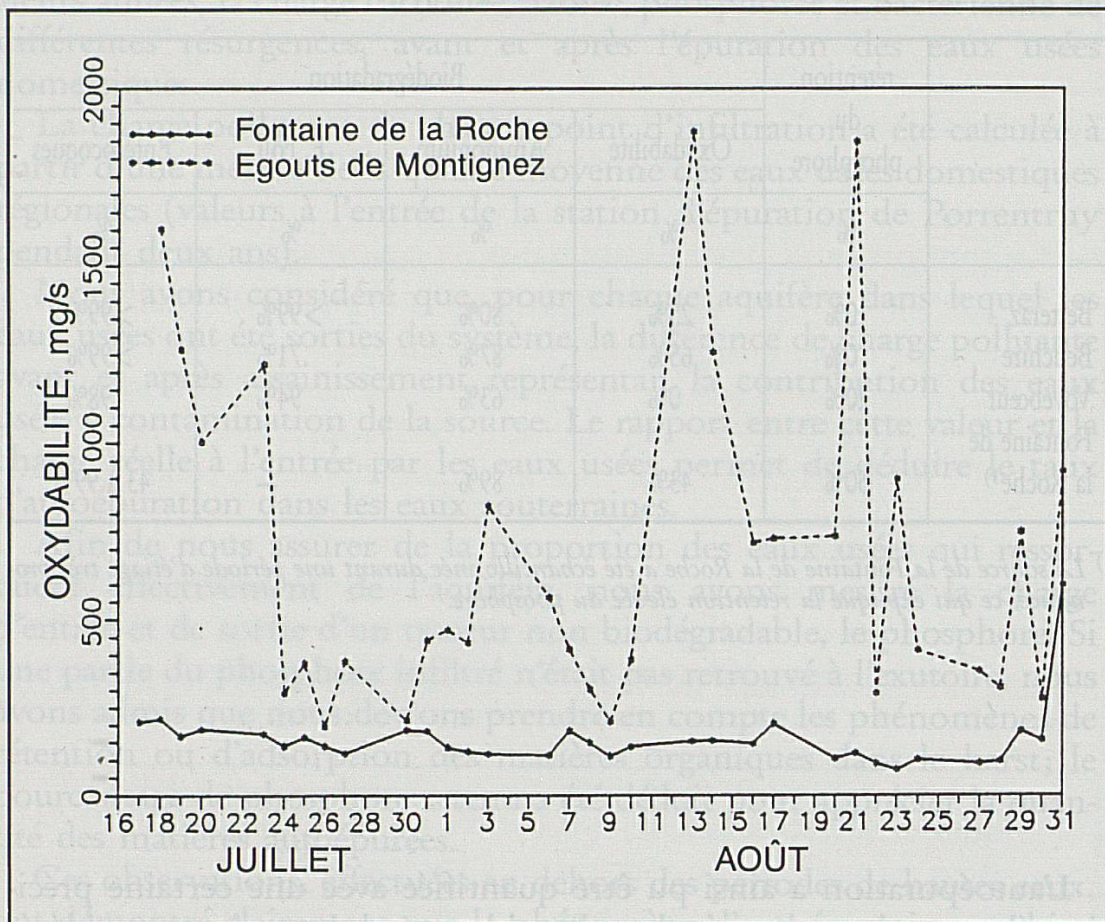
	rétention du phosphore	Biodégradation			
		Oxydabilité	Ammonium	E. coli	Entérocoques
	%	%	%	%	%
Betteraz	0%	25%	80%	>99%	>99%
Beuchire	0%	65%	87%	71%	>99%
Voyebœuf	20%	0%	63%	94%	98%
Fontaine de la Roche ¹⁾	50%	43%	89%	—	43 à 99%

¹⁾ La source de la Fontaine de la Roche a été échantillonnée durant une période d'étiage très prononcé, ce qui explique la rétention élevée du phosphore.

L'autoépuration a ainsi pu être quantifiée avec une certaine précision (les nombres donnés dans le tableau 6 doivent être considérés comme indicatifs) dans plusieurs aquifères. Dans le bassin expérimental de la Fontaine de la Roche, nous avons quantifié précisément les infiltrations par les eaux usées du village de Montignez (295 habitants) et la charge à la source durant le mois d'août 1990. Un essai de traçage effectué lors de la campagne de prélèvements a indiqué une restitution supérieure à 90%, ce qui signifie que la quasi-totalité de l'eau infiltrée dans le puits perdu ressort à la source. La figure 10 permet de comparer l'oxydabilité infiltrée avec les eaux usées et l'oxydabilité à la source, exprimées en charges (mg/s). La différence représente la part autoépuration par le karst; pour calculer la part biodégradée (tableau 6), nous avons encore tenu compte de la rétention, calculée d'après la rétention du phosphore. Nous n'avons pas retenu le fait que l'oxydabilité de la source a également d'autres origines que les eaux usées, et le pourcentage de biodégradation indiqué est à considérer comme une valeur minimale.

Figure 10

Evolution des charges en oxydabilité dans les eaux usées de Montignez et la source de la Fontaine de la Roche durant l'été de juillet-août 1990.



4.3.3 Importance des apports diffus dans la pollution des eaux souterraines

De nombreuses observations nous ont permis de constater que dans certains cas, le lessivage des sols, notamment agricoles, lors de fortes pluies, augmentait la charge polluante des sources. Des corrélations significatives ont ainsi pu être établies dans différents aquifères, entre le débit et le phosphore total ou la teneur en bactéries fécales.

Afin d'être en mesure d'appréhender correctement l'effet des assainissements réalisés, il est indispensable de connaître l'importance des apports diffus, en particulier les apports d'origine agricole, par rap-

port à celui des eaux usées domestiques. Cette information est nécessaire à une gestion globale et cohérente d'un système hydrologique donné.

Une mesure systématique, pendant plusieurs années, des charges polluantes après le raccordement des eaux usées domestiques aux stations d'épuration nous ont permis de calculer la charge provenant de l'agriculture pour les matières carbonées, azotées, phosphorées et pour les bactéries fécales aux sources. Etant donné que les conditions météorologiques ont une grande importance dans la gestion des eaux, en influençant fortement les débits et les charges polluantes des aquifères ou des cours d'eau, nous avons différencié les périodes de débits normaux, environ 70% du temps, des périodes de hautes eaux, environ 30% du temps.

Le tableau 7 donne une synthèse, pour quatre systèmes d'écoulement souterrains, de la charge totale, de la part des apports diffus et de celle des eaux usées domestiques, en tenant compte de l'autoépuration mesurée.

Les chiffres proposés par le tableau 7 permettent de tirer les quelques conclusions suivantes:

- A l'exception du système du Voyebœuf, dans lequel le parcours souterrain est très court, moins de 1 km, avec une charge polluante forte de 1500 habitants, il apparaît que la charge polluante organique (exprimée par l'oxydabilité au permanganate de potassium) provenant des apports diffus, est essentiellement d'origine agricole. Le fait est vérifié dans d'autres systèmes observés au cours de notre étude, mais dont les chiffres ne sont pas développés dans cet article; il s'agit en particulier du système Bonne-Fontaine, à Fontenais, la Fontaine de la Roche, à Courcelles (F), de la source Domont à Courchavon et de la Fontaine à Courtemaîche;
- La charge en azote, comme nous l'avions déjà observé en suivant l'évolution de la qualité des sources et des aquifères entre 1985 et 1990, est presque totalement d'origine agricole. Ceci s'explique par le fait que le nitrate, engrais utilisé en grandes quantités par les agriculteurs, est peu adsorbé par les complexes argilo-humiques des sols et donc lessivé très facilement;
- Les apports en phosphore sont en revanche beaucoup plus nettement d'origine domestique. Cette origine était même nettement prépondérante avant l'interdiction des phosphates dans les lessives,

Tableau 7

Valeurs comparées des charges polluantes d'origine agricole (apports diffus) et domestique (eaux usées) dans trois sources d'Ajoie

		Charge totale à la source (mg/s)		Charge provenant des eaux usées (mg/s)	Charge provenant des apports diffus (mg/s)		Part des eaux usées (%)	
		annuel	débits normaux		annuel	débits normaux	annuel	débits normaux
Beuchire (eaux usées de Courtedoux et Chevenez)	Oxydabilité	4060	1660	360	3700	1300	9%	22%
	Phosphore	216	148	91	125	57	42%	61%
	Azote minéral	4020	2020	120	3900	1900	3%	6%
Beuchire (eaux usées de Fahy)	Oxydabilité	3820	1420	120	3700	1300	3%	8%
	Phosphore	154	86	29	125	57	19%	34%
	Azote minéral	3937	1937	37	3900	1900	0,9%	2%
Betteraz (eaux usées de Courgenay)	Oxydabilité	1250	590	190	1060	400	15%	32%
	Phosphore	82	69	42	40	27	51%	61%
	Azote minéral	1531	761	31	1500	730	2%	4%
Voyebœuf (eaux usées de Courgenay)	Oxydabilité	2420	1800	1060	1360	740	44%	59%
	Phosphore	154	137	120	34	17	78%	88%
	Azote minéral	1058	508	128	930	380	12%	25%

intervenue le 1^{er} juillet 1986. Les engrais phosphatés sont pourtant utilisés en grandes quantités par les agriculteurs, mais, à la différence du nitrate, l'ion orthophosphate est très bien adsorbé par les sols et son lessivage n'intervient que lors de fortes pluies entraînant dans le sous-sol des particules de terre et des argiles. Il faut également savoir que le phosphore, dans nos régions, est toujours un indicateur de pollution ou de décomposition de matières organiques, car on ne le rencontre pas dans les roches, comme le chlore, le sodium, le sulfate ou le potassium, toujours présents même dans les sources de très bonne qualité.

4.3 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

En matière de gestion des eaux, les pouvoirs publics peuvent intervenir à différents niveaux. Il s'agit en premier lieu d'épurer les eaux usées domestiques rejetées dans des cours d'eau, comme l'exige la législation fédérale en la matière.

Il s'agit également de se doter de zones de protection des eaux fiables pour éviter toute atteinte à la qualité bactériologique des sources utilisées comme eau de boisson par des pollutions agricoles (épandages de purin, pesticides).

Les résultats de notre étude, en particulier la mise en évidence des phénomènes d'autoépuration et l'importance relative des eaux usées par rapport à la pollution agricole, nous permettent d'ores et déjà de faire des propositions concrètes en matière d'épuration des eaux usées en milieu karstique. Ce point nous paraît en effet très important, car il engendre de grosses dépenses pour les collectivités publiques et pour les citoyens en général. Pour ce qui concerne le Canton du Jura en particulier, d'importants investissements sont encore nécessaires.

- Le premier constat qui s'impose est celui de la très faible influence que peut avoir, sur la qualité des eaux, une épuration des matières azotées. Il semble en effet disproportionné de vouloir les éliminer spécifiquement, puisque d'une part, la plus grande partie de l'azote provient de l'agriculture et que d'autre part, les techniques à mettre en place (dénitrification) sont extrêmement coûteuses et difficiles à gérer au quotidien pour de petites collectivités;
- Le phosphore, en revanche, mérite à notre sens plus d'attention, puisque les eaux usées domestiques en contiennent beaucoup, qu'il

s'agit d'un élément eutrophisant et fertilisant très important, tant pour les cours d'eau, les lacs que pour la mer et qu'enfin son élimination par déphosphatation est simple à réaliser;

- Pour ce qui concerne la matière organique, carbonée plus particulièrement, son élimination doit faire l'objet d'une évaluation plus importante, qui dans la mesure du possible doit déboucher sur le choix d'un système d'épuration suffisamment performant et dont le coût soit le moins élevé possible.

A cet effet, les bases d'évaluation doivent être choisies de manière à ce que l'investissement consenti permette de respecter, pour chaque source ou aquifère concernée, les exigences légales, en particulier les valeurs limites en matière d'eau de boisson (Directives SSIGE), les limites relatives aux rejets dans les eaux de surface et les objectifs en matière de qualité des eaux souterraines et de surface.

Dans les régions à habitat très dispersé, il faut éviter une centralisation des eaux usées, très onéreuse, mais plutôt avoir recours à des systèmes d'élimination rudimentaires de ces eaux.

Pour être à même de prendre une décision, il conviendra de procéder à différentes investigations de base; il faut en effet connaître:

- vers quel exutoire les eaux usées s'écoulent;
- l'importance du bassin-versant de la source ou de l'aquifère;
- le débit et la qualité bactériologique-chimique de la source ou de l'aquifère que l'on veut protéger.

Ces connaissances étant acquises, il est possible de prévoir, quantitativement, la charge polluante qu'il est nécessaire d'enlever du système par épuration.

Nous tenons compte du fait qu'il faut, dans tous les cas, éviter le colmatage des conduits karstiques par des matières solides et réduire la charge en phosphore pour lutter contre l'eutrophisation des eaux. A cet effet, nous considérons donc trois types possibles d'épuration, présentant des rendements variables:

- épuration simplifiée avec déphosphatation; une fosse de décantation-digestion (fosse Emscher), associée à une précipitation du phosphate, permet, pour un investissement et des coûts de fonc-

tionnement réduits, une épuration des matières carbonées atteignant 50%, une épuration du phosphore dépassant 90% et probablement une diminution des bactéries fécales d'un facteur 10 à 100;

- épuration complète, avec déphosphatation; le rendement pour l'oxydabilité atteint 70 à 75%, celui du phosphore dépasse 90% et le taux de bactéries fécales diminue de 90 à 99%;
- élimination des eaux usées domestiques du bassin-versant; on élimine ainsi en totalité la charge polluante pour la déplacer dans un autre système; ce principe a été utilisé dans de nombreux cas en Ajoie, avec la station d'épuration centralisée à Porrentruy.

En plus des considérations précédentes, il faut tenir compte de la contamination bactérienne, peu évoquée jusqu'à présent. Cette contamination est importante dans l'ensemble des aquifères étudiés. Elle a relativement peu diminué depuis que les eaux usées ont été épurées ou sorties des systèmes karstiques, car l'origine des bactéries fécales est aussi bien domestique qu'agricole. Malgré le pouvoir autoépurateur du karst (50 à 99% de disparition des streptocoques fécaux et des *Eschérichia coli*), il convient, dans certains cas, de prendre en compte ce type de contamination en raison de son importance en matière de santé publique. Dans le bassin-versant d'une source utilisée comme eau de boisson par une collectivité, il faudra prendre toutes les précautions nécessaires pour éviter que des bactéries pathogènes ou des virus ne parviennent à la source. A cet effet, il faut savoir que les systèmes d'épuration des eaux traditionnels sont incapables de retenir les microorganismes pathogènes de manière suffisante. La solution la plus simple consistera donc, dans la mesure du possible, à sortir les eaux usées domestiques pour les épurer en dehors du bassin-versant de la source considérée. Cette solution se justifie d'autant plus que, s'il est bien connu que le bétail est porteur de germes pathogènes, les salmonelles en particulier, dans une mesure aussi importante que les êtres humains, la virulence de microorganismes (bactéries, virus, etc.) pour l'homme est toujours plus forte lorsqu'elle est transmise par l'homme.

5. POLLUTION PAR LES SOLVANTS CHLORÉS VOLATILS

5.1 LE PROBLÈME DES SOLVANTS CHLORÉS DANS LE JURA

Comme nous l'avons mentionné en introduction, l'Ajoie est une région assez fortement industrialisée, dans laquelle l'industrie est bien répartie géographiquement mais peu diversifiée. Plus de la moitié des entreprises jurassiennes (non compris les garages et carrosseries) sont liées à l'industrie horlogère. Ce type d'industrie utilise de grandes quantités de solvants chlorés pour le dégraissage des pièces. Durant plusieurs dizaines d'années, les déchets industriels liquides contenant ces solvants ont été rejetés dans les égouts, eux-mêmes infiltrés dans des puits perdus ou rejetés dans un cours d'eau, ou déposés dans des décharges sauvages (Lièvre 1988).

Depuis les premiers travaux consacrés à la source du Betteraz qui, depuis 1978, avait été pressentie pour l'alimentation en eau de boisson de Porrentruy, nous savons que les eaux souterraines n'échappent pas à la contamination par les solvants chlorés, essentiellement le trichloréthylène et le perchloréthylène et, dans une moindre mesure, le trichloréthane. Les valeurs limites pour les eaux de boisson sont de $25\mu\text{g}/\text{l}$ (microgrammes par litre) pour la somme des solvants chlorés volatils, la valeur indicative étant fixée à $1\mu\text{g}/\text{l}$. Des concentrations très fortes, dépassant $100\mu\text{g}/\text{l}$ ont été mesurées au Betteraz avant 1985.

Depuis l'entrée en souveraineté du canton du Jura, de nombreuses mesures ont été prises pour limiter la pollution des eaux par les déchets industriels. De plus, depuis 1987, la plupart des communes ont été progressivement raccordées à une station d'épuration, et l'infiltration directe des déchets dans les aquifères a pratiquement disparu. Si, dans un avenir proche, un contrôle général des entreprises, le suivi des déchets spéciaux et l'encouragement au recours à des techniques moins polluantes peuvent être assurés, le rejet de polluants dans les eaux sera maîtrisé.

Malgré ces efforts, la contamination des aquifères reste dans bien des cas préoccupante. Nous avons donc décidé d'étudier d'une part l'évolution des teneurs des sources en solvants chlorés, d'autre part leur comportement dans les aquifères (transfert vers les sources, biodégradation), afin de mieux cerner leur origine et prévoir le cas échéant les assainissements encore nécessaires.

5.2 ORIGINES DE LA CONTAMINATION

La contamination des eaux souterraines par les solvants chlorés peut avoir trois origines principales (Fahrni, 1984; Wasser-Wirtschaft-Verwaltung, 1985): l'infiltration directe dans les aquifères avec les eaux usées, l'infiltration depuis des décharges sauvages, l'évaporation de ces substances très volatiles et leur retombée avec les pluies.

Dans les eaux usées, nous avons mesuré des concentrations très variables de solvants chlorés, atteignant au maximum 300 $\mu\text{g/l}$. En moyenne, les eaux usées de la région de Porrentruy contiennent actuellement 20 à 40 $\mu\text{g/l}$ de solvants chlorés totaux. La quantité parvenant annuellement à la station d'épuration de Porrentruy s'élève à 150 à 300 kg ce qui, compte tenu d'une perte estimée à 50% dans les canalisations par évaporation, indique que les industries de la région rejettent 300 à 600 kg de ce type de solvants par an. Ces concentrations sont relativement basses; il n'est toutefois pas impossible qu'avant le raccordement des eaux usées à la station d'épuration, des déversements plus massifs atteignant directement les aquifères aient été effectués par certaines entreprises.

Nous avons effectué une recherche systématique des solvants chlorés dans les décharges connues de la région, en y implantant des piézomètres nous permettant d'effectuer des analyses d'eau ou d'air dans le corps de la décharge. Plus de 30 sites encore en activité ou abandonnés ont été retenus. Les 17 sites renfermant ces polluants industriels sont indiqués sur la figure 2. Ils sont de deux types: la plupart sont des décharges de matériaux de démolition ou d'ordures ménagères situées dans des carrières, des dolines ou des combes et reposant directement sur la roche calcaire généralement fissurée et perméable. Le second type est au contraire uniquement consacré à des déchets industriels: sur des terrains argileux (imperméables à l'eau), des fosses ont été creusées et les déchets industriels ont été déversés sous forme liquide (vidange de fosses septiques, vidange de fûts). Il est très difficile de quantifier les masses de solvants encore présents dans les décharges. D'après nos estimations, elles peuvent encore renfermer de quelques kilos pour les moins contaminées à plusieurs tonnes.

Les solvants chlorés étant très volatils, ils s'évaporent dans les ateliers et sont évacués dans l'air par les ventilations. Une estimation du Ministère de l'environnement du Bade-Würtemberg (Allemagne) indique qu'environ deux tiers des solvants utilisés par l'industrie sont rejetés dans l'atmosphère. A l'état gazeux, ces polluants seront d'une part dispersés et dilués dans l'atmosphère, d'autre part dégradés par l'expo-

sition aux rayons ultraviolets du soleil, et enfin entraînés par les pluies vers les sols et les aquifères. Afin d'en connaître l'impact sur les eaux, nous avons effectué de nombreuses analyses de pluies; elles révèlent que les concentrations en solvants chlorés sont très variables, passant de 0 à plus de 10 $\mu\text{g/l}$. En moyenne, ce sont près de 3 $\mu\text{g/l}$ qui atteignent le sol avec les pluies, ce qui permet d'estimer que la charge annuelle de solvants provenant des pluies s'élève à 3,2 kg de solvants par kilomètre carré.

Tableau 8

Concentrations en solvants chlorés (exprimés en $\mu\text{g/l}$)
dans les sources et puits entre 1987 et 1990

	Trichloréthane			Trichloréthylène			Perchloréthylène			Nombre d'analyses
	moy.	min.	max.	moy.	min.	max.	moy.	min.	max.	
Sources										
Betteraz	0,6	0,0	2,6	15,0	0,1	31,0	12,0	0,2	26,0	48
Pâquis	0,8	0,0	2,3	24,0	8,7	64,0	5,1	1,6	9,6	33
1 ^{re} Combe	0,5	0,0	1,0	0,8	0,0	2,0	2,7	2,2	2,5	9
St-Nicolas	0,3	0,0	1,1	0,4	0,0	1,1	0,3	0,0	1,9	21
Voyebœuf	0,4	0,0	1,4	2,5	0,6	6,9	1,7	0,4	5,8	27
Beuchire	0,8	0,0	4,6	1,3	0,0	6,2	0,7	0,0	10,0	89
Creugenat	0,8	0,0	2,8	0,8	0,0	3,5	0,5	0,0	4,7	27
Bonne Fontaine	0,5	0,0	3,5	1,8	0,0	12,0	0,8	0,0	9,3	32
Chaumont	0,7	0,0	2,5	5,3	1,8	14,0	2,0	0,5	7,2	30
Masset	0,6	0,0	2,9	3,6	0,4	6,8	1,2	0,0	7,8	28
Domont	0,5	0,0	2,0	6,9	0,6	20,0	1,2	0,2	3,2	41
Fontaine	0,4	0,0	1,1	2,8	0,0	6,7	0,8	0,2	2,2	24
Puits										
Pont d'Able 1	1,0	0,1	2,5	3,1	0,7	5,3	3,2	1,5	6,2	28
Pont d'Able 2	1,2	0,1	6,6	3,0	0,7	7,5	3,3	1,2	5,0	28
Pont d'Able 3	1,8	0,4	3,7	1,7	0,0	9,8	5,0	2,5	8,4	28
Courtemaîche	0,6	0,0	2,9	1,8	0,0	7,3	0,7	0,1	2,3	35
SEHA 1	0,5	0,0	1,9	1,5	0,0	9,0	0,8	0,0	4,2	35
SEHA 2	0,5	0,0	1,4	1,4	0,0	3,8	1,0	0,0	3,9	35
SEHA 3	0,6	0,0	2,5	1,4	0,0	6,2	1,0	0,4	2,7	35

5.3 ÉTAT ET ÉVOLUTION DE LA CONTAMINATION

Le tableau 8 indique pour la majorité des sources et puits de la région étudiée les teneurs moyennes, minimales et maximales en solvants chlorés entre 1987 et 1990.

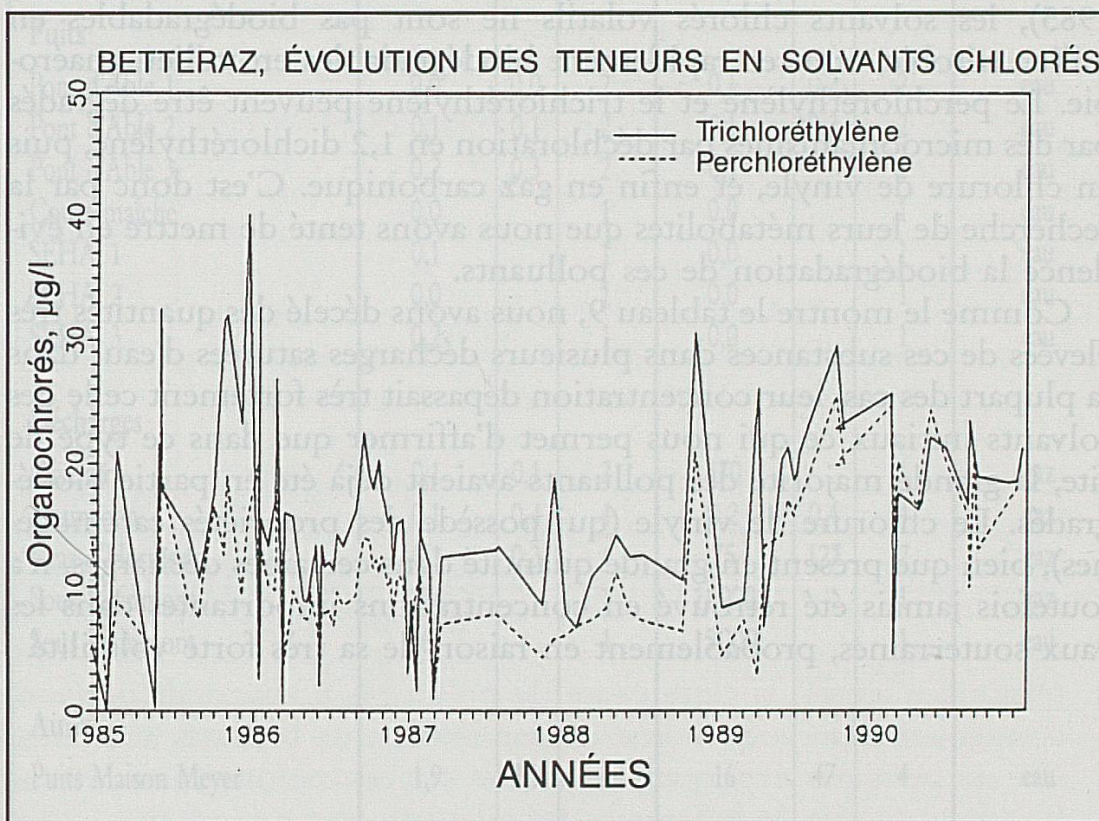
Comme on peut le constater, toutes les sources et les puits sont peu ou prou contaminés par les solvants chlorés. Seuls le Betteraz et le Pâquis montrent toutefois une contamination dépassant la valeur limite de $25 \mu\text{g/l}$.

Toutes dépassent la valeur indicative de $1 \mu\text{g/l}$, à l'exception de la source Saint-Nicolas, dont la faible contamination est probablement caractéristique des apports par les précipitations.

La figure 11 indique l'évolution des concentrations en trichloréthylène et en perchloréthylène dans la source du Betteraz entre 1985 et 1990. Bien que les hautes teneurs mesurées en 1983 (près de $100 \mu\text{g/l}$

Figure 11

Evolution des teneurs en solvants chlorés au Betteraz, 1985 à 1990.



de trichloréthylène lors d'un prélèvement) n'aient jamais été retrouvées, la contamination ne montre pas de tendance à la baisse marquée malgré les assainissements effectués. Tout au plus constate-t-on que les concentrations diminuent quelque peu lors des années humides (1987 et 1988), et sont plus élevées les années sèches (1989, 1990).

Dans les autres sources (Beuchire, Bonne-Fontaine, Fontaine), la contamination est également en règle générale relativement stable. Dans les puits du Pont d'Able, on perçoit une diminution de la contamination, alors que ceux de Courtemaîche ne varient pas sensiblement.

Nous avons calculé que les sources rejettent annuellement environ 350 kg de solvants à l'Allaine, ce qui représente environ deux pour mille de la quantité utilisée par les entreprises.

5.4 COMPORTEMENT DES SOLVANTS CHLORÉS

5.4.1 Biodégradation

Selon plusieurs auteurs (voir par exemple Vogel et McCarthy, 1985), les solvants chlorés volatils ne sont pas biodégradables en milieu aérobie, et assez rapidement biodégradables en milieu anaérobie. Le perchloréthylène et le trichloréthylène peuvent être dégradés par des microorganismes par déchloration en 1,2 dichloréthylène, puis en chlorure de vinyle, et enfin en gaz carbonique. C'est donc par la recherche de leurs métabolites que nous avons tenté de mettre en évidence la biodégradation de ces polluants.

Comme le montre le tableau 9, nous avons décelé des quantités très élevées de ces substances dans plusieurs décharges saturées d'eau; dans la plupart des cas, leur concentration dépassait très fortement celle des solvants initiaux ce qui nous permet d'affirmer que dans ce type de site, la grande majorité des polluants avaient déjà été en partie biodégradés. Le chlorure de vinyle (qui possède des propriétés carcinogènes), bien que présent en grande quantité dans certaines décharges, n'a toutefois jamais été retrouvé en concentrations importantes dans les eaux souterraines, probablement en raison de sa très forte volatilité.

Tableau 9

Analyses des métabolites des solvants chlorés, µg/l

	Chlorure de vinyle			1,2 cis dichloréthylène			Type d'échantillons
	moy.	max.	nombre	moy.	max.	nombre	
Sources							
Betteraz	0,5	0,5	2	1,0	1,3	4	eau
Paquis	0,2	0,4	4	3,5	7,0	4	eau
St-Nicolas	0,0	0,0	1	0,0	0,0	1	eau
Voyebœuf	0,2	0,3	3	0,7	1,2	3	eau
Beuchire	0,3	0,5	3	0,0	0,1	3	eau
Creugenat	0,4		1	0,0		1	eau
Bonne Fontaine	0,0	0,0	3	0,0	0,0	3	eau
Chaumont	0,2	0,4	3	0,5	0,8	3	eau
Masset	0,3	0,8	3	0,3	0,5	3	eau
Domont	0,0		1	0,3		1	eau
Fontaine	0,1		1	0,1		1	eau
Puits							
Pont d'Able 1	0,0	0,0	2	0,1	0,2	2	eau
Pont d'Able 2	0,1	0,1	2	0,1	0,2	2	eau
Pont d'Able 3	0,2	0,3	2	0,1		1	eau
Courtemaîche	0,0		1	0,0		1	eau
SEHA 1	0,1		1	0,0		1	eau
SEHA 2	0,0		1	0,0		1	eau
SEHA 3	0,2		1	0,0		1	eau
Décharges							
Oiselier	0,1	0,1	2	370		1	gaz
Vaumacon	0,1	0,4	4	0,2	0,4	4	gaz
Cras d'Hermont	0,1	0,3	4	75	127	2	gaz
Sous Plainmont	156		1	11 000		1	gaz
Sous Plainmont	6		1	15 000		1	eau
Autre							
Puits Maison Meyer	1,9	3,9	4	16	47	4	eau

5.4.2 Transfert dans les aquifères

L'étude des variations des concentrations en polluants lors des crues et des étiages apporte de nombreuses informations sur le transfert de ces substances dans les aquifères et l'origine des contaminations. Les figures 12 et 13 donnent l'évolution des concentrations en trichloréthylène lors d'une crue du Betteraz et d'une crue de la Beuchire, accompagnées d'autres paramètres indicateurs de l'origine de l'eau.

Nous constatons au Betteraz qu'au tout début de la crue, les teneurs en trichloréthylène (noté Tri sur le graphique) augmentent légèrement et rapidement, pour diminuer ensuite nettement et ne remonter légèrement qu'après la baisse des eaux que l'on observe par la diminution de la turbidité (notée FTU). On note que le magnésium (Mg sur le graphique) a un comportement similaire, alors que le phosphore (P TOT) et l'oxydabilité (KMnO₄) montrent une évolution opposée. Ces phénomènes s'expliquent de la manière suivante: au moment où la pluie tombe, la pression dans l'aquifère augmente rapidement, chassant brutalement l'eau emmagasinée dans les fissures du karst. C'est à ce moment que se marque la petite augmentation du trichloréthylène et du magnésium, ce phénomène étant appelé «effet piston» (Müller et al., 1983). Avec l'arrivée massive des eaux de pluie infiltrées dans l'aquifère, caractérisées par une turbidité, des teneurs en phosphore, et une oxydabilité élevée par le lessivage des sols, le trichloréthylène est soudain fortement dilué. Nous en concluons que les apports de polluants proviennent de secteurs de l'aquifère où la circulation est relativement lente, et que leur charge est relativement indépendante du régime des sources: nous notons en effet parallèlement lors des étiages une augmentation des teneurs lorsque les écoulements rapides diminuent.

Dans la source du Voyebœuf et du Pâquis, nous constatons comme au Betteraz une dilution très forte des polluants lors des crues. Dans ces sources, trois types d'origines peuvent être envisagés:

- les polluants peuvent s'être infiltrés dans l'aquifère sous forme liquide non miscible à l'eau, par des trous perdus ou par rejets liquides dans des dolines; de densité supérieure à l'eau, ils peuvent s'accumuler en fond d'aquifère et rejoindre progressivement la source par mise en solution et entraînement par les circulations profondes lentes; si cette cause de pollution nous paraît pouvoir contribuer à provoquer une contamination de base des aquifères, elle ne peut pas expliquer les hautes concentrations mesurées au Betteraz, du fait de la lenteur des circulations profondes;

Figure 12

Evolution des paramètres physico-chimiques lors de la crue du Betteraz d'octobre 1990. FTU: turbidité, P TOT: phosphore total, $KMnO_4$: oxydabilité au permanganate, Mg: magnésium, Tri: trichloréthylène.

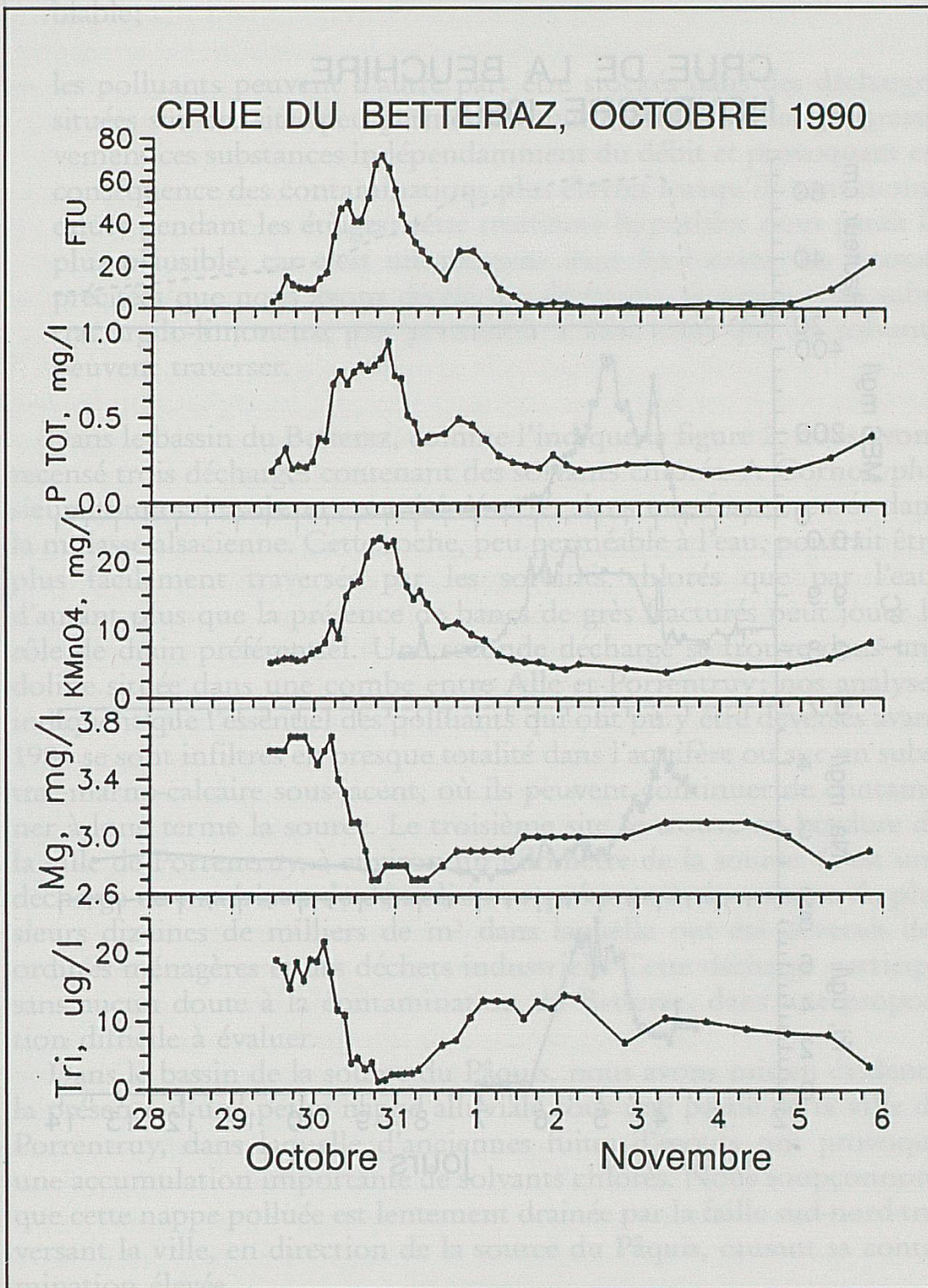
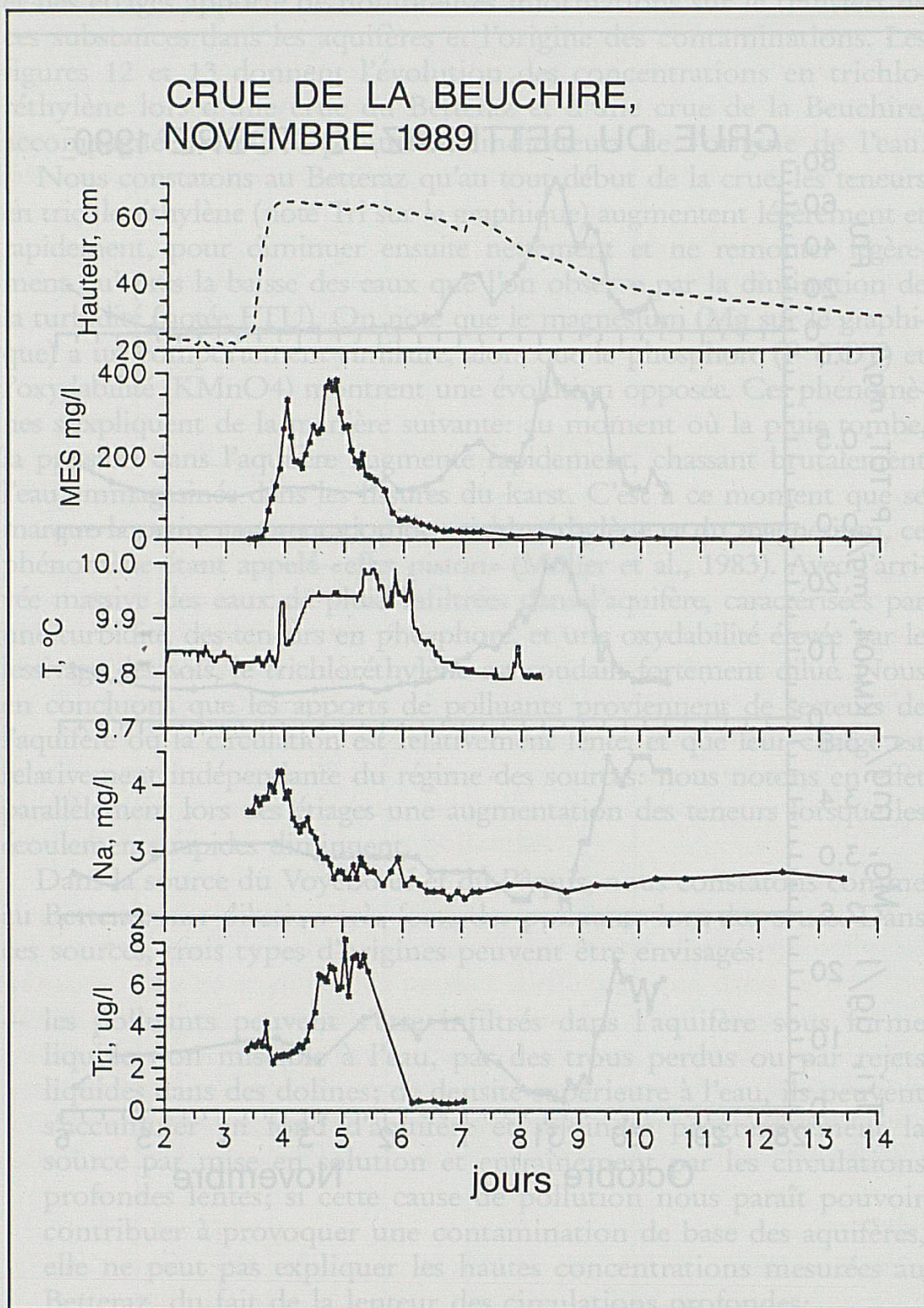


Figure 13

Evolution des paramètres physico-chimiques lors de la crue de la Beuchire de novembre 1989.
MES: matières en suspension, T: température, Na: sodium, Tri: trichloréthylène.



- les polluants peuvent avoir été infiltrés, de manière répétée dans des sites karstiques ou dans des alluvions non reliés par des réseaux de grande importance à l'aquifère; stockés dans des massifs peu perméables de l'aquifère, ils se comporteraient de manière semblable;
- les polluants peuvent d'autre part être stockés dans des décharges situées sur des sites peu perméables, qui laissent écouler progressivement ces substances indépendamment du débit et provoquant en conséquence des contaminations plus élevées lorsqu'ils sont moins dilués pendant les étiages; cette troisième hypothèse nous paraît la plus plausible, car c'est uniquement dans les bassins des sources précitées que nous avons décelé des décharges situées sur un substrat argilo-limoneux, peu perméable à l'eau mais que les solvants peuvent traverser.

Dans le bassin du Betteraz, comme l'indique la figure 2, nous avons recensé trois décharges contenant des solvants chlorés. A Cornol, plusieurs tonnes de solvants ont été déversés dans une fosse creusée dans la molasse alsacienne. Cette roche, peu perméable à l'eau, pourrait être plus facilement traversée par les solvants chlorés que par l'eau, d'autant plus que la présence de bancs de grès fracturés peut jouer le rôle de drain préférentiel. Une seconde décharge se trouve dans une doline située dans une combe entre Alle et Porrentruy; nos analyses indiquent que l'essentiel des polluants qui ont pu y être déversés avant 1984 se sont infiltrés en presque totalité dans l'aquifère ou sur un substrat marno-calcaire sous-jacent, où ils peuvent continuer de contaminer à long terme la source. Le troisième site se trouve en bordure de la ville de Porrentruy, à environ un kilomètre de la source. C'est une décharge de matériaux de démolition représentant un volume de plusieurs dizaines de milliers de m³ dans laquelle ont été déversés des ordures ménagères et des déchets industriels. Cette décharge participe sans aucun doute à la contamination du Betteraz, dans une proportion difficile à évaluer.

Dans le bassin de la source du Pâquis, nous avons mis en évidence la présence d'une petite nappe alluviale sous une partie de la ville de Porrentruy, dans laquelle d'anciennes fuites d'égouts ont provoqué une accumulation importante de solvants chlorés. Nous soupçonnons que cette nappe polluée est lentement drainée par la faille sud-nord traversant la ville, en direction de la source du Pâquis, causant sa contamination élevée.

Dans le bassin du Voyeboeuf, plusieurs décharges contiennent des solvants chlorés, et la principale est une décharge spécifiquement industrielle, une ancienne fosse creusée dans un terrain très argileux dans laquelle les polluants ont été apportés sous forme liquide par camions-citernes entre 1963 et 1975. L'écoulement lent et régulier des polluants depuis cette décharge explique les variations de concentrations durant les crues.

A la Beuchire, comme le montre la figure 13, le comportement du trichloréthylène est totalement différent: les concentrations en trichloréthylène augmentent très nettement dès la montée du débit, parallèlement à l'arrivée des eaux de surface chargées de matières en suspension (MES sur le graphique), et plus chaude de près de $0,15^{\circ}\text{C}$ (T sur le graphique, la crue de novembre est arrivée lors d'une période très chaude, la température de la pluie étant d'environ 14 à 15 degrés). Les solvants chlorés parvenant à la source de la Beuchire se trouvent donc emportés par les pluies, au même titre que les argiles sont lessivés dans les sols; ils proviennent de sites en surface, très probablement des décharges situées directement sur les calcaires. Piégés dans les matériaux de la décharge, ils ne peuvent rejoindre les eaux souterraines qu'entraînés par les pluies percolant dans le site contaminé lui-même. L'absence de retard entre l'émergence des eaux d'infiltration rapide et le trichloréthylène indique que ce polluant n'est pratiquement pas retenu dans le karst par des phénomènes de sorptions, qui se marqueraient par un décalage temporel.

Nous connaissons trois décharges principales dans le bassin de la Beuchire, à Porrentruy, Courtedoux et à Fahy. Dans les trois cas, il s'agit d'anciennes décharges d'ordures ménagères et de matériaux de démolition, dans lesquelles des solvants chlorés ont été déposés. Elles sont situées dans des sites où l'eau s'infiltrerait rapidement, à faible distance du niveau de l'aquifère.

Dans les sources de la Bonne-Fontaine et Domont, comme à la Beuchire, nous notons une augmentation des teneurs en polluants simultanée à la pointe de crue. Les résultats obtenus à la source Domont confirment clairement notre interprétation, car nous connaissons dans ce cas l'unique origine de la contamination. Il s'agit de la grande décharge de Mormont dans laquelle nous avons décelé des quantités très élevées de polluants; elle est située dans une ancienne carrière traversée par une faille qui fait office de drain important pour les eaux souterraines.

5.5 SYNTHÈSE

Le suivi actuel des déchets industriels et le raccordement de la plupart des communes à une station d'épuration ont permis d'éviter que de nouvelles contaminations directes des eaux souterraines ne se produisent, mis à part les apports par les précipitations qui doivent être maîtrisés au sein des entreprises, mais qui sont sans grandes conséquences pour les eaux souterraines (ces substances volatiles sont en revanche une des causes de la formation de l'ozone en basse atmosphère, et de la disparition de la couche protectrice d'ozone en haute atmosphère).

La permanence de la contamination implique que des sources de polluants déposés au cours des années 1950 à 1980 continuent de relâcher des solvants chlorés, et que cette contamination pourrait bien durer encore des dizaines d'années sans apports nouveaux. Bien que la biodégradation des solvants puisse être active dans des conditions anaérobies, et puisse réduire les quantités contenues dans certaines décharges, les eaux souterraines karstiques de la région sont actuellement toujours bien oxygénées et ne permettent pas une biodégradation efficace. Les polluants sont stockés soit dans des décharges en surface, dans le cas des sources de la Beuchire, de la Bonne-Fontaine et de la source Domont, soit dans des secteurs du karst à circulation lente ou dans des décharges situées en des sites peu perméables. Dans le premier cas, l'assainissement serait réalisable, mais du fait des immenses volumes de matières contaminées que l'on trouve dans les décharges, l'investissement serait disproportionné. Dans le second cas, l'assainissement des sites de surface ne pourrait pas venir à bout à court terme de la contamination des sources, qui perdurerait malgré des investissements considérables.

6. AUTRES MICROPOLLUANTS

6.1 ÉTAT DE LA CONTAMINATION

L'un des buts de notre étude consistait à vérifier si notre région est contaminée par d'autres micropolluants, moins spécifiques de l'industrie dominante du canton que les solvants chlorés volatils. Nous avons donc élargi notre champ de recherches à de nombreux types de substances susceptibles de polluer les eaux.

Nous avons effectué une recherche systématique des micropolluants suivants:

- les triazines, l'atrazine en particulier, en raison de son utilisation massive comme désherbant dans les cultures de maïs (anciennement également sur les voies de chemin de fer);
- le NTA (acide nitrilo triacétique), substance relativement rapidement biodégradable, qui a remplacé les phosphates dans les produits de lessive depuis 1986;
- l'EDTA (acide éthylène-diamino-tetra-acétique), substance beaucoup plus stable, utilisée aussi bien dans l'industrie que dans des produits de lessive ou des cosmétiques.

De plus, de nombreuses autres substances ont été recherchées dans quelques points caractéristiques, afin de vérifier si elles influençaient de manière sensible la qualité des eaux, et si certaines d'entre elles pouvaient être utilisées comme traceurs dans les eaux souterraines. Ont été recherchés à cet effet les hydrocarbures chlorés volatils (55 substances différentes), les hydrocarbures polyaromatiques, les anilines, les phénols et dérivés, les PCB, ainsi que divers pesticides.

La première conclusion importante de ces investigations est que, grâce à une recherche exhaustive, nous pouvons affirmer qu'à l'exception des solvants chlorés, de l'atrazine du NTA et de l'EDTA, aucun autre micropolluant n'a pu être identifié à des concentrations supérieures à $0,1 \mu\text{g/l}$. De nombreuses analyses des organochlorés volatils ont montré que seuls le trichloréthane, le trichloréthylène et le perchloréthylène, accompagnés parfois de leurs produits de dégradation (le chlorure de vinyle et le dichloréthylène) sont présents en quantités importantes dans les eaux.

Le remplacement des phosphates dans les produits de lessive entraîne des concentrations relativement fortes de NTA dans les eaux usées (Giger et al., 1987; Giger et al., 1992). Nous avons mesuré dans l'effluent de la station d'épuration une concentration moyenne de $33 \mu\text{g/l}$. Dans les sources et les puits en revanche, les teneurs sont généralement inférieures à $1 \mu\text{g/l}$ car cette substance est assez rapidement biodégradée.

L'EDTA, autre agent des lessives, est également élevé dans l'effluent de la station d'épuration (en moyenne $62 \mu\text{g/l}$ en 1990). On le détecte en concentrations variant entre 1 et $6 \mu\text{g/l}$ dans les puits et sources de la région, ce qui confirme sa stabilité.

L'atrazine est un herbicide dont les concentrations dans les eaux souterraines dépassent fréquemment la limite fixée pour les eaux de boisson à 0,1 $\mu\text{g/l}$, comme l'indique le tableau 10. Les maxima mesurés se produisent généralement entre les mois de mai et juillet, périodes de traitement des champs de maïs par ce pesticide. Ils dépassent 1 $\mu\text{g/l}$ dans certains points. Il semble s'amorcer une diminution des teneurs d'atrazine, liée à des limitations fédérales pour son utilisation, mais cette tendance reste à vérifier par un suivi à plus long terme.

Cette contamination des eaux souterraines par l'atrazine est le reflet de la vulnérabilité des aquifères aux polluants d'origine agricole.

Tableau 10

Atrazine dans les eaux souterraines, 1990

Atrazine, $\mu\text{g/l}$	Moyenne	Maximum	Minimum	Nombre
Beuchire	0,11	0,49	0,01	32
Betteraz	0,17	0,45	0,01	32
Domont	0,04	0,19	0,01	32
Creugenat	0,20	1,02	0,02	27
Puits communal de Courtemaître	0,06	0,22	0,01	31
SEHA nord	0,09	0,22	0,01	29
Pont d'Able centre	0,16	0,42	0,03	30
Allaine à Alle	0,22	1,39	0,01	27
Allaine Courtemaître	0,24	0,78	0,01	29
Effluent STEP	0,75	1,68	0,01	28

6.2 UTILISATION DES MICROPOLLUANTS COMME TRACEURS

Au début de cette étude, nous avons émis l'hypothèse que certains micropolluants peu adsorbés par les matières organiques ou minérales peuvent servir de traceur pour déterminer l'importance de la recharge des aquifères alluviaux à partir d'un cours d'eau. Nous pensions également qu'un suivi analytique de certains micropolluants nous permettrait de rechercher l'origine de certaines pollutions et de mieux comprendre le fonctionnement de quelques aquifères complexes.

Par exemple, l'analyse du dichloréthylène, présent dans les décharges, apporte des éléments complémentaires très intéressants pour la recherche de l'origine des pollutions: trouvé en quantités élevées dans plusieurs décharges et dans la nappe située sous la ville de Porrentruy (cf. tableau 9, puits de la maison Meyer), il n'a été décelé en quantités significatives que dans quelques exutoires karstiques, et jamais dans une nappe alluviale. Les quantités relativement élevées découvertes au Pâquis renforcent notre conviction d'une alimentation partielle de cette source par la nappe située sous la ville de Porrentruy. D'autre part, la présence de dichloréthylène dans la décharge de l'Oiselier, située sur le flanc de la plaine du Creugenat à l'ouest de Porrentruy, et l'absence de ce composé à la Beuchire nous confortent dans l'idée que les sources Chaumont et Masset doivent leur contamination par les solvants chlorés à cette décharge, située sur une partie commune de leurs bassins versants respectifs.

Le NTA et l'EDTA proviennent uniquement des eaux usées domestiques et industrielles. Les effluents de stations d'épuration en rejettent des quantités élevées. Le NTA est assez rapidement biodégradable, et sa présence implique un temps de transfert court, alors que l'EDTA est persistant et permet de détecter une pollution, même éloignée, par les eaux usées. Nous avons décelé par exemple des quantités non négligeables de NTA et d'EDTA dans plusieurs sources situées dans la ville de Porrentruy (Betteraz, Pâquis, Beuchire), supérieures à celles mesurées dans l'Allaine, qui prouvent clairement la contamination de ces sources par des fuites du réseau d'évacuation des eaux usées de la ville. Dans les puits, on trouve toujours de l'EDTA, caractéristique de l'influence de l'Allaine sur leur alimentation, alors que le NTA n'est mesuré en quantités plus élevées que dans les puits du Pont d'Able directement influencés par des pertes de l'Allaine dans le karst (temps de transit court). Comme nous l'avons mentionné au chapitre 3, les teneurs en EDTA dans les puits de Courtemaîche permettent de préciser l'influence de l'Allaine sur l'aquifère.

L'atrazine a également déjà été utilisée pour expliquer l'importance de l'Allaine dans la recharge de la nappe alluviale de Courtemaîche (chapitre 3). Nous devons tenir compte de cette substance et de la déséthylatrazine, un métabolite de cet herbicide: en effet, le rapport atrazine/déséthylatrazine est plus bas dans l'eau des puits de Courtemaîche que dans l'Allaine, indiquant que le temps de transit est suffisant pour permettre une biodégradation partielle de l'herbicide.

Nous avons ainsi mis en évidence l'importance du rôle que peuvent jouer les micropolluants comme traceurs et indicateurs des circu-

lations souterraines. Cette approche, qui représente un moyen d'investigation supplémentaire, peut apporter des informations originales. Un travail important reste à faire pour découvrir les substances les plus caractéristiques utilisables pour le traçage des eaux usées. La mise en place au Laboratoire des eaux d'une infrastructure analytique performante nous permettra de mieux utiliser dans l'avenir ces éléments de compréhension très utiles pour une gestion cohérente des eaux.

7. CONCLUSION

L'étude cantonale des eaux souterraines du Jura tabulaire a permis d'une part de cerner avec précision les ressources en eau de l'Ajoie, de connaître leur vulnérabilité aux pollutions diverses, et d'autre part à mieux comprendre les effets des infiltrations d'eaux usées et des pollutions industrielles dans une région karstique.

Une bonne connaissance des **ressources en eau** est un élément indispensable aux responsables de l'alimentation en eau de boisson. Comme nous l'avons mis en évidence, celles-ci sont relativement abondantes en Ajoie. Mises à part les sources émergeant dans les flancs du Jura plissé, peu abondantes, les sources sont toutefois concentrées dans la vallée de l'Allaine; la Haute-Ajoie, en revanche, en est pratiquement dépourvue. Trois sources sont actuellement utilisées par des collectivités publiques: la Bonne-Fontaine par Fontenais, le Betteraz par Porrentruy et Courgenay et la Fontaine par le syndicat des eaux de Haute-Ajoie (SEHA). Il reste les sources non utilisées du Voyebœuf et surtout de la Beuchire, plus grande source de la région par son débit, dont la qualité chimique est bonne et qui ne nécessite pas un traitement élaboré (contamination relativement faible par les solvants chlorés). On peut compter, lors des étiages les plus prononcés, sur un débit cumulé atteignant près de 200 l/s, auquel on peut ajouter l'eau des puits du Pont d'Able (30 l/s). Ces quantités sont suffisantes pour alimenter potentiellement une population d'environ 40 000 personnes, soit bien plus que l'ensemble de l'Ajoie. Ces chiffres sont toutefois à utiliser avec précaution, car un prélèvement excessif d'eau à une resurgence peut porter atteinte au fonctionnement biologique du cours d'eau qui en dépend. A Courtemâche, la nappe alluviale permet en étiage, avec une alimentation artificielle par la source de la Fontaine, de pomper quelque 30 l/s également, soit la quantité suffisant à plus de 5000 habitants. Dès que l'épuration des eaux usées de la Basse-Allaine sera réalisée, cette nappe pourrait aisément être alimentée

directement par irrigation avec l'eau de l'Allaine; elle verrait ainsi sa capacité augmenter suffisamment pour assurer l'alimentation future des communes membres du SEHA et de la place d'armes de Bure.

Dans un souci de gestion globale et cohérente de l'eau, nous préconisons, en cas de besoin régional accru, de prendre en compte les ressources suivantes:

- l'aquifère des Champs-Fallat à Saint-Ursanne, de bonne qualité chimique et bactériologique (capacité estimée à 4000 l/min), sera dans quelques années relié par le tunnel de la Transjurane à plusieurs réseaux communaux voisins du portail du tunnel;*
- une partie du débit de la Beuchire peut être prélevée sans perturber le fonctionnement du réseau hydrographique situé en aval; il conviendrait toutefois de pomper ces eaux en amont de la ville de Porrentruy, de manière à mieux garantir la qualité de cette eau;*
- l'amélioration de l'alimentation artificielle de l'aquifère alluvial de Courtemaîche peut permettre d'augmenter notablement les volumes pompés vers la Haute-Ajoie;*
- enfin, des forages profonds, bien que présentant des incertitudes quant à leur rendement, peuvent être effectués jusqu'au niveau des marnes oxfordiennes, dont le relief a été cartographié dans le cadre de cette étude.*

Dans le Jura tabulaire, comme c'est également le cas dans d'autres régions karstiques pauvres en cours d'eau, les eaux usées domestiques sont fréquemment infiltrées par des puits perdus directement dans les aquifères. Nous avons montré par nos travaux que les **phénomènes d'autoépuration** dans le karst existaient et qu'ils étaient parfois importants. Les matières organiques carbonées peuvent être dégradées durant leur transit souterrain jusqu'à 60% alors que les matières azotées se retrouvent, pour l'essentiel, sous forme de nitrate. Nous avons démontré que la plus grande partie de l'azote présent dans les sources

était d'origine agricole, alors que le phosphore provenait pour une part importante des eaux usées domestiques. Les bactéries fécales sont bien autoépurées dans le karst, mais la contamination résiduelle reste préoccupante, en particulier lorsqu'une source est utilisée comme eau de boisson.

Pour les communes dont les effluents sont déversés dans un cours d'eau, nous avons mis en évidence la nécessité de procéder à l'**épur****ation** complète des **eaux usées domestiques** (par des systèmes mécano-biologiques traditionnels). Cet investissement est en effet indispensable pour assurer une protection efficace des aquifères alluviaux et pour garantir une qualité acceptable des cours d'eau touchés. En revanche, dans les régions où les eaux usées sont infiltrées dans de grands aquifères karstiques comme en Haute-Ajoie, nous pensons qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser systématiquement les techniques d'épuration classiques. Nous estimons au contraire qu'il est utile d'étudier chaque cas de manière séparée, dans un contexte de gestion globale de l'eau. Nos recherches ont démontré qu'une **épur****ation simplifiée**, permettant de ce fait une réduction des investissements à la charge des collectivités, serait parfois suffisante pour atteindre les objectifs fixés.

La contamination des eaux par des **micropolluants** industriels, les solvants chlorés volatiles, est omniprésente dans les sources et nappes alluviales d'Ajoie. Seules deux sources cependant en contiennent des taux supérieurs à la valeur limite admise pour les eaux de boisson (25 $\mu\text{g/l}$): le Betteraz et le Pâquis. Nous avons mis en évidence que, malgré les assainissements réalisés, la contamination des aquifères peut persister des dizaines d'années. Ces solvants chlorés proviennent principalement des nombreuses anciennes décharges sauvages, et peut-être dans certains cas des secteurs du karst à circulation lente dans lesquels ils se sont accumulés. Nous avons montré qu'il existe plusieurs types de décharges, les unes qui relâchent leurs polluants au moment de l'infiltration des pluies, et d'autres qui relarguent lentement et régulièrement les solvants chlorés. Leur assainissement est extrêmement coûteux. Nous estimons qu'il est d'abord nécessaire d'éviter totalement de nouveaux foyers de pollution. Il convient pour cela de n'autoriser que des **décharges centralisées** avec un contrôle permanent et précis des matières déposées.

Pour ce qui concerne la qualité chimique des eaux, nous avons mis en évidence la vulnérabilité des aquifères aux matières en suspension contenues dans les eaux d'infiltration et aux bactéries fécales et pathogènes. En revanche, la question des micropolluants, en dehors de la source du Betteraz, ne se pose pas de manière aiguë. Si les pouvoirs

publics s'efforcent de mettre en place dans les plus brefs délais des **zones de protection** fiables, dans les périmètres desquelles les épandages de purin et l'utilisation de produits phytosanitaires sont fortement limités ou interdits, les investissements nécessaires pour assurer une bonne qualité bactériologique des réseaux publics d'eau de boisson se limiteront à des systèmes de traitement conventionnels (filtration-désinfection). Si, par le passé, une telle politique pouvait se heurter aux intérêts légitimes des agriculteurs, les dispositions légales actuelles en matière d'agriculture ouvrent de nouvelles perspectives.

L'étude des micropolluants peut, comme nous l'avons montré, être un complément très utile et parfois indispensable à la connaissance et à la compréhension des circulations souterraines. Bien que les recherches dans ce domaine requièrent l'utilisation de techniques de laboratoires sophistiquées, elles méritent d'être développées dans l'avenir, particulièrement pour l'étude d'aquifères alluviaux ou d'aquifères complexes.

Ami Lièvre

Jean Fernex

Pierre-Alain Gretillat

BIBLIOGRAPHIE

- BEAUDOING G., ASTRUC J.-G., BARADAT J.-M., BOUZIGUES M., COUSTOU J.-C., GETTO D., RICARD J., SAUTY J.-P., TARRISSE 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: études du Causse de Gramat. Annales Scientifiques de l'Université de Besançon, Géologie - Mémoire Hors série, No 6 - 1988, pp. 1 - 8.
- BURGER A. (1983): Prospection et captage des eaux souterraines des roches carbonatées du Jura. *Gaz-Eaux-Eaux usées*, Vol 63, No 9, pp. 533 - 583.
- COLOMBI, SCHMUTZ, DORTHE SA - CSD (1972 & 1973): Hydrogéologie de la Plaine du Pont d'Able. Propositions pour des zones de protection. Rapports inédits de B. Schindler des 6.3.72 et 7.3.73.

- FAHRNI H.-P. (1984): Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe in Schweizer Gewässern. *Gaz-Eaux-Eaux usées* No 64, 11 pp. 689 - 695.
- GIGER W., BRUNNER P.-H., AHEL M., McEVOY J., MARCOMINI A. (1987): Organische Waschmittelinhaltsstoffe und deren Abbauprodukte in Abwasser und Klärschlamm. *Gaz-Eaux-Eaux usées* 67, 3 pp. 111 - 122.
- 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* No 32F, mai 1992, pp. 27 - 31.
- GIGON R., WENGER R. (1986): Inventaire spéléologique de la Suisse. Tome II: Canton du Jura. Porrentruy. 291 pp.
- LIÈVRE A. (1989): Evolution de la qualité chimique de la source karstique du Betteraz à Porrentruy. *Gaz, Eaux, Eaux usées* No 1, 1989, pp. 5 - 14.
- LIÈVRE L. (1936): La découverte d'une rivière souterraine en Ajoie. *Les Intérêts Economiques du Jura* No 4, 1936.
- LIÈVRE L. (1945): Alimentation en eau de la Haute Ajoie: étude géologique et hydrogéologique. *Les Intérêts du Jura* 1 et 2, 1945.
- LIÈVRE A. (1988): L'épuration des eaux usées domestiques et industrielles dans le canton du Jura. *Actes de la Société Jurassienne d'Emulation* 1988, pp. 95 - 120.
- MISEREZ J.-J. (1973): Géochimie des eaux du karst jurassien. Thèse, Neuchâtel, 313 pp.
- MULLER I., BURGER A., SCHOTTERER U., SIEGENTHALER U. (1983): Résultats des méthodes d'investigation indirecte dans l'exploration des aquifères calcaires. *Gaz-Eaux-Eaux usées* Vol 63, No 9, pp. 501 - 515.
- SCHINDLER (1984): Etude hydrogéologique; zone de protection de la source du Betteraz. Rapport inédit.
- SCHWEIZER H.-U. (1970): Beiträge zur Hydrologie der Ajoie (Berner Jura). *Beitr. zur Geol. der Schweiz-Hydrologie*, 17/1970. 223 pp.

VOGEL T.-M., McCARTHY P.-L. (1985): Biotransformation of tetrachlorethylene to trichlorethylene, dichlorethylene, vinylchloride, and carbon dioxide under methanogenic conditions. Appl. Environ. Microbiol. No 49, pp. 1080 - 1083.

WASSER - WIRTSCHAFT - VERWALTUNG BADEN - WÜRTTEMBERG (1985): Leitfaden für die Beurteilung und Behandlung von Grundwasserverunreinigungen durch leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt Baden-Württemberg. Stuttgart, 99 pp.

CARTES GÉOLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES

CHAUVE P., MARTIN J., BAILLY C., (1985): Carte géologique de la France 1 : 50 000, No 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 Saint-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.

PFIRTER U., HAUBER L. (1991): Carte hydrogéologique de la Suisse 1 : 100 000, feuille 31: Biel/Bienne. Commission géotechnique suisse.