

LES ELEMENTS CHIMIQUES EXTERIEURS AU SYSTEME  
KARSTIQUE INDICATEURS DE LA QUALITE DES EAUX  
DES RESERVES DES CALCAIRES JURASSIENS.

\* CHAUVE P., \*\* BLAVOUX B., \* MIGNOT C., \*\* MUDRY J.

Résumé :

*Des campagnes annuelles de prélèvements effectuées pendant des périodes d'étiage comprises entre 1977 et 1982 donnent des indications sur les compositions chimiques des eaux des principales sources karstiques jurassiennes. Les concentrations en éléments extérieurs aux systèmes karstiques tels que  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $K^+$  et  $Na^+$  permettent une approche du degré de contamination de leurs réserves. Une classification est établie à partir des données de l'étiage de Novembre 1978; elle est reconductible d'année en année. D'une manière générale, les sources issues des zones de plateau aux réserves importantes sont plus riches en ces éléments qui sont des indicateurs de pollution pour la région et demanderaient une surveillance particulière.*

I. INTRODUCTION

Des campagnes de prélèvement d'eau au griffon des principales sources karstiques jurassiennes ont été effectuées régulièrement depuis 1977, pour rechercher leur teneur en ions majeurs ainsi que les teneurs isotopiques en Oxygène 18 et Tritium. Ces prélèvements ont été le plus souvent réalisés en période d'étiage, de manière à s'affranchir de l'asynchronisme des variations physico-chimiques observables en crue.

L'échantillon d'étiage nous paraît représentatif de l'écoulement de la matrice calcaire, peu ou pas influencé par le ruissellement souterrain retardé empruntant le réseau de drains.

En étudiant les teneurs en chlorures, nitrates et potassium des différentes sources, tous en provenance de l'extérieur du système karstique, nous nous proposons de montrer la façon dont l'eau de la matrice, donc des réserves est atteinte par ces éléments.

Dans la région, ces éléments étant très faiblement représentés dans les précipitations, leur abondance est souvent le signe d'une activité humaine. Ainsi la qualité des différents réservoirs pourra être comparée.

II. CONDITIONS DE PRELEVEMENT ET RESULTATS

Trois campagnes de prélèvements d'eau aux principales émergences karstiques du Jura ont été effectuées en 1977, en étiage d'hiver, crue de fonte des neiges, et en étiage d'été. Elles ont permis de dresser des instantanés

\* Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée, Faculté des Sciences, Place Maréchal Leclerc, 25030 BESANCON Cédex.

\*\* Laboratoire d'Hydrogéologie, Faculté des Sciences, 33 rue Louis Pasteur, 84000 AVIGNON. Laboratoires du GRECO 35 du CNRS, HYDROGEOLOGIE.

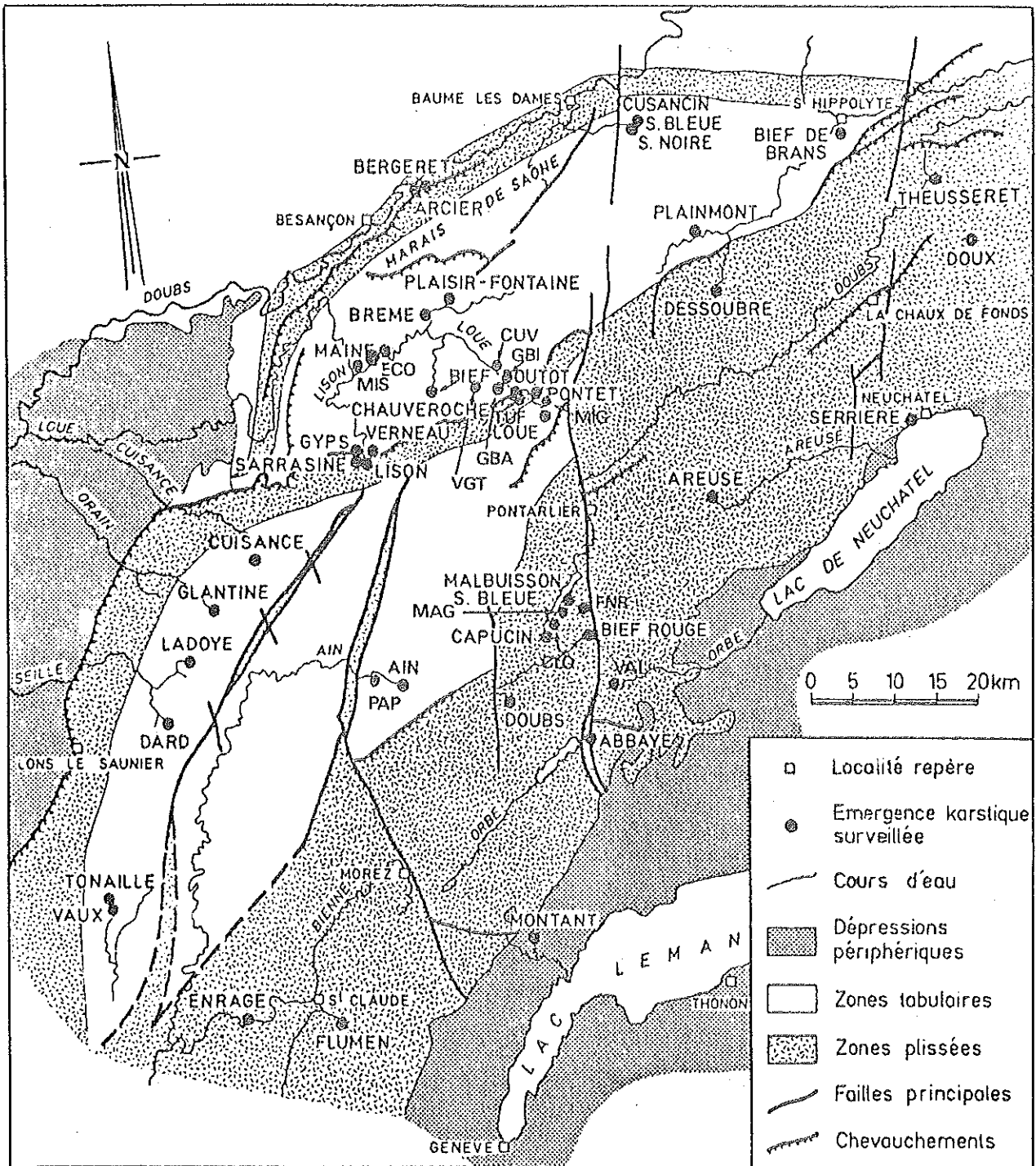


Fig. 1 : Localisation structurale des émergences karstiques étudiées.

isotopiques et chimiques de la province hydrogéologique suffisants pour distinguer de grands ensembles hydro-structuraux (BLAVOUX et al. 1979).

Ces mêmes points d'eau (voir fig. 1) ont fait l'objet de prélèvements annuels en étiage jusqu'en 1982. Les débits de quelques stations de jaugeage lors de ces prélèvements sont fournis sur le tableau 1 et permettent d'apprécier l'importance relative des différents tarissements.

Date de prélèvement	Etat Hydrologique	Débits de référence en m <sup>3</sup> /s					
		Cuisance	Loue	Bléfonds	Verneau	Arcier	Sarrazine
I-77	bas. eaux hiv.	4,4	4,8	1,72	0,55	0,60	0,015
II-77	crue hiv.	16,9	27,8	4,27	1,01	0,48	5,20
IX-77	étiage	0,9	4,2	0,29	0,05	0,26	0,015
X-78	"	0,57	3,8	0,11	0,03	0,12	0,016
XII-79	bas. eaux hiv.	0,25	2,4	0,18	0,03		0,016
X-80	étiage		8				
III-82	bas. eaux print.						

Tableau 1 : les campagnes de prélèvement

Les résultats des analyses de Chlorures, nitrates, potassium et sodium figurent dans les tableaux 2 et 3. On doit noter que les prélèvements 77 et 78 ont été analysés au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon, alors que ceux postérieurs à 78 l'ont été au Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée de Besançon. Les méthodes d'analyse étant différentes, il est difficile de comparer les valeurs absolues d'une même source entre ces deux périodes. En revanche, il est possible d'étudier la distribution des teneurs sur une même campagne. Pour suivre les variations de teneur d'un étiage à l'autre, il sera fait appel aux classes de concentration introduisant des valeurs relatives.

### III. INTERPRETATION DES RESULTATS DE LA CAMPAGNE D'ETIAGE 1978.

Cette campagne a été choisie en raison de l'importance de l'étiage automnal et du grand nombre d'échantillons récoltés (47). Ces sources se répartissent entre St Hippolyte, St Claude, Neuchâtel et Besançon, sur les versants français et suisse du Jura (fig. 1).

#### A. Teneur en Chlorures.

La moyenne des teneurs des 47 sources échantillonnées s'élève à 4,4 mg/l.

La courbe des fréquences cumulées des concentrations, par ordre décroissant, est tracée sur la fig. 2. Elle permet de justifier les limites des classes choisies pour tracer l'histogramme. On remarquera que 50% des sources ont des teneurs inférieures à 3,8 mg/l, et qu'une moitié de la population a des teneurs comprises entre 2,5 et 5,1 mg/l. La valeur de la moyenne, plus élevée que celle de la médiane, indique une distribution dissymétrique avec un étalement vers les fortes concentrations qui suggère des apports anthropiques à certains systèmes karstiques.

Les sources les plus pauvres se situent dans la Haute-Chaine et sur le 2° plateau, dans des régions essentiellement forestières à faible densité de population. L'intervalle 1 à 3 mg/l de Cl<sup>-</sup> semble représenter la teneur naturelle

ABB	LYONNE (ABBAYE) (CH)	MAB	Source Bleue (Halbuisson)
AIN	AIN	MAG	Grande Source (Halbuisson)
ARB	Bergetot (Arcier)	MAI	Maine
ARC	Arcier	MOR	Montant (CH)
ANE	Apreau (CH)	HIG	Houlin Higuet
AVA	Avenne	HES	Houlin des Isles
BAL	Baignes	HOU	Houillère
BAR		NOI	Noirfond
BRA	Bief de brans	PAP	Papeterie
BRE	Puits de la Brèze	PLA	Plaisiront (Nevrotte)
CAP	Capucins	PLP	Plaisirfontaine
CHA	Chauveroché	POH	Pontec
CHM	Chaspdenoy	POU	Bief Poutot
CLO	Clouterie	QUE	Quenoche
CUB	Source Bleue (Val de Cusance)	RAP	Rapigney
CUI	Cuisance (Les Planches)	ROH	Rozaine (Fondrent)
CUN	Source Noire (Cusancin)	ROU	Bief Rouge
CUV	Cul de Veux	RUH	Ruhans
DAR	DARD (Seille Sud)	SAR	Sarrazine
DES	Dessoubre	SER	Serrière
DIA	Diabie	THE	THEUSSERET (CH)
DOU	Doubs	TON	Tonnaille
DOX	La Doux (CH)	TOU	Touaille
ECO	Ecoutote	TUF	Tuffière
ENR	Enragé	VAL	Exhaure du Hc d'Or (Vallorbe, CH)
EPH	Evaite (Rloz)	VAU	Vaux
GLA	Glantine (Vaux/Poligny)	VER	Verneau
GBI	Grand Bief	VGT	Vergetolle
GRF	Granfontaine (Lavoir)		
GYP	Gyps		
ISS	Issone		
LAD	Ladoye (Seille Nord)		
LIS	Lison		
LOG	Lougrea		
LOU	Loue		

- Abréviations des sources -

Sources	Teneur en Cl <sup>-</sup>								Teneur en N/NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>							
	77a	77b	77c	78	79	80	82	77a	77b	77c	78	79	80	82		
ABB ABBAYE	1,3	0,7	1,1	1,5	5,4	11,5	6,1	0,84	0,61	0,68	0,65	0,48	0,32	0,32		
AIN AIN	1,6	1,4	2,1	2,0	9,3	5,5	3,5	0,75	0,64	0,80	1,35	0,88	0,32	0,45		
ARB BERGERET	-	4,5	3,1	2,5	6,4	8,1	3,5	-	2,57	0,40	0,18	0,22	2,00	0,80		
ARC ARCIER	8,6	6,4	6,4	8,2	11,9	15,5	3,5	4,06	2,70	2,80	2,51	2,74	2,48	1,17		
BRA BIEF DE BRAND	13,4	4,6	5,8	8,7	10,1	13,3	7,0	2,55	2,20	2,17	2,36	1,52	1,66	0,60		
CAP CAPUCINS	1,7	0,8	1,5	1,3	4,2	6,5	12,2	1,91	0,71	0,81	0,83	0,12	0,35	0,44		
CHA CHAUVEROCHE	4,0	2,8	-	8,1	9,7	8,1	4,1	2,40	2,50	-	0,96	2,74	0,40	0,58		
CUB CUSANCIN See BLEUE	5,5	3,1	4,0	4,3	5,8	12,5	3,9	2,14	1,74	1,80	1,45	0,88	1,87	0,72		
CUI CUISANCE	2,9	1,7	2,2	3,2	9,1	6,0	4,4	0,92	0,77	0,86	0,96	0,77	0,31	0,31		
CUN CUSANCIN See NOIRE	-	2,6	4,1	4,2	6,4	6,7	2,3	-	1,67	1,66	1,43	1,76	1,76	0,46		
DAR DARD	10,7	2,1	3,0	5,2	11,5	7,5	3,0	2,29	1,64	1,63	1,88	2,96	1,47	1,07		
DES BESSOUBRE	9,7	4,9	5,0	5,1	9,3	11,0	4,4	2,39	1,88	1,77	2,13	1,56	1,61	0,96		
DOU DOUBS	1,3	1,3	1,2	1,5	7,6	4,5	12,2	0,75	0,60	0,47	0,59	0,44	0,34	0,28		
ENR ENRAGE	4,6	1,5	2,2	1,4	7,8	4,8	5,2	0,65	0,39	0,56	0,29	0,28	0,34	0,24		
FLU FLUNEN	1,4	1,2	1,4	1,4	8,8	2,4	-	0,58	0,42	0,49	0,64	0,40	0,75	-		
GLA GLANTINE	6,8	2,4	3,4	8,8	-	7,0	8,3	0,70	0,51	3,34	5,06	-	2,30	3,20		
GYP GYPS	2,9	1,3	2,3	3,0	5,2	4,8	4,6	1,38	0,75	1,04	1,20	0,62	1,24	0,75		
LIS LISON	2,8	1,4	2,1	3,1	5,6	6,5	2,6	1,28	0,79	1,01	1,42	1,00	0,84	0,40		
LOU LOUE	4,9	1,7	4,2	4,9	9,1	-	5,2	1,24	1,23	0,88	0,62	0,88	0,58	0,60		
MAB HALBUISSON BLEUE	2,1	1,5	2,4	2,5	4,8	6,5	7,8	1,10	0,90	1,13	0,84	0,55	0,51	0,60		
MAI MAINE	6,4	3,4	4,1	4,8	7,6	8,0	4,4	2,11	1,60	1,40	1,32	1,92	1,23	0,65		
PAP PAPETERIE	-	-	-	2,5	10,9	4,3	3,9	-	-	-	1,07	1,22	0,31	0,47		
PLP PLAISIR-FONTAINE	3,3	3,1	3,3	3,8	10,1	5,7	4,8	1,83	1,77	1,73	1,72	1,22	1,39	0,75		
POH PONTET	4,9	2,2	2,9	4,4	6,4	8,0	4,1	2,35	1,16	1,00	1,38	1,38	1,60	0,58		
POU BIEF POUTOT	4,1	2,6	3,1	3,5	8,2	5,7	5,2	2,34	1,78	1,82	2,15	2,16	0,40	0,72		
RAP SARRAZINE	2,5	1,5	2,0	3,2	4,2	4,3	6,5	1,20	0,79	0,97	1,19	1,00	0,84	0,81		
VAU VAUX	10,7	2,3	3,8	6,0	11,3	5,2	5,7	1,60	0,81	0,82	1,03	1,30	0,40	0,54		
VER VERNEAU	4,4	2,5	4,0	4,7	7,0	8,0	5,7	1,88	1,43	1,70	1,97	1,30	1,14	0,84		

Tableau 2 : Teneurs en chlorures et nitrates des émergences karstiques jurassiennes (1977-1982)

Teneur en K<sup>+</sup>Teneur en Na<sup>+</sup>

Sources		Teneur en K <sup>+</sup>								Teneur en Na <sup>+</sup>							
		77a	77b	77c	78	79	80	82	77a	77b	77c	78	79	80	82		
AB	ABBAYE	0,26	0,22	0,32	0,30	0,30	0,30	0,55	0,67	0,49	0,61	0,86	0,80	0,70	0,35		
AIN	AIN	0,11	0,40	0,69	0,63	0,60	0,70	-	0,78	0,92	1,07	0,93	0,50	0,10	-		
AMB	BERGERET	-	1,01	0,57	0,46	0,53	1,80	1,40	-	1,82	1,19	1,07	0,82	2,20	2,25		
ARC	ARCIER	1,72	1,05	1,57	2,73	1,80	1,80	1,70	2,93	1,50	2,93	3,95	2,90	2,80	2,60		
BRV	BIEF DE BRAND	2,01	1,21	1,81	2,54	1,95	2,50	1,70	7,44	1,62	3,44	6,34	4,15	3,80	4,65		
CAP	CAPUCIENS	0,56	0,31	0,54	0,74	0,19	1,10	0,80	0,86	0,64	0,87	0,92	0,32	0,80	0,55		
CHA	CHAUVEROCHE	1,37	0,61	-	4,95	0,68	1,70	1,45	1,41	1,18	-	4,38	1,00	2,20	1,30		
CEB	CESANCIN See BLEUE	2,08	1,23	1,35	2,05	1,45	2,40	2,10	2,13	2,64	1,78	2,27	1,40	2,20	1,60		
CEL	CITSARGE	1,38	0,37	0,62	1,00	0,65	0,70	0,75	1,75	1,05	1,09	1,36	0,75	1,20	1,20		
CEN	CESANCIN See NOIRE	-	1,02	1,81	2,06	1,55	2,40	1,95	-	1,26	1,94	2,20	1,80	2,40	1,60		
DAR	DARD	1,03	0,50	0,71	2,72	1,65	1,30	1,40	4,79	1,24	1,36	2,26	1,85	1,50	2,65		
DE	DESSOUBRE	2,63	1,26	2,11	2,03	2,00	2,30	2,50	4,38	1,55	2,64	2,71	2,25	2,50	2,75		
DOU	DOUES	0,26	0,22	0,28	0,22	0,20	0,40	0,35	0,59	0,85	0,53	0,55	0,50	5,40	1,03		
EBR	EBRAGE	0,99	0,39	0,68	0,38	0,60	1,45	0,60	2,39	1,17	1,43	0,85	0,90	2,20	1,40		
ELI	ELPHEN	0,50	0,42	0,48	0,45	0,70	0,50	-	0,77	0,99	0,81	0,78	0,30	0,75	-		
GLA	GLANTINE	0,64	0,24	0,44	6,96	-	0,50	1,20	3,08	1,53	1,28	4,68	-	1,40	1,20		
GYP	GYP	0,72	0,56	0,84	1,25	0,87	1,20	1,05	1,28	0,95	1,16	1,52	0,87	1,30	1,30		
LIS	LISON	0,85	0,58	0,87	1,73	1,10	1,30	1,50	1,15	0,95	1,23	1,59	0,95	1,20	1,15		
LOE	LOUE	1,24	0,78	1,08	1,33	1,15	1,30	1,20	2,48	1,00	2,56	3,39	2,50	2,30	1,90		
MAB	MALBUISSON BLEUE	1,04	0,52	0,96	0,99	0,44	0,60	0,65	1,02	1,00	1,10	1,03	0,59	1,00	0,75		
MAL	MALZE	1,42	1,03	1,34	1,81	1,55	2,00	1,65	2,43	1,57	2,27	2,72	2,15	2,80	1,95		
PAP	PAPETERIE	-	-	-	0,93	1,10	1,20	0,90	-	-	-	1,17	0,61	1,60	0,95		
PLF	PLAISIR-FONTAINE	0,27	0,22	0,27	0,32	0,47	1,50	0,40	1,18	1,20	1,19	1,15	0,85	2,20	0,80		
PON	PONTET	1,95	0,95	1,56	1,90	1,35	1,70	1,60	1,87	1,17	1,54	2,12	1,10	2,40	1,40		
POT	BIEF POUTOT	1,33	0,76	1,16	1,82	1,50	1,80	1,50	1,54	1,21	1,44	1,94	1,10	1,80	1,30		
SAR	SARPASTINE	0,78	0,55	0,90	1,75	1,00	1,50	1,45	1,07	0,94	1,13	1,60	0,80	1,20	1,15		
VAU	VAUX	1,83	0,83	0,81	1,52	2,20	0,60	0,60	5,16	1,53	2,04	2,81	1,60	1,70	1,40		
VER	VERNEAU	3,54	1,96	2,75	3,75	3,90	2,30	3,50	2,08	1,47	2,08	2,61	2,15	1,70	2,30		

Tableau 3 : Teneurs en potassium et sodium des émergences karstiques jurassiennes (1977-1982)

des eaux des terrains calcaires sous climat jurassien. A part la source Bergeret (ARB), aucune émergence du premier plateau n'appartient à ce groupe.

Le groupe des fortes concentrations comprend essentiellement les sources du premier plateau à densité de population plus élevée et à élevage plus développé. Dans ce groupe apparaissent cependant les sources de Fontaine-Ronde et de Montant, qui sont vraisemblablement contaminées par le salage hivernal des routes. En effet, Fontaine-Ronde est située en bordure immédiate de la route Lausanne-Pontarlier, et les relations entre le col de la Givrine St Cergues, autre axe routier important, et la source de Montant ont été montrées par traçage (AUBERT et al. 1970).

#### B. Teneurs en nitrates.

La moyenne des teneurs observées s'élève à 1,4mg/l d'azote nitrique, la médiane à 1,24 mg/l et une moitié de la population a une teneur comprise entre 0,8 et 1,8 mg/l. Comme pour les chlorures, l'histogramme des concentrations (fig. 3) fait apparaître une dissymétrie avec un étalement vers les fortes valeurs.

Les sources présentant une teneur inférieure à 0,8 mg/l de N sont situées dans tous les contextes. En revanche, les sources riches en nitrates appartiennent toutes au Jura des plateaux. Cette localisation fait penser à un apport agricole ou humain. L'existence de corrélations (tableau 4) significatives entre la teneur en azote et la silice dissoute, la teneur en azote et le potassium nous permet de préciser que la source de cet azote est le sol, soit de manière naturelle, soit plutôt à la suite d'épandages.

Cl	—					
N	NS	—				
Na	0,61**	NS	—			
K	0,61**	0,77**	0,54*	—		
SiO <sub>2</sub>	NS	0,58*	NS	NS	—	
SO <sub>4</sub>	NS	NS	0,60**	NS	NS	—
	Cl	N	Na	K	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>4</sub>

Tableau 4 : matrice de corrélations  
47 sources

NS non significatif    \* significatif    \*\* hautement significatif

#### C. Teneurs en potassium.

La moyenne des teneurs (1,77 mg/l de K<sup>+</sup>) est toujours supérieure à la médiane (1,45 mg/l), alors qu'une moitié des sources a des teneurs comprises entre 0,60 et 2,10 mg/l (fig. 4).

Les sources à faible teneur (< 0,5 mg/l) constituent un groupe homogène qui paraît représenter la teneur naturelle des systèmes carbonatés jurassiens. Une corrélation significative du potassium avec les nitrates montre son origine pédologique.

Fig. 2 : Distribution des teneurs en chlorures - étiage 1978.

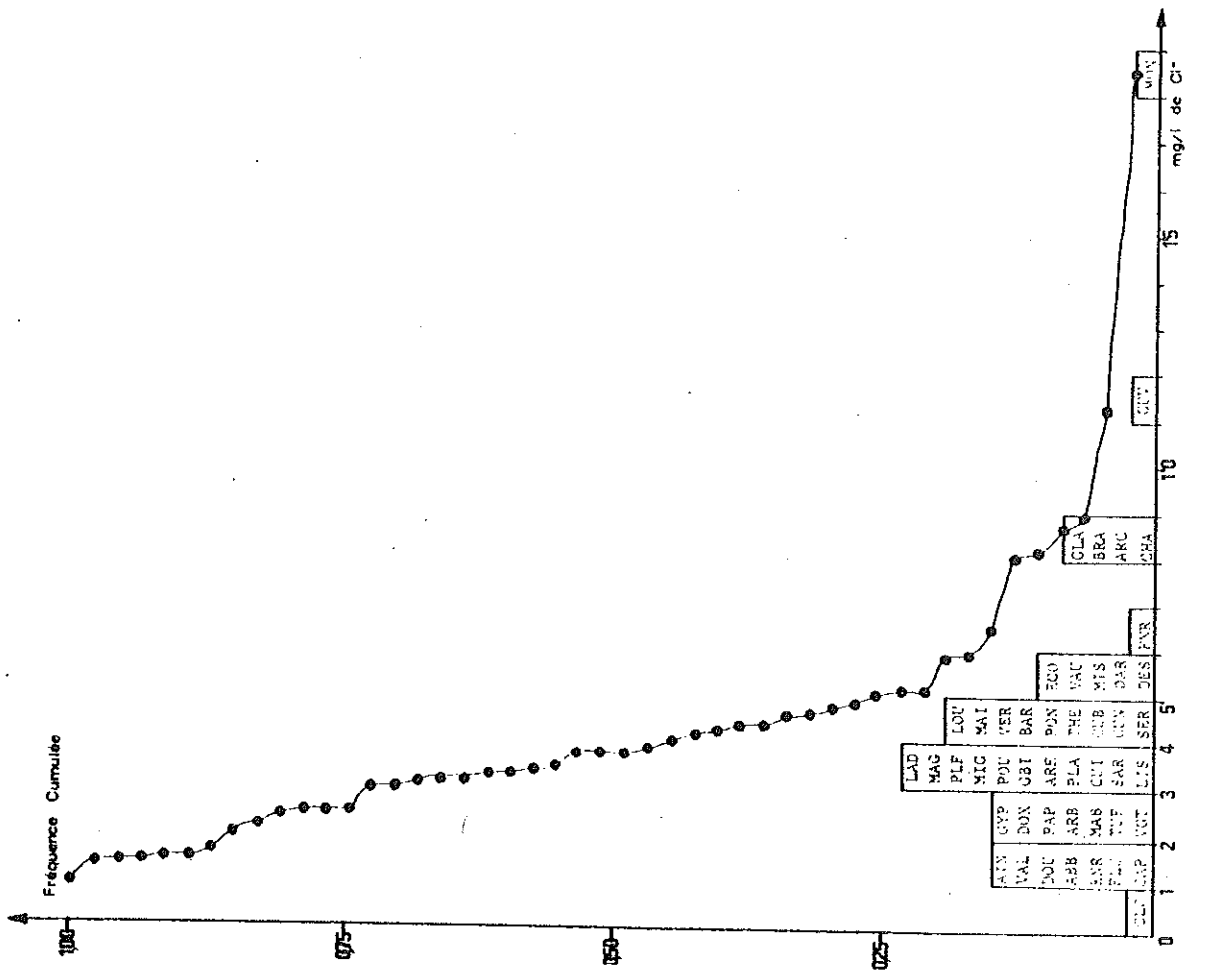
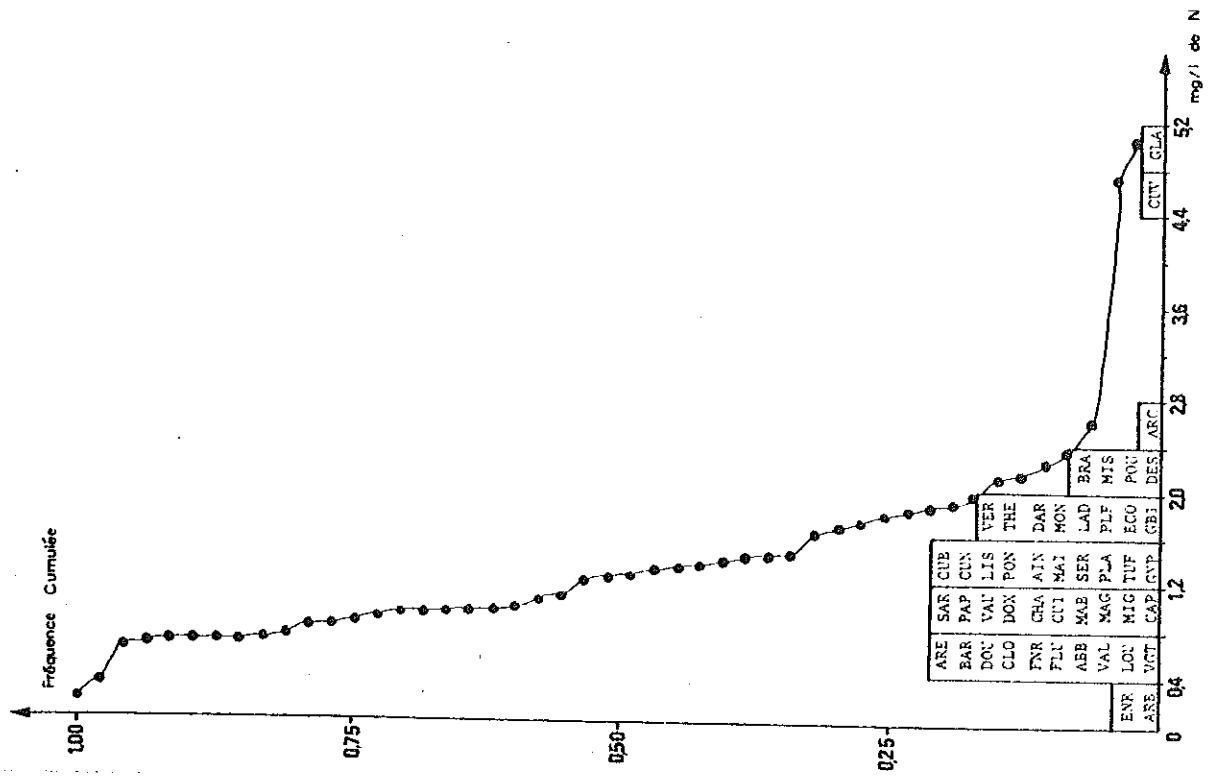


Fig. 3 : Distribution des teneurs en nitrates - étiage 1978.







Il est toutefois difficile de distinguer le rôle régulateur de la phase silicatée sur les alcalins (J.J. MISEREZ 1973) des facteurs d'ordre biologique. Pour les sources à forte teneur ( $> 2$  mg/l), qui appartiennent toutes au premier plateau, l'origine anthropique du potassium est toutefois certaine.

#### D. Teneurs en sodium.

La moyenne des teneurs (2,40 mg/l) est plus élevée que la médiane (1,9 mg/l) avec étalement des fortes valeurs. Une moitié des sources a des concentrations comprises entre 1,15 et 2,75 mg/l.

La distribution est très proche de celle des chlorures, à l'exception de l'exhaure du tunnel de Vallorbe, chargée en sodium (10,3 mg/l) ainsi qu'en sulfates (37,5 mg/l).

Cette minéralisation anormale pour le Jura, bien que faible, est sans doute acquise par les eaux de drainage lors de leur circulation finale dans le tunnel par lessivage des enduits des voûtes.

#### E. Définition d'un indice de contamination.

L'abondance des quatre éléments étudiés paraît donc liée à l'activité humaine : élevage, épandage de lisiers et dans une moindre mesure d'engrais azotés, salage des routes.

Sur les figures 2, 3, 4, 5, les courbes de fréquence cumulée ont permis de fixer des intervalles de classe d'1 mg/l pour les chlorures, de 0,4 mg/l pour l'azote nitrique, de 0,5 mg/l pour le sodium et le potassium.

Chaque source peut donc être repérée par le numéro de la classe dans laquelle elle est rangée pour chaque élément. Ainsi (tableau 2), la source de la Clouterie appartient à la 1ère classe pour les chlorures, le sodium et le potassium, à la 2ème classe pour l'azote. L'indice de contamination d'une source est défini par la somme des classes de ses teneurs en chlorures, nitrates, potassium et sodium. Ainsi la source de la Clouterie a un indice de 5 lors de la campagne de 1978. Plus cet indice est élevé, plus la source en étiage, donc les réserves doivent être considérées comme atteintes par l'activité humaine.

Compte-tenu des corrélations (tableau 4) existant entre chlorures et sodium d'une part, nitrates et potassium d'autre part, il aurait peut-être été possible de se limiter à l'utilisation des deux seuls anions. Cependant, l'adjonction du sodium et du potassium modifie le classement de certaines sources (voir plus loin).

Sur le tableau 5, les 47 sources ont été classées dans l'ordre croissant de leur indice de contamination. Il faut remarquer que globalement les faibles indices appartiennent géographiquement au Jura plissé, les forts au premier plateau, ce qui confirme les distributions des quatre éléments examinés séparément.

La plupart des réservoirs sont généralement affectés de façon homogène par les quatre éléments extérieurs au karst. Parmi les exceptions, on observe les sources de Fontaine-Ronde, Baume-Archée, Loue et Montant marquées en chlorure de sodium par le salage des routes, la source de la Glantine, marquée en nitrate de potassium, ce qui suggère une pollution organique, et l'exhaure du tunnel de Vallorbe déjà citée.

### IV. INTERPRÉTATION DES RESULTATS DES DIFFÉRENTES CAMPAGNES

#### A. Variations des teneurs en chlorures.

Les histogrammes des teneurs en chlorures des seules 29 sources prélevées lors des campagnes de Janvier, Février et Septembre 1977, d'Octobre 1978 et de Mars 1982 (incomplet) ont été comparés sur la figure 6. Les valeurs des campagnes d'hiver en basses eaux (1977a et 1982) sont les plus dispersées, alors que celles de la crue (1977b) sont les plus regroupées vers les faibles concentrations. La cause principale de la dispersion

Sources	Classes de teneur				
	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
CLOUTERIE	1	2	1	1	5
ENRAGE	2	1	1	1	5
FLEMEN	2	2	1	1	6
ABBAYE	2	2	1	1	6
DOUBS	2	2	1	1	6
VERGETOLLE	3	2	1	1	7
BERGERET	3	1	1	2	7
CAPUCIN	2	3	2	1	8
TUFFIERE	3	4	1	1	9
AIH	2	4	2	1	9
PAPETERIE	3	3	2	2	10
MALBUISSON (See bleue)	3	3	2	2	10
MALBUISSON (Grande See)	4	3	1	2	10
AREUSE	4	2	2	2	10
CUISANCE	4	3	2	2	11
PLAINMONT	4	4	1	2	11
DOUX	3	3	3	3	12
PLATSIR-FONTAINE	4	5	1	2	12
GYP	3	4	3	3	13
MOULIN-MIGUET	4	3	3	4	14
SERRIERE	5	4	2	3	14
SARRAZINE	4	3	4	3	14
FONTAINE-RONDE	7	2	1	5	15
BAUME-ARCHEE	5	2	3	5	15
LISON	4	4	4	3	16
LOUE	5	2	3	6	16
LADOYE	4	5	4	3	16
GRAND-BIEF	4	5	4	3	16
BIEF-POUTOT	4	6	4	3	17
PONTET	5	4	4	4	17
THEUSSERET	5	5	3	4	17
MAINE	5	4	4	5	18
VAUX-CHATAGNA	6	3	4	5	18
CUSANCIN (Noire)	5	4	5	4	18
CUSANCIN (bleue)	5	4	5	4	18
ECOUTOT	6	5	5	5	21
DARD	6	5	6	5	22
DESSOUBRE	6	6	5	5	22
VERHEAU	5	5	8	5	23
MOULIN-DES-ILES	6	6	7	6	25
VALLOBE (Tunnel)	2	2	2	20	26
ARCIER	9	7	6	7	29
CHAUVEROCHE	9	3	10	8	30
BIEF DE BRAND	9	6	6	12	33
MONTANT	19	5	5	12	41
GLANTINE	9	13	14	9	45
CUL-DE-VAUX	12	12	25	13	62

Tableau 5 : Classement des sources par indice de contamination croissant - campagne d'été 1978

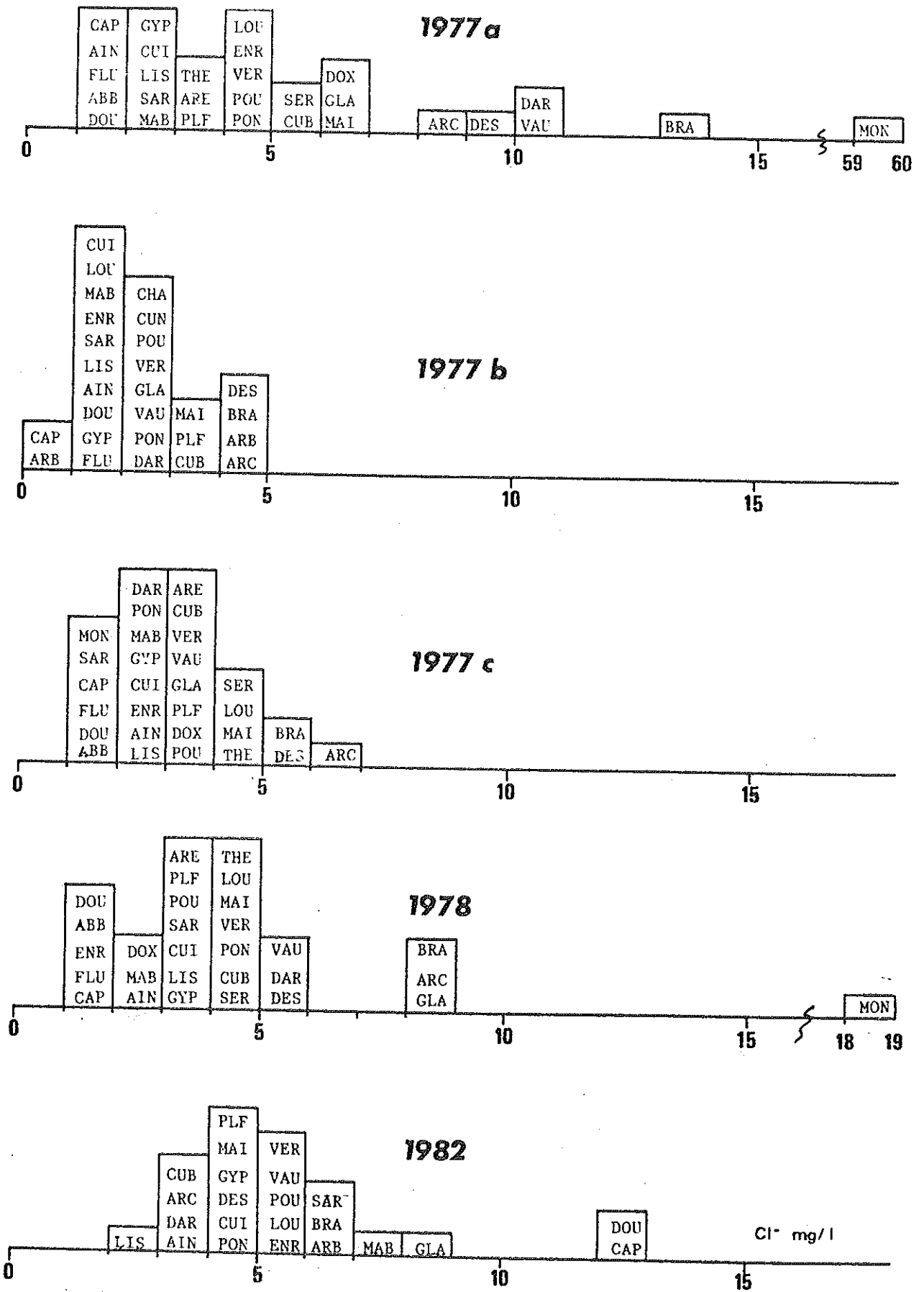


Fig. 6 : Histogrammes des teneurs en chlorures campagnes 1977a,b et c, 1978, 1982

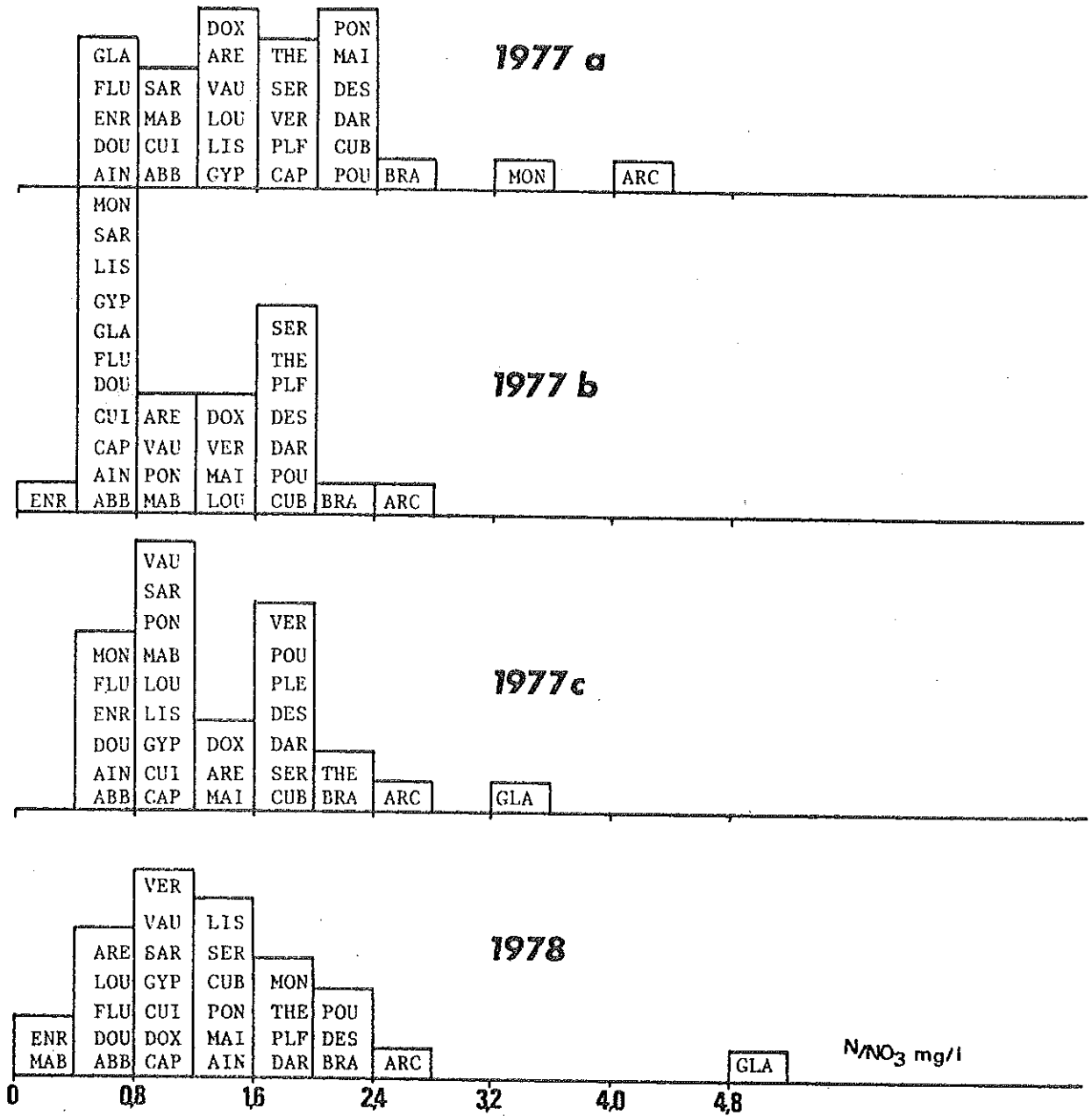


Fig. 7 : Histogrammes des teneurs en nitrates campagnes 1977 a, b et c, 1978

1 9 7 8		Somme des 3 campagnes			1978
Source	Indice Contamin.	Source	Indices	Rang	rang
ENRAGE	5	FLUMEN	21	1	2
FLUMEN	6	DOUBS	21	1	2
ABBAYE	6	ABBAYE	22	3	2
DOUBS	6	AIN	28	4	6
CAPUCIN	8	CAPUCIN	29	5	5
AIN	9	ENRAGE	30	6	1
AREUSE	10	MALBUISSON	32	7	7
MALBUISSON	10	CUISANCE	36	8	9
CUISANCE	11	SARRASINE	36	8	13
DOUX	12	GYPS	37	10	12
PLAISIR-FONTAINE	12	AREUSE	38	11	7
GYPS	13	PLAISIR-FONTAINE	39	12	10
SARRASINE	14	LISON	39	12	15
SERRIERE	14	LOUE	41	14	15
LISON	16	DOUX	47	15	10
LOUE	16	SERRIERE	48	16	13
BIEF-POUTOT	17	BIEF-POUTOT	51	17	17
PONTET	17	PONTET	51	17	17
THEUSSERET	17	THEUSSERET	52	19	17
MAINE	18	MAINE	57	20	20
VAUX-CHATAGNA	18	CUSANCIN Bleue	57	20	20
CUSANCIN Bleue	18	VAUX-CHATAGNA	63	22	20
DARD	22	VERNEAU	64	23	25
DESSOUBRE	22	DARD	66	24	23
VERNEAU	23	DESSOUBRE	76	25	23
ARCIER	29	GLANTINE	81	26	29
BIEF DE BRAND	33	ARCIER	84	27	26
MONTANT	41	BIEF DE BRAND	98	28	27
GLANTINE	45	MONTANT	170	29	28

Tableau 6 : Classement des sources par indice de contamination croissant : comparaison de la campagne d'étiage 1978 avec la somme des campagnes d'étiage 1977 a, c et 1978.

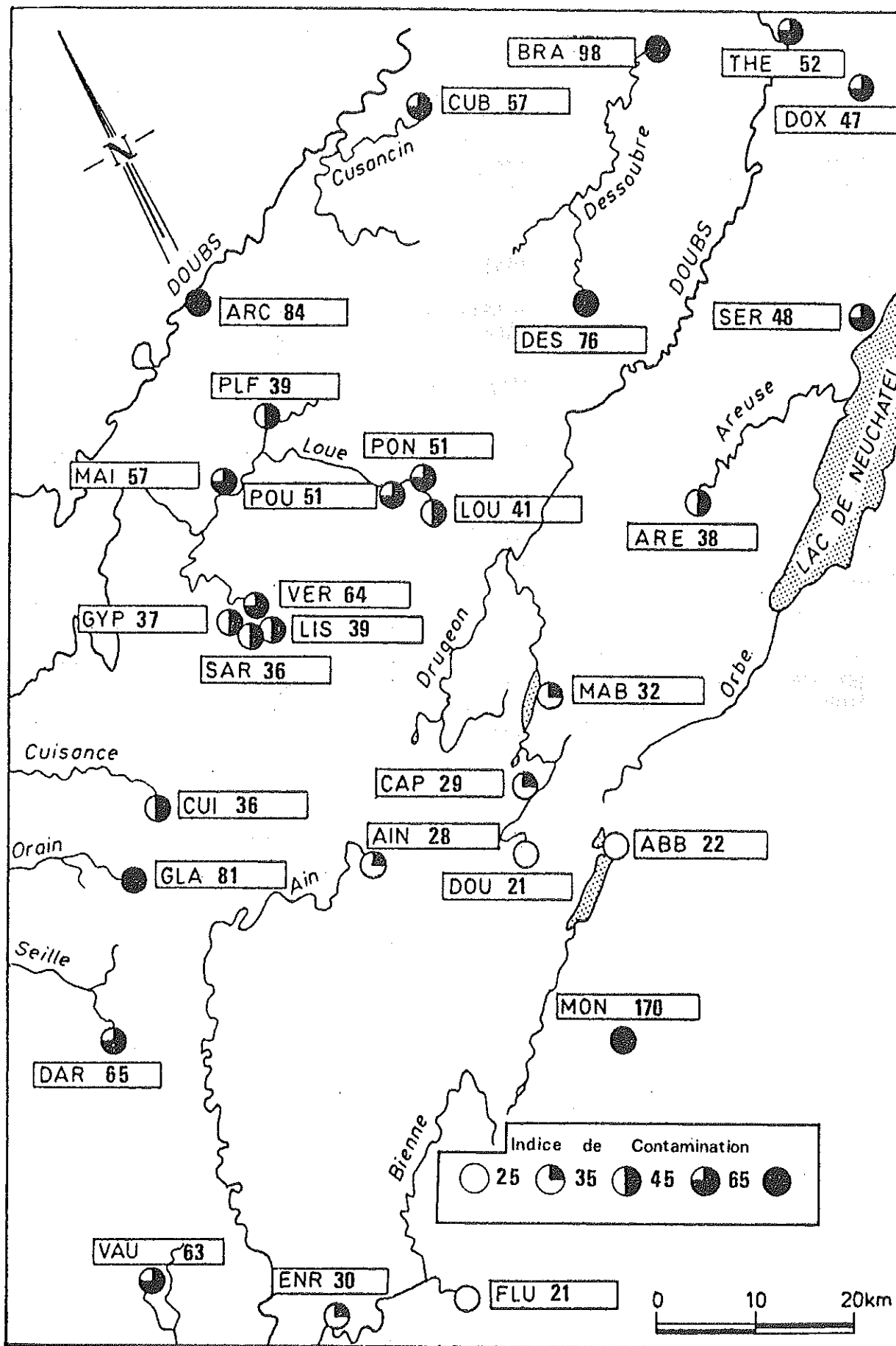


Fig. 8 : Carte des indices de contamination somme des campagnes 1977a, c et 1978

d'hiver est la contamination momentanée par le salage des routes. En effet, cette contamination affecte en Janvier 1977 les sources issues du premier plateau, alors qu'en Mars 1982 elle affecte essentiellement les émergences de la Haute Chaîne. Ceci montre que, malgré le faible débit, une partie de l'écoulement provient d'un ruissellement souterrain provoqué par le déneigement. On doit donc considérer que les basses eaux d'hiver ne sont pas totalement représentatives de l'état des réserves. En revanche, la fonte généralisée de la couverture neigeuse, responsable de la crue de Février 1977, provoque une dilution générale des teneurs et un regroupement. Pour les deux campagnes d'étiage d'automne (1977c et 1978), le classement des sources en fonction de leur teneur en chlorure est très comparable. Ces observations confirment les analyses multivariées dans lesquelles les nuages de points des campagnes de basses eaux d'hiver occupent une position intermédiaire entre ceux des étiages automnaux et ceux des crues de fonte de neige (MUDRY et al. 1979).

#### B. Variations des teneurs en nitrates.

La figure 7 rassemble les histogrammes des teneurs en nitrates des 29 sources. Le classement des émergences varie très peu et l'étalement des valeurs est à peu près constant d'une campagne à l'autre, qu'elle soit effectuée en basses eaux d'hiver, en crue de fonte de neige ou en étiage. Contrairement aux chlorures sujets à variations hivernales du fait du salage du réseau routier, les nitrates ne sont pas perturbés par le déneigement. Leur teneur est le reflet d'un état permanent d'atteinte des réserves par l'activité humaine.

#### C. Indices de contamination.

Afin de tester la représentativité des résultats de la campagne d'étiage automnal 1978, nous avons défini un indice de contamination inter-annuel, en faisant la somme des indices des étiages d'hiver et d'été 1977 et d'automne 1978. Cet indice permet une deuxième classification. Sur le tableau 6, on remarquera que le classement des sources pour la somme des trois campagnes est très voisin de celui de la campagne de 1978, à l'exception des sources de l'Enragé, de l'Areuse et de la Doux moins chargées en 1978 qu'en moyenne, et de la source de la Sarrasine plus chargée qu'en moyenne, sans toutefois que leur rang ne diffère de plus de 5 unités. On peut donc considérer qu'une seule campagne d'étiage automnal suffit à caractériser le degré de contamination des réserves par les éléments extérieurs au karst, d'origine anthropique.

#### V. CONCLUSION

Le prélèvement des principales émergences karstiques du Jura nous a permis, en sélectionnant les campagnes d'étiage automnal, de dresser un "état de santé" des réserves des karsts (fig. 8). Les teneurs observées montrent, malgré une bonne qualité permettant de considérer toutes les eaux prélevées comme chimiquement potables, une atteinte sélective des aquifères karstiques par les éléments extérieurs aux systèmes. Ces teneurs ne permettent pas de préjuger du comportement des émergences en crue, ni de la qualité bactériologique de ces eaux.

Le calcul d'un indice de contamination moyen par grand secteur structural permet de quantifier l'atteinte des grandes unités :

Indice de contamination moyen (étiage 1978) :

Premier plateau 21,8

Deuxième plateau 13,5

Haute Chaîne,  
versant suisse 18,0

Haute Chaîne,  
versant français 9,7

Ces valeurs opposent les zones forestières et peu peuplées du versant français de la Haute Chaîne et du deuxième plateau, aux régions d'élevage à population plus dense du versant suisse de la Haute Chaîne et du premier plateau. Il faut noter cependant que des sources géographiquement voisines et situées dans le même contexte géologique (Arcier et Bergeret) ou des sources ayant un même impluvium (tunnel de Vallorbe, Grande Source de Malbuisson et Fontaine-Ronde) peuvent avoir un indice de contamination différent.

Le classement des émergences permet enfin de concevoir un réseau de surveillance de la qualité des eaux. Une source appartenant à chacun des cinq groupes cartographiés sur la figure 8 pourrait être choisie pour suivre l'évolution de la qualité des réserves d'un étiage à l'autre. Les réserves des sources du groupe I comme celle du Doubs, ne sont pratiquement pas atteintes par l'activité humaine, et on peut considérer leur teneur comme l'état naturel des karsts jurassiens. Parmi les sources du groupe V, les plus marquées par l'activité humaine, bien que chimiquement potables, on remarquera la source d'Arcier utilisée pour l'alimentation en eau de Besançon.

#### BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT D., PETCH M. et JEMELIN L. (1970) - Expérience de coloration à la Dôle (Jura vaudois). *Bull. Labo. Géol., miné., géophys. et du musée géol. de l'Université de Lausanne*, n° 185, et *bull. de la Soc. vaudoise des Sciences Naturelles* n°333, vol. 70, 8 p., 3 fig.
- BLAVOUX B., BURGER A., CHAUVE P. et MUDRY J. (1979) - Utilisation des isotopes du milieu à la prospection hydrogéologique de la chaîne karstique du Jura. *Revue géol. dyn. et géogr. phys.*, vol. 21, fasc. 4, p. 293-306, 10 fig. 4 tabl.
- CHAUVE P., PEGUENET J., TISSOT G. et TRESSE Ph. (1979) - Inventaire des circulations souterraines reconnues par traçage en Franche-Comté - *SRAE de Franche-Comté et Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée*, 10 fig., atlas.
- MISEREZ J.J. (1973) - Géochimie des eaux du karst jurassien (contribution physico-chimique à l'étude des altérations), *thèse Neuchâtel*, 313 p., 60 fig., 54 tabl.
- MUDRY J., KIRALY L. et MULLER I. (1979) - Analyse multivariée du chimisme de quelques sources karstiques du Jura suisse et franc-comtois. *Bull. Centre Hydrogéologie Neuchâtel* n°3, pp. 183-221, 20 fig., 4 tabl.