

Utilisation des isotopes du milieu à la prospection hydrogéologique de la chaîne karstique du Jura

par Bernard BLAVOUX *, André BURGER **, Pierre CHAUVE *** et Jacques MUDRY ***

RÉSUMÉ. — Trois campagnes de prélèvements d'eau aux principales émergences karstiques du Jura ont été effectuées en 1977, en étiage d'hiver, en crue de fonte des neiges, et en étiage d'automne. Elles permettent de dresser des instantanés isotopiques et chimiques de la province hydrogéologique. Une bonne corrélation a été trouvée entre la température de l'eau et l'altitude de l'émergence qui fournit un gradient de température égal à 0,52 °C par 100 m. La décroissance des teneurs en ^{18}O avec l'altitude du bassin d'alimentation varie de 0,29 ‰ par 100 m en février, à 0,18 ‰ en septembre. Elle est suffisante pour distinguer les ensembles hydrogéologiques. On observe des teneurs en tritium élevées (200 U.T.) par rapport aux pluies des trois dernières années (100 U.T.) pour des sources situées en aval des zones tabulaires, en bordure externe, alors que les plus faibles teneurs (70 U.T.) voisines de celles des pluies de l'année sont localisées dans la Haute Chaîne plissée. Des hypothèses sur l'hydrodynamique du système karstique et l'importance des réserves peuvent être ainsi avancées. Toutes les eaux sont du type bicarbonaté calcique. Les émergences du plateau sont toutefois légèrement plus minéralisées que celles de la zone plissée. L'abondance relative du magnésium indique que le karst se développe dans le Malm dolomitique de la Haute Chaîne, alors que la teneur en silice dissoute, également marqueur lithologique, pourrait être un bon indicateur du temps de séjour de l'eau dans le terrain.

Mots-clés : Isotopes du milieu, Prospection hydrogéologique, Karst, Jura.

ABSTRACT. — *Use of environmental isotopes to hydrogeologic prospecting of calcareous aquifer in Jura :* Water from main fissure springs of Jura has been taken at three times in 1977, low-water in winter, flood of snow-melt and low-water in autumn. Therefore isotopic and chemical "snapshots" of ground-water province can be set up. A good correlation has been found between the

temperature of water and the altitude of the spring, which gives a temperature-gradient equivalent to 0.52 °C by 100 m. The decrease of ^{18}O contents on account of altitude of catchment area makes variations from 0.29 ‰ by 100 m in February to 0.18 in September. It is sufficient so as to distinguish the recharge areas. We can observe high tritium contents (200 T.U.) compared to the rains of the last three years (100 T.U.) for springs which are situated downstream the tableland on the outer edge, whereas the lower contents (70 T.U.) next to the contents of the rains of the year are located in the high pleated zone. So hypothesis about the Geohydrology of karstic system and about the importance of reserves can be advanced. The total mineral contents of calcium bicarbonate waters are lightly more important in the springs of the tableland than in the high pleated zone. The relative abundance of magnesium indicates that karst extends itself in the dolomitic Malm of the high mountain range although the dissolved silica content, also lithological mark, might indicate how long the water stays in the aquifer.

Key-words : Environmental isotopes, Hydrogeologic prospecting, Karst, Jura.

Introduction.

L'utilisation du traçage naturel par l'oxygène-18 des aquifères karstiques du marais de Saône et du bassin de Champlive (B. Blavoux *et al.*, 1976) avait montré l'existence d'un gradient isotopique entre les deux premiers plateaux calcaires du Jura. Encouragés par ces résultats, nous avons pensé qu'il était possible d'utiliser les isotopes du milieu pour la prospection hydrogéologique d'une région karstique, pour identifier et classer les systèmes karstiques. L'étude plus ponctuelle des réactions isotopiques d'un exutoire aux événements hydrologiques, qui a déjà été expérimentée (A. Burger *et al.*, 1971; P. Eberentz, 1975; G. Tissot et Ph. Tresse, 1978), ne devrait logiquement être entreprise que sur des systèmes préalablement classés et

* Centre de Recherches Géodynamiques, Avenue de Corzent, 74203 Thonon.

** Centre d'Hydrogéologie, 11, rue Émile Argand, CH-2000 Neuchâtel.

*** Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée, Université de Franche-Comté, Place Maréchal Leclerc, 25030 Besançon Cédex.

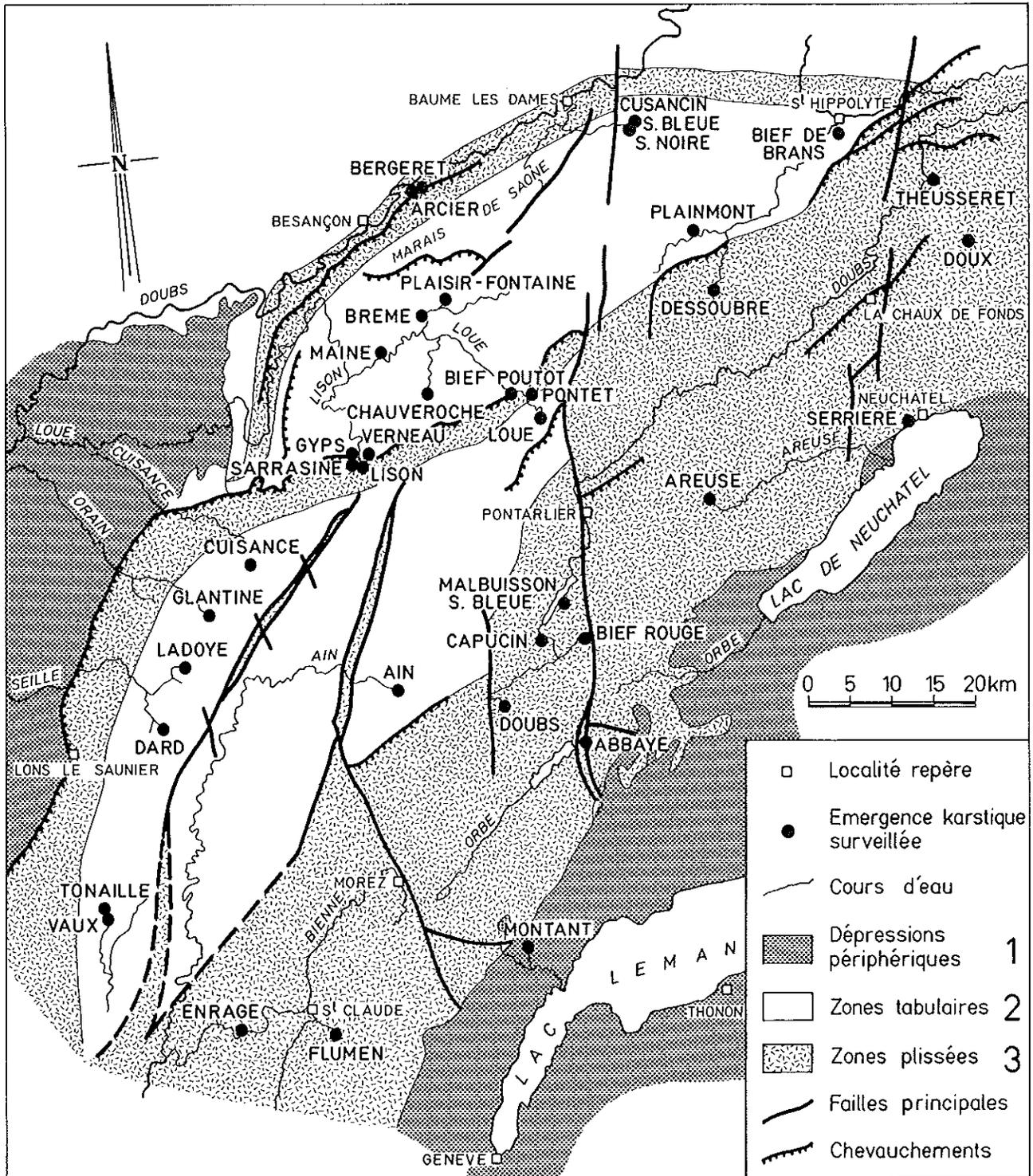


FIG. 1. - Localisation structurale des émergences karstiques étudiées.

FIG. 1. - Location of studied fissure springs in the structural field of Jura.

1 : peripheric depression - 2 : tableland - 3 : pleated zone.

représentatifs d'une certaine famille d'eaux. Une application à la chaîne du Jura a donc été tentée. Trois instantanés isotopiques et géochimiques de cette province hydrogéologique ont été pris en 1977. Le choix des émergences à analyser a été fait en fonction de l'importance de leur débit, de leur situation structurale et de leur accessibilité dans un périmètre de quelques 8 000 km² compris entre Saint-Hyppolyte, Neuchâtel, Gex, Saint-Claude, Lons-le-Saunier, Besançon et Baume les Dames (fig. 1). Trois campagnes ont été effectuées au cours de l'année 1977. La première campagne (19,

20 et 21 janvier) correspond à un étiage d'hiver, la deuxième (24 et 25 février) à une forte crue de fonte des neiges, la troisième (23 septembre) à l'étiage d'automne.

Dans cette étude nous exposerons essentiellement les premières indications fournies par le seul examen des teneurs en oxygène-18 et en tritium, et des principaux paramètres physico-chimiques des 37 émergences. Les résultats bruts sont reportés dans le tableau I. Pour étalonner cette méthode de prospection, ces résultats

TABLE I. - Température, minéralisation totale, teneurs en oxygène-18 et en tritium des sources du Jura karstique.

1 : Janvier, étiage d'hiver - 2 : Février, crue de fonte de neige - 3 : Septembre, étiage d'automne.

TABLE I. - Temperature, total mineral content, oxygen-18 and tritium contents of fissure springs in calcareous Jura.

1 : January, winter low-water - 2 : February, flood of snow-melt - 3 : September, autumn low-water.

Nom de la source	Localité	Code	Altitude de l'émergence	Altitude estimée du bassin d'alimentation	Température °C			18O-δ ‰ vs. SMOW			Tritium - U.T.			Minéralisation totale en mg/l		
					1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Source Bleue	Val de Cusance	CUB	310	600	9,75	8,9	10,5	- 10,3	- 10,8	- 9,64	182 ± 13	130 ± 9	211 ± 15	11,06	9,65	12,52
Source Noire	"	CUN	325	600		9,1	9,75		- 10,7	- 9,70		150 ± 25	136 ± 21		9,17	11,61
Bergeret	Arcier	ARR	266	400		9,1	10		- 9,7	- 9,23		140 ± 22	119 ± 19		9,67	12,32
Arcier	"	ARC	275	400	8,25	9,1	10,5	- 9,86	- 10,1	- 9,03	167 ± 12	145 ± 10	214 ± 16	9,93	9,56	11,48
Plaisir-Fontaine	Bonnevaux	PLF	395	550	9,0		10,0	- 9,91	- 10,2	- 9,64	144 ± 23	135 ± 21	119 ± 19	9,19	8,81	11,09
Maine	Cléron	HAI	306	560	9,0		10,0	- 10,25	- 10,8	- 9,90	152 ± 11	108 ± 17	138 ± 22	10,23	9,19	11,29
Puits de la Brème	"	BRE	330	560	9,5		"sec"	- 10,42	- 11,0	"sec"	150 ± 24	115 ± 8	"sec"	10,46	9,09	"sec"
Chauveroch	"	CHA	400	660	7,5		"sec"	- 10,15	- 10,8	"sec"	193 ± 29	130 ± 21	"sec"	9,01	8,84	"sec"
Bief Poutot	"	POU	370	650	9,5		10,0	- 10,30	- 11,2	- 10,20	152 ± 24	115 ± 18	126 ± 20	10,31	8,99	11,54
Verneau	Nans sous Ste-Anne	VER	430	670	8,75		10,0	- 10,24	- 10,9	- 9,83	173 ± 12	129 ± 9	171 ± 13	10,51	7,65	12,38
Lison	"	LIS	382	650	8,0		8,75	- 10,62	- 11,1	- 9,46	145 ± 11	91 ± 7	170 ± 13	9,52	7,95	11,22
Sarrasine	"	SAR	399	640	8,0		10	- 10,34	- 11,5	- 9,63	143 ± 11	97 ± 7	168 ± 13	9,55	8,61	10,99
Gyps	"	GYP	390	590	9,5		9,5	- 9,93	- 11,0	- 10,09	161 ± 12	105 ± 8	160 ± 12	9,57	7,79	10,77
Cuisance	Les Planches	CUI	378	570		8,5	9,4	- 10,45	- 10,7	- 9,82	156 ± 30	158 ± 25	188 ± 28	9,87	8,72	10,15
Glantine	Vaux sur Poligny	GLA	420	560		9,0	9,7	- 10,57	- 10,7	- 9,89	242 ± 16	196 ± 13	282 ± 20	11,08	10,36	12,28
Seille Nord	Ladoye	LAD	390	580		9,5	9,6	- 10,3	- 10,3	- 9,87		210 ± 30	217 ± 32		6,52	11,18
Dard	Baume les Messieurs	DAR	400	600		9,75	10,1	- 10,24	- 10,9	- 9,70	143 ± 11	118 ± 9	161 ± 12	10,47	6,75	12,18
Bief de Brand	"	BRA	400	770	9,5	9,1	9,5	- 10,44	- 11,4	10,33	135 ± 22	133 ± 21	158 ± 23	11,05	9,44	11,86
Plainmont	"	PLA	570	770		8,8	"sec"	- 11,3	- 11,3	"sec"		94 ± 15	"sec"		9,07	"sec"
Dessoubre	Consolation	DES	598	770	8,5	8,5	8,75	- 10,82	- 11,0	- 9,95	147 ± 11	104 ± 8	173 ± 13	10,52	9,13	13,00
Pontet	Mouthier	POU	408	790	8,25		9,5	- 10,43	- 11,6	- 9,60	149 ± 24	106 ± 17	138 ± 22	10,11	8,22	11,19
Loue	Ouhans	LOU	535	820	8,5			- 10,10	- 12,7	- 9,89	145 ± 11	84 ± 6	170 ± 13	9,48	8,66	9,60
Ain Vaux	Conte Chatagna	AIN	700	910		7,25	9,4	- 10,8	- 10,8	- 9,99		33 ± 5	85 ± 14		7,26	10,26
Tonaille	"	VAU	384	520		8,75	10,6	- 10,08	- 10,5	- 9,30		97 ± 7	132 ± 10	10,05	8,35	10,69
"	"	TON	395	520		7,75	"sec"	"sec"	- 10,7	"sec"		107 ± 17	"sec"	"sec"	8,38	"sec"
Thusseret	Muriaux	THE	507	1 100	6,3		8,2	- 11,44	- 11,2	- 10,62	193 ± 29	161 ± 26	181 ± 28	8,37	6,86	9,07
Doux	Le Torrent	DOX	776	1 150	8,0		8,1	- 12,13	- 12,2	- 11,07	176 ± 27	139 ± 22	182 ± 28	10,53	8,41	10,56
Serrière	"	SER	475	1 100	8,6		8,8	- 10,43	- 11,9	- 10,93	154 ± 11	114 ± 8	143 ± 11	9,75	8,91	9,91
Areuse	St-Sulpice	ARE	793	1 100	7,4		7,8	- 11,36	- 12,0	- 10,76	130 ± 10	89 ± 7	155 ± 12	9,10	7,42	10,54
Source Bleue	Malbuisson	MAB	980	1 150	7,0	7,5	7,6	- 10,91	- 12,0	- 10,76	120 ± 19	72 ± 12	123 ± 20	9,40	8,32	9,97
Bief Rouge	Métabief	ROU	965	1 100	7,0	7,25	6,8	- 11,51	- 11,7	- 10,79	103 ± 17	84 ± 14	89 ± 15	7,83	9,27	8,48
Capucin	Labergement S.M.	CAP	860	910	7,25	7	7,4	- 10,68	- 11,7	- 10,22	70 ± 12	52 ± 9	88 ± 14	9,87	7,52	10,50
Doubs	Mouthes	DOU	965	1 150	6,0	5,75	6,2	- 11,22	- 13,4	- 10,46	108 ± 8	68 ± 5	155 ± 12	7,46	6,34	8,41
Abbaye Lyonnaise	l'Abbaye Genolier	ABB	1 080	1 200	6,1		5,1	- 11,82	- 13,2	- 11,14	95 ± 16	31 ± 5	125 ± 20	7,21	6,33	8,30
Montant	"	MON	585	1 000	4,6		6,4	- 10,27	- 12,8	- 10,57	102 ± 8	54 ± 5	132 ± 10	15,06	7,95	9,38
Fluzen (Les Moulins)	Septtroncel	FLU	926	1 160		7,0	7,0	- 12,12	- 12,3	- 9,83	98 ± 8	56 ± 5	168 ± 13	6,57	5,57	8,47
Enragé	Molinges	ENR	410	870		7,25	7,5	- 11,79	- 11,7	- 9,80	94 ± 15	39 ± 6	108 ± 18	7,76	5,87	8,23

seront toutefois confrontés à nos connaissances hydro-géologiques et hydrodynamiques sur les bassins d'alimentation des systèmes étudiés.

I. - TEMPÉRATURES DE L'EAU ET GRADIENTS ALTIMÉTRIQUES.

Différentes corrélations ont été calculées entre la température de l'eau mesurée à l'émergence et, d'une part, l'altitude de cette émergence et, d'autre part, l'altitude des bassins d'alimentation correspondants estimés d'après la carte topographique.

TABLE II. - Corrélations entre la température de l'eau et l'altitude.

Coefficient de corrélation r - Δ : non significatif au seuil de 95 %
- * : significatif au seuil de 95 % - ** : significatif au seuil de 99 %.

TABLE II. - Correlations between the temperature of water and on the one hand, the altitude of springs and on the other hand the altitude of recharge areas.

Campagne	1. Janvier	2. Février	3. Septembre	1 + 2 + 3
Nombre de couloirs Z - T	24	20	32	76
Valeur de r avec altitude de l'émergence Z (E)	- 0,775 Δ	- 0,819**	- 0,860**	- 0,793**
Valeur de r avec altitude du bassin d'alimentation Z (A)	- 0,730 Δ	- 0,802*	- 0,853**	- 0,770**

Dans le tableau II, on observe que les relations température-altitude de l'émergence sont toujours légèrement meilleures que celles qui prennent en compte l'altitude vraisemblable du bassin d'alimentation. Le coefficient de corrélation le plus élevé est obtenu entre l'altitude de l'émergence et la température mesurée lors de l'étiage d'automne (fig. 2). La baisse de température de l'eau avec l'altitude ainsi calculée est égale à 0,52 °C par 100 m, c'est-à-dire identique aux valeurs connues pour les températures de l'air comprises entre 0,51 °C et 0,55 °C (A. Burger, 1959). L'équilibre thermique entre l'eau et l'encaissant vers l'exutoire est donc atteint pour la majorité des sources en étiage parce que les vitesses de transit sont faibles, et que l'écoulement de la zone noyée du karst constitue alors l'essentiel du débit de la source. On notera sur le graphique de la figure 2 que les températures des sources Enragé (ENR) et Montant (MON) sont nettement inférieures à celles de la relation générale. La grande différence d'altitude, voisine de 400 m, entre la zone d'alimentation et l'émergence de ces deux sources entraîne un transit final rapide, et l'eau conserve une partie des caractères thermiques acquis lors de l'infiltration.

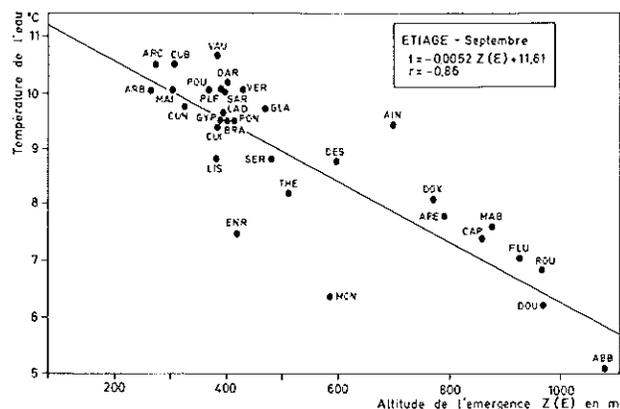


FIG. 2. - Diminution de la température de la source en fonction de l'altitude de l'émergence.

FIG. 2. - Decrease of water-temperature with the altitude of spring in low-water.

A gradient of 0.52°C by 100 m has been found, comparable to that of air.

II. - TENEURS EN OXYGÈNE-18.

Les teneurs sont exprimées en $\delta\text{‰}$ par rapport à l'étalon S.M.O.W. avec une incertitude de $\pm 0,1 \delta$. On sait que les teneurs des précipitations toujours appauvries en oxygène-18 par rapport à l'étalon (valeurs négatives) varient avec la température au sol, et par conséquent avec l'altitude. Une diminution d'environ 0,25 $\delta^{18}\text{O}$ des pluies pour une augmentation de 100 m en altitude a été souvent mesurée en accord avec le calcul utilisant la relation $\delta^{18}\text{O} = 0,40_5 T - 13,5$ et un gradient thermique de 0,6 °C/100 m (B. Blavoux, 1978). Pour un même lieu la teneur des pluies varie évidemment avec la saison. Les pluies sont en moyenne plus riches en oxygène-18 (valeurs moins négatives) en été qu'en hiver.

A. Les gradients d'oxygène-18 avec l'altitude.

Des corrélations entre les teneurs en oxygène-18 et l'altitude ont été calculées comme précédemment (tabl. III). A l'inverse des températures, les meilleures corrélations s'observent toujours quand l'on prend en compte l'altitude moyenne estimée du bassin versant. En effet la teneur en ^{18}O de l'eau à l'exutoire est directement héritée de celle de la pluie efficace sur le bassin d'alimentation, qui est elle-même fonction de l'altitude moyenne du bassin hydrogéologique.

TABL. III. - Corrélations entre les teneurs en ^{18}O des sources et l'altitude.

Coefficient de corrélation r - * : significatif au seuil de 95 % - ** : significatif au seuil de 99 %.

TABLE III. - Correlations between the oxygen-18 contents and on the one hand, the altitude of springs and on the other hand, the altitude of recharge areas.

Campagne	1. Janvier	2. Février	3. Septembre	1 + 2 + 3
Nombre de couples $Z - \delta^{18}\text{O}$	30	37	33	100
Valeurs de r avec l'altitude de l'émergence $Z (E)$	- 0,774**	- 0,747**	- 0,675*	- 0,564**
Valeurs de r avec l'altitude du bassin d'alimentation $Z(A)$	- 0,789**	- 0,849**	- 0,845**	- 0,641**

Le report sur la figure 3 des teneurs en oxygène-18 en fonction de l'altitude du bassin d'alimentation pour deux campagnes confirme la bonne relation linéaire entre ces deux paramètres, ainsi que la décroissance générale des teneurs en oxygène-18 avec l'altitude depuis le Jura des plateaux jusqu'à la Haute Chaîne. La décroissance des teneurs en ^{18}O lors de la campagne de crue égale à $0,29 \delta\text{‰}$ par 100 m est plus accentuée que celle calculée pour la campagne d'étiage égale à $0,18 \delta\text{‰}$ par 100 m (fig. 3). En étiage d'hiver une décroissance intermédiaire a été relevée ($0,22 \delta^{18}\text{O}$ par 100 m). Ces gradients mesurés, surtout ceux d'étiage,

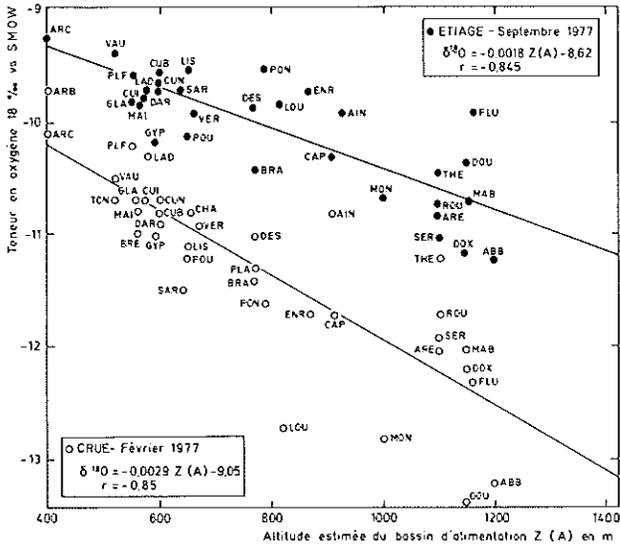


FIG. 3. - Décroissance des teneurs en oxygène-18 des sources en fonction de l'altitude de leurs bassins d'alimentation en étiage et en crue.

FIG. 3. - Decreases of oxygen-18 contents of fissure springs on account of altitude of their recharge areas in low-water and in flood of snow-melt.

The isotope gradient is larger in February ($-0.29 \delta/100 \text{ m}$) than in September ($0.18 \delta/100 \text{ m}$). This last is nearly the annual mean value.

sont très voisins de ceux déjà connus pour le Jura oriental ($0,20 \delta^{18}\text{O}$ par 100 m : U. Siegenthaler *et al.*, 1970).

Pour expliquer la différence des gradients entre étiage et crue, il faut considérer que la concentration en étiage est essentiellement celle de la zone noyée du karst alors que la teneur de crue est celle d'un mélange entre l'eau de pluie (infiltration rapide et retardée) et l'eau de la zone noyée. La zone noyée étant un réservoir dans lequel se mélangent les recharges de plusieurs années, sa teneur en ^{18}O est une teneur moyenne annuelle, et par conséquent les gradients mesurés en étiage sont des gradients moyens. Les gradients mesurés

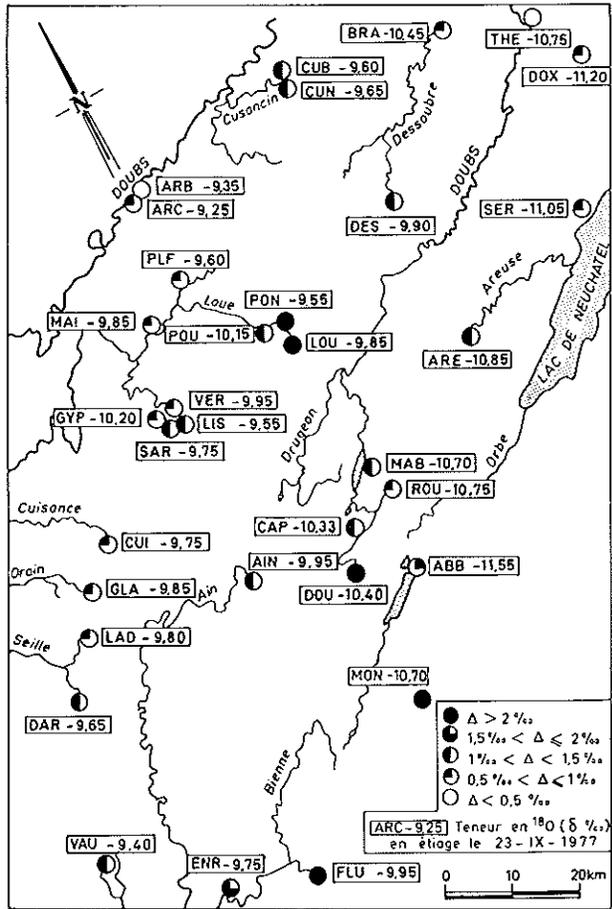


FIG. 4. - Carte des teneurs en ^{18}O lors de l'étiage et amplitude des variations (Δ) entre crue de fonte des neiges et étiage de septembre.

FIG. 4. - Repartition of oxygen-18 contents of fissure springs in September low-water.

The $\delta^{18}\text{O}$ variations (Δ) between winter-flood and low-water contents of springs located in high pleated zone are larger than variations of springs located downstream the tableland especially at outer edge of Jura.

en crue sont par contre fortement influencés par les gradients de l'averse qui présentent des variations saisonnières importantes. Ils sont généralement plus élevés en hiver que les gradients moyens (cas observé), et plus faibles en été, comme l'ont signalé G.M. Zuppi *et al.* (1974) à propos des pluies sur l'Apennin romain.

B. Identification des bassins d'alimentation à l'aide de l'oxygène-18.

Les gradients d'oxygène-18 en période de basses eaux d'automne, qui est la plus significative, sont suffisants pour distinguer certains ensembles hydrogéologiques jusqu'alors confondus (fig. 4). La source du Maine (MAD), par exemple, a une teneur en ^{18}O significativement plus basse que celle d'Arcier (ARC), bien que toutes deux soient connues comme des émergences du marais de Saône. La teneur de la source du Maine est plus proche de celles du deuxième plateau, plus élevé, d'où elle recevrait une alimentation importante, et ce fait peut confirmer un traçage discuté entre Pasonfontaine sur le plateau d'Ornans et Maine (R. Nuffer, 1968). Bien que liées dans leur comportement hydrodynamique (G. Tissot et Ph. Tresse, 1978) les sources du Lison (LIS) et de la Sarrazine (SAR) présentent en hiver des valeurs un peu différentes. Cette constatation confirmerait les conclusions de ces auteurs. Alors que le Lison a un fonctionnement complexe, la Sarrazine ne serait que le trop plein d'un des systèmes aboutissant au Lison. À l'inverse la similitude des teneurs de certains systèmes voisins, Source Bleue et Source Noire du Cusancin (CUB, CUN), Cuisance (CUI) et Glantine (GLA), atteste que leurs zones d'alimentation se situent à une altitude comparable.

C. Variations de la teneur en oxygène-18 entre la crue de février et l'étiage de septembre.

Les teneurs en oxygène-18 lors de la crue de fonte des neiges en février sont sans exception plus faibles que celles de l'étiage (tabl. I). La neige surtout et les précipitations de la saison froide en général étant très pauvres en isotopes lourds, cela indique une participation rapide des neiges et pluies hivernales à l'écoulement de février, à la manière d'un ruissellement pour les eaux de surface. Les amplitudes des variations des teneurs en ^{18}O entre crue d'hiver et étiage ont été reportées sur la carte de la figure 4. On observe une localisation des fortes amplitudes supérieures à 1,5 ‰ dans les zones plissées du Haut Jura, tandis

que les amplitudes les plus faibles se manifestent dans les zones tabulaires et principalement à la bordure externe du Jura. Les fortes variations de la Haute Chaîne suggèrent un transit rapide des eaux météoriques avec des mélanges modérés (réserves faibles; gradients hydrauliques forts; trajets directs) tandis que les faibles variations du Jura des plateaux font penser à un faible gradient hydraulique avec mélange important au sein d'un aquifère noyé ou dans une zone non saturée très développée.

Toutefois l'étude détaillée de l'exutoire karstique du Baget au cours d'une crue (P. Eberentz, 1975) a montré que les teneurs isotopiques de l'eau peuvent varier très rapidement à l'échelle horaire, et que le maximum des variations isotopiques dans le sens de l'impulsion responsable de l'événement ne correspond pas à la pointe de l'hydrogramme de crue. Si bien qu'il est pratiquement impossible, lors d'une campagne, de prélever toutes les sources dans les mêmes conditions de variations maximales des teneurs. Les résultats exposés ci-dessus doivent donc être considérés avec prudence, et les hypothèses formulées avec réserve.

III. - TENEURS EN TRITIUM.

Les mesures de tritium ont été faites par comptage de scintillations en phase liquide après que les échantillons aient été enrichis par électrolyse. Les teneurs sont exprimées en Unités Tritium (U.T.) avec une erreur expérimentale totale (préparation et comptage) de l'ordre de $\pm 10\%$ mais variable et figurant après les résultats dans le tableau I. On sait que les teneurs naturelles en tritium des précipitations qui étaient comprises entre 5 et 20 U.T. avant 1953 (J.C. Fontes, 1976) ont considérablement augmenté dès 1954, et que plusieurs pics ont été observés à la suite des explosions thermonucléaires en 1958-1959, et surtout en 1963 quand les teneurs ont atteint leur maximum entre 5 000 et 10 000 U.T. Le signal Pluie a été mesuré dès 1963 à la station de Thonon (rive sud du Léman) qui nous servira de référence. Les teneurs

TABLE IV. - Teneurs pondérées annuelles en tritium des précipitations à Thonon (I.A.E.A., 1979).

TABLE IV. - *Weighted means of tritium contents of annual precipitations at Thonon.*

Année	U.T.	Année	U.T.	Année	U.T.	Année	U.T.	Année	U.T.
1963	2.907	1966	247	1969	206	1972	144	1975	171
1964	1.496	1967	213	1970	189	1973	126	1976	117
1965	595	1968	217	1971	228	1974	113	1977	74

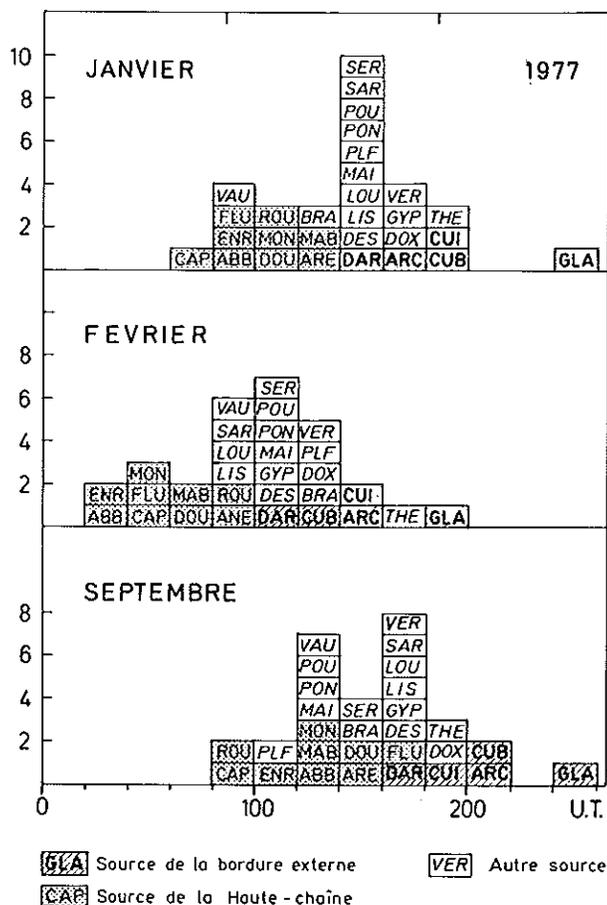


FIG. 5. - Histogrammes des teneurs en tritium des sources karstiques du Jura lors des 3 campagnes de 1977.

Les concentrations lors de la crue de fonte des neiges sont plus basses qu'en été.

FIG. 5. - Histogramms of tritium contents of fissure springs in 1977.

The concentrations in flood of snow-melt are lower than in low-water. We can also observe that the springs located at the outer edge of Jura (1) show almost ever the largest concentrations contrary to those located in the high pleated zone (2) which show the lowest tritium contents.

annuelles très élevées en 1963 (près de 3 000 U.T.) ont déchu rapidement jusqu'en 1967 (213 U.T.), et varient peu depuis autour de 150 U.T. Les teneurs de 1977 sont sensiblement plus basses puisqu'elles n'atteignent que 74 U.T. (tabl. IV).

A. Classes d'eau d'après leurs teneurs en tritium et localisation.

Les concentrations en tritium mesurées sur les prélèvements d'une même campagne sont très variables selon

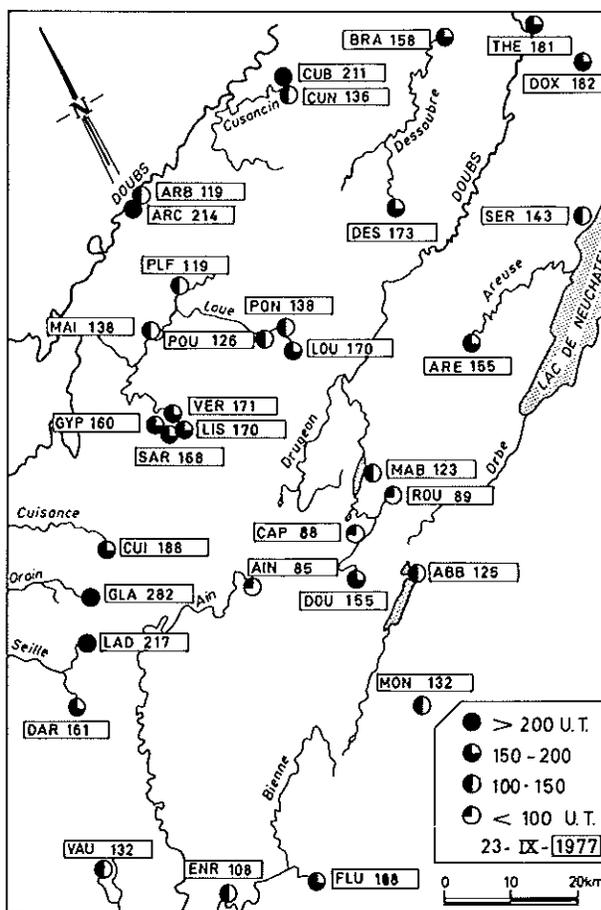


FIG. 6. - Carte des teneurs en tritium lors de l'étiage.

FIG. 6. - Repartition of tritium contents of fissure springs in September low-water.

It shows that the ^3H contents of fissure springs located downstream the tableland exceed 200 T.U. whereas those of springs located in high pleated zone are around 100 T.U.

les sources. Entre les valeurs extrêmes de chaque campagne qui montrent un écart comparable de 200 U.T., les teneurs en tritium présentent une distribution à deux modes avec une ébauche de troisième famille d'eau vers les concentrations élevées (fig. 5). L'instantané de septembre 1977 (fig. 6) montre que la teneur en tritium d'une source est directement liée à sa situation géographique et structurale. Les teneurs fortes en tritium supérieures à celles des pluies des cinq dernières années correspondent aux sources situées en bordure externe du Jura, en aval de la zone des plateaux. La source Glantine (GLA) de la reculée de Vaux sur

Poligny qui présente toujours les concentrations maximums est dans cette situation. Les teneurs les plus faibles en tritium, proches ou légèrement supérieures aux teneurs des précipitations de l'année, sont localisées dans la Haute Chaîne au pied de zones plissées.

B. Variations de la teneur en tritium entre la crue de février et l'étiage de septembre.

Il faut remarquer la similitude des teneurs d'une source entre la première campagne de prélèvements (basses eaux d'hiver) et la troisième (basses eaux d'automne). Par contre les concentrations en tritium mesurées lors de la crue de fonte des neiges sont significativement inférieures à celles de l'étiage (fig. 5). Les neiges de l'hiver 1976-1977 présentant des teneurs en tritium très inférieures à celles des sources à l'étiage (chronique de Thonon), cette baisse indique une participation rapide de l'eau de fonte des neiges à l'écoulement de crue. L'amplitude des variations des concentrations entre la crue et l'étiage serait donc proportionnelle à l'importance des apports météoriques rapides. Comme précédemment pour l'oxygène-18 on remarque une localisation des fortes variations voisines de 100 U.T. dans les zones plissées du Haut-Jura, tandis que les amplitudes les plus faibles sont observées dans les zones de plateau. Toutefois les mêmes réserves que pour l'interprétation des variations des teneurs en oxygène-18 doivent être formulées, parce que la représentativité d'une situation de crue par un échantillon ponctuel est très discutable.

C. Interprétation des teneurs en tritium lors de l'étiage.

Nous avons souligné précédemment les grandes différences des concentrations en tritium des sources lors d'une campagne d'étiage en période non directement influencée par les pluies. Ces marquages à l'exutoire sont entraînés par les variations des temps de séjour moyen des eaux dans le système karstique. En effet, si l'on considère les teneurs de 200 U.T. en 1977 de certaines sources de bordure de plateau, il faut remonter aux précipitations annuelles de 1965 pour fournir ces dernières valeurs compte tenu de la décroissance radioactive du tritium. Dans ce même cas, si on suppose que des recharges annuelles d'un volume constant se mélangent totalement dans le réservoir qui donne naissance aux écoulements d'étiage, et si l'on connaît l'évolution du signal d'entrée, un modèle mathématique

(P. Hubert *et al.*, 1970 ; B. Blavoux, 1978) permet d'estimer la contribution de la recharge annuelle dans l'écoulement à moins de 10 %. Cela signifie encore que la proportion dans le débit d'étiage des molécules d'eau dont le temps de séjour est inférieur ou égal à 1 an est de 10 %, inférieur à 2 ans de 19 % ; 50 % de l'eau ayant moins de 7 ans. C'est un ordre de grandeur qui nécessite cependant de faire appel à un réservoir de grande capacité. Par contre, si l'on considère les teneurs en tritium voisines de 10 U.T., il s'agit en grande majorité ou en totalité d'un écoulement issu des précipitations de l'année 1976-1977. Les réserves sont très vite renouvelées et de faible capacité.

La répartition des teneurs en tritium des exutoires vient étayer ces hypothèses. Les valeurs les plus fortes sont localisées sur la bordure externe du Jura en aval des zones de plateau, là où la géométrie de l'aquifère suggère l'existence de réserves importantes au niveau du karst noyé. Les valeurs les plus basses se rapportent à la Haute Chaîne, zone plissée à gradient hydraulique élevé avec de fortes pentes du substratum imperméable, qui n'est guère favorable à la présence de réserves développées. Toutefois les mélanges s'effectuent déjà au cours de l'infiltration dans le sol, puis au niveau de la zone non saturée, et l'indice de réserves importantes ne doit pas automatiquement être lié à l'existence d'un karst noyé. Il convient enfin de noter que les fortes teneurs en tritium relevées sur les émergences de la Doux (DOU) et du Theusseret (THE) dans le Jura suisse, bien qu'elles se situent en zone plissée, pourraient être imputées en partie à des émissions de tritium dans l'atmosphère par les industries horlogères de la Chaux de Fonds signalées dans le rapport de la commission fédérale de surveillance de la radioactivité pour 1976. L'explication de la teneur très élevée de la source Glantine (GLA), à l'Ouest vers Poligny, demanderait une enquête et une étude approfondies.

IV. - CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES DES SOURCES.

Les analyses des principaux éléments majeurs (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ et K^+ pour les cations, CO_3H^- , Cl^- , SO_4^- , NO_3^- pour les anions et la silice dissoute) ont été effectuées sur les prélèvements des trois campagnes. Un traitement statistique de ces résultats est en cours, et fera l'objet d'un autre travail. Cependant quelques grandes tendances régionales et des relations simples entre éléments, qui apparaissent à l'examen rapide de ces données, sont exposées ci-après.

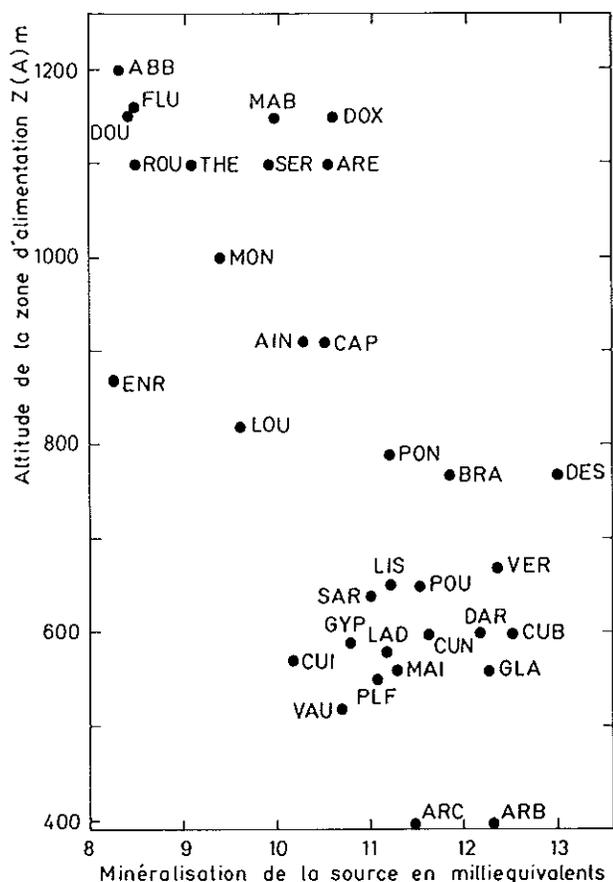


FIG. 7. — Baisse de la minéralisation des sources avec l'augmentation de l'altitude de leur bassin d'alimentation.

FIG. 7. — Decrease of total mineral content of fissure springs with the increase of their recharge area.

A. Variations de la minéralisation avec l'altitude du bassin d'alimentation.

Toutes les sources analysées sont du type bicarbonate calcique. En règle générale les minéralisations lors de l'étiage et surtout les duretés diminuent quand l'altitude du bassin d'alimentation augmente (fig. 7). En effet différents facteurs, tous dépendant de l'altitude, peuvent entraîner des variations de la charge finale en bicarbonates. Ces facteurs sont : la température, les teneurs en CO_2 du sol liées à l'activité biologique, la couverture végétale, la lame d'eau écoulée dépendant de la pluie et de l'évapotranspiration, la vitesse de circulation et le temps de contact de l'eau avec le réservoir dépendant à la fois des structures géologiques et de la lame d'eau écoulée. Il est donc normal que l'on retrouve toujours une différenciation entre les émergen-

ces basses du plateau plus minéralisées, particulièrement en position externe, et celles de la Haute Chaîne moins chargées. Il est difficile toutefois de distinguer l'influence de l'environnement climatique sur l'acquisition de la minéralisation de celle de l'hydrodynamique liée à la structure du milieu. On remarquera cependant que parmi les sources ayant des bassins d'alimentation à la même altitude, les plus minéralisées lors de l'étiage de 1977 (fig. 7) sont aussi celles qui ont les teneurs en tritium les plus fortes (fig. 6). Cette observation confirme le rôle du temps de contact de l'eau avec le réservoir calcaire dans l'acquisition de sa minéralisation carbonatée.

B. Tendances régionales observées aux exutoires.

1. Le magnésium.

Les teneurs en magnésium des sources du Jura restent toujours faibles et inférieures à 10 mg/l. Toutefois, il apparaît sur la figure 8 que les sources de la Haute Chaîne et du plateau de Levier-Champagnole présentent des teneurs plus élevées (> 5 mg/l) que la moyenne des trente-trois sources (entre 3 et 4 mg/l). Cette abondance toute relative du magnésium s'explique par la présence sur leur bassin d'alimentation de calcaires dolomitiques essentiellement représentés dans le Jurassique supérieur terminal. Ainsi le magnésium est un marqueur lithologique utile qui permet de distinguer en étiage les eaux en provenance d'un karst développé dans le Jurassique moyen de celles ayant circulé dans le Jurassique supérieur.

2. La silice dissoute.

Les teneurs en silice dissoute sont également faibles puisque la moyenne des teneurs des trente-trois sources en étiage atteint seulement 3,5 mg/l. Les émergences des plateaux du Jura externe sans exception, et celles du Verneau (VER) et du Gyps (GYP) ont des teneurs supérieures à 4,0 mg/l (fig. 8), alors que les plus basses teneurs se localisent dans la Haute Chaîne, les sources de l'Abbaye (ABB), de l'Enragé du Flumen (ENR) et du Doubs (DOU) par exemple, présentant des concentrations voisines de 2 mg/l. La teneur en silice provient d'une part de la couverture meuble des calcaires qui joue un rôle déterminant dans l'acquisition du chimisme de l'eau, et d'autre part du réservoir karstique lui-même. Ce sont d'abord les conditions climatiques et la lithologie commandant l'altération qui contrôlent les teneurs en SiO_2 ; après l'infiltration, ce

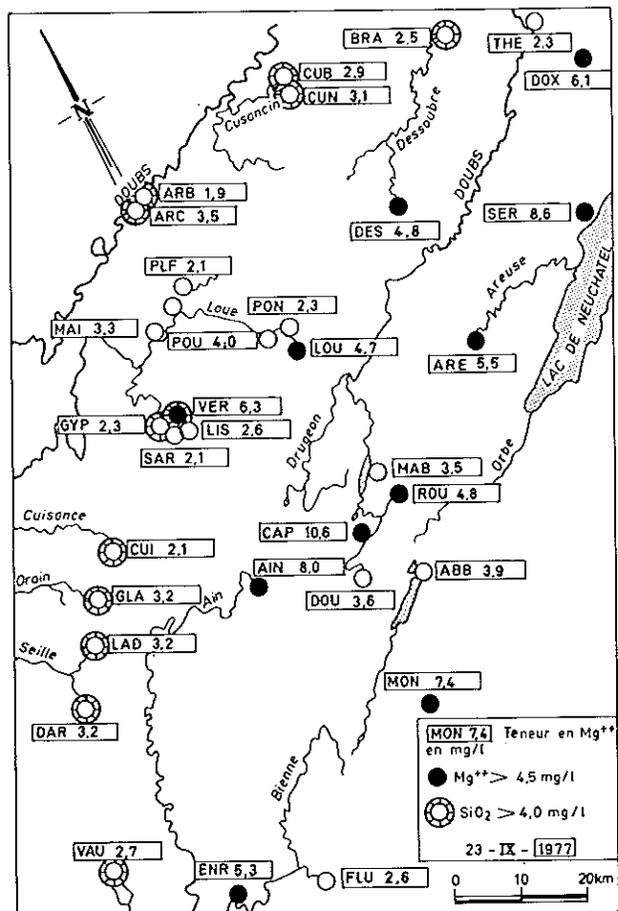


FIG. 8. — Carte des teneurs en magnésium des sources lors de l'étiage et anomalies des concentrations en magnésium et en silice dissoute.

FIG. 8. — Map of magnesium contents of springs in September low-water and location of excess of magnesium and dissolved silica contents with regard to mean value.

The magnesium and silica seem to be lithologic marks.

sont la nature des roches du réservoir et du substratum imperméable, ainsi que le temps de contact de l'eau avec le terrain. En effet, la plus forte teneur mesurée (5,5 mg/l à la source Glantine) est encore loin de la saturation, en admettant que le contenu en SiO_2 des eaux du karst du Jura soit limité par la solubilité du quartz (11 mg/l de SiO_2 à 25°C, d'après J.J. Miserez, 1973). Pour expliquer la localisation des fortes teneurs en silice à la bordure externe du Jura on peut avancer deux hypothèses :

- Le même réservoir du Jurassique moyen étant développé ailleurs sans que les concentrations en silice soient remarquables, ce serait la nature argilo-schisteuse des terrains liasiques constituant le mur imper-

méable des aquifères karstiques qui serait responsable de cette abondance relative. Dans le cas de la source du Verneau (VER), qui n'est pas située en bordure externe, l'eau ruisselle toutefois sur ces mêmes terrains liasiques avant de se perdre dans le karst.

- Comme il existe une assez bonne corrélation entre les teneurs en SiO_2 et la dureté de l'eau ou la minéralisation (fig. 9), et que cette dernière est en partie fonction du temps de séjour de l'eau dans le réservoir (voir chapitre IV.A.), il peut en être de même pour les teneurs en silice.

3. Les autres éléments : Cl^- , SO_4^{--} , NO_3^- , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$.

Il s'agit en général d'éléments extérieurs au karst proprement dit et introduits dans celui-ci avec les pluies ayant transité dans le sol et les terrains de recouvrement, ou par les pertes de surface transportant des pollutions. Cependant leurs teneurs restent faibles, et seules les teneurs dépassant largement la moyenne lors de l'étiage de septembre ont été signalées sur la carte de la figure 10. Tous les points remarquables se situent dans la moitié nord du périmètre étudié qui est la zone la plus peuplée, alors que la Haute Chaîne plus déserte et couverte de forêts présente les teneurs les plus faibles. Cette répartition semble confirmer l'origine en partie anthropique de ces éléments.

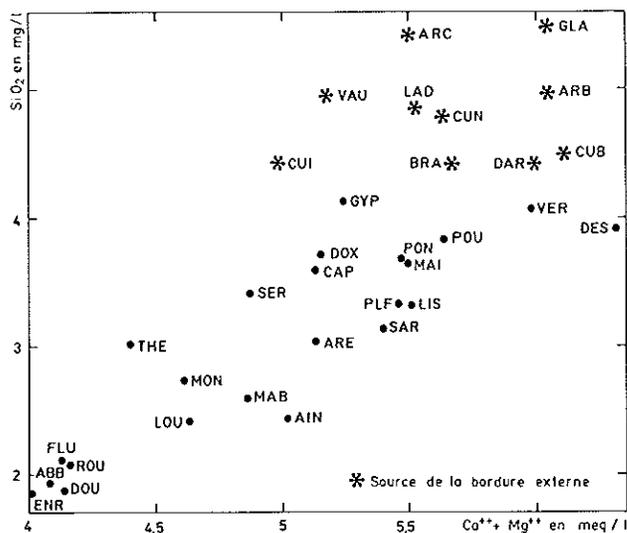


FIG. 9. — Relation entre les teneurs en silice dissoute et les duretés de l'eau.

FIG. 9. — Relation between the dissolved silica contents and the hardness of water.

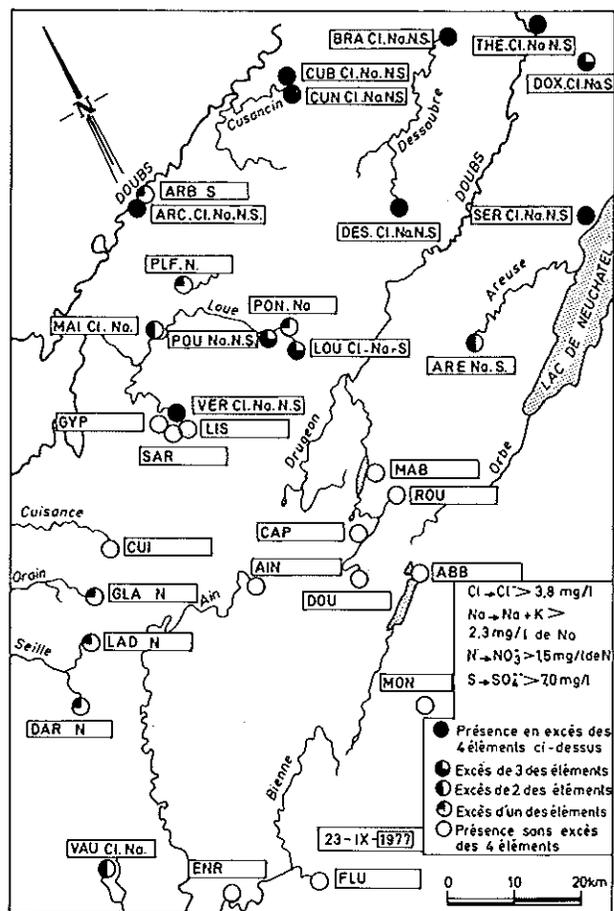


FIG. 10. - Carte des anomalies des concentrations en éléments « extérieurs » au karst (Cl, Na + K, NO₃, SO₄).

FIG. 10. - Location of high concentrations of four elements from outside the karst (Cl, Na + K, NO₃, SO₄).

The contents higher than the mean of all springs are located in the north part of the map, in populated district.

Conclusions.

Les résultats de ces trois campagnes isotopiques et chimiques menées en 1977 dans le Jura montrent l'utilité et l'originalité de cette technique des isotopes du milieu pour la prospection hydrogéologique d'une région karstique. La période la plus propice pour sa mise en œuvre est sans doute l'étiage. Toutefois, une campagne supplémentaire en période de très hautes eaux, bien que délicate à interpréter, apporte des précisions intéressantes sur la variabilité des caractéristiques de l'eau, et indirectement sur l'hydrodynamique du système.

La décroissance des teneurs en oxygène-18 avec l'altitude permet de calculer l'altitude moyenne du bassin d'alimentation d'une source. Par la simple mesure de leur teneur en ¹⁸O, des émergences qui étaient attribuées au même système hydrogéologique peuvent être distinguées, et leur zone d'alimentation reconsidérée. A l'inverse, l'appartenance de sources assez éloignées à un même système peut être envisagée si leur teneur en ¹⁸O est la même.

Le dosage du tritium renseigne sur le temps de séjour de l'eau dans le réservoir. Il permet de faire des hypothèses sur l'hydrodynamique du système karstique et sur l'importance des réserves. La possibilité grâce au tritium d'introduire le facteur temps dans l'étude de l'évolution des minéralisations nous paraît essentielle pour comprendre la signification des paramètres chimiques. C'est ainsi que pour un même système karstique la teneur en silice pourrait être un bon indicateur du temps de séjour de l'eau.

L'étude très détaillée de phénomènes hydrologiques isolés ne devrait débiter sur quelques émergences choisies pour leur représentativité qu'après cette phase de reconnaissance indispensable.

RÉFÉRENCES

- ANONYME (1979). - Environmental isotope data n° 6 : World survey of isotope concentration in precipitation, *Tech. Rep. Ser.*, 192, I.A.E.A., Vienna, p. 12 et p. 166-168.
- BLAVOUX B. (1978). - Étude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène-18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Univ. P. et M. Curie, Paris, p. 52-62.
- BLAVOUX B., CHAUVE P., CLAUDON G., METTETAL J.P., MUDRY J. et PASQUIER C. (1976). - Premiers résultats d'expérience de traçage isotopique par l'oxygène-18 dans le karst du premier plateau jurassien, au Sud et à l'Est de Besançon. *Actes 2^e Coll. Hydrol. Pays Calc. et Ann. Sci. Univ.*, Besançon, 3^e série, Géologie, fasc. 25, p. 71-76, 3 fig., 1 tabl.
- BURGER A. (1959). - Hydrogéologie du bassin de l'Areuse. Thèse Neuchâtel, *Bull. Soc. Neuch. Géogr.*, vol. 52 (1).
- BURGER A., MARCÉ A., MATHEY B. et OLIVE Ph. (1971). - Tritium et oxygène-18 sur les bassins de l'Areuse et de la Serrière (Jura neuchâtelois, Suisse). *Actes Coll. Hydrol. en Pays Calc.*, Besançon 1971, et *Ann. Sci. Univ.*, Besançon, 3^e série, Géologie, fasc. 15, p. 79-87, 4 fig.
- EBERENTZ P. (1975). - Apport des méthodes isotopiques à la connaissance de l'aquifère karstique. Thèse 3^e cycle Géol. dyn., Univ. P. et M. Curie, Paris.
- FONTES J.C. (1976). - Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles : quelques aspects. Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Univ. P. et M. Curie, Paris, p. 28-33.

- HUBERT P., MARCÉ A., OLIVE Ph. et SIWERTZ E. (1970). - Étude par le tritium de la dynamique des eaux souterraines. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, t. 270, p. 908-911.
- MISEREZ J.J. (1973). - Géochimie des eaux du karst jurassien. Thèse de Doctorat ès Sciences, Univ. de Neuchâtel (Suisse), p. 267-270.
- NUFFER R. (1968). - Coloration du bassin des Seignes de Passonfontaine. *Bull. Ass. Spéleo. Est*, n° 5.
- SIEGENTHALER U., OESCHGER H. et TONGIORGI E. (1970). - Tritium and Oxygen-18 in natural water samples from Switzerland in "Isotope in Hydrology 1970". *Proceed. Symp. I.A.E.A.*, Vienna, p. 373-385.
- TISSOT G. et TRESSE Ph. (1978). - Étude des systèmes karstiques du Lison et du Verneau. Région de Nans-sous-Ste Anne (Doubs). Thèse 3^e cycle, Besançon, 134 p., 50 fig.
- ZUPPI G.M., FONTES J.C. et LETOLLE R. (1974). - Isotopes du milieu et circulations d'eaux sulfurées dans le Latium. In : *Isotope Technique in ground-water hydrology. Proceed. Symp. I.A.E.A.*, Vienna, t. I, p. 341-361.

*Manuscrit déposé le 22 mai 1979,
accepté le 12 octobre 1979.*