

ESSAI D'EVALUATION DU TEMPS DE RENOUVELLEMENT
DES RESERVES KARSTIQUES DU JURA A PARTIR DE
L'EVOLUTION DES TENEURS D'ETIAGE EN TRITIUM.

⁺B. BLAVOUX, ⁺⁺P. CHAUVE, ⁺J. MUDRY, ⁺⁺⁺Ph. OLIVE

Résumé :

Les teneurs d'étiage en tritium des principales sources karstiques du Jura sont suivies depuis 1977. La comparaison des teneurs de la campagne 1978 la plus complète permet de classer les sources et d'émettre des hypothèses sur l'hydrodynamique des systèmes karstiques. La situation de ces différentes familles se calque sur les grands ensembles structuraux de la chaîne du Jura. L'évolution sur plusieurs années des teneurs en tritium des sources à l'étiage comparée à celle du signal pluie permet d'approcher le temps de renouvellement des réserves à partir d'un modèle de bon mélange qui sera discuté.

I.- INTRODUCTION

Trois campagnes de prélèvement 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 ont permis de dresser des instantanés chimiques et surtout isotopiques de la province hydrogéologique qui ont été commentés dans un travail précédent (B. BLAVOUX et al. 1979). Considérant que l'échantillon d'étiage avancé est représentatif du seul écoulement de la matrice capacitive calcaire, il a été décidé de renouveler ces campagnes d'étiage pendant plusieurs années afin de mieux comprendre l'évolution des teneurs en tritium des réserves des différents systèmes karstiques en fonction du signal Pluie d'entrée. Ce travail rend compte de l'interprétation des résultats obtenus jusqu'en 1980.

II.- RESULTATS

Les résultats des campagnes d'Octobre 1978, de Juillet et ou Décembre 1979 et de Septembre 1980 complètent donc ceux des 2 campagnes 1977. Les débits de quelques stations de jaugeage au moment de ces prélèvements sont donnés sur le tableau 1 ci-après, afin d'apprécier l'importance relative des différents tarissements.

⁺Laboratoire d'Hydrogéologie, Faculté des Sciences,
33 rue Louis Pasteur, 84000 AVIGNON

⁺⁺Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée,
Faculté des Sciences, Place Maréchal Leclerc, 25030 BESANCON

⁺⁺⁺Centre de Recherches Géodynamiques, Avenue de Corzent,
74203 THONON-LES-BAINS

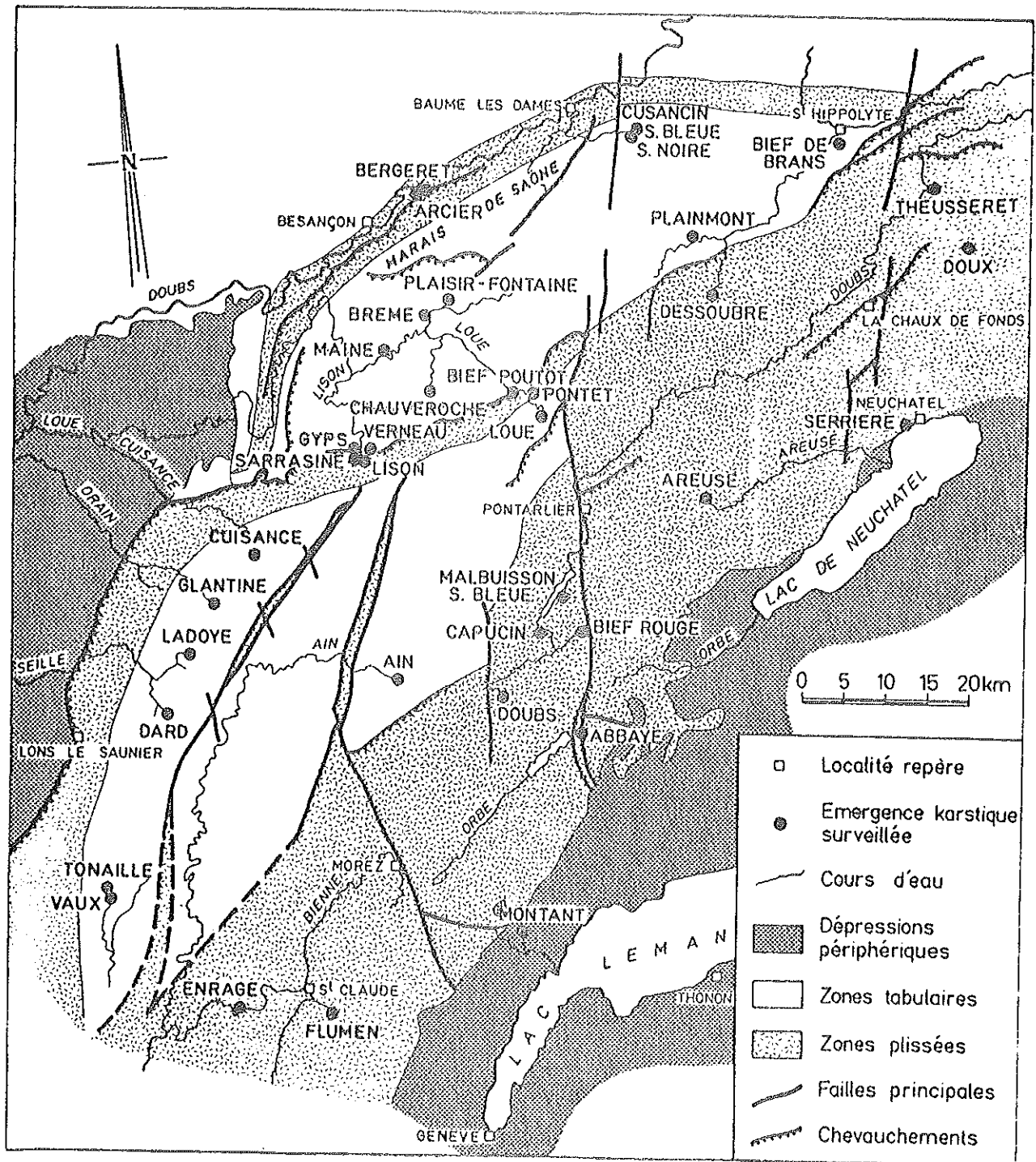


Fig. 1 : Localisation structurale des émergences karstiques étudiées.

Date de prélèvement	Etat Hydrologique	Débits de référence en m ³ /s					
		Cuisance	Loue	Bléfonds	Verneau	Arcier	Sarrazine
I-77	bas. eaux hiv.	4,4	4,8	1,72	0,55	0,60	0,015
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				

Tableau 1 : les campagnes de prélèvement

Toutes les concentrations en tritium disponibles sont rassemblées dans le tableau 2. Les mesures ont été faites par comptage de scintillations en phase liquide soit en comptage direct, soit après que les échantillons aient été enrichis par électrolyse. Les teneurs sont exprimées en Unités Tritium (U.T.) suivies de l'erreur expérimentale totale (préparation et comptage) inférieure à $\pm 10\%$ dans le cas d'un enrichissement, de l'ordre de $\pm 15\%$ dans le cas d'un comptage direct.

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

Cette campagne a été choisie pour différencier les classes d'eau en raison du grand nombre d'échantillons analysés (35), tous après enrichissement par électrolyse, donc de façon homogène et en raison de l'importance de l'étiage automnal. Les sources se répartissent entre St Hippolyte et St Claude du Nord au Sud, et Besançon et Neuchatel d'Ouest en Est sur les versants français et suisse du Jura. La localisation structurale des émergences karstiques étudiées est portée sur la figure 1.

A.- Classement des sources d'après leur teneur en tritium.

La moyenne des teneurs des 35 sources échantillonnées en Octobre 1978 s'élève à 107 U.T. La courbe des fréquences cumulées par ordre décroissant a été tracée sur la figure 2. Elle permet de justifier les limites des classes choisies pour tracer l'histogramme : classe I de 60 à 85 U.T., classe II de 85 à 110, classe III de 110 à 135, classe IV de 135 à 160, classe V au-delà de 160 U.T. On remarquera que 50% des sources ont des teneurs inférieures à 106 U.T. (MOY = 107) et qu'une moitié de la population présente des teneurs comprises entre 90 et 127 U.T. ce qui indique une distribution symétrique centrée sur la moyenne.

B.- Localisation des familles d'eau.

L'instantané d'Octobre 1978 (fig.3) montre que la teneur en tritium d'une source est directement liée à sa situation géographique et structurale. Les teneurs fortes en tritium correspondent aux sources situées en bordure externe du Jura, en aval du premier plateau. La source Glantine (GLA) de la reculée de Vaux sur Poligny, qui présente la concentration la plus forte, est bien dans cette situation, les sources du Theusseret (THE) et de la Doux (DOX), avec de fortes concentrations et une appartenance au Jura plissé, faisant néanmoins exception. Les teneurs les plus faibles en tritium sont celles des sources situées dans la zone plissée de la Haute Chaîne et

		1 9 7 7		1978	1 9 7 9		1980
		JANVIER	SEPTEMBRE	OCTOBRE	JUILLET	DECEMBRE	SEPTEMBRE
GLA	GLANTINE	242 ± 16	282 ± 20	179 ± 12			84 ± 1
DOX	DOUX	176 ± 27	182 ± 28	165 ± 11			
THE	THEUSSERET	193 ± 29	182 ± 28	150 ± 10			
ARB	BERGERET		137 ± 19	138 ± 10			
ARC	ARCIER	167 ± 12	214 ± 16	134 ± 9		105 ± 2	85 ± 1
CHA	CHAUVEROCHE	193 ± 29		131 ± 7	115 ± 3		
CUN	CUSANCIN (noire)		136 ± 21	129 ± 9			
PLF	PLAISIR-FONTAINE	144 ± 23	143 ± 22	128 ± 7	102 ± 3		
LAD	LADOYE		217 ± 32	127 ± 9			
DES	DESSOUBRE	147 ± 11	173 ± 13	127 ± 9			
BRA	BIEF DE BRAND	135 ± 22	158 ± 23	126 ± 7			
CUB	CUSANCIN (bleue)	182 ± 13	211 ± 15	123 ± 7		107 ± 2	80 ± 1
CUI	CUISANCE	196 ± 30	188 ± 28	122 ± 8			
MAI	MAINE	152 ± 11	138 ± 22	108 ± 8	91 ± 2		
ARE	AREUSE	130 ± 10	155 ± 12	107 ± 8		59 ± 1	56 ± 1
GYP	GYPS	161 ± 12	160 ± 12	107 ± 7			
DAR	DARD	143 ± 11	161 ± 12	106 ± 7			
SER	SERRIERE	154 ± 11	143 ± 11	106 ± 7			
LOU	LOUE	145 ± 11	170 ± 13	105 ± 8	86 ± 2	71 ± 9	62 ± 1
MAB	MALBUISSON (bleue)	120 ± 19	123 ± 20	104 ± 7	79 ± 2	73 ± 9	65 ± 9
PON	PONNET	149 ± 24	138 ± 22	100 ± 6	92 ± 2	83 ± 9	94 ± 9
PLA	PLAINMONT			100 ± 7			
VAU	VAUX-CHATAGNA	97 ± 7	132 ± 10	100 ± 7			
SAR	SARRAZINE	143 ± 11	168 ± 13	97 ± 7			
VER	VERNEAU	173 ± 12	171 ± 13	93 ± 6	81 ± 2		
FLU	FLUMEN	98 ± 8	168 ± 13	92 ± 7			
ENR	ENRAGE	94 ± 15	108 ± 18	89 ± 6			
LIS	LISON	145 ± 11	170 ± 13	78 ± 5		75 ± 1	76 ± 1
POU	BIEF-POUTOT	152 ± 24	126 ± 20	78 ± 5	75 ± 2		
DOU	DOUBS	108 ± 8	155 ± 12	74 ± 6	61 ± 2	62 ± 9	53 ± 1
AIN	AIN		85 ± 14	74 ± 5			
ABB	ABBAYE	95 ± 16	125 ± 20	69 ± 5	61 ± 2	55 ± 9	51 ± 1
MON	MONTANT	102 ± 8	132 ± 10	66 ± 5			
CAP	CAPUCINS	70 ± 12	38 ± 14	62 ± 5	39 ± 2	55 ± 9	54 ± 9
VAL	VALLORBE (tunnel)			61 ± 4	74 ± 2		76 ± 9

Tableau 1 : teneurs en tritium des émergences karstiques jurassiennes (1977-1980)

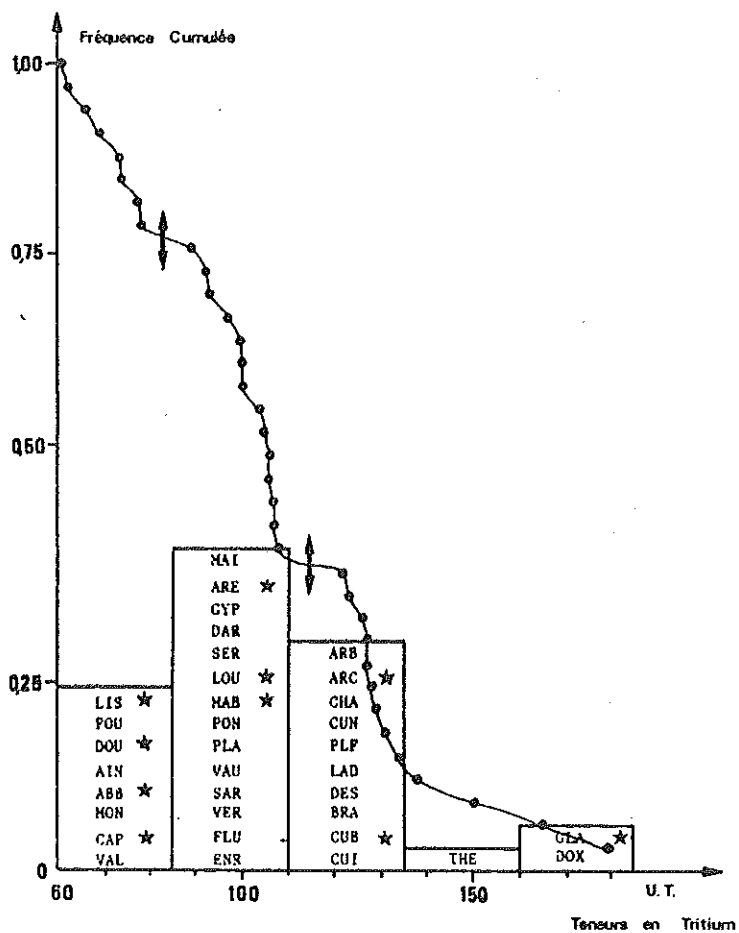


Figure 2 : distribution des teneurs en tritium - été 1978

particulièrement sur les hauts bassins du Doubs, de l'Ain et de l'Orbe. Le groupe intermédiaire moyen est composé de sources appartenant à la fois aux zones tabulaires du second plateau et aux zones plissées nord et sud.

C.- Comparaison des teneurs en ^3H avec celles de la pluie.

Le signal Pluie a été mesuré dès 1963 sur la rive sud du Léman à la station de THONON-LES-BAINS (fig. 1), distante de quelques 30km seulement de la Haute Chaîne du Jura. Les teneurs pondérées annuelles en Tritium des précipitations à cette station qui nous servira de référence sont données dans le tableau ci-après.

Année	U.T.	Année	U.T.	Année	U.T.	Année	U.T.	Année	U.T.	Année	U.T.
1963	2907	1966	247	1969	206	1972	144	1975	171	1978	86
1964	1496	1967	213	1970	189	1973	126	1976	117	1979	59
1965	595	1968	217	1971	228	1974	113	1977	74	1980	33

Tableau 3 : teneur pondérée annuelle en tritium des précipitations à THONON (1963-1980).

Si en 1978, les teneurs les plus faibles des sources de la Haute Chaîne sont très voisines de celles des pluies de l'année, on remarquera toutefois que la teneur moyenne de tous les prélèvements (106 U.T.) est supérieure à celle des pluies de l'année (86 U.T.) ou de l'année précédente (74 U.T.). Quant aux teneurs les plus fortes des sources, supérieures à 150 U.T., elles ne peuvent s'expliquer que par la participation à l'écoulement de l'étiage 1978, d'eaux précipitées en 1975 et plus vraisemblablement avant 1972 (voir tableau ci-dessus). La gamme des teneurs mesurées en 1978 sur les sources indique donc des âges très différents pour les réserves de la matrice capacitive des systèmes karstiques qui vont de l'année à une dizaine d'années. Cependant, une incertitude subsiste pour les sources les plus pauvres en tritium qui peuvent être de l'année ou résulter d'un mélange d'eaux antérieures aux essais nucléaires avec des eaux plus récentes. L'évolution, jusqu'en 1980 des teneurs en tritium des sources en étiage comparée avec celle du signal pluie d'entrée, va nous permettre de lever cette ambiguïté et de préciser le temps de renouvellement des différentes réserves.

IV.- EVOLUTION DES TENEURS D'ETIAGE EN TRITIUM DE 1977 à 1980.

A.- Evolution générale.

Les gammes des teneurs rencontrées aux émergences à chaque campagne d'étiage sont comparées, sur la figure 4, avec les teneurs pondérées annuelles des précipitations à Thonon. Une forte décroissance de toutes les concentrations en tritium des sources entre 1977 et 1980 accompagne la décroissance des teneurs des pluies. Les teneurs les plus basses sont toujours très voisines de celles des pluies. L'intervalle de variation très grand en 1977 va en diminuant très sensiblement, si bien que les concentrations les plus fortes se rapprochent des valeurs de la pluie en 1980.

Figure 3 : campagne d'étiage 1978 -
carte des teneurs en tritium.

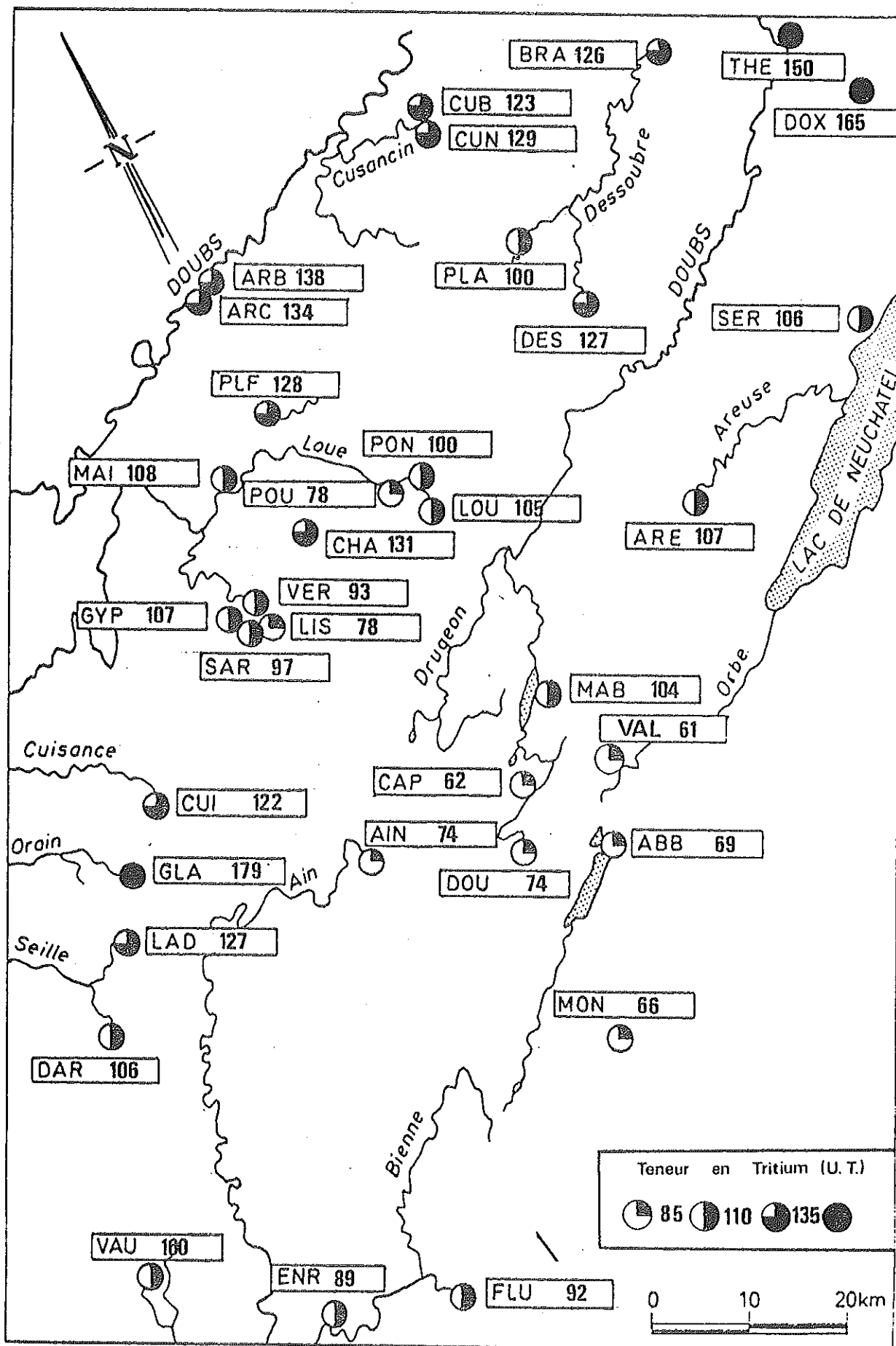
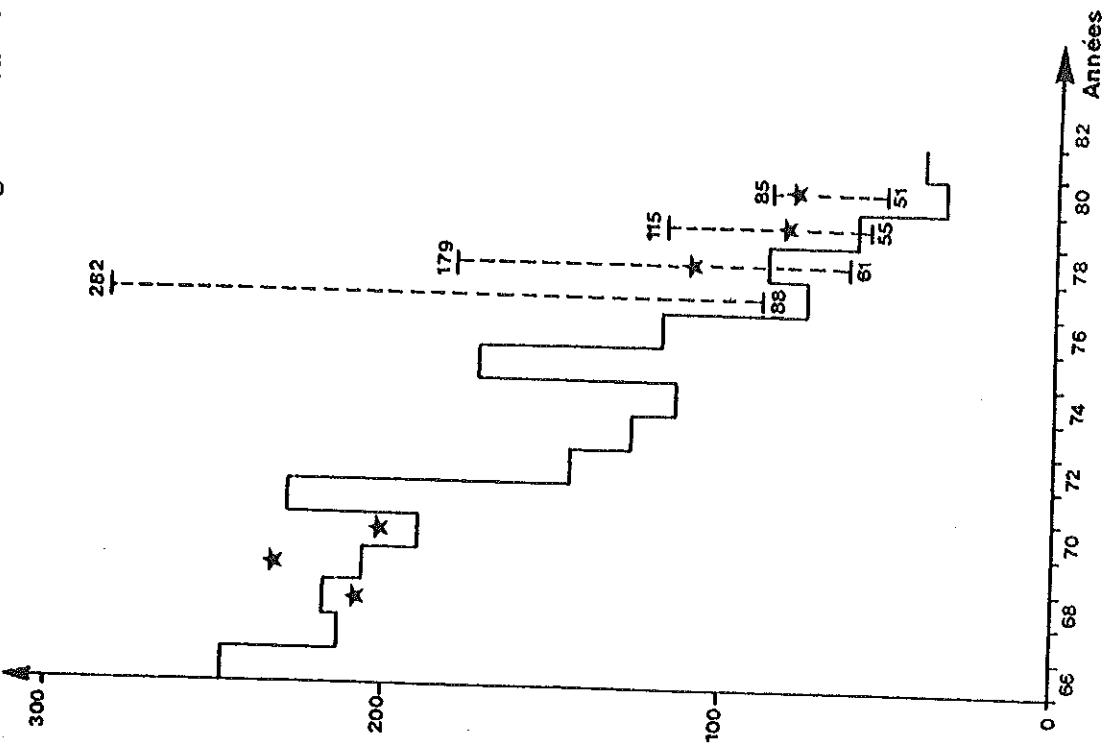


Fig. 4 : Teneur pondérée annuelle de la pluie à Thonon et valeurs extrêmes de Tritium mesurées aux émergences en 1977-1980.



— Teneur annuelle pondérée de la pluie à Thonon
 - - - Gamme des teneurs observées dans l'eau des émergences
 ★ Source de l'Areuse (Neuchâtel, Suisse)

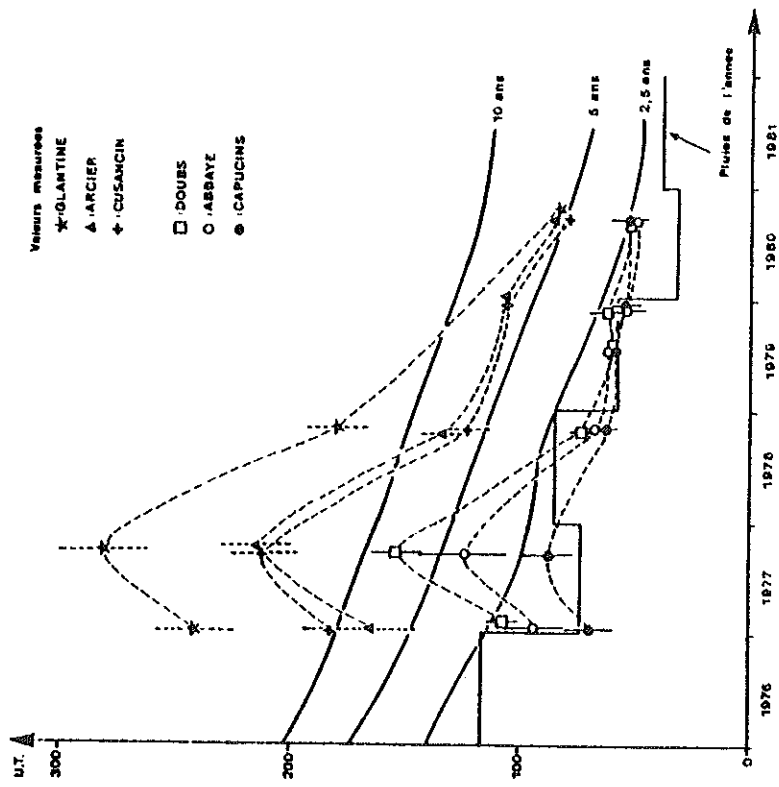


Fig. 5 : Modèle exponentiel : Teneurs en Tritium simulées aux exutoires des systèmes karstiques avec des temps de renouvellement de 1, 2.5 , 5 et 10 ans.

B.- Choix d'un modèle de fonctionnement.

Pour simuler le signal de sortie de la zone capacitive calcaire, en fonction du signal-pluie d'entrée, nous utiliserons le modèle exponentiel ou de bon mélange proposé par ERIKSSON (1962) et repris par HUBERT et al. (1970). Ce modèle mathématique simple suppose un réservoir homogène dans lequel se mélangent des recharges annuelles constantes en volume. La validité du modèle est vérifiée par la concordance des teneurs effectivement mesurées avec celles calculées des sorties.

$$S_n = \sum_{p=0}^{p=\infty} \alpha (1 - \alpha)^p \lambda^p \cdot E_{n-p}$$

avec : S_n = teneur en tritium de l'exutoire pour l'année n.

α = coefficient de recharge.

λ = 0,95 facteur de décroissance du tritium pour 1 an.

E = teneur en tritium de la recharge annuelle (moyenne pondérée).

p = ordre de chacune des recharges antérieures à l'année n.

Le choix d'un modèle de bon mélange dans un aquifère homogène appliqué à un réservoir karstique connu pour son hétérogénéité peut surprendre, mais se justifie ainsi : nous étudions en étiage le seul débit de la matrice calcaire capacitive drainée par le réseau karstique. Lors des périodes de hautes eaux, il est connu (BURGER 1979) que l'alimentation de cette matrice est essentiellement assurée par ce même réseau de drains. Ainsi, la bonne "irrigation" des blocs capacitifs permet, en première approximation, une recharge générale à l'échelle du réservoir, d'autant plus que le système est bien karstifié. La réponse à l'étiage de ce réservoir peut donc être statistiquement considérée comme celle d'un ensemble homogène, à condition que l'état hydrodynamique du système soit comparable.

C.- Application aux sources karstiques du Jura.

Les teneurs en Tritium des sorties des années 1977 à 1980 ont été calculées à partir du signal d'entrée pluie brute à Thonon, pour des temps de renouvellement allant de 1 à 500 ans (tableau 4).

τ ans	1	1,66	2,5	5	10	25	50	100	200	500
α ans ⁻¹	1	0,66	0,4	0,2	0,1	0,04	0,02	0,01	0,005	0,002
Sorties UT 1977	74	92	103	138	170	133	85	49	27	13
1978	86	86	93	122	154	125	81	47	26	12
1979	59	68	76	104	137	116	77	45	25	12
1980	33	45	57	86	121	107	72	42	24	11

Tableau 4 : Modèle exponentiel : Teneur en Tritium de la sortie (période 1977-1980) pour des temps de renouvellement de 1 à 500 ans.

Le temps de renouvellement (T) d'un réservoir supposé homogène et de volume (V) constant est par définition égal à $\frac{V}{Q}$ (Q étant la recharge moyenne annuelle). C'est l'inverse du coefficient de recharge α ($\frac{Q}{V}$). On remarquera que pour $\alpha = 1$, les teneurs des sorties sont celles des pluies de l'année.

L'examen du tableau 4 montre que pour simuler les fortes décroissances des teneurs mesurées de 1977 à 1980 aux émergences karstiques, il faut faire appel à un modèle présentant un temps de renouvellement inférieur ou égal à 10 ans.

La figure 5 compare l'évolution des concentrations de deux groupes de sources représentant les classes extrêmes définies lors de la campagne 1978, avec les valeurs de sortie du modèle fonctionnant avec des coefficients de recharge α allant de 1 à 0,1. On constate tout d'abord que le classement de 1978 reste valable pour toute la période 1977 à 1980. L'opposition entre les aquifères karstiques présentant des faibles concentrations avec des temps de renouvellement de 1 à 2 ans ($\alpha = 1$ à 0,4), tels que les Capucins, l'Abbaye et le Doubs, et les aquifères présentant les fortes concentrations avec des temps de renouvellement de 5 à 10 ans ($\alpha = 0,2$ à 0,1) tels que le Cusancin, Arcier ou la Glantine, persiste lors de toutes les campagnes. Cette distinction confirme les hypothèses formulées sur l'hydrodynamique des systèmes jurassiens à partir des données structurales. Ainsi les émergences de la Haute-Chaîne, dont les aquifères présentent de fortes dénivelées structurales, donc un fort gradient hydraulique, ont des réserves qui se renouvellent en 1 ou 2 ans, alors que les émergences des aquifères des plateaux, dont le substratum est à pente douce et le gradient hydraulique plus faible, ont des réserves qui se renouvellent en 5-10 ans.

Les valeurs que nous possédions pour la source de l'Areuse en 1968-70 (BURGER et al., 1971) s'accordent bien avec celles de la période récente pour donner un temps de renouvellement compris entre 1 et 2 ans et demi.

D.- Critique du modèle.

Le modèle choisi, s'il s'applique assez bien aux années 1978-79-80 ne permet pas de simuler correctement les valeurs d'étiage 1977, surtout celles de Septembre. Plusieurs raisons peuvent être invoquées :

- le modèle suppose un état d'équilibre avec une recharge annuelle et un réservoir de volume constant. Ce fait, très discutable pour des régions à pluviométrie discontinue (climat méditerranéen ou semi-aride) semble présenter moins d'inconvénients dans le Jura où les précipitations sont régulières. Cependant, il faut noter que les basses eaux de 1977 interviennent après la sécheresse de 1976. La recharge ayant été déficitaire, on peut penser que l'écoulement de la matrice capacitive a mobilisé des eaux plus anciennes, moins accessibles en année normale. Le réservoir serait donc hétérogène.

- le modèle utilise comme concentration de la pluie, les valeurs pondérées annuelles, or on sait que le signal-pluie mensuel présente une variation saisonnière avec un pic de printemps et des basses valeurs d'automne-hiver. L'avapotranspiration prélevant davantage sur les pluies à forte concentration, le signal-infiltration résultant a une teneur légèrement appauvrie par rapport à la pluie pondérée annuelle. La comparaison des valeurs d'écoulement du lysimètre de Thonon avec celles de la pluie le démontrent (BLAVOUX, 1978). Cette prise en compte des valeurs vraies de l'infiltration ne changerait pas fondamentalement les teneurs simulées si ce n'est en augmentant légèrement les temps de renouvellement.

V. - CONCLUSIONS.

L'approche du temps de renouvellement des réserves karstiques par un modèle certes discutable nous paraît cependant très importante. Elle est la seule actuellement capable d'évaluer l'impact temporel des pollutions chroniques ou accidentelles sur la qualité des réserves. En effet, contrairement aux études par traçage artificiel, qui fournissent une information qualitative ne concernant que les zones transmissives des aquifères, le "suivi" des teneurs en tritium intègre toutes les recharges, tous les mélanges et toutes les restitutions, tant en zone noyée que dans l'aquifère épikarstique. La simulation du fonctionnement par le modèle permettra donc la prévision de "l'état de santé" des réserves en fonction de la pollution une fois le coefficient α déterminé.

Il faut cependant noter que le temps de renouvellement est une notion statistique qui correspond à un temps moyen de séjour de l'eau dans l'aquifère. Il conviendrait d'étudier en tarissement l'évolution des teneurs en tritium à un pas de temps adapté au système pour vérifier la représentativité d'un seul échantillon d'étiage par rapport à l'ensemble du phénomène.

Enfin il nous paraît hatif de considérer un temps de renouvellement élevé comme l'indice de réserves importantes.

. BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE .

- BLAVOUX B. (1978) - Etude du cycle de l'eau au moyen de l'Oxygène 18 et du Tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. Thèse Sciences Naturelles Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 332 pages.
- BLAVOUX B. (1980) - L'eau dans le karst : les différentes composantes de l'écoulement et leur participation au débit à l'exutoire en crue et en étiage. Actes 1er Colloque Nat. sur la Prot. des Eaux Souterraines Karst. Besançon, Avril 1980, p. 59-81, 9 fig.
- BLAVOUX B., BURGER A., CHAUVÉ P. et MUDRY J. (1979) - Utilisation des isotopes du milieu à la prospection hydrogéologique de la chaîne karstique du Jura. Rev. Géol. dyn. et Géogr. Phys., Vol. 21, fasc. 4, p. 295-306.
- BURGER A. (1979) - Recherche de critères pour la protection des eaux souterraines karstiques contre la pollution. Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel, n°3, p. 115-154, 9 fig., 3 tabl.
- BURGER A., MARCE A., MATHEY B. et OLIVE Ph. (1971) - Tritium et Oxygène 18 dans les bassins de l'Areuse et de la Serrière (Jura neuchâtelois, Suisse). 1er Colloque Hydrol. en pays calc. Besançon, 1971, p. 79-87, 4 fig.
- ERIKSSON E. (1962) - Radioactivity in hydrology in : H.I. Israël et A. Krebs (Editors) Nuclear Radiations in Geophysics 42. Springer Verlag, Berlin - Heidelberg, p. 47-60.
- HUBERT P., MARCE A., OLIVE Ph. et SIWERTZ E. (1970) - Etude par le Tritium de la dynamique des eaux souterraines. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 270, série D, p. 908-911, 1 fig.