Les traceurs en hydrogéologie karstique.

Leur apport à la connaissance des réservoirs aquifères calcaires

PAR

A. Mangin
CNRS, Moulis

J. Molinari
CENG-SARR, Grenoble

H. Paloc
BRGM, Paris

L'utilisation de traceurs en hydrogéologie est une technique depuis fort longtemps répandue : pour détecter une communication directe entre deux points, évaluer les vitesses de circulation. . . Elle a trouvé dans le domaine du karst un champ d'action important surtout lié au développement de la spéléologie. Les conceptions de circulation des eaux dans le calcaire telles qu'elles furent définies par E.A. Martel (1921) donnaient une place de choix à la recherche des grands réseaux d'écoulement, recherche dans un but d'identification spéléologique de ces réseaux, ou dans l'optique d'un captage nécessitant la détection de sources de contamination possible. Citons parmi les nombreux exemples de mise en évidence de "percée hydraulique" la célèbre et spectaculaire démonstration de l'appartenance des Monts Maudits au haut bassin de la Garonne par N. Casteret en 1931.

Le résultat et l'analyse de nombreuses expériences (H. Paloc, 1975), les progrès récents réalisés en matière de mise en oeuvre des traceurs et dans la détermination des informations qu'ils fournissent (J. Molinari, 1973), la meilleure connaissance que l'on peut avoir des aquifères karstiques et du fonctionnement hydrodynamique dont ils sont le siège (A. Mangin, 1975), permettent de préciser l'intérêt, l'efficacité, les limites et les perspectives de l'outil "traçage" dans les karsts.

1. Bilan des expériences réalisées

En France, ce sont les résultats de traçages effectués par des spéléologues qui sont les plus nombreux. Le traceur employé est essentiellement un colorant fluorescent : l'uranine ou "fluorescéine soluble pour recherches hydrologiques". Ce traceur présente en effet l'énorme avantage d'être décelable à l'oeil nu pour des concentrations faibles (supérieures à 0,1

mg/l) et dans le cas qui nous intéresse, celui des eaux souterraines, la photodégradation n'intervient pas. En outre l'utilisation de "fluocapteur" (A. Lallemand et H. Paloc, 1967) facilite la surveillance et, pour l'obtention de données qualitatives, est d'un intérêt certain. B. Gèze (1957) a donné une première synthèse des résultats obtenus lors de 40 colorations. On trouvera dans le tableau 1, un nouveau bilan effectué pour la seule région des causses nord-montpellierains grâce aux archives du B.R.G.M. L'ensemble de ces résultats fournit un certain nombre de renseignements. Il a pu être mis en évidence des liaisons pertes-résurgences et ceci est important surtout dans des cas où la structure géologique ne semblait pas favorable à une relation hydraulique. Il est apparu également que les eaux avaient tendance soit à converger vers un exutoire ou un groupe d'exutoires, soit à diverger à partir du lieu d'injection vers plusieurs exutoires différents suivant l'état hydrologique du karst (phénomène de "difffluence" observé notamment dans le Jura). Enfin on constate que les vitesses apparentes de circulation, bien qu'assez variables sont toujours rapides (la plupart du temps supérieures à 1 m/h et pouvant aller jusqu'au km/h).

Menés de façon systématique les traçages ont permis dans certains cas de définir les bassins versants d'une source karstique. Citons l'exemple de Fontaine de Vaucluse (fig. 1) (H. Paloc 1969).

Le traçage a également été employé dans des actions plus ponctuelles tel le contrôle d'étanchéité d'ouvrages divers ou l'évaluation des risques de fuite d'une retenue (R. Thérond, 1973) (fig. 2 et 3).

On doit à l'école de Graz (J. G. Zötl, 1953, 1957, 1974), les premières études systématiques de l'utilisation des traceurs dans le karst : puis au laboratoire de Munich (H. Moser et al, dès 1966) ainsi qu'à celui de Grenoble (J. Molinari, 1969) de nombreux perfectionnements aboutissant notamment à l'emploi de multitraçages.

Tableau 1

DONNEES TECHNIQUES RECUEILLIES A L'OCCASION DE 65 EXPERIENCES DE COLORATION

1. DANS LA REGION DES GRANDS CAUSSES s.s.

INJECTION			REAPPARITION		RESULTATS (*)						
N° CARTE	POINT D'INJECTION	DATE	POINT DE REAPPARITION	N° CARTE	L	D	P	Q		T	V
								I	R		
9310 64	Perte du BONNEUR	18/ 9/97	Résurgence de BRAMABIAU	9310 64	700	90	13	3000	3000	0h 40'	1050
936 8	Perte n°2 du TREVEZEL	10/10/38	Source de la LAOUTCHOUNIERE	936 8	5250	35	0,6			2h 28'	187
884 25	Perte du RIEU-TORS	10/ 6/43	Source du RIEU-PRECH	884 25	500	28	5,6			4	125
936 40	Perte n°1 de la VIS	23/ 7/47	Foux de la VIS	962 32	7500	200	2,7	50	1200	6h 04'	10,7
887 7	Perte du BRAMONT	10/48	Exsurgence des COMBES	887 7	1050	95	8,9			2	525
936 71	Event de ROGNES	26/ 9/54	Source de ROGNES	936 71	500	82	16,4	0,5	0,5	170	2,9
963 30	Rivière du ROUSQUET	27/ 2/55	Event de CARTEYRALS	963 31	1000	145	14,5	3	5	48	20,8
933 31	Perte n°3 de la VIRELQUE	11/11/55	Foux de la VIS	962 32	12500	353	2,8	30	3000	132	94,7
962 5	Aven de la BAYSSIERE	18/ 4/57	Source de la SORGUES	961 10	4200	47	1,1			62h30'	57,2
962 89	Aven des PLANS	27/ 7/58	Source de SOURLAN	962 71	1000	355	35,5	0,5		103	0,1
962 62	Aven de ROGUES	13/ 9/59	Event de la MAGNANERIE	962 54	5500	150	2,8	1	1000	100	55
			Event de la THILLEDE	962 60	4700	155	3,3	1	2000		
936 71	Event de ROGNES	27/ 6/61	LAS PCNS	936 56	2700	64	2,4	2	50	120	22,5
962 4	Aven JACK	2/ 9/62	Aven du MAS RAYNAL	961 24	3200	71	2,2	50			
			Source de la SORGUES	961 10	5500	127	2,3	50	1000	80	08
962 109	Aven de la VACQUERIE	6/ 1/63	Source de la CLAMOUSE	969 15	11600	600	5,2	0,03	2000	96	120
934 12	Perte de FORTBOVILLER	28/ 2/63	Résurgence du BOIS DE GOZON	934 14	1300	80	6,1	2	20	200	6,5
962 62	Aven de ROGUES	24/ 3/63	Event de la MAGNANERIE	962 54	5100	145	2,8	50	200	456	11
			Event de la THILLEDE	962 60	4300	150	3,5	50	800	456	9,4
936 25	Grotte des CANALETTES	19/ 8/63	Source du DURZON	936 18	1750	137	7,2	2	1000	98	18
962 11	Perte des MENDES	1/ 4/64	Source de CURNUS	961 12	5250	90	1,7	4	300	564	10,4
			Source de CLERON	935 45	11600	147	1,2	4	1000	72	23
936 26	Aven de la PORTALEMIE	4/ 4/64	Source du DURZON	936 18	3200	197	6,1	7	2000	100	35
934 3	Perte de PINSAC	17/ 4/64	Source de la DRAGONIERE	934 15	750	55	7,3	4	10	21h30'	44
932 90	Perte du PONT NOIR	11/11/64	Exsurgence de l'AVOCAT	962 99	2450	280	11,5	1	100	35	70
936 84	Perte n°1 de la DOUBIE	15/ 4/65	Exsurgence de la BARBARESCQUE	910 85	1700	20	1,2	200		160	10,6
910 31	Grotte des SOURBETTES	7/ 4/66	Exsurgence des DOUZES	910 24	4500	40	0,8	20	200	16	281
962 106	Aven n°1 de la VERNEDE	30/10/66	Exsurgence de GOUNNAS	962 99	3700	200	5,4	0,25	150	360	10,3
910 59	Perte de la GARENNE	31/ 3/67	Exsurgence du MOULIN DE CORP	910 55	12300	500	4	10	800	405	30
962 94	Aven n°2 du MAS DE ROUQUET	12/ 1/69	Event de SOURS	962 166	2500	365	14,6	0,25	30	333	7,5
963 22	Grotte de l'OURS	1/ 5/69	Foux de St JEAN	963 23	700	335	48	0,1	300	80	8,7

2. DANS LA REGION DES GARRIGUES

937 103	Aven de la TOUR DE MOLLE	27/ 9/97	Fontaine de SAUVE	937 103	85	2	2,4		1000	1h20'	65,6
937 85	Aven de BANELLE	5/ 8/42	Fontaine de SAUVE	937 103	7500	57	0,8	25	150	480	15,6
989 15	Grotte de la CLAMOUSE	4/ 9/49	Sources de la CLAMOUSE	989 15	700	14	2	50	50	17	41,1
989 14	Trou du DRAC	26/10/49	Sources de la CLAMOUSE	989 15	2850	61	2,1			120	23,7
962 130	Grotte du CERSENT	24/ 6/50	Sources du CABRIER	962 134	3000	37	3,2			72	31,2
			Source du ROUIER	962 134	3100	107	3,5			96	4,2
989 18	Perte du VERDUS	1952	Résurgence du V. ROUS	989 19	400	10	2,5	10	10	96	4,2
937 32	Pertes du RIEUTORD	25/ 5/52	Aven de l'OLIVIER	937 44	2500	49	1,9	500	1000	5	500
937 44	Aven de l'OLIVIER	25/ 5/52	Les SOURBETTES	963 37	3500	5	0,1	1000	1000	120	29,1
			Source des CHATAIGNIERS	963 61	4300	9	0,2	1000		312	13,7
			Foux du TRIADOU (?)	963 201	5500	21	0,4	1000		2520	2,2
			Source de la VERNEDE (?)	963 66	10500	28	0,3	1000		12888	0,8
937 44	Aven de l'OLIVIER	29/ 8/54	Les SOURBETTES	963 37	3500	5	0,1	50	100	528	6,6
963 25	Perte n°1 de la BUEGES	20/ 4/55	Source des CENT PONS	963 113	9200	30	0,4	200	500	245	33,4
963 109	Perte du BRESTALOU	19/ 2/57	Bouillou de VIALA	963 110	800	11	1,4	50		17	47
			Source du LEZ	990 17	16500	59	0,3	50	3000	312	52,9
963 116	Perte n°3 de l'HERAULT	16/ 3/58	Source des RAMASSIERS	962 156	1500	3	0,2	10		44	34
963 109	Perte du BRESTALOU	7/ 3/59	Bouillou de VIALA	963 110	800	11	1,4	50	50	24	33,3
963 93	Perte de l'ARTIGUES	10/ 2/61	Source du LEZ	990 17	21000	112	0,5	0,08	2000	2952	7,1
963 198	Perte du YORGUES	18/ 4/62	Source du LEZ	990 17	3700	46	1,2	5	400	1592	2,7
937 74	Perte du CROS	28/ 5/62	Source de BAUMEL	937 76	1600	40	2,2	50	200	24	75
963 101	Perte de RISMASSEL	14/10/62	Fontaine de SAUVE	937 103	6500	60	0,9	50	2000	15	433
980 47	Perte n°2 du COULAZOU	28/10/62	Source de la VENE		7600	60	0,8			100	76
990 11	Perte de SAUTRAS	15/ 1/63	Source de MONTLOIRE	990 12	4000	30	0,8	20	150	240	16,4
963 86	Aven de la LIQUISSE	10/11/63	Source du LAMALOU	963 185	3400	26	0,8	25	2000	96	35,4
			Source du CPES	963 181	3200	26	0,8	25	100		
			Aven du ROUET	963 186	3200	26	0,8	25	0		
963 194	Perte n°1 du LAMALOU	15/11/63	Source des FORTVILLERS	963 120	15400	85	0,6		1000	672	22,9
			Source du LEZ (?)	990 17	11500	116	1		5000		
989 15	Grotte de la CLAMOUSE	27/ 1/64	Source de la CLAMOUSE	989 15	225	43	5,8	0,03	1000	7h30'	30
963 83	Perte de la TOURQUILLE	2/ 2/64	Source du LEZ	990 17	17000	156	0,9			336	50,6
989 12	Perte de l'AIGUES-VIVES	12/ 6/64	Source de la CLAMOUSE	989 15	2850	47	1,7	3	1000	56	51
990 14	Bouillou des MAIELLES	11/10/64	Event du LIROU	990 15	1000	10	1	500	500	2	500
963 143	Perte de SAINT-MARTIN	8/11/64	Source des CHATAIGNIERS	963 169	4000	75	1,9	5	100	140	28,5
			Source des FORTVILLERS	963 120	16000	85	0,8	5	1000	165	63
962 156	Aven n°4 du MAS D'AGNE	11/11/65	Source du CABRIER	962 134	4600	370	8	5	50	432	10,5
963 117	Perte de COLOM	17/ 4/66	Exsurgence de MARROU	963 135	2100	145	7	2		480	4,4
963 149	Grotte de la FAUSSE MONNAIE	15/ 4/68	Source du LEZ	990 17	8900	220	2,5	3	1000	649	13,7
990 45	Event de COURMONTERRAL	8/12/68	Source de la VENE		4500	10	0,2	8		1296	3,5
			Source d'ISSANKA		10500	36	3,4	8	500	552	19
963 156	Grotte-aven de CAMLOUS	23/ 3/69	Source des FONTAILLES	963 120	8900	77	8,6	0,5	1000	550	16

3. DANS LES REGIONS DE "SOCLE"

937 11	Trou de BARDET	1955	Source d'ISIS	937 11	80	0	0			2	40
936 73	Perte de la BREAUZE	20/ 7/61	Source d'ISIS	937 11	2000	78	3,9	3	120	42	47,6
937 13	Perte de la GLEPPE	22/ 7/61	Source du VERDIER	937 14	900	20	2,2	2	80		
936 74	Perte du COUDOULOUS	3/ 8/61	Source d'ISIS	937 11	1200	68	5,7	1	120		
937 13	Perte de la GLEPPE	1/ 9/61	Captage d'AVEZE	937 14	100	2	2	5	40	2	50
936 72	Perte de la PUJADE	20/ 9/61	Source d'AVEZE	937 11	3000	128	4,3	0,25	120	192	15,6
936 52	Perte sup. de la VIS	11/10/68	Source d'AVILLERES	936 53	1500	180	12	12	10	407	3,6

(*) L : distance en m. D : dénivellée en m. P : pente en %. Q : débit en l/s (I : injection R : réapparition)
T : temps de passage en h. V : vitesse en m/h.

1/ Carte schématique de la région de Fontaine de Vaucluse.

2/ Traçages effectués pour la recherche des fuites au niveau de la retenue du barrage de Charmines-Moux (Ain).
(d'après R. Théron, 1973) 3/ Traçages effectués dans le cadre des études d'étanchéité au niveau du barrage de Camarasa (Espagne).
(d'après R. Théron, 1973).

2. Perfectionnements apportés à la méthode de traçage

L'opération de traçage est un problème de transfert de masse et en tant que tel est un problème très général ; un certain nombre de modèles phénoménologiques a été proposé ; ils font appel à la dynamique des systèmes.

Prenons un ensemble d'un milieu au niveau duquel les eaux circulent et supposons qu'un traceur suive les molécules d'eau, un signal transitoire de concentration à l'entrée de ce système, se traduira par une réponse, c'est-à-dire par une forme de signal de concentration après la traversée de cet ensemble.

La "réponse impulsionnelle", réponse à une impulsion unitaire, caractérise le système considéré pour des conditions hydrodynamiques précises. Notamment le modèle interprétatif suppose une permanence des régimes. Dès lors par le jeu de l'analyse entrée-sortie, on détermine la "réponse impulsionnelle" et par son intermédiaire une analyse du système étudié peut être effectuée.

Pour ce faire, il devient nécessaire d'obtenir une information complète sur la restitution du traceur. La courbe de concentration en fonction du temps au point de sortie est appelée "distribution des temps de séjour" (en abrégé DTS, J. Molinari, 1973) et cette courbe est exploitée à la lumière des modèles mathématiques d'écoulement.

L'obtention des DTS permet entre autres d'établir un bilan de la sortie du traceur, point important si l'on doit effectuer plusieurs traçages et qui en outre met en évidence des phénomènes de "sorption". L'analyse des DTS, dans la mesure où l'on veut définir une réponse impulsionnelle du système indique qu'il faut apporter un soin tout particulier dans l'opération d'injection. En effet, la DTS ne correspond à la réponse impulsionnelle que si l'injection est une impulsion de Dirac. Dans l'exemple d'une injection étalée ou continue, certaines modalités très strictes doivent être respectées pour que l'analyse de la fonction sortie soit rendue possible.

C'est en effet surtout cette analyse qui nous intéresse, puisque par son intermédiaire nous allons essayer de comprendre le fonctionnement du système hydrodynamique. Mais à ce niveau, un certain nombre de problèmes se posent : les modèles dispersifs, de mélange ou autres que l'on a l'habitude d'employer sont-ils acceptables dans le cadre de l'utilisation que nous en faisons ? Le système étudié est-il invariant ou non ? linéaire ou non linéaire ? simple ou complexe ? En outre insistons sur le fait que la permanence des régime d'écoulement est une hypothèse audacieuse dans l'exemple des karsts.

Les recherches récentes effectuées sur le karst permettent de répondre à l'ensemble de ces questions.

3. Données récentes relatives au fonctionnement hydrodynamique des aquifères karstiques

Par aquifère karstique est défini un aquifère de roche généralement carbonatée qui est affecté par la karstification. Dans cette roche, fissurée à l'origine, on voit les fentes et les fissures progressivement élargies sous des actions physico-chimiques spécifiques, créant ainsi de grands vides, voire de larges conduits. Toutefois, du fait de l'existence d'une interaction entre

circulation des eaux et karstification, il s'avère que tous les vides ne sont pas uniformément élargis ; seuls certains d'entre eux le sont, avec une hiérarchisation de ces vides allant de pair avec l'organisation d'un drainage (A. Mangin, 1975). Il en résulte la constitution d'un mode hydrodynamique spécial qui confère à l'aquifère karstique une originalité incontestable.

Nous retiendrons de ces particularités, l'existence de tout un réseau de drainage à l'intérieur de l'aquifère, réseau au niveau duquel les circulations s'apparentent à celles de rivières de surface, ou de torrents parfois. Ces drains ne sont malheureusement que très rarement détectables depuis la surface ; leur nombre, leur place, leur fonctionnement sont le plus souvent inconnus. En dehors de ces drains, au niveau de la zone saturée (karst noyé) existent des ensembles, comportant généralement des réserves, limités en dimension, isolés les uns des autres, mais tous en relation avec les drains. C'est à ces ensembles qu'a été donné le nom de systèmes annexes (A. Mangin, 1975). Les apports au karst noyé paraissent se faire suivant deux modalités bien distinctes, l'une rapide, véritable ruissellement, l'autre retardée, sorte de percolation très lente.

Le fonctionnement hydrodynamique d'un tel aquifère est sous l'étroite dépendance de ces particularités. Au niveau des drains les vitesses de circulation sont très rapides (vitesse apparente supérieure à 100 m/h en général et sauf en étiage). En revanche au niveau des systèmes annexes ces vitesses sont plus lentes et d'autant moindres que l'on s'éloigne des drains principaux. Mais ce qui importe surtout c'est le fonctionnement de ces systèmes annexes ; en effet, ils sont tantôt alimentés par les drains lorsque ces derniers sont en charge, tantôt au contraire ils alimentent les drains. Il en résulte des piégeages momentanés de l'eau à leurs niveaux. En outre, ce sont eux qui assurent les réserves ; leurs connexions avec les drains créent les pertes de charges qui influent sur le mode général de l'écoulement. Ce fonctionnement des systèmes annexes est en partie responsable d'une hétérogénéité dans le temps du comportement du système karstique : par suite le système n'est ni simple, ni linéaire. On constate également qu'ils introduisent une forte hétérogénéité spatiale.

On peut donc en conclure que l'analyse des DTS va échapper à tous les modèles simples prévus jusqu'à ce jour pour l'analyse des traçages.

4. Perspective de l'outil traçage dans le karst

Nous avons vu que sans l'analyse des DTS le traçage apportait déjà un certain nombre de renseignements : liaison pertes-résurgences et par suite une investigation possible de la délimitation d'un bassin versant dans le cas d'un karst. Toutefois, dans ces conditions, les données fournies sur le fonctionnement du système karstique sont peu nombreuses. Adjoindre l'étude des DTS à l'opération confère à l'outil traceur une puissance considérable. Le calcul du temps de transit dans le système, n'a de sens que si l'on connaît l'étalement dans le temps de la restitution du traceur, étalement parfois considérable. Le "temps de transit" sera calculé entre le moment de l'injection et le centre de gravité de la DTS ; c'est à partir de ce temps que sera obtenue la "vitesse moyenne apparente de transit" (On retrouve là le problème bien connu des réponses d'un système quelconque à une pluie par exemple).

La DTS est caractérisée par ses moments (moyenne au moment d'ordre un, variance ou moment centré d'ordre deux. ...). Toutefois le calcul des moments à partir des données expérimentales est difficile en raison du "poids statistique" des

queues de courbes (J. Villermaux, 1975). Cela impose de posséder l'ensemble de la courbe et d'obtenir une bonne précision dans la mesure des faibles concentrations.

L'impossibilité d'avoir recours à des modèles conceptuels simples pour déterminer la réalité physique des paramètres de la courbe engendrée par la DTS, conduit à l'heure actuelle à proposer une recherche relative aux relations existantes entre la DTS, le système intéressé par le traçage et l'état de ce système au moment du traçage. Cette recherche suppose que l'on connaisse par ailleurs la constitution et le comportement du système karstique pris comme terrain d'expérimentation pour diverses conditions hydrologiques. Il existe à ce niveau tout un champ d'investigations prometteur qui donnera sans doute au traçage une place de choix dans les moyens dont peut dis-

poser l'hydrogéologue praticien. Notamment, il paraît nécessaire de constituer un catalogue des DTS en fonction des états hydrodynamiques des karsts.

Faute de ces informations, les renseignements apportés par les DTS sont encore d'interprétation assez spéculative puisqu'ils sont fondés seulement sur les connaissances actuelles du fonctionnement d'un système karstique (A. Mangin, 1975, fig. 4 et 5). Si, sous l'impulsion des précipitations, l'état du karst se modifie continuellement, ce qui se traduit par une suite de crues, l'opération de traçage se greffe sur cette évolution des modes de circulation ; une coloration effectuée avant, pendant ou après une crue ne présente pas du tout la même réponse à l'exutoire du système. Dans l'interprétation de la DTS, il faut alors faire attention de ne pas rattacher l'évolution

4/ Schématisation d'un système karstique.

5/ Schématisation du fonctionnement d'un aquifère karstique.

des concentrations à celles des débits, la première correspondant à un transfert de matière (matérialisé par le colorant), la seconde à un transfert d'énergie, indépendant de la première.

En revanche, il importe de replacer l'ensemble du traçage par rapport à l'évènement : crue, montée de crue, décrue, étiage. La vitesse de circulation des eaux, les conditions de mélange sont sous l'étroite dépendance de ces différents états. En crue, par exemple, les vitesses sont plus rapides et il pourrait en résulter un étalement moindre de la DTS, mais d'un autre côté les mélanges sont accentués. Du fonctionnement particulier des systèmes annexes, piégeant momentanément en crue des eaux circulant dans le drainage, il peut en résulter des sorties de traceur sous forme d'une courbe à plusieurs pointes comme cela a déjà été observé (S. Alessandrello et al, 1970). Jusqu'à présent, les traçages effectués avec certitude sur des systèmes annexes, montrent, outre des vitesses apparentes de transit lentes, un étalement assez prononcé de la DTS. L'ensemble de ces données est fondamental puisqu'à l'heure actuelle, l'un des gros problèmes posés par le karst est de savoir s'il existe dans son aquifère un drainage bien organisé et où est situé ce drainage. En outre, l'emploi de multitraçage ou de traçages répétés est une approche de la compréhension du fonctionnement d'un tel aquifère, compte tenu de son hétérogénéité spatio-temporelle au niveau de l'hydrodynamisme.

5. Conclusion

L'utilisation des traceurs dans les karsts possède une longue histoire et a déjà rendu à l'hydrogéologue d'énormes services. L'hydrogéologie a évolué, a rajeuni ses concepts mais n'a pas pour autant relégué cette méthode au rang des procédés dépassés. Au contraire, l'amélioration des techniques de traçage, la connaissance actuelle du karst lui donnent un regain d'intérêt. Son emploi intervient sur deux plans. Le premier a trait à l'obtention de données sur les mécanismes hydrodynamiques dont cet aquifère particulier est le siège. Le second se rapporte à l'interprétation des variations des paramètres physico-chimiques aux exutoires ; ces paramètres peuvent être considérés, dans une certaine mesure, comme des traceurs de l'eau. On comprend alors tout l'avenir de la méthode aussi bien d'un point de vue de recherche fondamentale que de celui d'une étude appliquée telle la définition d'un périmètre de protection d'un captage.

Travaux cités

- ALESSANDRELLO (S.), AMIOT (M.) et DELANCE (J.H.) — Restitution de colorant par vagues successives (Rivière souterraine de Bèze — Côte d'Or). *Spélunca Mémoires*, 7. Actes du IX^e Congrès national de Spéléologie, p. 49.59. 1970.
- GEZE (B.) — Caractères des circulations karstiques d'après les récentes colorations à la fluorescéine en France. *C.R. somm. Soc. Geol. France*, 15, p. 351-355. 1957.
- LALLEMAND (A.) et PALOC (H.) — L'intérêt de la "méthode au charbon actif" dans les traçages à la fluorescéine en hydrogéologie. Quelques exemples. *Mémoires Réunion A I H* 1967, 7, p. 220-226. 1967.
- MANGIN (A.) — Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse d'Etat, Dijon. *In Ann. Spéol.*, 1974, 29, 3, p. 233-332 ; 29, 4, p. 494-601, 1975, 30, 1, p. 21-124.
- MARTEL (E.A.) — *Nouveau traité des eaux souterraines*. Doin, Paris, 840 p. 1921.
- MOLINARI (J.) — Les traceurs salins et fluorescents en hydrologie CEA — CENG, DR/SAR — G/69, 15, 36 p. 1969.
- MOLINARI (J.) — Les techniques de traceur dans l'étude des problèmes de pollution. *Nuisances et environnement*. Ed. hors série STAP, 17 p. 1973.
- MOSER (H.) et SAGL (H.) 1973 — Die Direktmessung hydrologischer Farbtracer im Gelände. *Steir. Beitr. 2. Hydrogeologie* 18/19, Graz. 1967.
- PALOC (H.) et FLANDRIN (J.) — Etude d'une source de karst : la Fontaine de Vaucluse (France). *Cong. Int. Spéol.*, Stuttgart, 5, Hy 13/1 à 15. 1969.
- PALOC (H.) — Les traceurs en hydrogéologie karstique. Leur apport à la connaissance des réservoirs aquifères calcaires. *Session d'information sur l'emploi des traceurs en hydrologie, en sédimentologie et en génie civil*, Saclay 14-16 avril 1975, 27 p.
- THEROND (R.) — *Recherche sur l'étanchéité des lacs de barrage en pays karstique*. Eyrolles, Paris, 444 p. 1973.
- VILLERMAUX (J.) — Application des méthodes du génie chimique à la modélisation de l'écoulement avec transfert de matière en milieu poreux. *Colloque ATP d'Hydrogéologie, Dispersion de fluides miscibles en milieux poreux*, 30 p. 1975.
- ZÖTL (J.) — Die hydrogeologischen Verhältnisse im Raume des Buchkogelzuges bei Graz. *Beitr. Z. Hydrogeologie Steiermarks*, 6. 1953.
- ZÖTL (J.) — Neue Ergebnisse der Karsthydrologie. *Erdkunde*, 9, 2, Bonn. 1957.
- ZÖTL (J.) — *Karsthydrogeologie*. Springer Verlag, Wien, 291 p. 1974.

Discussion

Président : M. Jean MARGAT

M. Le Président remercie M. MANGIN et ouvre la discussion en remarquant que dans le karst les traceurs ont été surtout employés par "tout ou rien" ; il souhaite que les méthodes basées sur la "fonction de transfert" soient désormais utilisées car elles peuvent apporter un complément d'information utile.

En effet, répond M. MOLINARI, nous n'avons trouvé aucun essai visant à l'obtention des courbes de réponse d'un système karstique ou

concernant l'évolution des temps de séjour en régime transitoire. Nous nous proposons d'entreprendre l'étude de ces questions sur un "réseau représentatif".

En l'absence d'autre intervention, M. Le Président lève la séance en remerciant tous ceux qui par leur Communication ou par leur intervention en ont fait un dialogue fructueux.

Abstract

How use of tracers in hydrogeological surveys can help to locate karst groundwater

Although tracers have been in use in karst hydrology surveys for a very long time, their full "data potential" does not seem to have been exploited, for it is now realized that they are capable of yielding a hitherto unsuspected wealth of information. Potholers are practically the only people to have used tracers for exploration of karst formations, in the course of which they have gradually improved their methods and equipment by addition of such "refinements" as "fluorescein monitors", multiple tracing methods, etc. From their data, relationships have been established between aquifer water loss and spring flow, catchment area boundaries and "difffluence effects" have been determined, and points of leakage from storage ponds have been located.

Recent research findings on tracers and tracing methods have shown that it is possible to analyse actual tracer behaviour in the system between points of injection and re-emergence, in addition to tracer link problems

as hitherto, though subject to study of the residence time distribution (a basic requirement for this type of analysis).

From recent data on karst aquifers and their hydrodynamic properties, the residence time distribution emerges as an important factor for understanding the structure of karst formations. Water circulation patterns are known to differ considerably at high and low water conditions, and the existence of a drainage network interconnecting the storage sub-systems of a karst aquifer is also an established fact. And, it so happens that a major problem with this type of aquifer is to locate its drainage network and determine its role in the overall system. Thus, some kind of "catalogue" of residence time distributions for karst aquifers of known hydrodynamic characteristics would no doubt be useful both as a "working tool" and in reviving interest in the use of tracers for investigation of groundwater in karst formations.