

Comparaison des écoulements sur deux bassins versants élémentaires, bocager et « ouvert », à l'aide du traçage isotopique naturel par ^{18}O

B. BLAVOUX ⁽¹⁾, M. DRAY ⁽¹⁾, Ph. MEROT ⁽²⁾

I – INTRODUCTION

Depuis septembre 1973, une équipe de chercheurs du laboratoire de Pédologie de l'I.N.R.A. de Rennes étudie l'évolution des sols et les transformations en quantité et qualité des écoulements après la suppression des talus, haies et fossés. Dans le Morbihan, sur le bassin versant du Scorff, ont été sélectionnés et équipés à cet effet deux petits bassins versants de 30 hectares sur sous-sol granitique. Le Bassin de Penety est un bassin bocager; celui de Kermaminon, distant de trois kilomètres et demi, est un bassin aux talus arasés, dit « ouvert ».

La comparaison des fonctionnements hydrologiques de ces deux bassins apporte des renseignements très importants sur le rôle des talus aussi bien dans l'écoulement annuel qu'à l'échelle de l'averse (MÉROT, 1976*).

Nous avons greffé sur cette étude hydrologique et géochimique une étude isotopique pour tester notamment l'outil nouveau que constitue l'oxygène 18 dans le traçage naturel. Il s'agit en fait d'une première investigation ayant utilisé un échantillonnage existant imposé par les circonstances. Après les premières conclusions développées ci-après nous souhaiterions pouvoir entreprendre un échantillonnage spécifique pour vérifier nos interprétations.

Principe du traçage naturel en oxygène 18 des eaux

Nous rappelons brièvement les quelques éléments nécessaires à l'interprétation des résultats obtenus.

L'abondance naturelle des isotopes de l'oxygène dans les eaux est, en moyenne, la suivante :

^{16}O : 99,76 p. 100; ^{17}O : 0,04 p. 100;
 ^{18}O : 0,2 p. 100

La composition isotopique d'une eau est donnée en parts pour mille de différence par rapport à un standard de référence et exprimée en unité :

$$\delta = \left(\frac{R \text{ échantillon}}{R \text{ standard}} - 1 \right) 1000$$

avec $R = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$.

Le standard de référence est le S.M.O.W. (Standard Mean Oceanic Water) qui définit les compositions isotopiques moyennes de la masse océanique.

Les variations des teneurs en ^{18}O , (isotope stable) au cours du cycle hydrologique, sont la conséquence du fractionnement qui intervient lors du changement de phase (condensation, évaporation).

L'évaporation entraîne toujours la formation de masses de vapeur appauvries en isotopes lourds

(1) Laboratoire de Géologie Dynamique, Université Pierre-et-Marie-Curie, 4, place Jussieu, 75230 PARIS CEDEX 05.

(2) I.N.R.A., Laboratoire de Recherches de la Chaire de Science du Sol, E.N.S.A., 65, rue de Saint-Brieuc, 35042 RENNES CEDEX.

par rapport au liquide d'origine donc avec des δ plus négatifs. A l'inverse la phase condensée est toujours enrichie en isotope lourd au détriment de la phase vapeur. D'autre part la teneur en ^{18}O des précipitations issues d'une même masse de vapeur est fonction de la température de condensation, elle-même liée, tout du moins pour les valeurs moyennes, à la température au sol. Cette dépendance vis-à-vis de la température est à la base du traçage naturel des précipitations dont les teneurs vont varier en fonction de la latitude, de l'altitude ou de la saison.

C'est le traçage saisonnier des précipitations que nous utilisons pour notre étude. Nous allons comparer l'évolution et la transformation du signal pluie sur chaque bassin au cours d'un même cycle hydrologique.

II — PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

1 — Étude isotopique des précipitations

Sur chaque bassin, les pluies de la semaine ont été cumulées dans le seau de contrôle protégé de l'évaporation, d'un pluviographe de 2 000 cm². Les quantités de pluie hebdomadaires et leurs teneurs en oxygène 18 sont reportées au tableau 1 et sur la figure 2. Bien que les pluviographes soient très voisins on constate que les pluies de Penety sont légèrement plus riches en oxygène 18 que celles de Kermaminon. Le $\delta^{18}\text{O}$ pondéré des pluies pour l'année 1975 s'élève en effet à $-5,90$ p. 100 à Penety contre $-6,13$ p. 100 à Kermaminon. Cette différence est faible mais significative. A l'échelle de l'averse, il existe une très bonne corrélation entre les pluies des deux bassins (fig. 1). On

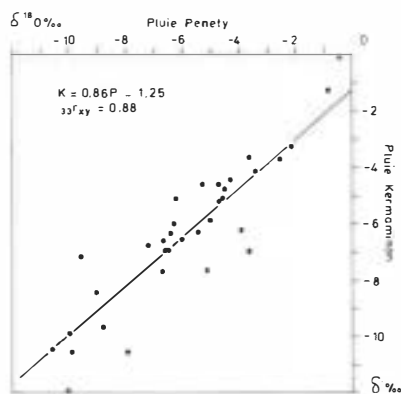


Fig. 1

Figure 1. RELATIONS ENTRE LES TENEURS EN OXYGÈNE ($\delta^{18}\text{O}$ p. 1000) DES PLUIES TOMBÉES SUR LES DEUX BASSINS DE PENETY (BOCAGER) ET KERMAMINON (ARASÉ).

observe classiquement des teneurs basses en hiver et à l'automne et des valeurs beaucoup plus élevées au printemps et en été. L'amplitude des varia-

tions atteint 10δ . Toutefois l'année 1975 est une année très sèche et si le signal pluie est bien marqué en qualité, il est peu important en quantité. Nous avons cependant essayé de sélectionner les pluies hebdomadaires suffisamment abondantes et marquées isotopiquement loin de la moyenne pour constituer une impulsion suffisante à la réserve souterraine. Deux périodes répondent à cette définition; celle du 1^{er} au 14 avril surtout, avec 40 mm de pluie et neige négatives ($\delta = -10,6$) et celle du 20 août au 15 septembre avec quelques 35 mm d'eau, toutefois moins marquée ($\delta = -7,2$).

2 — Étude isotopique des eaux souterraines

Sur ces bassins au sous-sol granitique, un aquifère se développe dans l'arène et les fissures du granite. Il est utilisé par quelques puits de ferme dans les parties hautes des bassins et s'écoule par des petites sources qui apparaissent aux ruptures de pente et assurent le débit de base des rus.

Un échantillonnage hebdomadaire a été programmé sur un puits choisi sur chaque bassin. Des difficultés d'accès à Kermaminon ont toutefois perturbé et écourté cette dernière série. La moyenne des teneurs en oxygène 18 de l'eau des puits s'élève respectivement à $-6,10\delta$ sur Penety et $-6,16\delta$ sur Kermaminon mais sur une série tronquée. Ces valeurs moyennes sont comparables à celles de la pluviométrie 1975, très légèrement plus négatives. La différence entre les teneurs moyennes des eaux souterraines des deux bassins est certainement héritée de la pluviométrie.

Les variations des teneurs sur le cycle hydrologique étudié sont faibles et assez peu significatives mais il faut rappeler que la période de référence est exceptionnelle par sa sécheresse.

La comparaison des histogrammes de fréquence des teneurs en ^{18}O des puits révèle un histogramme bien centré des teneurs autour de la valeur $-6,0\delta$ pour le bassin de Penety tandis que sur Kermaminon, on n'observe pas de tendance marquée (fig. 3) sur une série plus courte toutefois. On peut expliquer ce comportement par une meilleure régulation des eaux souterraines sur le bassin de Penety à cause de réserves plus grandes et surtout d'un temps de transit plus long favorisant les mélanges. Cette conclusion est confirmée par l'observation que les débits d'étiage sont plus soutenus sur le bassin de Penety. Dans le détail nous remarquons aussi une réponse de l'aquifère aux deux épisodes pluvieux significatifs que nous avons retenus. Une réaction à l'épisode du 1^{er} au 14 avril est enregistrée sous forme de baisse des teneurs dès le 28 avril et surtout le 5 mai dans le puits de Kermaminon, le 5 et 12 mai à Penety soit en moyenne

avec trois semaines à un mois de décalage. De la même façon l'impulsion négative du début septembre est perçue dans le puits de Penety dès le 30 du même mois mais la pluie très abondante (63,5 mm) de la semaine du 22 au 30 septembre quoique moins marquée ($\delta = -6,65$) en est peut-être aussi responsable. Cet exemple est donc moins remarquable car plus complexe.

3 — Étude isotopique des écoulements

a — Prélèvements hebdomadaires

Les deux rus ont été prélevés chaque semaine à l'exutoire des bassins. Les teneurs en ^{18}O des prélèvements ainsi que les débits instantanés sont reportés au tableau 1 et à la figure 2. Pour l'année 1975 les $\delta^{18}\text{O}$ sont peu variables. Pour Penety l'histogramme des fréquences des teneurs des eaux de surface montre une dispersion des valeurs un peu plus grande que pour les eaux souterraines mais autour du même mode ($-6,0 \delta \text{ p. } 1000$).

Tableau 1
CARACTÉRISTIQUES DES PLUIES, DES EAUX DES RUISSEAUX
ET DES NAPPES SOUTERRAINES DES DEUX BASSINS
DE PENETY (BOCAGER) ET KERMAMINON (ARASE) ANNÉE 1975.
Quantités hebdomadaires de pluie (P mm); teneur en ^{18}O ($\delta \text{ p. } 1000$); débit (Q l/s).

Période et date des prélèvements	Pluies				Ruisseaux				Nappes	
	Penety		Kermaminon		Penety		Kermaminon		Penety	Kermaminon
	P	δ	P	δ	Q	δ	Q	δ	δ	δ
	(mm)	(p. 1000)	(mm)	(p. 1000)	(l/s)	(p. 1000)	(l/s)	(p. 1000)	(p. 1000)	(p. 1000)
23-12 au 6-1	33,7	-4,6	37,7	-7,7	4,25		5,3		-5,8	
6-1 au 13-1	6,3	-2,55	1,9	-3,65	5,6		5,0		-6,0	-6,05
13-1 au 20-1	3,4	-7,9	0,1	-10,5	33,5	-7,95	30,0	-7,55	-6,05	-6,05
20-1 au 27-1	66,9	-6,2	65,4	-5,05	10,0	-6,0	19,5	-6,6	-6,0	-6,4
27-1 au 2-2	18,5	-3,4	24,7	-4,1	8,4		13,0		-5,9	-6,6
2-2 au 10-2	17,7	-8,8	8,3	-9,6	19,0		22,0	-6,7		-6,5
10-2 au 17-2	15,0	-5,1	19,0	-7,6	6,6	-6,0	8,4	-6,5	-5,9	-6,4
17-2 au 24-3	76,4	-4,7	83,2	-4,55	5,4	-5,85	6,4	-6,15	-5,65	
24-3 au 1-4	12,0	-6,6	13,1	-6,9	4,4	-6,0	6,3	-5,9		-6,0
6-4	neige	-14,8	neige	-14,9	5,6	-6,6	4,8		-6,05	
1-4 au 14-4	40,7	-10,6	40,1	-10,4	4,9	-6,0	4,2	-6,6	-5,8	-5,85
14-4 au 21-4	6,3	-5,45	8,9	-6,25	4,5	-6,2	3,0	-6,3	-5,95	-5,8
21-4 au 28-4	1,0		1,0		4,0	-5,8	3,0	-5,9	-5,8	-6,3
28-4 au 5-5	0,6		0,9		4,0	-6,4	3,0	-5,75	-6,45	-6,6
5-5 au 12-5	8,8	-9,6	6,3	-7,1	4,1	-6,2	3,0	-6,1	-6,2	-5,6
12-5 au 19-5	14,4	(-4,7)	13,1	-5,15	3,7		2,7	-6,6		
19-5 au 26-5	0,6	-3,6	0,8	-3,6	2,5	-6,35	2,4	-6,15	-6,05	-5,9
26-5 au 2-6	5,1	-5,3	6,1	-4,55	2,4	-6,05	2,2	-5,95		-6,75
2-6 au 10-6	14,8	-2,15	16,2	-3,20	2,0	-5,7	1,5	-6,05	-5,8	-6,0
10-6 au 18-6	1,1	-9,9	0,1	-10,5	2,1	-6,25	1,5	-5,85	-6,1	-6,2
18-6 au 27-6	0,0		0,0			-6,2		-6,7	-6,1	-5,7
27-6 au 7-7	0,6	-0,45	1,1	-0,05	1,8		0,6	-6,95	-6,0	-5,7
7-7 au 11-7	12,6	-5,0	12,2	-5,85	1,8		0,85	-6,0		
11-7 au 15-7	1,1	-0,85	6,4	-1,2	1,8	-6,6	0,65		-5,8	
17-7	10,0	-9,0	18,2	-8,4	voir détail des crues fig. 4					-6,3
17-7 au 20-8	7,9		11,4		1,5	-5,95	0,65		-6,05	
20-8 au 15-9	34,3	-7,2	48,9	-6,7	1,2	-6,0	0,65	-6,75		
15-9 au 22-9	13,8	-3,6	20,0	-6,9	1,2	-5,95	0,65	-6,9	-5,9	
22-9 au 30-9	63,5	-6,65	55,7	-6,55	1,8	-5,8	2,0	-6,0	-6,65	
30-9 au 14-10	22,8	-4,3	23,9	-4,4	1,2	-6,6	0,85	-5,8	-6,7	-6,5
14-10 au 20-10	17,7	-6,4	13,6	-6,3	1,8	-7,7	0,65	-6,25	-6,4	
20-10 au 28-10	1,7	-6,0	1,7	-6,5	1,2	-6,8	0,65	-5,8	-6,0	
28-10 au 12-11	27,6	-6,7	30,9	-7,65	1,2	-5,7	0,65	-5,45	-7,05	
12-11 au 16-11	37,1	-4,6	33,9	-5,1	2,1	-6,5	3,2	-6,45	-6,8	
16-11 au 1-12	33,0	-4,5	20,6	-4,7	1,2	-6,15	0,65	-5,8	-6,2	
1-12 au 7-12	16,7	-6,5	16,6	-6,9	1,2	-6,4	1,6	-6,0	-5,9	
7-12 au 12-12	1,2	-6,3	1,3	-6,0	1,2	-5,55	1,5		-6,65	
12-12 au 22-12	1,6	-3,9	2,6	-6,15	1,5	-6,15	1,5	-6,6	-6,3	

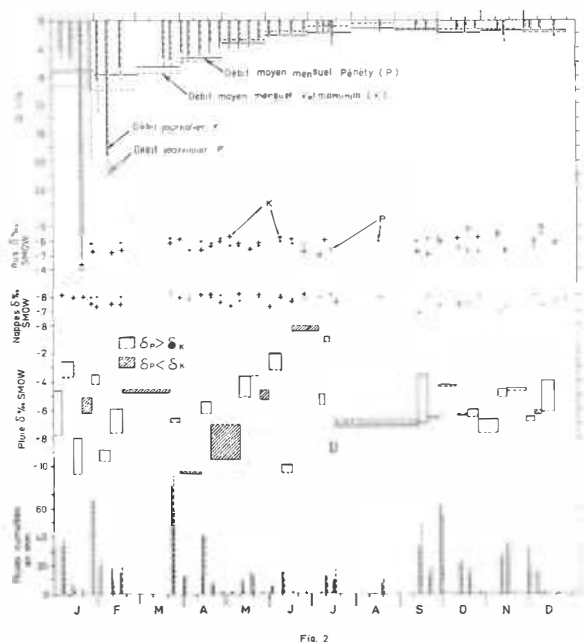


Figure 2 — ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES HYDROLOGIQUES DES DEUX BASSINS DE PENETY (BOCAGER) ET KERMAMINON (ARASÉ) AU COURS DE L'ANNÉE 1975.

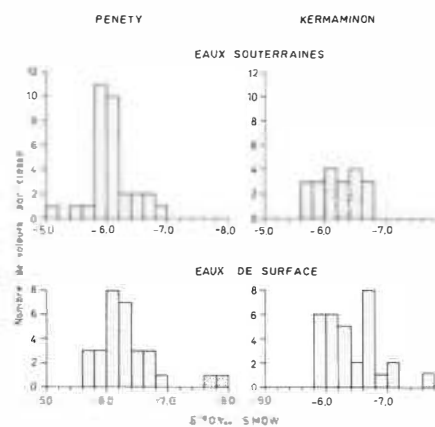


Figure 3 — COMPARAISON DES TENEURS EN ^{18}O DES EAUX SOUTERRAINES ET DE SURFACE DES DEUX BASSINS DE PENETY (BOCAGER) ET KERMAMINON (ARASÉ).

Pour Kermaminon apparaissent deux groupements des valeurs, l'un vers $-6,1 \delta$ soit la valeur moyenne des eaux souterraines, l'autre vers $-6,6 \delta$. L'année 1975 étant très sèche on conçoit que des prélèvements à pas de temps fixé correspondent le plus souvent à une situation d'étiage. Or en étiage, le débit de la rivière est dû essentiellement aux débits cumulés des eaux souterraines. La concentration de cette rivière est donc celle des eaux souterraines. Ainsi la valeur la plus fréquente d'un prélèvement hebdomadaire du ru correspond bien pour cette année sèche à celle des eaux souterraines. Dès que le débit croît la concentration en ^{18}O du ru s'écarte de cette valeur la plus fréquente et on observe une tendance vers la teneur de la pluie.

Cette réaction montre qu'il ne s'agit pas uniquement d'un transfert de pression occasionnant une augmentation de débit mais aussi d'un transit rapide vers le ru de l'eau de pluie qui se mélange au débit de base assuré par l'aquifère. Le ru de Kermaminon où l'on observe le plus d'écarts à la moyenne semble moins régulé et plus « influençable » que celui de Penety.

b — La crue du 17 juillet 1975

Au cours de cette petite crue survenue après un orage d'été, des prélèvements rapprochés ont été effectués et leur teneur en ^{18}O mesurée.

L'hydrogramme traduit une augmentation très faible des débits (fig. 4) et on remarque que le débit d'étiage initial est plus élevé sur le bassin de Penety.

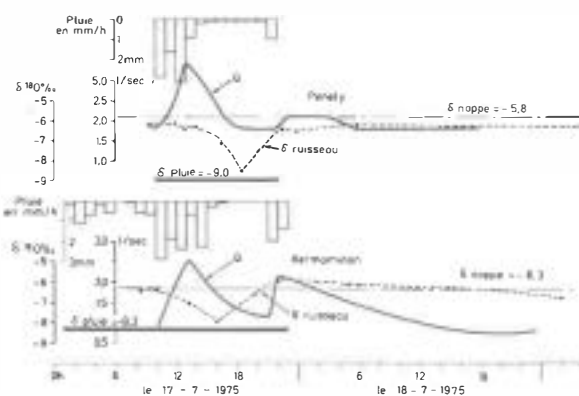


Fig 4

Figure 4 — CARACTÉRISTIQUES DE LA CRUE DU 17 JUILLET 1975 OBSERVÉE SUR LES RUISSEAUX DE PENETY (BOCAGER) ET KERMAMINON (ARASÉ).

Les teneurs en ^{18}O du ru sont comparées à celles de la pluie et des eaux souterraines. Elles évoluent entre ces deux pôles et leurs variations ont la forme d'un hydrogramme (fig. 4). A tout moment on peut en effet considérer le débit de la rivière comme résultant du débit des eaux souterraines et du « ruissellement ». La composante souterraine a la teneur isotopique de l'aquifère. Le « ruissellement » ou plutôt l'écoulement rapide a la teneur en ^{18}O de l'eau de pluie. Plus l'on se rapproche de la valeur de l'eau de pluie, plus la part de celle-ci dans l'écoulement est importante. A l'étiage au contraire teneur du ru et teneur des eaux souterraines peuvent être pratiquement confondues. Or la réaction des deux rus à cette pluie moyenne est très marquée. Sur les deux bassins à la pointe de l'hydrogramme « isotopique » le débit est assuré à plus de 80 p. 100 par l'eau de pluie récemment tombée qui s'écoule donc rapidement vers le ru sans profiter aux eaux souterraines. Dans le détail il faut signaler en outre que la pointe de l'hydrogramme survient

avant le maximum de déviation des teneurs en ^{18}O . On explique ce décalage par l'effet piston de la pluie tombée et donc un transfert de pression qui se manifeste avant le transit réel de l'eau de pluie. Pour l'exemple retenu, enfin, le transit sur Kermaminon semble plus rapide que sur Penety mais l'échantillonnage est trop lâche pour pouvoir placer avec précision les pics isotopiques.

4 — Les teneurs en oxygène 18 de l'eau du sol

Afin de mieux appréhender les circulations de l'eau dans les sols nous avons cherché à connaître la qualité isotopique de l'eau qu'ils contenaient après une période pluvieuse.

Le 20 mars 1976, à partir d'une toposéquence caractéristique choisie sur le Bassin de Penety (fig. 5), nous avons prélevé à la tarière des échantillons de sol à différentes profondeurs sur quatre verticales. Au laboratoire l'eau a été extraite sous vide (10^{-2} mm de mercure) et récupérée dans un piège refroidi par un mélange acétone carboglace à -70°C . Cette opération longue (48 h) et délicate correspond à une distillation nécessitant obligatoirement la récupération de toute l'eau du sol afin d'éviter le fractionnement. L'eau extraite est pesée puis comparée pour contrôle à la différence de poids entre l'échantillon initial et l'échantillon déshydraté. Ce dernier ne doit pas changer de poids après passage à l'étuve pendant 24 heures à 105°C .

Les taux d'humidité pondérale mesurés sur les échantillons carottés varient de 27 p. 100 à la surface du sol jusqu'à 12 p. 100 en profondeur dans le niveau arénisé (fig. 5).

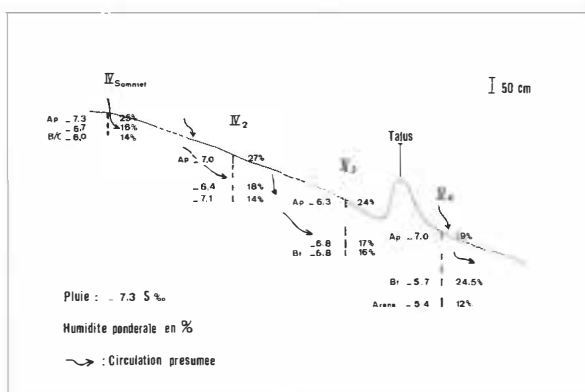


Figure 5 — TOPOSÉQUENCE DE LEURVEN (BASSIN DE PENETY): Position des échantillons et teneurs en ^{18}O ($\delta p.$ 1 000 SMOW) 20 mars 1976.

Les teneurs en ^{18}O de l'eau extraite des horizons de surface (excepté toutefois le 4 mars) sont proches des teneurs des pluies des semaines précédentes (-7.51 p. 1000 le 12 mars et -7.23 le 20

mars 1976). Sur le profil du sommet on observe une différence nette entre l'eau du niveau 0 — 10 cm proche des pluies antérieures et l'eau du niveau 50 — 60 cm qui a la teneur en ^{18}O de la nappe (-6.0δ). Sur les deux autres profils avant le talus, l'ensemble des échantillons semble contaminé par les pluies récentes jusqu'à la profondeur de 160 cm. En aval du talus on distingue à nouveau l'eau de l'horizon de surface proche de la pluie, de celle des horizons inférieurs plus riches en oxygène 18 suggérant les teneurs de la nappe. On retrouve ainsi une situation hydrologique un peu comparable à celle du sommet.

Sur cet exemple, malgré le petit nombre d'échantillons dont nous disposons, nous pouvons proposer provisoirement le modèle de circulation suivant :

- au sommet une percolation sur 40 cm de profondeur;
- un écoulement oblique jusqu'au talus qui fait écran. Avant le talus on observe en effet une pénétration plus profonde de la pluie récente qui peut cependant contourner certains niveaux d'accumulation tel IV₂ Bt;
- en aval du talus, de nouveau une percolation puis une dispersion latérale de l'eau de pluie analogue au cycle précédent.

III — CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Malgré un échantillonnage pas toujours adapté et en dépit de la sécheresse exceptionnelle de l'année 1975, la comparaison des fonctionnements isotopiques des deux bassins met en évidence :

- un temps de transit de l'ordre du mois pour les eaux souterraines;
- un écoulement, oblique ou latéral, rapide des pluies, confirmé par la crue du 17 juillet 1975;
- le rôle de barrage du talus, retardateur d'écoulement latéral, favorisant la percolation d'où son importance dans la réalimentation de la nappe.

A partir de ces premières mesures et afin de mieux connaître le mécanisme (transfert et transit) des écoulements en région granitique, il nous paraît indispensable de procéder, maintenant, à un échantillonnage plus serré sur les crues, les drainages à différents niveaux, ainsi que sur les eaux contenues dans les sols.

Par ailleurs pour que cette comparaison entre

les bassins soit totalement valable, il conviendrait de s'assurer, par prospection géophysique par

exemple, de leur similitude concernant l'épaisseur de l'arène granitique, et son degré d'altération.

SUMMARY

Comparison of the outflow of two elementary catchment areas

We made the comparison of the outflow of two elementary catchment areas (0,3 km²) for the year 1975, in " bocage area " and " open area ". The methodology uses oxygen 18 natural tracing.

The study shows :

- a travel time of about one month for the ground water flow;
 - a very fast lateral flow following rain water which is confirmed by the flood of 17-7-1975;
 - the important damming role of the embankment which brakes the lateral flow and enhances percolation, whence its importance in the recharging of the aquifer.
-