

**LE TRITIUM DANS LES MESURES D'HYDROLOGIE DE SURFACE.
DETERMINATION EXPERIMENTALE DU
COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT**

EDITH CROUZET, PIERRE HUBERT, PHILIPPE OLIVE, ERIK SIWERTZ

Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon-les-Bains, Haute-Savoie, France

et

ADRIEN MARCE

Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France

Abstract: No reliable method exists to establish the relative proportions of surface-runoff and groundwater discharge from analysis of hydrographs¹⁻³). However, it is possible to measure the amounts of tritium in the rainwater, the groundwater, and the outflow from a particular drainage basin. From such data, the part of the total discharge due to direct runoff can be established.

After a short description of the method and an analysis of the accuracy to be expected, three applications have been given. At Pont des Blaves, the greater part of the flood waters passing on 11/7/1968 appeared to consist of displaced groundwater. To a lesser extent this proved also to be the case with the discharge at Charmoisy (2/8/1968), situated within the same drainage basin. On the other hand, the discharge at Verthier (23 to 29/12/1968) was largely due to precipitation.

Earlier radiometric methods have used ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs as indicators⁴⁻⁶). Tritium, however, is to be preferred; unlike the other two elements, it is not adsorbed by the soil.

It is to be expected that the proposed method will give more insight into the water balance and especially into the hydrological cycle in drainage basins.

Résumé: Dans l'analyse de l'hydrogramme d'une crue, il n'existe pas de méthode expérimentale permettant d'évaluer les parts respectives des eaux de ruissellement et des eaux souterraines dans le débit des rivières¹⁻³).

Nous fondant sur la mesure des teneurs en tritium dans les précipitations, la rivière et les eaux souterraines d'un même bassin versant, nous avons pu évaluer, à chaque instant, la participation de la pluie directement ruisselée au débit de la rivière.

1. Principe de la méthode

En période d'étiage, le débit de la rivière Q est uniquement dû aux débits cumulés q_s des eaux souterraines en amont du point de mesure:

$$Q = q_s. \quad (1)$$

En période de crue, au débit q_s s'ajoute le débit q_r dû au ruissellement :

$$Q = q_s + q_r. \quad (2)$$

En ce qui concerne le tritium, en appelant respectivement a , a_r , a_s les concentrations en tritium de la rivière, des précipitations, dont une partie va ruisseler, et des eaux souterraines, on peut écrire qu'en période d'étiage :

$$Q \cdot a = q_s \cdot a_s \quad (3)$$

car à l'étiage :

$$Q = q_s \quad (1)$$

et $a = a_s$.

En période de crue :

$$Q \cdot a = q_s \cdot a_s + q_r \cdot a_r. \quad (4)$$

Nous pouvons alors calculer le quotient $r = q_r/Q$ en éliminant q_s entre les éqs. (2) et (4) :

$$r = q_r/Q = (a_s - a)/(a_s - a_r)$$

soit encore :

$$r = q_r/Q = (1 - \alpha)/(1 - \beta). \quad (5)$$

avec $\alpha = a/a_s$ et $\beta = a_r/a_s$ coefficients sans dimension toujours positifs.

Nous appellerons r le coefficient de ruissellement instantané :

$$r = (1 - \alpha)/(1 - \beta)$$

ce rapport $r = q_r/Q$ mesure à chaque instant la fraction d'eau de pluie ruisselée dans le débit total.

Sur des axes de coordonnées α et β , les courbes $r = C^{te}$ sont des droites de pentes r appartenant au faisceau linéaire de sommet $\alpha = I$ et $\beta = I$. Seules nous intéressent les droites de pentes comprises entre 0 et 1 ($0 < r < I$) correspondant aux couples α , β possibles : domaines A et B de la fig. 1.

Cette figure permet de mieux comprendre l'indétermination intervenant pour $\alpha = 1$ et $\beta = 1$ (c'est-à-dire lorsque $a = a_s = a_r$) ainsi que le peu de précision obtenue dans la détermination de r lorsque α et β sont voisins de 1.

Nous appellerons f fraction ruisselée afférente à une averse, le rapport de V , intégrale prise entre le début et la fin de la crue due à cette averse, de la fonction $q_r = r \cdot Q$ au volume V_0 des pluies tombées sur le bassin versant.

$$f = V/V_0 = 1/V_0 \int_0^t rQ dt. \quad (6)$$

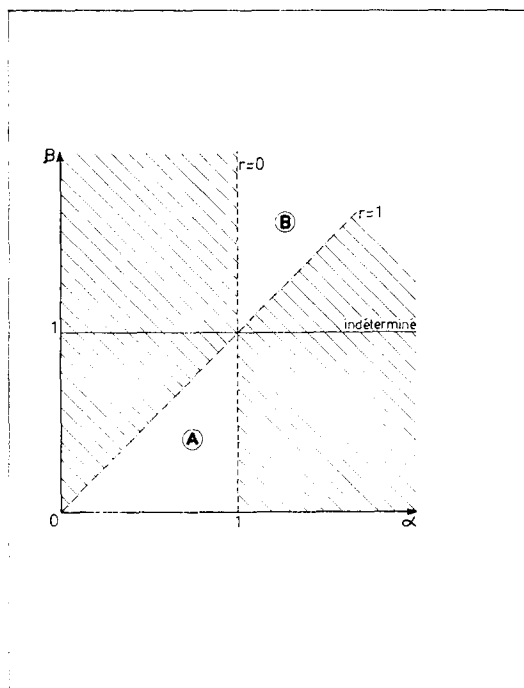


Fig. 1

2. Précision de la méthode

Il est important d'effectuer une étude précise de l'incertitude avec laquelle nous calculons les valeurs de r et de f .

Après avoir obtenu la différentielle logarithmique de l'expression (5), passant aux incertitudes, nous pouvons écrire, en admettant que les mesures des teneurs a , a_s et a_r sont faites avec la même précision p (c'est en principe le cas, car ces teneurs sont du même ordre de grandeur):

$$\Delta r/r = p/100 \cdot \frac{|\alpha - \beta| + \alpha|1 - \beta| + \beta|1 - \alpha|}{|1 - \alpha||1 - \beta|} \quad (7)$$

Nous devons étudier cette expression dans les deux cas correspondant aux régions (A) et (B) de la fig. 1 précédemment définies:

domaine A: $\alpha < 1$ $\beta > 1$

domaine B: $\alpha > 1$ $\beta < 1$.

Dans chacun de ces cas, nous pouvons alors supprimer les valeurs absolues et simplifier ainsi l'expression (7)

domaine A: $\Delta r/r = 2p\alpha/100 (1 - \alpha)$

domaine B: $\Delta r/r = 2p\alpha/100 (\alpha - 1)$

ce qui peut se rassembler dans l'écriture unique:

$$\Delta r/r = 2p\alpha/100|\alpha - 1|.$$

Nous voyons donc que l'incertitude relative sur le coefficient de ruissellement ne dépend que de deux facteurs p et α .

La précision relative p de la mesure des teneurs a , a_s et a_r est un facteur sur lequel nous pouvons jouer, alors que le coefficient α est une donnée. Sur la fig. 2, nous avons tracé la courbe représentative des variations de $\Delta r/r$ en fonction de α , dans un intervalle de 0, 1 à 10, p étant considéré comme un paramètre à qui nous avons successivement attribué les valeurs 10%, 5% et 1%.

Quelles que soient les valeurs de p , on remarque que l'incertitude sur r augmente indéfiniment lorsque α tend vers 1. Mais la valeur de p n'est pas indifférente. Admettant en effet que nous désirions obtenir r avec une préci-

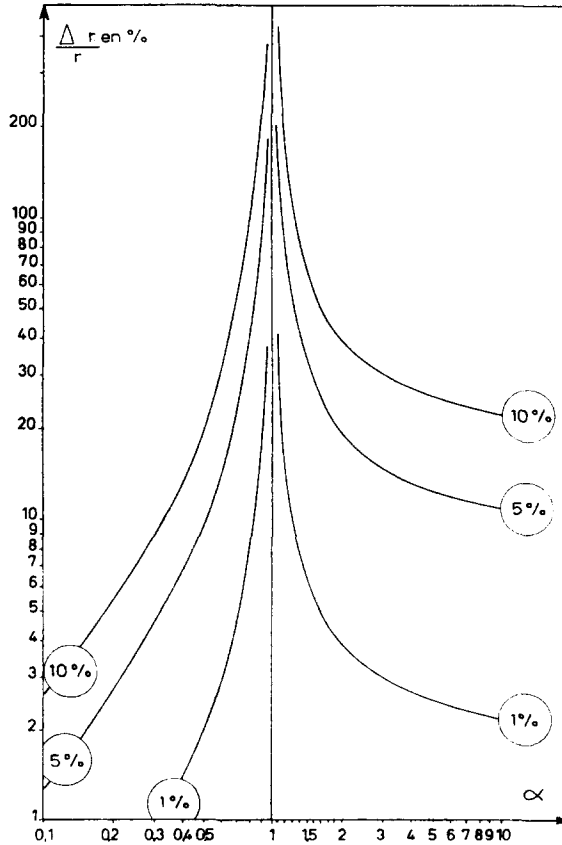


Fig. 2

sion relative de 20%, nous avons rassemblé dans le tableau suivant, pour différentes valeurs de p , les intervalles hors desquels doit se trouver α :

| | p | intervalle interdit à α |
|------------------------|-----|--------------------------------|
| $\Delta r/r \leq 20\%$ | 10 | 0,5 - ∞ |
| | 5 | 0,7 - 2 |
| | 1 | 0,9 - 1,1 |
| | 0,5 | 0,95 - 1,05 |

Nous pouvons déterminer la valeur de p nécessaire en fonction de la précision $\Delta r/r$ désirée et de la valeur de α déterminée par un premier comptage effectué à une précision p' . On juge de la validité du résultat en comparant p' à p , et en reprenant éventuellement les analyses.

La précision obtenue pour l'évaluation de la fraction ruisselée (cf. (6)):

$$f = V/V_0 = 1/V_0 \int_0^t rQ dt$$

dépend essentiellement de la précision sur r , V et V_0 . En première approximation:

$$\Delta f/f \leq \text{Maj } \Delta r/r + \text{Maj } \Delta Q/Q + \Delta V_0/V_0.$$

Compte tenu des précisions généralement obtenues (débitmétrie à 5%, pluviométrie ponctuelle à 10%, coefficient de ruissellement à 20%), la fraction ruisselée n'est pas connue à mieux que 40% près.

3. Applications à quelques crues d'échelles différentes

Nous avons d'abord appliqué cette méthode sur le bassin versant expérimental des Blaves (Haute-Savoie). Ce bassin couvre une superficie de 24 km², le module pluviométrique annuel y est d'environ 1 200 mm, et le régime du ruisseau des Blaves est de type nivopluvial (fig. 3). On constate qu'une moyenne entre les teneurs en tritium des sources de la Versoie et Zouzou reflétait bien la teneur des eaux souterraines pour l'ensemble du bassin (tableau 2).

Notre étude a porté sur les sous bassins de Charmoisy (5,7 km²) et de Pont des Blaves (15 km²) équipés de stations limnigraphiques.

La crue du 11 Juillet 1968 nous a permis d'obtenir, sur le sous bassin de Pont des Blaves, les résultats suivants reportés sur le tableau 2 et la fig. 4.

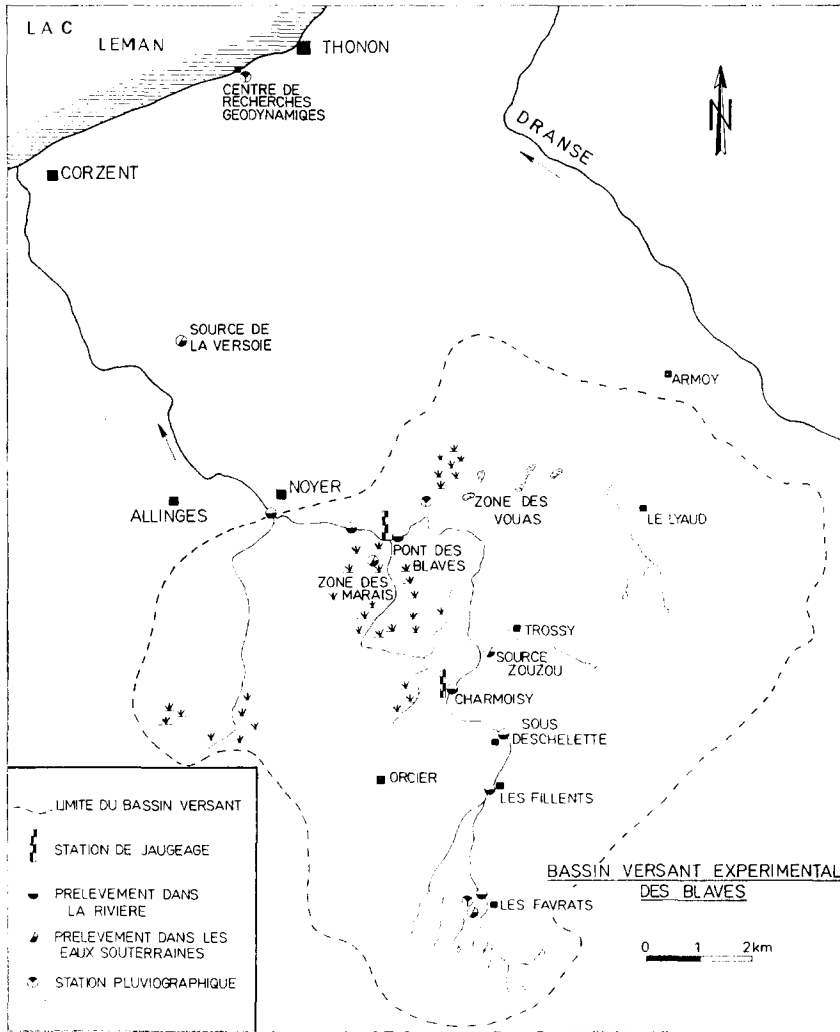


Fig. 3

TABLEAU 2

| <i>Rivière des Blaves le 16/12/68 (étiage)</i> | | <i>Apports souterrains le 16/12/68</i> | |
|--|-------------|--|----------------|
| Les Favrats | 215 ± 17 UT | Source des Favrats | 143 ± 40 UT |
| Les Fillents | 311 ± 24 UT | | |
| Sous Deschelette | 277 ± 22 UT | | |
| Charmoisy | 325 ± 26 UT | | |
| Pont des Blaves | 329 ± 26 UT | Source Zouzou | 421 ± 35 UT |
| Noyer | 310 ± 24 UT | Source de la Versoie | 269 ± 21 UT |
| | | | Moyenne 340 UT |

On constate que la teneur en tritium de la rivière avant la crue reflète bien celle due aux apports souterrains provenant en particulier des sources de la Versoie et Zouzou.

La pluie de 31 mm mesurée au Pont des Blaves et aux Favrats représente

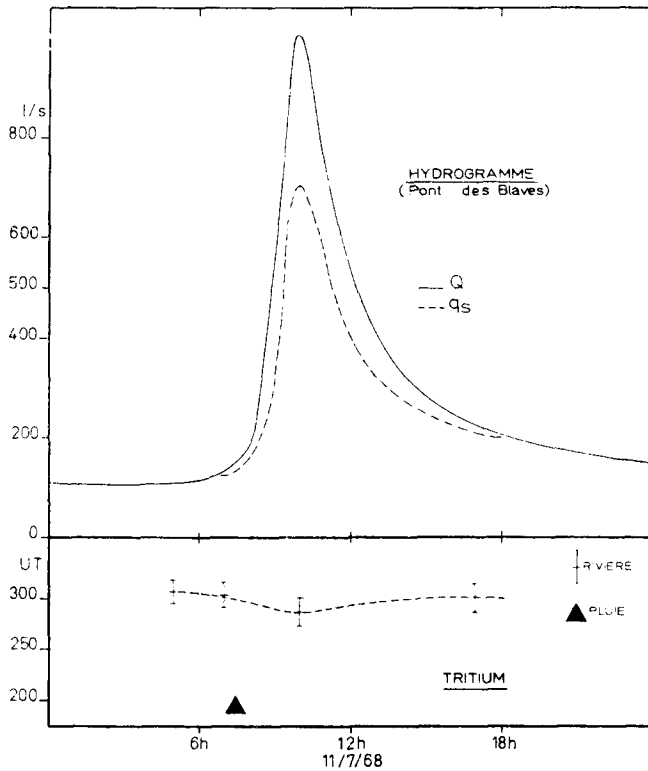


Fig. 4

TABLEAU 3

| | | | |
|---------------------------------------|---------|-------------------------|-----------------|
| <i>Pluie 11/7/68 (station C.R.G.)</i> | | 189 ± 6 UT | |
| <i>Eaux souterraines</i> | | | |
| Versoie 14/7/68 | | 321 ± 19 UT | |
| Versoie 31/7/68 | | 267 ± 22 UT | |
| Zouzou 11/7/68 | | 379 ± 28 UT | |
| | | moyenne 314 ± 24 UT | |
| <i>Rivière</i> | | | |
| avant la crue | 11/7/68 | (7 h) | 311 ± 24 UT |
| en crue | 11/7/68 | (10 h) | 274 ± 22 UT |
| en décrue | 11/7/68 | (17 h) | 303 ± 24 UT |
| | | | $r = 0$ |
| | | | $r = 0,30$ |
| | | | $r = 0,06$ |

un volume de $462 \cdot 10^3 \text{ m}^3$. A la station de Pont des Blaves, il est passé $3,6 \times 10^3 \text{ m}^3$ d'eau de pluie. La fraction ruisselée, telle que nous l'avons définie (cf. (6)), est de l'ordre de 1%.

C'est-à-dire qu'environ 1% de la pluie tombée sur le bassin versant a emprunté la voie du ruissellement superficiel. La présence de marais dans la partie inférieure du bassin permet d'expliquer l'aspect particulier de l'évolution des eaux souterraines caractérisée par une réponse très rapide. Cela est probablement dû à la vidange du marais.

Sur le sous bassin de Charmoisy, la crue des 1 et 2 août 1968 a donné les résultats suivants: tableau 4 et fig. 5.

La pluie du 1er août, de 6 mm, mesurée aux Favrats, représente un volume de $35,6 \times 10^3 \text{ m}^3$ dont $0,05 \times 10^3 \text{ m}^3$ ont ruisselé. La fraction ruisselée est donc négligeable. Par contre, la pluie du 2 août de 24,8 mm ($141 \times 10^3 \text{ m}^3$) a ruisselé dans une proportion d'environ 3% ($3,62 \times 10^3 \text{ m}^3$).

La troisième crue a été étudiée sur le bassin de l'Eau Morte, affluent principal du lac d'Annecy (Haute-Savoie) qui couvre une superficie de 91 km^2 et se jette dans le lac près de Verthier où est située la station de jaugeage

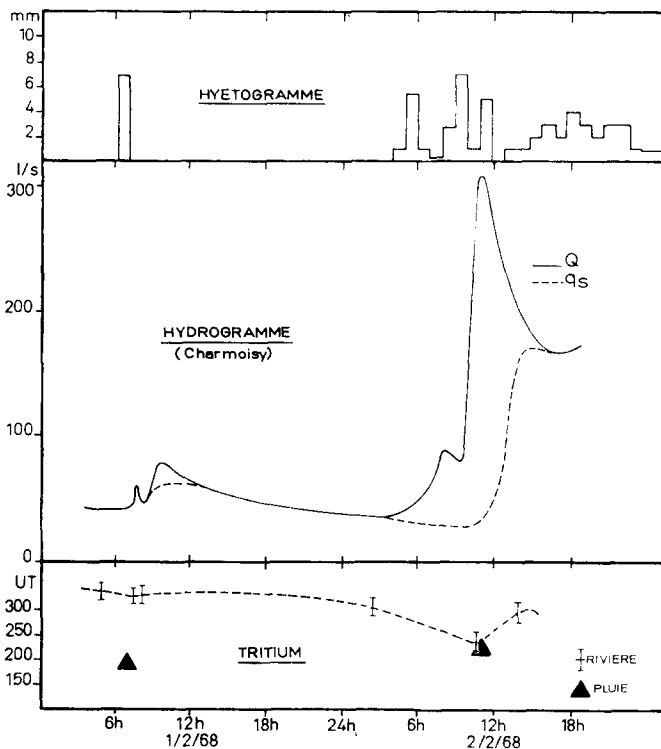


Fig. 5

TABLEAU 4

| | | | |
|---|------------------|-------------|---------------------|
| <i>Pluie</i> 1/8/68 (station C.R.G.) | | 202 ± 16 UT | |
| <i>Eaux souterraines</i> | | | |
| Versoie 31/7/68 | | 267 ± 22 UT | |
| Versoie 7/8/68 | | 264 ± 21 UT | moyenne 339 ± 27 UT |
| Zouzou 2/2/68 | | 412 ± 30 UT | |
| <i>Rivière</i> | | | |
| légère crue | 1/8/68 (7 h 30) | 331 ± 23 UT | $r = 0,06$ |
| décruce | 1/8/68 (8 h 15) | 335 ± 23 UT | $r = 0,03$ |
| <i>Pluie</i> 2/8/68 (Station des Favrats) | | 232 ± 33 UT | |
| <i>Rivière</i> | | | |
| avant la crue 2/8/68 | | 335 UT | $r = 0$ |
| début de crue | 2/8/68 (2 h 30) | 309 ± 25 UT | $r = 0,25$ |
| crue | 2/8/68 (10 h 50) | 239 ± 20 UT | $r = 0,93$ |
| décruce | 2/8/68 (14 h 35) | 301 ± 21 UT | $r = 0,33$ |

(fig. 6). Ce bassin dont l'altitude moyenne est de 1200 m reçoit environ 1400 mm de précipitation par an. Le régime de l'Eau Morte est donc de type nivo-pluvial avec un module annuel de 3 m³/s.

Une crue a été provoquée sur ce bassin par une série d'épisodes pluvieux qui se sont succédés du 21 décembre au 29 décembre 1968 avec un maximum le 25 où l'intensité a atteint 4,4 mm/h entre 14 h et 16 h.

Divers arguments météorologiques et observations de terrain nous ont amené à définir une superficie de bassin sur laquelle les précipitations ont effectivement participé à la crue. En effet, les précipitations étaient sous

TABLEAU 5

| | | | |
|---|------------|-------------------|------------|
| <i>Pluie</i> (Station de Verthier) | | | |
| | 23/12/68 | 73 ± 16 UT | |
| | 24/12/68 m | | |
| | 25/12/68 m | 40 ± 10 UT | |
| | 26/12/68 m | | |
| <i>Rivière</i> avant la crue (échantillon moyen du 16/12/68 au 22/12/68): 302 ± 30 UT | | | |
| | 23/12/68 | (8 h) 118 ± 25 UT | $r = 0,80$ |
| | 24/12/68 | (9 h) 98 ± 21 UT | $r = 0,77$ |
| | 25/12/68 | (16 h) 79 ± 17 UT | $r = 0,84$ |
| | 26/12/68 | (8 h) 55 ± 12 UT | $r = 0,94$ |
| | 27/12/68 | (8 h) 155 ± 33 UT | $r = 0,55$ |
| | 29/12/68 | (9 h) 271 ± 54 UT | $r = 0,10$ |
| après la crue (échantillon moyen du 30/12/68 au 5/1/69): 294 ± 29 UT | | | |

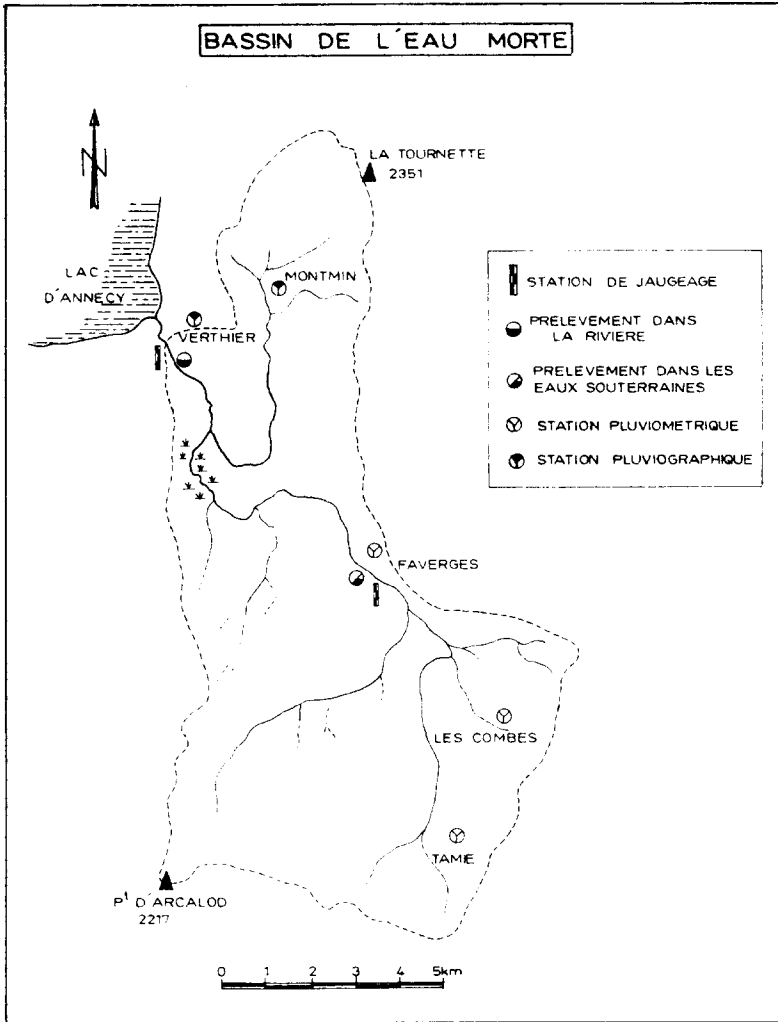


Fig. 6

forme de neige à partir de 1200 m pour le premier épisode (des 20 et 21 décembre) et à partir de 1000 m pour le second (du 22 au 26 décembre). Les superficies intéressées par ces épisodes ont été respectivement de 59,5 km² et de 42,1 km².

Cette crue a donné les résultats suivants: tableau 5 et fig. 7.

Les précipitations correspondant à un volume de $6500 \times 10^3 \text{ m}^3$ ont entraîné un ruissellement de 54% ($3500 \times 10^3 \text{ m}^3$).

L'analyse de l'hydrogramme met en évidence certaines particularités. Débutant en réalité le 21 décembre vers 12 h, la crue n'est apparente qu'à

partir du 23 à 0 h. L'apport dû au ruissellement équilibrant exactement la baisse de débit des eaux souterraines, il apparaît de plus que la montée des eaux souterraines est nettement décalée (plus de 24 h) par rapport à celle

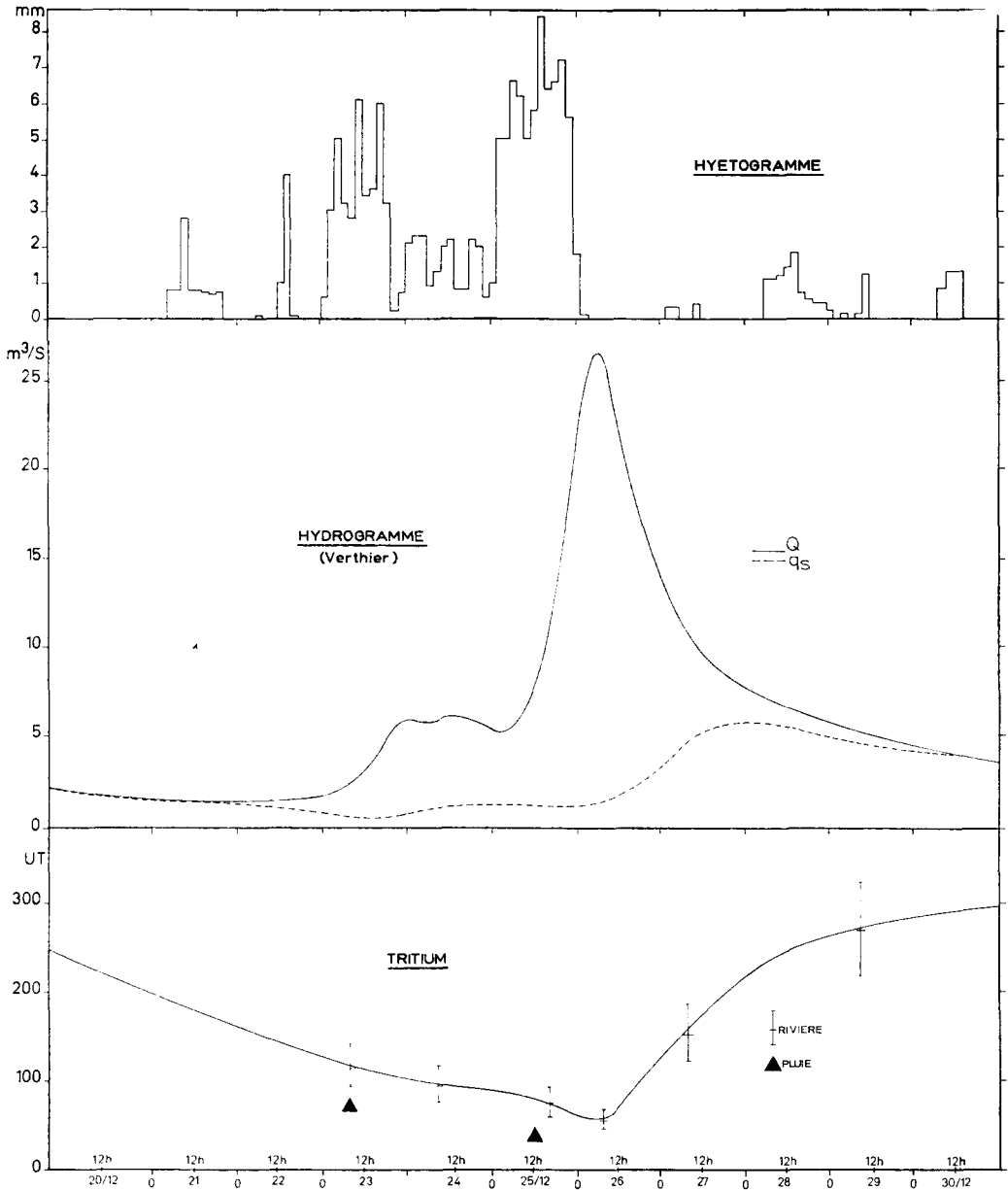


Fig. 7

des eaux superficielles, ceci étant vraisemblablement dû à un temps de transit assez long de ces eaux souterraines.

4. Conclusions

La mesure des teneurs en tritium dans les précipitations et la rivière permet de déterminer la participation réelle des eaux de pluie au débit des rivières en période de crue.

Lorsque la durée de la crue est inférieure au temps de transit des eaux souterraines, la teneur en tritium après la crue se rétablit à la valeur d'avant la crue, il n'est pas alors nécessaire de mesurer le tritium dans les eaux souterraines. Dans nos exemples, où la durée des crues ne dépasse pas une semaine, cette simplification est valable. On sait en effet, que dans la région étudiée, le temps de transit moyen des eaux souterraines superficielles est au moins de l'ordre du mois. L'augmentation du débit des eaux souterraines, constaté lors des crues, ne s'accompagne pas d'une variation de leur teneur en tritium. Il s'agit uniquement d'une mise en charge de ces eaux et non d'un mélange entre la pluie infiltrée et les eaux souterraines. Tout se passe comme si la lame d'eau infiltrée chassait, plus vite, devant elle, les eaux des épisodes pluvieux antérieurs.

Par contre, si la durée de la crue permet l'intervention d'eaux souterraines d'âges différents donc de concentrations probablement différentes, un échantillonnage de ces eaux souterraines lors de la crue s'avère nécessaire. On se rendra compte d'un tel phénomène si la concentration dans la rivière en fin de crue diffère sensiblement de celle d'avant la crue.

Des tentatives de ce genre avaient été faites pour mesurer la participation de la pluie au débit par l'emploi d'autres radioéléments, comme le ^{90}Sr et le $^{137}\text{Cs}^{4-6}$). L'avantage du tritium réside dans le fait qu'il n'y a pas, à notre avis, de fixation ni importante ni définitive de cet élément à la surface du sol lors du ruissellement. Ce qui n'est pas le cas pour le strontium et le césium.

Ainsi la détermination réelle, par cette méthode, de la partie des eaux de pluie évacuée directement par le ruissellement lors des crues, permet de mieux établir les bilans hydrologiques des bassins versants.

Bibliographie

- 1) J. E. Nash, Determining run-off from rainfall. A.I.H.S. (1958) 163-184
- 2) Ven Te Chow, Handbook of Applied Hydrology, Section 14, Run-off (McGraw Hill, 1964)
- 3) G. Remenieras, L'hydrologie de l'Ingénieur (Eyrolles, Paris, 1960)
- 4) Y. Miyake and H. Tsuboda, Estimation of the direct contribution of meteoric water

- to river waters by means of fall-out radiocesium and radiostrontium. Radioisotopes in hydrology. A.I.E.A., Vienna (1963) 425-431
- 5) N. Yamagata, T. Okita and K. Kodaira, The run-off of fall-out radiostrontium from a river and its applications in hydrology, Radioisotopes in hydrology A.I.E.A., Vienna (1963) 417-423
 - 6) L. Balek, The importance of beta-radioactivity measurement in representative and experimental basins (Symp. Representative and experimental areas, Budapest) A.I.H.S. **66** (1965) 347-351