

**HYDROGÉOLOGIE ISOTOPIQUE.** — *Etude par le tritium de la dynamique des eaux souterraines.* Note (\*) de MM. Pierre Hubert, Adrien Marcé, Philippe Olive et Erik Siwertz, présentée par M. Louis Glangeaud.

A la suite des importantes études d'hydrologie isotopique de W. F. Libby (<sup>1</sup>), E. Eriksson (<sup>2</sup>), K. O. Münnich (<sup>3</sup>), faites après les essais thermonucléaires, le tritium s'est révélé être un des éléments les plus adaptés à l'étude de la dynamique des eaux souterraines. Nous présentons dans cette Note, un modèle mathématique simple permettant, relativement à une échelle de temps annuelle, de rendre compte de cette dynamique.

Ce modèle est un outil mathématique qui permet, connaissant un programme d'entrée constitué par les caractéristiques isotopiques des précipitations participant à la recharge des nappes, de déterminer les caractéristiques isotopiques correspondantes à l'exutoire du bassin. La validité du modèle est mesurée par la concordance entre les sorties calculées et les sorties effectivement observées. Nous l'avons appliqué aux bassins du Rhône, de la Dranse et de la Loire.

1. DÉTERMINATION DU PROGRAMME D'ENTRÉE. — Au niveau d'une station hydrométéorologique où sont mesurées la teneur en tritium et la hauteur des précipitations mensuelles, où est évaluée l'évapotranspiration, on calcule la concentration en tritium des eaux qui participent effectivement à la réalimentation des eaux souterraines.

On sait que sous nos latitudes cette recharge a lieu essentiellement de l'automne au début du printemps et qu'elle représente globalement l'infiltration d'environ un tiers des précipitations annuelles [(<sup>4</sup>), (<sup>5</sup>)].

Rappelons qu'au moment de la recharge, les teneurs en tritium des précipitations présentent un minimum. Celui-ci est sensiblement le même pour toutes les stations que nous avons pu étudier (<sup>6</sup>).

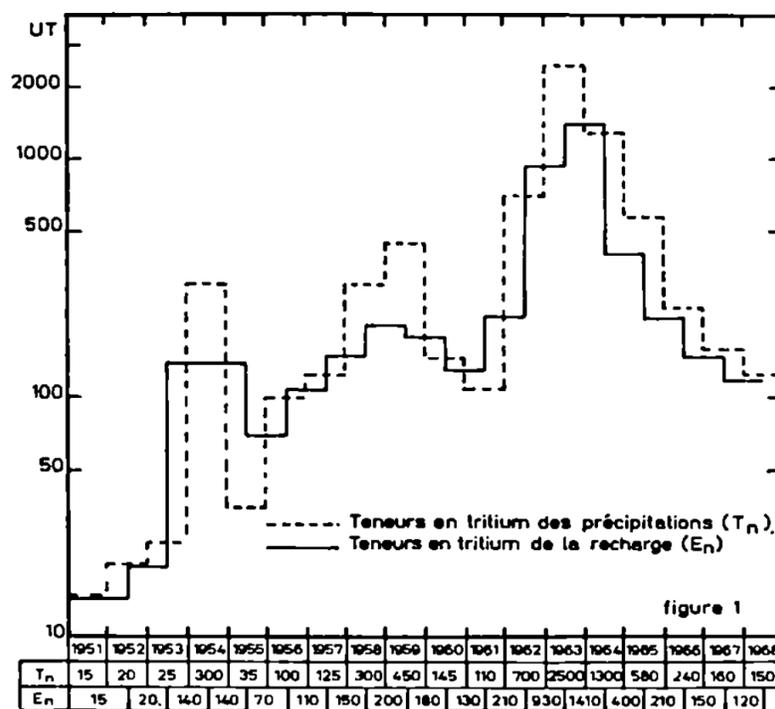
Aussi la série des  $E_n$ , teneurs moyennes en tritium de la recharge annuelle, déterminée dans nos stations par mesures depuis 1963 et par extrapolation pour les années antérieures (<sup>6</sup>), constitue bien en première approximation une série de grandeurs représentatives de la zone climatique tempérée (*fig.*).

2. EVALUATION DES SORTIES. — Nous considérerons les sorties,  $S_n$ , comme les teneurs pondérées annuelles des fleuves étudiés à l'exutoire du bassin considéré : le Rhône en amont du Léman (bassin fermé au pont de Scex), la Dranse à son exutoire dans le Léman (bassin fermé à Thonon) et la Loire à Angers (tableau).

3. MODÈLE. — Nous avons tenté d'exprimer les termes de la série  $S_n$  en fonction de ceux de la série  $E_n$ . La validité des modèles étudiés étant éprouvée sur la correspondance entre les résultats mesurés et les données du calcul sur les 4 années d'observations dont nous disposons. Les résultats les plus satisfaisants ont été obtenus en postulant que les sorties  $S_n$  étaient fonctions linéaires des entrées  $E_n$ , le volume de

TABLEAU

E <sub>n</sub>	Rhône		Dranse		Loire	
	S <sub>n</sub>	S' <sub>n</sub>	S <sub>n</sub>	S' <sub>n</sub>	S <sub>n</sub>	S' <sub>n</sub>
1968	250	220	240	220	150	130
120						
1967	310	310	320	310	170	170
150						
1966	430	440	450	440		
210						
1965	680	630	670	630		
	α = 0,4		α = 0,4		α = 0,8	



la recharge en eau étant considéré comme constant (lié à l'année pluviométrique moyenne).

Nous écrirons :

$$S_n = a_0 E_n + a_1 E_{n-1} + \dots + a_p E_{n-p} + \dots$$

ce qui signifie que les eaux émergentes de l'année *n* sont un mélange de 100.*a*<sub>0</sub> % d'eaux de la précédente recharge, 100.*a*<sub>1</sub> % d'eaux de l'avant-dernière recharge, etc.

Cette expression peut s'écrire sous la forme condensée :

$$S_n = \sum_{p=0}^{\infty} a_p \cdot E_{n-p} \quad \text{avec} \quad \sum_{p=0}^{\infty} a_p = 1.$$

Nous avons de plus été amenés à supposer l'homogénéisation des nappes à une échelle de temps annuelle ce qui se traduit par la relation :

$$S_n = \alpha E_n + \lambda(1 - \alpha) S_{n-1}.$$

La recharge de teneur *E<sub>n</sub>* se mélange donc à la nappe homogène et de teneur *S<sub>n-1</sub>* à la fin de l'année *n - 1*, et ceci dans les proportions respectives *α* et 1 - *α* (*α* est

un paramètre compris entre 0 et 1, que nous appellerons coefficient de recharge,  $\lambda = 0,95$  est le facteur de décroissance du tritium pour un an). Cela nous conduit à prendre  $a_p = \alpha(1 - \alpha)^p$  qui satisfait bien à la condition :

$$\sum_{p=0}^{\infty} \alpha(1 - \alpha)^p = 1 .$$

En définitive, et en tenant compte de la décroissance du tritium :

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

On voit donc que ce sont toutes les recharges antérieures qui déterminent l'état actuel de la nappe, mais cette influence est pondérée par  $\alpha(1 - \alpha)^p$  qui diminue rapidement.

En choisissant convenablement le coefficient de recharge  $\alpha$ , nous ajusterons au mieux les valeurs de  $S'_n$  calculées aux valeurs de  $S_n$  mesurées.

4. APPLICATIONS. — Nous avons reporté sur le tableau les valeurs  $S'_n$  calculées pour l'optimum en regard des valeurs  $S_n$  effectivement mesurées. On constate que les différences relatives entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées sont alors au maximum de l'ordre de grandeur des erreurs de mesure sur les comptages de tritium. Pour le Rhône où  $\alpha = 0,4$  l'âge moyen des eaux est de 2 ans. En effet, la lame d'eau écoulée en un an comprend 40 % d'eaux de moins d'un an, 64 % d'eaux de moins de 2 ans, 78 % d'eaux de moins de 3 ans, 87 % d'eaux de moins de 4 ans, etc. La participation de chaque recharge décroît exponentiellement et devient négligeable au bout de 9 ans.

5. CONCLUSIONS. — Dans ce modèle qui se vérifie sur quatre années consécutives où les teneurs sont passées de 700 UT en 1965 à 200 UT en 1968, tout se passe comme si les eaux d'infiltration se mélangeaient à des nappes elles-mêmes homogènes, ce mélange s'effectuant suivant un certain coefficient de recharge  $\alpha$ , propre au bassin, qui caractérise l'ensemble des facteurs hydrogéologiques. Cela signifie que la surface de recharge se répartit sur l'ensemble de la surface du bassin. En effet, un épisode pluvieux généralisé va, en s'infiltrant, se mélanger à des filets d'eau qui auront circulé plus ou moins longtemps dans l'aquifère. Ce mélange intéressera des eaux d'autant plus anciennes qu'il s'effectuera dans les parties basses du bassin : influence importante de la topographie (7). On se rend bien compte ainsi que l'on n'a pas affaire à un mélange parfait mais à un mélange très complexe qui se traduit en particulier par le fait que l'âge de deux ans des eaux du Rhône est la moyenne d'une distribution des âges s'étendant de quelques mois à dix ans et non la valeur unique d'un temps de transit. Ce dernier paramètre est uniquement valable pour les nappes où la surface de recharge, bien délimitée, est suffisamment éloignée de l'aire d'émergence. Dans ce cas, d'ailleurs, il y a principalement stratification des eaux (8).

Il existe des eaux qui échappent au cycle hydrogéologique lié à la valeur du coefficient de recharge  $\alpha$  du bassin. Elles s'infiltrent profondément, passent sous un niveau lié au niveau de base du bassin, et entrent ainsi dans un cycle beaucoup

plus long. Dès lors, leur vitesse de circulation diminue pour tendre à s'annuler. Leur temps moyen de renouvellement est généralement compris entre  $10^2$  et  $10^4$  ans [(<sup>9</sup>), (<sup>10</sup>)]. Elles peuvent dans certains cas revenir en surface à la faveur par exemple d'accidents géologiques ou de thermosiphons (<sup>11</sup>). Elles peuvent se mélanger, en très faible proportion, avec des eaux plus superficielles. Il suffit alors que ces dernières aient des teneurs élevées en tritium, comme ce fut le cas notamment en 1964 pour que l'on puisse déceler cette faible participation (<sup>12</sup>) jusqu'alors inconnue (<sup>13</sup>).

D'autre part la connaissance de l'âge moyen  $\tau$  des eaux d'un bassin permet d'en évaluer le volant d'eau  $V$  par la relation classique :  $\tau = V/\Delta V$  où  $\Delta V$  représente le volume des entrées ou des sorties annuelles. On peut ainsi calculer les réserves d'eau du bassin. Dans le cas du bassin de la Dranse où  $\tau \approx 2$  ans, et  $\Delta V \approx 0,6 \text{ km}^3/\text{an}$ , les réserves actives sont de l'ordre de  $1,2 \text{ km}^3$ .

De façon générale nous caractériserons l'inertie d'une nappe par le paramètre  $1/\alpha$ , inverse du coefficient de recharge. Cette inertie est relative à l'échelle annuelle envisagée. A une échelle de temps inférieure on observera des fluctuations dues à une inertie résiduelle résultant du caractère nécessairement imparfait des processus réels de mélange. Chaque cas particulier étudié apportera des enrichissements, par exemple en nous permettant d'introduire des paramètres spécifiques de phénomènes secondaires comme le rôle de l'altitude, la nature du tapis végétal, les forts épisodes pluvieux estivaux à haute teneur en tritium, etc.

(\*) Séance du 2 février 1970.

(1) F. BEGEMANN et W. F. LIBBY, *Geochim. et Cosmo. Acta*, 12, 1957, p. 277.

(2) E. ERIKSSON, *Tellus*, 10, 1958, p. 472.

(3) K. O. MÜNNICH, W. ROETHER et L. THILO, *Isotopes in Hydrology*, Vienne, 1967, p. 305.

(4) G. REMENIERAS, *L'Hydrologie de l'ingénieur*, Paris, 1965, p. 253.

(5) L. L. THATCHER et B. R. PAYNE, *Radiocarbon and tritium dating*, Washington, 1965, p. 616.

(6) B. BOSCH, B. GUEGAN, P. HUBERT, A. MARCÉ, Ph. OLIVE et E. SIWERTZ, *Comptes rendus*, 270, Série D, 1970, p. 267.

(7) Y. GUSTAFSSON, *Ground water problems*, Pergamon, 1968, p. 3.

(8) A. NIR, *Journal of Geophys. research*, 69, 1964, p. 2589.

(9) J. C. VOGEL et D. EHHALT, *Radioisotopes in Hydrology*, Vienne, 1963, p. 383.

(10) J. C. VOGEL, *Isotopes in Hydrology*, Vienne, 1967, p. 355.

(11) L. GLANGEAUD, *Revue du monde souterrain*, 76-77, 1953, p. 1.

(12) J. C. FONTES, R. LETOLLE, Ph. OLIVE et B. BLAVOUX, *Isotopes in Hydrology*, Vienne, 1967, p. 401.

(13) B. BLAVOUX, L. GLANGEAUD, P. LEVEQUE et Ph. OLIVE, *Comptes rendus*, 259, 1964, p. 4323.

(P. H., Ph. O., E. S., Centre de Recherches Géodynamiques,  
avenue de Corzent, 74-Thonon, Haute-Savoie ;  
A. M., Bureau de Recherches Géologiques et Minières,  
45-Orléans, Loiret.)