

QUELQUES RENSEIGNEMENTS SUR L'EMPLOI DU TRITIUM COMME TRACEUR DANS DES MESURES DE COURANTS

Exemple d'application dans un problème d'hydrologie souterraine pour le fleuve Timavo

par E. ERIKSSON ⁽¹⁾ et F. MOSETTI ⁽²⁾

L'emploi de l'eau tritiée en qualité de traceur pour des problèmes hydrologiques et en général pour l'étude des mouvements des masses d'eau et des relatifs rapports d'interdépendance est très important.

Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau marquée par le tritium sont pratiquement les mêmes que celles de l'eau naturelle, en sorte que les molécules injectées, vraie eau dans l'eau, ne sont responsables d'aucune perturbation aux conditions naturelles du mouvement. L'absorption sélective par ces microorganismes qui sont présents dans les eaux (argument à vrai dire encore à l'étude) où les phénomènes d'adsorption ne seraient pas à prendre en considération. Les voies habituellement suivies avec d'autres radioisotopes qui, pour les problèmes hydrauliques, sont injectés mélangés à une grande quantité de solution de l'isotope stable correspondant (p. ex. I ¹³¹ avec I ¹²⁷), de sorte que l'éventuelle possibilité de réaction chimique entre le traceur et des substances de l'eau soit négligeable, s'appliquent de façon favorable avec le tritium. Dans ce cas on dilue l'eau dans l'eau même.

Les méthodes techniques modernes pour le dosage du tritium avec des appareils qui donnent une bonne statistique et un rendement suffisant permettent des mesures aussi exactes que celles effectuées avec des isotopes plus actifs.

L'emploi du tritium comme celui des autres isotopes n'est pas sujet à de grossières erreurs d'interprétation comme c'est le cas des colorants (sans parler des solutions de sel) dont les mesures peuvent être faussées par des turbidités naturelles ou aussi par des absorptions élevées.

Les techniques modernes d'interprétation permettent une bonne évaluation (mieux que dans le temps passé) des rapports quantitatifs dans un réseau de courants, en se basant sur des expressions dérivées des lois de diffusion ⁽³⁾. Nous examinerons ces lois dans la suite de la présente note.

Les méthodes modernes permettent la mesure des différents débits d'un système donné de cours d'eau et l'étude de la façon dont ces cours d'eau se mélangent. Ces méthodes ne sont pas limitées (comme il arrivait dans le temps passé) à la simple vérification de la présence du traceur ou à la détermination de la vitesse de l'eau. Les possibilités analytiques, sur lesquelles sont fondées les méthodes d'interprétation modernes, dérivent de l'étude des courbes de diffusion du traceur en fonction du temps et du parcours entre le point d'injection et le point d'observation. Les solutions mathématiques sont différentes selon le type de l'injection et ses modalités.

(1) Division des isotopes de l'Agence internationale de l'Energie Atomique, Vienne.

(2) Osservatorio Geofisico Sperimentale, Trieste.

(3) MOSETTI (F.), 1960. — Su alcuni criteri ed esperienze per misurazioni idrologiche mediante sostanze traccianti. — *L'Energia Elettrica*, Milano, **37** (9).

Fondamentalement on observe, l'injection (source) d'un traceur quelconque peut être effectuée instantanément ou pendant une certaine durée ou de manière continue.

A ce dernier système correspondent des solutions mathématiques simples mais ce système n'est pas le plus propre à obtenir des mesures sur de grands volumes d'eau parce qu'il implique l'emploi de très grandes quantités de traceur.

La formule d'interprétation la plus simple, dans ce cas est connue et d'application facile. Si le débit inconnu du courant est P et si dans ce même courant on injecte continuellement un autre courant (de débit $P_0 \ll P$) dans lequel la concentration du traceur est c_0 , on mesure en aval du point d'injection une concentration c telle que :

$$P = P_0 (c_0 - c)/c \text{ avec } (c \ll c_0)$$

Si des dilutions ultérieures se produisent le long du parcours, nous pouvons connaître leur effet en comparant la valeur P ainsi obtenue et les mesures directes de débit (en différentes sections du cours).

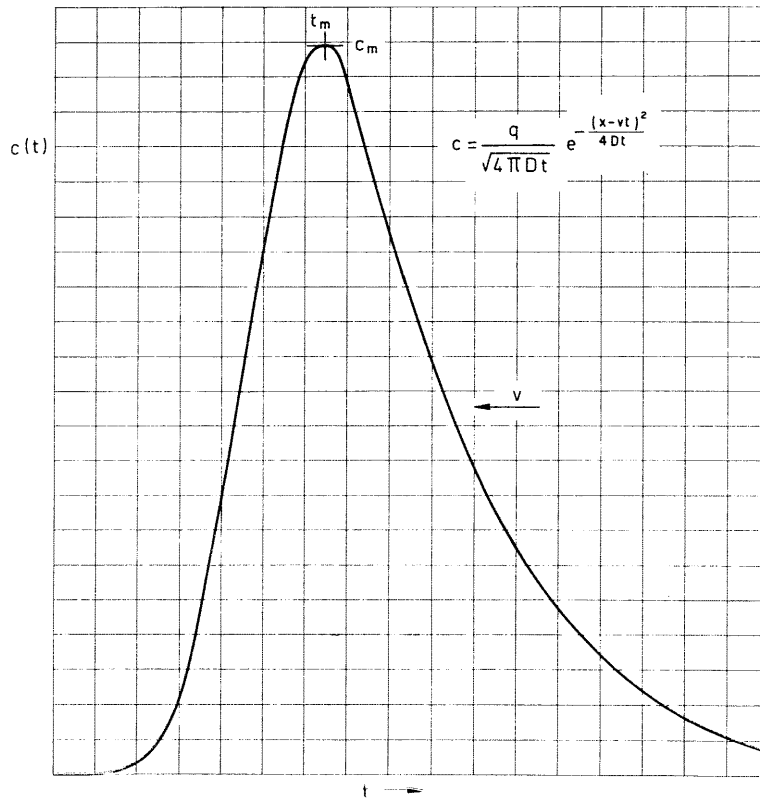


FIGURE 1

Habituellement quand on travaille avec des traceurs on ne procède à l'emploi des sources continues (injections continues) que si l'injection découle d'une source naturelle (p. ex. tritium dans la pluie). Dans les autres cas on préfère, au lieu d'employer des sources continues (l'emploi de ces sources est difficile à cause de la complexité des formulations mathématiques, ce qui empêche souvent de trouver les paramètres principaux) le système des sources impulsives. En ce cas nous disposons d'intéressantes solutions particulièrement applicables à des cours d'eau longs, mais de largeur limitée, c'est-à-dire pour un courant liquide bien délimité.

En injectant en un point $x = 0$ d'un courant, de longueur suffisamment élevée, de section constante S , une quantité de traceur Q telle que la densité initiale soit $q = Q/S$, la concentration

$c(t)$ du traceur en un point quelconque $x \neq 0$ et au temps t ($t = x/v$ au point d'injection), si v est la vitesse du courant (que nous supposons uniforme) et D la diffusivité, il en résulte que :

$$c = \frac{q}{\sqrt{4 \pi D t}} \frac{(x - v t)^2}{4 D t}$$

La courbe $c(t)$ présente une allure du type représenté dans la figure 1. De l'analyse de cette courbe, qu'on peut effectuer en lui comparant les différentes $c(t)$ mesurées au temps t , en un point donné et en traitant les résultats par les moindres carrés nous obtiendrons les paramètres q , D et v . On doit noter aussi les relations suivantes qui sont utilisables pour l'analyse des données d'observations :

$$c_{\max} \cong \frac{q}{\sqrt{4 \pi D t_{\max}}} \text{ pour } x = v t_{\max} \text{ et } \int_0^{\infty} c(t) dt = \frac{q}{v} = \frac{Q}{P} \text{ avec } P = \text{débit courant}^{(1)}.$$

L'analyse des courbes $c(t)$ permet d'obtenir de très importantes informations sur les rapports existant dans un système de réseaux de cours d'eau. Nous considérerons à présent seulement des réseaux de courants de type tubulaire pour lequel la $c(t)$ a la forme sus-mentionnée.

Si, soit dit en parenthèse, le courant est diffusé sur une surface, comme il arrive p. ex. dans le cas d'une nappe souterraine, la loi $c(t)$ a une allure différente.

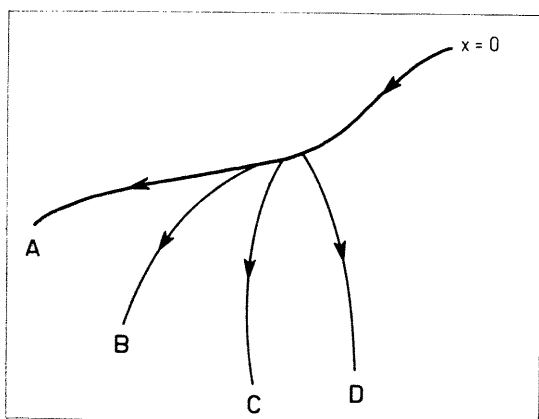


FIGURE 2

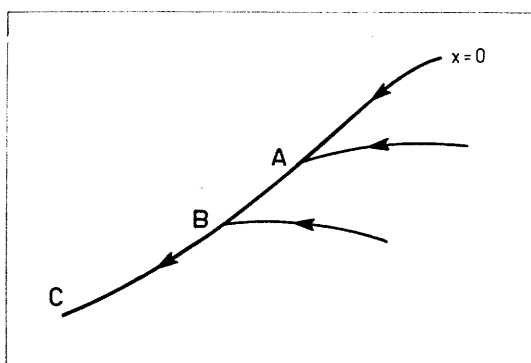


FIGURE 3

On suppose que le cours initial se ramifie en d'autres cours (fig. 2) dans lesquels, aux points A, B, C, D sont mesurées les $c(t)$. Soient P_A, P_B, P_C, P_D les débits en ces points ; supposons l'absence d'autres débits dans le système (le système est isolé).

Il résulte alors, si Q est la quantité du traceur injecté en $x = 0$:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C + Q_D \text{ où } Q_A = \int_0^{\infty} P_A(t) c_A(t) dt \text{ et les analogues .}$$

La méthode permet d'évaluer les rapports inconnus entre un point d'injection $x = 0$ et les points d'observation A, B, C, D (p. ex. dans le cas d'un cours souterrain s'immergeant dans $x = 0$ dans une région dans laquelle existent des résurgences A, B, C, D).

Si A, B, C, D sont alimentés seulement en $x = 0$, alors $Q_A + Q_B + Q_C + Q_D = Q$.

Si au contraire il existe d'autres points des résurgences on a $Q_A + Q_B + Q_C + Q_D < Q$.

Le rapport $\Sigma Q/Q$ nous donne le pourcentage de l'eau qui entre en $x = 0$ et alimente les résurgences connues A, B, C, D. Si au contraire, bien que le cours soit le même, il reçoit des apports ultérieurs (fig. 3). p. ex. en A et B, telles que $P_A > P_0, P_B > P_A$, on peut calculer les

(1) Pratiquement si a et b sont deux temps tels que $0 < a < b < \infty$ et tels que $c(a) \sim c(b) < \varepsilon$ (ε petit à volonté) l'intégrale $\int_0^{\infty} c(t) dt$ se réduit à $\int_a^b c(t) dt$.

intégrales suivantes (où v_A et v_B sont les vitesses moyennes obtenues de l'analyse de $c(t)$ en A et B)

$$v_A \int_0^{\infty} c_A(t) dt = q_A \quad v_B \int_0^{\infty} c_B(t) dt = q_B$$

Les intégrales $\int_0^{\infty} c(t) dt = q/v$ sont particulièrement importantes.

Si nous faisons les rapports $(q_A/v_A)/(q_0/v_0)$ ou $(q_B/v_B)/(q_0/v_0)$ nous obtiendrons les rapports en pourcentage entre le débit de A provenant de o et aussi entre le débit de B provenant de o. On peut ainsi connaître l'ampleur des apports qu'un cours donné reçoit sur son trajet.

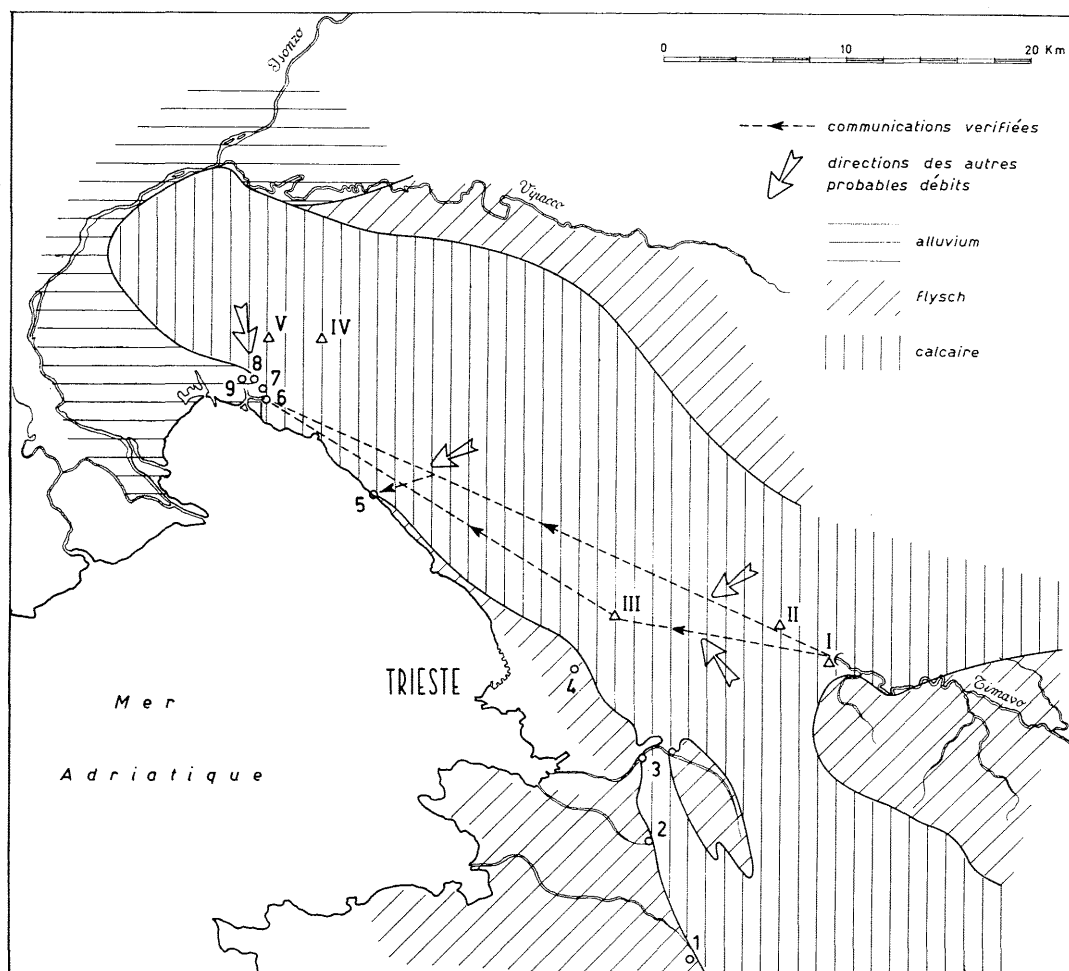


FIGURE 4

Les considérations qu'on vient d'exposer sont précieuses en général, même si elle ne donnent parfois qu'une première approximation. Elles ont été contrôlées et appliquées au fleuve Timavo, qui coule en partie dans le sous-sol, près de la ville de Trieste et sur lequel existaient déjà quelques études.

On a injecté dans les grottes de S. Canziano (n. 1 de fig. 4) ou le fleuve Timavo disparaît dans le sous-sol calcaire, 200 curies d'eau tritiée. On a effectué des observations sur les différentes

sources karstiques que l'on supposait être en rapport avec le Timavo même (petits cercles dans la fig. 4) et dans des grottes ou des puits profonds sur le fond desquels coule de l'eau (petits triangles dans la fig. 4).

Parmi les différentes grottes examinées on n'a trouvé du tritium, en grande quantité, que dans la grotte de Trebiciano. Parmi les différentes résurgences examinées on ne trouve du tritium qu'à Duino et à Aurisina. Toutes les autres sources considérées seraient donc indépendantes du Timavo.

Donc on a noté la sortie à Duino de 101 curies et à Aurisina de 1 curie. On n'a trouvé donc, sur 200 curies injectées, que 102 curies; cela signifie que l'eau de S. Canziano sort aussi par d'autres côtés (peut-être l'eau sort-elle aussi de sources sous-marines qui probablement existent entre 5 et 6 mais qui ne sont pas parfaitement connues). La vitesse moyenne apparente de l'eau entre S. Canziano et Duino a été de 2,41 cm/s et entre S. Canziano et Aurisina de 1,44 cm/s (cette vitesse est obtenue en effet par l'analyse de $c(t)$ où x n'est pas la valeur réelle de la distance entre les points d'injection et d'observation, qui est inconnue, mais seulement la distance à vol d'oiseau).

A l'époque des mesures (juillet, août 1962) le débit à S. Canziano était d'environ 50 000 m³/j, à Aurisina de 15 000 m³/j et à Duino de 900 000 m³/j.

Les rapports entre les intégrales $\int_0^{\infty} c(t) dt$ ont montré qu'environ 3 % seulement des débits de Duino et 3,5 % de l'eau de Aurisina dérivent de San Canziano. On démontre aussi qu'à l'intérieur du Karst, il arrive d'énormes dilutions de l'eau entrant à S. Canziano par mélange avec des eaux de différente provenance.

Les expériences pratiques ont été effectuées avec la collaboration de l'Institut hydrométéorologique et de l'Institut nucléaire « I. Stefan » de Lubiana et de l'Institut hydraulique de l'Université de Trieste. L'Agence internationale de l'Energie atomique de Vienne et le Comitato nazionale per l'Energia nucleare de Rome ont donné des contributions financières pour l'expérience. Nous remercions vivement tous ces Instituts pour leur collaboration.
