

ÉTAT ACTUEL DES MÉTHODES DE DILUTION POUR LA MESURE DES DÉBITS DANS LES CONDUITES EN CHARGE

Communication
présentée au Comité technique
de la Société Hydrotechnique de France
le 21 mars 1969

PAR J.-P. SILBERSTEIN *

S'il est possible, à l'heure actuelle, de mesurer des grandeurs parfois très difficilement accessibles avec des précisions dépassant souvent l'entendement, il est troublant de constater que la mesure du débit d'un fluide reste toujours une opération difficile.

Obtenir une telle mesure avec une précision relative de 1 % nécessite dans la plupart des cas une mise en œuvre lourde et coûteuse. Qui plus est, ce matériel, introduit dans la conduite, peut perturber lui-même la grandeur à mesurer.

Seule la méthode résultant de la définition même d'un débit et consistant à mesurer la quantité de fluide écoulé pendant un temps donné, permet d'accéder à la grandeur débit avec une précision importante. Malheureusement, ce procédé n'est guère utilisable si ce n'est en tant que méthode d'étalonnage en laboratoire.

Dans le cas des conduites en charge, les méthodes de dilution, encore peu répandues, offrent de nombreux avantages.

Trois méthodes de mesure peuvent ainsi être utilisées. Deux d'entre elles, appelées méthodes d'intégration et méthode d'injection à débit constant, ont ceci en commun qu'elles nécessitent la mesure de la concentration en traceur, en aval de son point d'injection.

Ces deux méthodes utilisées avec des traceurs chimiques ou colorés sont à proscrire dans le cas de mesure en conduite, car elles nécessiteraient de pratiquer des trous dans la conduite aux points de prélèvement. Utilisées avec un traceur radioactif, elles sont là encore difficilement exploitables car, bien que les sondes puissent être extérieures à la

conduite, la quantité de traceur est difficilement dosable avec précision, et d'autre part, le traceur disparaît spontanément dans le temps par décroissance radioactive.

Par contre, une troisième méthode, celle du nuage radioactif, trouve dans le cas de conduites fermées tout son intérêt. Ici, la quantité de traceur injecté importe peu, pour autant qu'on puisse le détecter dans les sections de mesure.

Préconisée en 1923 par Allen et Taylor, cette méthode a fait, depuis lors, l'objet de nombreuses études tant théoriques qu'expérimentales. Il est d'ailleurs amusant de remarquer que si l'imagination des chercheurs s'est révélée fertile en résultats, elle l'a été presque autant sur le plan de la terminologie. Les études faites dans ce domaine portent en effet des titres aussi variés que méthode d'Allen, de l'écran salin, des deux pics, en langue française, de pulse dilution method, peak tuning pour les anglo-saxons.

Nous ajouterons à cette liste déjà longue la méthode du nuage radioactif, car elle nous semble coller mieux à la réalité.

Mais quarante années d'efforts n'ont pas permis aux expérimentateurs et théoriciens de proposer une technique de mesure véritablement opérationnelle. Il manquait un maillon à la chaîne. Ce n'est que tout récemment, avec l'apparition de générateurs de solutions radioactives que la méthode du nuage radioactif a pu révéler ses véritables possibilités. Nous verrons pourquoi lors de la description de ce générateur.

Mais, auparavant, voyons le principe de la méthode.

Supposons qu'il soit possible de déposer dans une section droite d'une conduite une quantité don-

* E.D.F., Direction des Etudes et Recherches, Chatou.

née de traceur avec une distribution uniforme. Supposons de plus que la vitesse du fluide est constante en tout point de la section et que le traceur ne diffuse pas dans le fluide.

Dès lors, la mesure du temps que met cette tranche de fluide marqué entre deux sections, dites sections de mesure, situées à distance l connue l'une de l'autre, permet de calculer la vitesse du fluide, donc, en supposant connue la section, le débit à mesurer.

Malheureusement, il faut être réaliste et tenir compte :

1° de la distribution non uniforme de vitesse dans une section;

2° de l'impossibilité de marquer une tranche infiniment mince de fluide, avec une répartition homogène de traceur;

3° de la diffusion turbulente qui tend à diluer le nuage initial, tant radialement que axialement.

Nous allons montrer néanmoins que si l'on opère la détection du nuage suffisamment loin en aval du point d'injection, d'une part, et si l'on mesure, d'autre part, la vitesse du centre de gravité temporel du nuage, alors, malgré tout, la vitesse ainsi mesurée est bien la vitesse moyenne du fluide, à partir de laquelle on peut donc calculer le débit.

Les équations de la diffusion turbulente

Notations.

- R rayon de la conduite;
- D diamètre de la conduite;
- r rayon polaire;
- θ angle polaire;
- x abscisse mesurée le long de la conduite;
- t variable temporelle;
- u vitesse locale;
- U vitesse moyenne;
- u_* vitesse de frottement;
- c concentration locale;
- c_m concentration moyenne;
- $Z = r/R$ rayon polaire réduit;
- $\xi = x/R$ abscisse réduite;
- $\xi_1 = \frac{x - Ut}{R}$ abscisse réduite pour un observateur se déplaçant à la vitesse moyenne du fluide le long de la conduite;
- $\rightarrow \tau = \frac{u_* t}{R}$ variable temporelle réduite;
- $n = \frac{U}{u_*}$
- K_1 coefficient de diffusion radiale;
- K_2 coefficient de diffusion tangentielle;
- K_3 coefficient de diffusion axiale.

Equation de la diffusion.

Soit \vec{A} le transfert de matière sortant de la surface entourant un volume élémentaire de concentration c , l'équation de continuité s'écrit :

$$\text{div } \vec{A} + \frac{\partial c}{\partial \tau} = 0 \tag{1}$$

\vec{A} résulte d'une part de la convection, d'autre part de la diffusion turbulente.

Les composantes de la convection sont :

- composante radiale : 0,
- composante tangentielle : 0,
- composante axiale : $(u/u_*)c$.

En fait, on adoptera la valeur moyenne $(U/u_*)c$.

Les composantes du terme de diffusion turbulente sont proportionnelles au gradient de la concentration :

- composante radiale : $-K_1 (\partial c / \partial Z)$,
- composante tangentielle : $-K_2 (\partial c / Z \partial \theta)$,
- composante axiale : $-K_3 (\partial c / \partial Z)$.

En s'appuyant sur le fait que les systèmes turbulents ont une forte tendance à l'isotropie (Sir G.I. Taylor, « The dispersion of water in turbulent flow through a pipe », « British Hydromechanics Research Association, K. J. Whiteman, mars 1955 »), on écrira :

$$K_1 = K_2 = K_3 = K(Z)$$

Si l'on suppose une symétrie axiale : $(\partial c / \partial \theta) = 0$ et dès lors :

$$\text{div } \vec{A} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u}{u_*} c - K_1 \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(-K_2 \frac{\partial c}{\partial Z} \right)$$

En négligeant la diffusion axiale devant la convection, l'équation pourra s'écrire :

1° dans un système de coordonnées fixes par rapport à la conduite :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(K \frac{\partial c}{\partial Z} \right) \tag{2}$$

2° dans un système de coordonnées se déplaçant à la vitesse moyenne U du fluide dans la conduite :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{U}{u_*} \frac{\partial c}{\partial \xi} = \frac{1}{Z} \frac{\partial}{\partial Z} \left(ZK \frac{\partial c}{\partial Z} \right) \tag{3}$$

Vitesse de déplacement du centre de gravité

L'expression de l'abscisse temporelle du centre de gravité d'un nuage quelconque, enregistré par une sonde fixée sur la conduite est :

$$OG = \frac{\int_0^1 2 \pi Z \int_0^\infty ct dt dZ}{\int_0^1 2 \pi Z \int_0^\infty c dt dZ}$$

Supposons, et nous montrerons plus loin que ceci est la réalité, que pour toute valeur de x supérieure à une valeur donnée L , la concentration est uniforme dans une section, soit :

$$\frac{\partial c}{\partial Z} = 0$$

Appelons c_m la valeur de cette concentration moyenne. c_m sera donc telle que :

$$c_m = \int_0^1 2 Z c dZ$$

L'équation de la diffusion devient :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = 0$$

Multiplions les deux membres par $Z dZ$ et intégrons de 0 à 1 :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^1 Z c dZ + \frac{\partial}{\partial x} c \int_0^1 u Z dZ = 0 \quad (4)$$

Soit, en remarquant que :

$$U = \int_0^1 2 u Z dZ$$

Si U est la vitesse moyenne de l'écoulement :

$$\frac{\partial c_m}{\partial t} + U \frac{\partial c_m}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

Posons :

$$f = \int_0^\infty e^{-\mu t} c_m dt$$

On remarquera que :

$$f(\mu = 0) = \int_0^\infty \int_0^1 c Z dZ = D$$

$$\frac{\partial f}{\partial \mu}(\mu = 0) = - \int_0^\infty \int_0^1 ct Z dZ = N$$

et que dès lors :

$$OG = - \frac{N}{D}$$

Cette transformation est celle de Laplace et l'équation (5) devient :

$$\mu f + U \frac{\partial f}{\partial x} = 0$$

dont la solution est :

$$f = a e^{\mu[(x-x_0)/U]}$$

d'où :

$$\frac{\partial f}{\partial \mu} = -a \frac{x-x_0}{U} e^{\mu[(x-x_0)/U]}$$

avec $x_0 \geq L$

donc :

$$f(\mu = 0) = a$$

$$\frac{\partial f}{\partial \mu}(\mu = 0) = -a \frac{x-x_0}{U}$$

d'où :

$$OG = \frac{x-x_0}{U}$$

Donc, pour toute valeur de $x > L$, en aval de laquelle la concentration est homogène dans une section, le centre de gravité temporel du nuage se déplace à la vitesse moyenne U de l'écoulement.

Distance de bon mélange L

Nous avons admis, pour mener à bien le calcul ci-dessus, qu'en aval d'une section située à une distance L du point d'injection, le mélange devenait homogène dans une section. Cette distance, nous l'appellerons distance de bon mélange, et nous allons démontrer qu'elle existe.

Reprenons l'équation de la diffusion, écrite cette fois-ci dans un système d'axes se déplaçant à la vitesse moyenne du fluide dans la conduite :

$$\frac{1}{Z} \frac{\partial}{\partial Z} \left(Z K \frac{\partial c}{\partial Z} \right) = \frac{u}{u_s} \frac{\partial c}{\partial \xi} + \frac{\partial c}{\partial \tau} \quad (3)$$

Supposons que la concentration est la même dans toutes les sections de la conduite [$(\partial c / \partial \xi) = 0$], et que le coefficient de diffusion transversal est parabolique, soit :

$$K = k Z (1 - Z)$$

L'équation (3) devient :

$$\frac{1}{Z} \frac{\partial}{\partial Z} \left[Z^2 (1 - Z) \frac{\partial c}{\partial Z} \right] = \frac{1}{k} \frac{\partial c}{\partial \tau} \quad (6)$$

Cherchons une solution de la forme :

$$c = c_m + e^{-\alpha \tau} F(Z)$$

en appelant toujours c_m la concentration moyenne dans une section.

L'équation (6) devient (en posant $r = \alpha/k$) :

$$(Z - Z^2) F'' + (2 - 3Z) F' + rF = 0$$

Or, on connaît une solution de l'équation différentielle :

$$(Z - Z^2) F'' + [c - L(a + b + 1)Z] F' - abF = 0$$

Soit, en prenant $c = 2$, $a + b = 2$, $ab = -r$:

$$F_n(Z) = 1 - \frac{r}{2} Z - \frac{r(3-r)}{2 \times 3} \frac{Z^2}{2!} \dots - \frac{r(3-r)(8-r) \dots [n(n+2) - r] Z^{n+1}}{(n+2)! (n+1)!}$$

d'où la solution cherchée :

$$c = c_m + \sum d_n e^{-\alpha_n \tau} F_n(Z)$$

avec $\alpha_n = rn/K$

En exprimant que :

$$c_m = \int_0^1 2 \pi Z c dZ,$$

on montre que r peut prendre toute valeur de la forme :

$$r_n = n(n+2)$$

avec $n = 1, 2, 3, \dots$

Considérons maintenant une distribution initiale de concentration telle que :

$$c = A^2 \text{ pour } 0 < Z < 1/A$$

$$c = 0 \text{ pour } 1/A < Z < 1$$

On peut aisément établir une condition d'orthogonalité :

$$\int_0^1 Z F_n F_p dZ = 0$$

pour $n \neq p$;
qui, avec les conditions initiales choisies, nous permet de calculer :

$$a_n = \frac{A^2 \int_0^{1/A} Z F_n(Z) dZ}{\int_0^1 Z F_n^2 dZ}$$

Calculons les premiers termes de c et leurs coefficients; et les coefficients des termes d'amortissement :

$$F_1 = 1 - \frac{3}{2} Z$$

$$F_2 = 1 - 4 Z + \frac{10}{3} Z^2$$

$$F_3 = 1 - \frac{15}{2} Z + 15 Z^2 - \frac{10}{3} Z^3$$

$$a_1 = 8 \left(1 - \frac{1}{A} \right)$$

$$a_2 = \frac{9}{2} \left(6 - \frac{16}{A} + \frac{10}{A^2} \right)$$

$$\alpha_1 = 3 K$$

$$\alpha_2 = 8 K$$

Soit, pour différentes valeurs de A , les valeurs suivantes :

A	a_1	a_2
10	7,2	19,35
100	7,92	26,275
1 000	7,992	26,928
∞	8	27

$A \rightarrow \infty$ correspond à une injection ponctuelle.

En prenant pour K la valeur 0,4 donnée par Taylor, calculons les termes d'amortissement pour différentes valeurs de τ :

τ	$e^{-1,2\tau}$	$e^{-3,2\tau}$
1	0,301	0,0407
2	0,0907	0,00166
3	0,027	0,0000677
10	0,00000614	

On constate donc, qu'en pratique, tous les termes sont petits devant le premier et qu'une majorante de son coefficient est 8.

D'où :

$$c \approx c_m \{ 1 + 8 [1 - (3/2) Z] e^{-1,2\tau} \}$$

Calculons alors l'écart de concentration entre l'axe et la paroi de la conduite :

$$\Delta c = \frac{c_0 - c_1}{c_m} = 12 e^{-1,2\tau}$$

On constate que cet écart tend exponentiellement vers 0, ce qui prouve le bien fondé de l'hypothèse de bon mélange.

Expression pratique de L

Ce calcul va nous permettre d'évaluer L .
Calculons le temps τ au bout duquel :

$$\Delta c = X 10^{-2}$$

$$12 e^{-1,2\tau} = X 10^{-2}$$

Or :

$$\tau = \frac{Ut}{nR} = \frac{2L}{nD} \quad \text{si } n = \frac{U}{u_*}$$

Si L est la distance parcourue par le liquide se déplaçant à la vitesse moyenne U pendant le temps τ :

$$12 e^{-[(1,2 \times 2L)/nD]} = X 10^{-2}$$

$$\frac{L}{D} = 2,9542 n - \frac{n}{2,4} \ln X$$

Donc, la distance de bon mélange, exprimée en nombre de diamètres est :

$$\frac{L}{D} = 2,9542 n - \frac{n}{2,4} \ln X$$

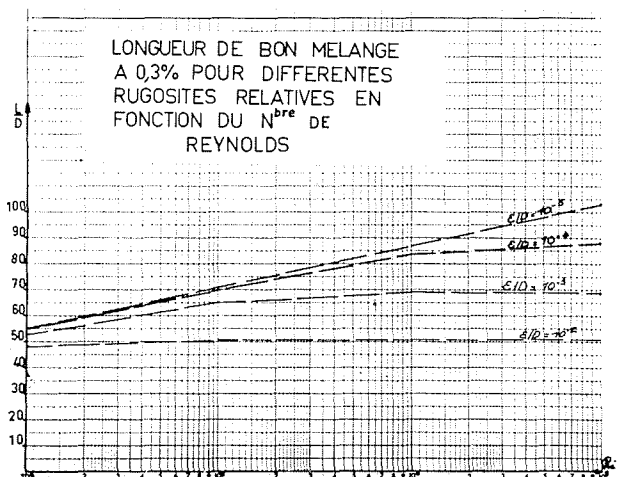
soit pour $X = 1$:

$$\frac{L}{D} = 3 n$$

Il est facile d'établir que si K_s est le coefficient de Strickler :

$$n = 0,25 K_s D^{1/6}$$

D'autre part, on notera λ le coefficient de perte de charge linéaire. Dès lors, la longueur de bon mélange à 1 % près pourra s'écrire :



$$\frac{L}{D} = 3n$$

$$\frac{L}{D} = 0,75 K_s D^{1/6}$$

$$\frac{L}{D} = 3 \sqrt{\frac{8}{\lambda}}$$

Pour des Reynolds variant de 10^4 à 10^7 et pour les rugosités relatives variant de 10^{-2} à 10^{-5} , des courbes permettent de prévoir L/D pour obtenir des mélanges à 0,3, 1, 5 %.

Dans la pratique, les conduites fermées habituelles conduisent à des distances de bon mélange (à 1 %) de l'ordre de 75 diamètres dans le cas d'une injection centrale.

Erreur systématique de la méthode en fonction de l'homogénéité du mélange

Considérons que dans la section de mesure choisie, le mélange est réalisé à X %.

Nous venons de montrer que c peut s'écrire :

$$c = c_m \left[1 + 8 \left(1 - \frac{3}{2} Z \right) e^{-1,2r} \right]$$

et :

$$\Delta c = 12 e^{-1,2r} = X 10^{-2}$$

soit :

$$c = c_m \left[1 + 8 \left(1 - \frac{3}{2} Z \right) \frac{X}{12} 10^{-2} \right]$$

$$c = c_m \left[1 + \frac{2}{3} \left(1 - \frac{3}{2} Z \right) \varepsilon \right]$$

en posant $\varepsilon = X 10^{-2}$

La loi de répartition des vitesses dans la section peut s'écrire d'autre part :

$$u = U \left[1 + \frac{1}{nk} \left(\frac{3}{2} + \log(1 - Z) \right) \right]$$

Dans ce cas, l'équation différentielle (4) devient :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^1 Z c dZ + \frac{\partial}{\partial x} \int_0^1 U c_m Z \left[1 + 8 \left(1 - \frac{3}{2} Z \right) \varepsilon \right] \left[1 + \frac{1}{nk} \left(\frac{3}{2} + \log(1 - 2) \right) \right] dZ = 0$$

Par définition :

$$c_m = \int_0^1 2 Z c dZ$$

donc, le 1^{er} terme de l'équation est :

$$\frac{1}{2} \frac{\partial c_m}{\partial t}$$

le 2^e terme se calcule aisément et s'écrit :

$$\frac{1}{2} U \frac{\partial c_m}{\partial x} \left(1 + \frac{2 \varepsilon}{9 kn} \right)$$

L'équation (5) s'écrit donc :

$$\frac{\partial c_m}{\partial t} + U \left(1 + \frac{2 \varepsilon}{9 kn} \right) \frac{\partial c_m}{\partial x} = 0$$

équation identique à (5) qui implique que le centre de gravité du nuage n'a plus la vitesse U, mais :

$$U \left(1 + \frac{2 \varepsilon}{9 kn} \right)$$

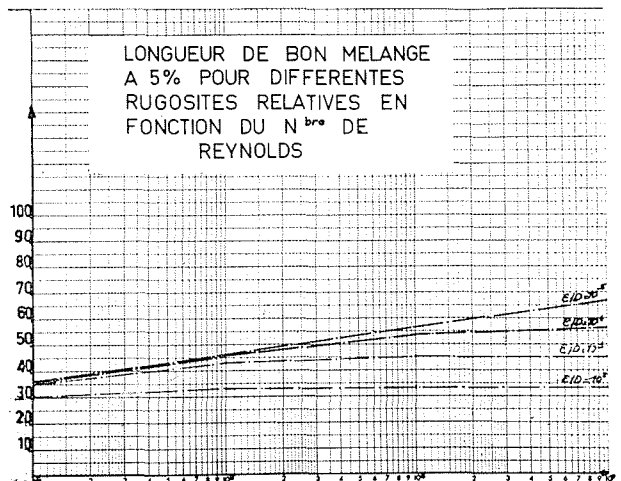
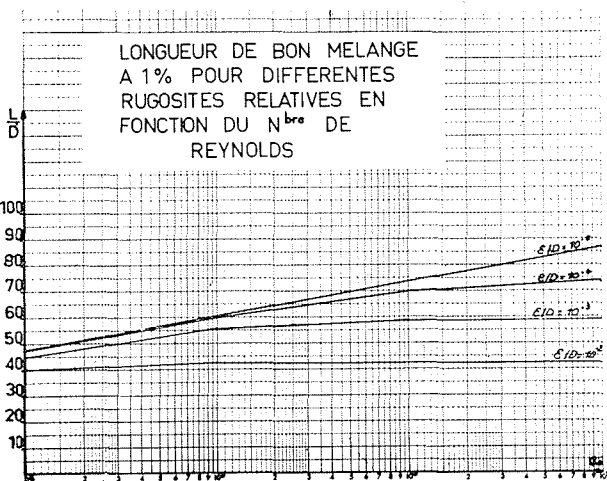
Donc, l'erreur de mesure sur U est :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{2 \varepsilon}{9 kn} = \frac{2}{9 kn} X 10^{-2}$$

Si $n = 20$ et $k = 0,4$:

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{1}{36} x 10^{-2}$$

Donc, dans une section où l'écart de concentration entre le centre et la paroi est de X %, l'erreur systématique sur la mesure de la vitesse moyenne du fluide par détection de la vitesse du centre de gravité temporel d'un nuage marqué est d'environ X/40 % par excès.



Cas de détecteurs extérieurs

Dans ce cas, il faut considérer l'évolution de la concentration que voit le détecteur, c'est-à-dire faire intervenir un coefficient de pondération $p(x, z, \theta)$ fonction de l'angle solide qui intéresse le détecteur et de l'auto-absorption du rayonnement émis par le traceur, par le fluide lui-même.

Dès lors, l'abscisse temporelle du centre de gravité d'un nuage sera :

$$OG' = \frac{\int_v \int_0^\infty pct \, dt \, dv}{\int_v \int_0^\infty pc \, dt \, dv}$$

Soit :

$$OG' = \frac{\int_v p [(x - x_0)/u] \, dv}{\int_v p \, dv}$$

D'après les calculs précédents :

$$\int_0^\infty c \, dt = a$$

$$\int_0^\infty ct \, dt = a \frac{x - x_0}{u}$$

Considérons deux sondes situées à distance l l'une de l'autre, positionnées aux points d'abscisse ξ_1 et ξ_2 , et géométriquement semblables vis-à-vis de l'écoulement.

On posera : $x = \xi + \alpha$:

$$OG_2 - OG_1 = \frac{\int_v ap \frac{\xi_2 + \alpha - x_0}{u} \, dv - \int_v ap \frac{\xi_1 + \alpha - x_0}{u} \, dv}{\int_v ap \, dv}$$

$$= \frac{\xi_2 - \xi_1}{U} \frac{\int_v ap \, dv}{\int_v ap \, dv}$$

$$= \frac{\int_v apa \, dv - \int_v apa \, dv}{\int_v ap \, dv}$$

$$= \frac{\xi_2 - \xi_1}{u} = \frac{l}{U}$$

Donc, le résultat est conservé : la vitesse de déplacement du centre de gravité mesurée entre les deux sondes, supposées semblables, est la vitesse moyenne du fluide dans la conduite.

Pratique de la méthode

Dans les développements précédents, il n'a pas été fait état de la qualité du traceur, mais il a été implicitement admis que l'on devait mesurer l'évolution dans le temps de la concentration moyenne dans une section de la conduite.

L'utilisation d'un produit chimique comme traceur, ou d'un colorant nécessiterait de percer la conduite pour pouvoir mesurer les concentrations. Bien au contraire, si le traceur est un radioélément, il est possible, si celui-ci est bien choisi, d'en détecter la concentration à travers la conduite.

Le choix de ce radioélément doit être fait en fonction des impératifs suivants :

- énergie suffisante pour pouvoir être détecté à travers la conduite;
- période suffisamment longue pour avoir le temps de faire la mesure, suffisamment courte pour que l'activité totale injectée soit ramenée à une valeur inférieure à la C.M.A. légale avant rejet.

Jusqu'à ces dernières années, le problème était difficile à résoudre. Les radioéléments utilisés devaient être transportés de leur lieu de fabrication au lieu d'utilisation et cela nécessitait de les choisir avec des périodes relativement longues, de prévoir de plus, les dates des essais en fonction des dates de fabrication, d'utiliser des quantités faibles puisque, entre l'instant d'utilisation et le moment du rejet du fluide à mesurer, la quantité injectée n'avait, vu la période radioactive assez grande, pas le temps de décroître de façon notable.

Malgré ces difficultés, de nombreux essais ont été faits, mettant en jeu des radioéléments tels que l'I₁₃₁, le Br₈₂, le Na₂₄. Mais les difficultés opératoires restaient grandes et l'intérêt de la méthode, limité.

L'apparition, il y a quelques années, de générateurs de radioéléments à période courte a permis de redonner un essor à cette méthode.

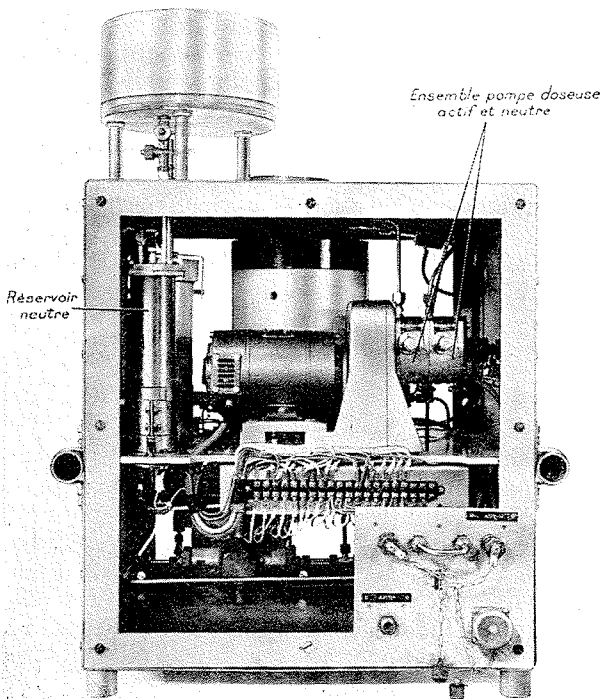
Le principe de ces générateurs (parfois appelés « vache ») est très simple. Sur une résine échangeuse d'ions est déposé un radioélément « père » à période radioactive grande. Ce « père » donne par filiation un radioélément de période courte. La résine est choisie de telle sorte qu'un éluant qui la traverse entraîne le seul élément « fils ».

Plusieurs couples Père-Fils sont envisageables et parmi ceux-ci, nous avons utilisé essentiellement le couple Cs — Ba. Dans celui-ci, la période du Père (Cs₁₃₇) est d'environ trente ans, celle du Fils (Ba₁₃₇) de deux minutes et demie.

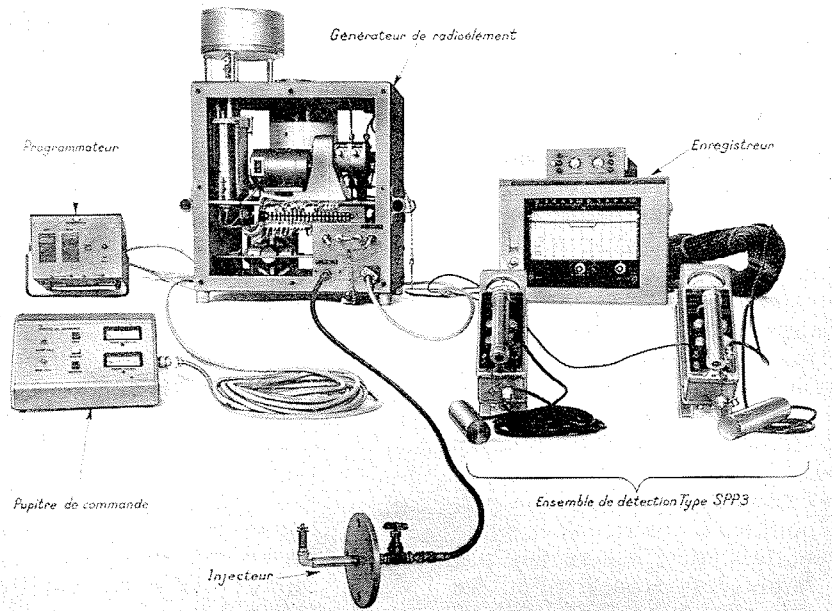
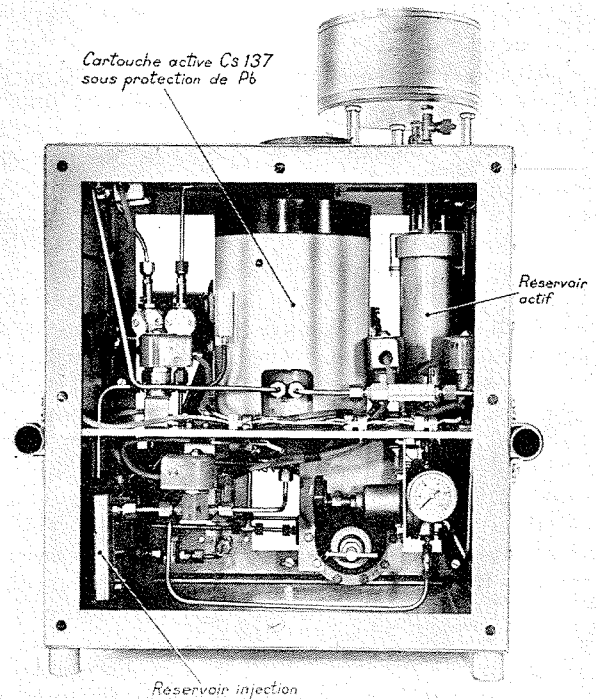
Ces chiffres sont très intéressants car la longévité de la cartouche est fonction de la période de l'élément Père (donc nous disposons d'un appareil pouvant fonctionner longtemps sans recharge), et la période de l'élément Fils est pratiquement l'idéal pour les mesures à effectuer. En effet, le temps total d'une mesure entre l'instant de l'injection, et la détection du nuage dans la deuxième section de mesure est dans la pratique comprise entre quelques dizaines de secondes et quelques minutes.

De plus, on calcule qu'un quart d'heure après l'essai, l'activité restante est ramenée à 1/1 000 de l'activité injectée. Dans le cas cité du couple Cs — Ba, l'éluant peut être de l'eau ou, pour des problèmes d'encrassement de filtres, du CO₂Ca, produit à très bon marché et sans aucun danger.

Un autre couple est disponible si les temps de mesures doivent être beaucoup plus grands : le couple Sn — In. La période de l'élément Fils est de l'ordre de une heure et demie. Mais, dans ce cas, le Père a une période de quatre mois, ce qui nécessite une recharge fréquente de la cartouche et, de plus, l'éluant doit être une solution décimale d'acide



4/ 5/



6/

chlorhydrique, ce qui présente des inconvénients. Quoi qu'il en soit, voyons le schéma de fonctionnement d'un tel générateur.

Une pompe doseuse fait circuler, en permanence, le liquide éluant à travers la résine chargée en élément Père. Lorsqu'une « traite » est désirée, ce liquide, chargé d'éléments Fils est dirigé par une électrovanne dans un réservoir auxiliaire.

Le nombre de coups de pompe, que l'on peut prédéterminer, définit le volume qui sera donc stocké. Quand ce nombre est atteint, une autre électrovanne permet d'introduire une quantité de liquide neutre dans le réservoir auxiliaire pour augmenter le vo-

lume de la solution active disponible. Dès lors, se trouve prêt à être utilisé un volume fixé de solution, d'activité globale prévue.

Le réservoir auxiliaire débouche à travers une électrovanne dans un tube flexible relié à l'injecteur. Celui-ci est constitué par une soupape tarée à une faible pression.

La mise à l'air libre du réservoir auxiliaire en même temps que l'ouverture de la vanne située au-dessous de lui permet à la solution de descendre par gravité jusqu'à la soupape. Une pression d'azote introduite dans le réservoir pousse alors la solution dans la conduite. Cette injection est donc bru-

tale, sans être cependant infiniment brève, mais on doit remarquer que la détection du nuage sera d'autant plus aisée que le nuage est bref pour une activité donnée.

Toutes ces opérations sont automatiques; le pupitre de commande comportant la mise en marche du générateur, le départ du cycle d'injection, et quelques voyants permettant de suivre le bon déroulement des opérations, se trouve à une dizaine de mètres du générateur, mettant l'opérateur à l'abri de l'inévitable mais faible dose du rayonnement issu du générateur pendant son fonctionnement.

Il faut noter en effet que les pompes étant stoppées, cette dose est inférieure au bruit de fond généralement observé dans nos régions.

Une précaution supplémentaire est de s'assurer qu'aucune quantité d'élément Père ne s'échappe du générateur. Celui-ci, vu sa période importante, risquant de contaminer d'une manière non négligeable et surtout durable, le fluide se trouvant dans la conduite.

Des dosages ont été faits montrant qu'après une dizaine d'injections, l'activité dans l'eau circulant en circuit fermé était 1 000 fois inférieure à la C.M.A.

Cet appareil présente donc toutes les garanties quant à un risque éventuel de contamination radioactive ou toxique.

Examinons maintenant les appareils de détection. Ceux-ci sont constitués de détecteurs à scintillations. En effet, ce type est le plus adapté, permettant, outre un bon rendement, de ne pas être influencé par les inévitables rayonnements parasites, en éliminant tout comptage de particules d'énergie inférieure à celle du traceur utilisé.

Ces sondes sont reliées à un boîtier autonome fonctionnant sur piles et capable d'une part de fournir l'alimentation de la sonde, d'autre part, d'intégrer les impulsions reçues dans un icromètre linéaire à plusieurs gammes.

Les sorties des icromètres, branchées sur un enregistreur potentiométrique à deux pistes, permettent l'enregistrement des deux nuages. Une base de temps s'inscrit en même temps sur cet enregistrement et permet la mesure du temps écoulé entre le passage des centres de gravité des deux nuages.

Un enregistrement simultané des impulsions délivrées par les détecteurs sur bande magnétique permet d'autre part, de dépouiller *a posteriori*, et d'une façon plus fine, les résultats. Ceci est réalisé par échantillonnage de ces impulsions, transcription des valeurs des échantillons sur bande perforée, et traitement par ordinateur.

Un ensemble de dépouillement automatique est en cours de réalisation qui permettra de délivrer la valeur du temps de propagation du centre de gravité, sur les lieux mêmes de la mesure et dans un temps égal une fois et demie le temps mis pour faire la mesure elle-même.

De nombreuses mesures de débits ont été réalisées à ce jour, dans des conditions plus ou moins favo-

rables, permettant de confirmer les résultats théoriques exposés.

Tout d'abord, des mesures ont été faites sur un circuit expérimental de diamètre 350 mm muni d'un dispositif de mesure de débit de précision 1/1 000. Sur ce circuit, nous avons pu vérifier :

1° la validité de l'hypothèse sur la distance de bon mélange;

2° l'erreur commise sur la mesure de débit. Cette erreur totale, dans de bonnes conditions de mesure, c'est-à-dire au-delà de la distance de bon mélange était toujours inférieure ou égale à 1 %.

Des essais ont été faits de plus :

— sur la conduite forcée de Sassenage ($\varnothing = 900$) et ont conduit à des résultats entachés d'une erreur de 1 %;

— sur la conduite rectangulaire de la turbine pompe alimentaire de la centrale de Porcheville B, conduite ayant une section d'environ 10 m², débitant à pleine charge 22 m³/s environ. Dans ce cas, le 1^{er} détecteur se trouvait à quelques diamètres du point d'injection et les résultats ont été entachés d'une erreur de l'ordre de 6 % par rapport à des mesures faites à l'aide d'une batterie de moulinets.

Nous avons été amenés, pour des cas pratiques à vérifier l'influence de coudes pouvant se trouver, soit entre le point d'injection et la 1^{re} section de mesure, soit entre les deux sections de mesure. Le 1^{er} cas offre un avantage, c'est de diminuer la distance de bon mélange d'environ 20 diamètres. Quant au deuxième cas, coude entre les deux sections de mesure, aucune influence sur la précision de la méthode n'a pu être décelée.

Un cas pratique de mesure de débits dans des tubes de faible diamètre (1 pouce), alimentés à partir d'un collecteur de diamètre 200 ou 300 mm, nous a conduit à injecter le traceur dans le collecteur, et à placer les sondes de mesures sur le petit tube. La mesure est alors très facile à réaliser, sans introduction de perte de charge dans le tube, et la précision obtenue de l'ordre de 1 ou 2 %.

Ainsi, cette méthode de mesure restée longtemps inexploitée par manque de commodité, est redevenue, avec le générateur de radioéléments, une méthode de mise en œuvre facile, donnant des débits avec une précision semblable à celle donnée par les appareils classiques. Elle offre, sur ces appareils classiques, de nombreux avantages dont les plus importants sont : facilité de mise en œuvre, application à toutes sortes de liquides, possibilité de mesurer des débits dans les nombreux petits tuyaux des installations industrielles modernes, tels les tubes de réfrigération de caissons des réacteurs nucléaires dont on ne savait jusqu'alors équilibrer les débits, échangeurs, tubes écrans des générateurs de vapeur. Un projet de recommandation de l'ISO est d'ailleurs en cours de rédaction, qui précisera les règles correspondant aux meilleures conditions d'emploi.

Discussion

Président : M. VALIRON

M. le Président ouvre la séance, dont il rappelle l'ordre du jour, et donne la parole à M. SILBERSTEIN.

M. le Président remercie M. SILBERSTEIN de son intéressant exposé qui ouvre des horizons nouveaux dans le domaine des mesures de débits dans les conduites.

M. DOLLFUS demande si l'on enregistre sur la bande du magnétophone un ensemble de sigaux donnant une « base de temps ».

M. SILBERSTEIN répond que l'on a utilisé un magnétophone dont la vitesse était bien constante. Il signale que, dans un autre cas, pour un enregistrement analogique, on a ajouté au dispositif décrit un système inscrivant sur la bande une « base de temps » afin de pallier toute irrégularité éventuelle du déroulement de celle-ci.

M. LIÈVRE voudrait savoir si la position du point d'injection dans la conduite a une influence sur la précision de la mesure.

Le point d'injection peut être choisi n'importe où, dit M. SILBERSTEIN, par exemple à l'emplacement d'un trou d'homme de la conduite.

M. BRACHET pose les deux questions suivantes :

1. Quel est le coût d'une opération de mesures, exécutée par la méthode décrite ?
2. A-t-on comparé cette méthode à celle qui consisterait à utiliser des ultra-sons (si la précision recherchée n'est pas aussi grande que celle obtenue par la méthode de dilution) ?

M. SILBERSTEIN répond :

1. Le coût de l'opération n'a pas été estimé; on sait seulement que le générateur à radio-éléments revient actuellement à 20 000 F environ et qu'il peut fonctionner trente ans sans recharge (la charge ne coûte que 1 000 à 2 000 F).
2. Aucune comparaison n'a été faite avec les méthodes de mesures par ultra-sons; ces dernières ont l'inconvénient de nécessiter l'implantation dans la conduite de deux ou quatre générateurs et capteurs d'ultra-sons (selon les méthodes).

M. PARSY pose à M. SILBERSTEIN le problème suivant :

« Il s'agit d'une double conduite de 700 de diamètre, d'environ 17 km de longueur et de 80 ans d'âge (donc vraisemblablement avec fuites), dont on connaît seulement les deux extrémités; les pompes sont anciennes et les rendements ne sont pas ceux d'origine. Comment peut-on connaître les débits actuels et le débit consécutif à l'installation d'une nouvelle pompe ? »

M. SILBERSTEIN pense que si l'on peut opérer sur une longueur de conduite d'une centaine de mètres, située vers l'aval, la mesure est possible, entre deux points donnés, le point d'injection étant disposé en tête; les nuages seront extrêmement dilués mais la méthode reste encore valable. La question pourra sans doute être reprise au cours de la discussion de la communication de M. ANDRÉ.

Pour remédier dans une certaine mesure à l'inconvénient signalé par M. SILBERSTEIN résultant du prix élevé de la méthode d'Allen avec l'utilisation de traceurs radioactifs, M. CARLIER rappelle qu'à l'origine, la méthode de l'écran salin était utilisée avec des solutions salines, le passage du nuage étant repéré par la mesure de la conductivité dans les sections limitant le tronçon étudié. L'utilisation de cette technique nécessite évidemment d'introduire des électrodes de mesure à l'intérieur de la canalisation, mais ceci est souvent facilité par l'existence de tampons de visite ou d'orifices de purge ou de vidange. On évite alors l'utilisation du générateur de radio-éléments et la méthode devient très économique sans perdre ses avantages de rapidité et de précision.

M. SILBERSTEIN confirme que la méthode classique, encore utilisée, conduit à des résultats du même ordre que ceux obtenus par la méthode radio-active. L'avantage de cette dernière est de ne nécessiter aucune ouverture dans la conduite en essai.

M. DOMERGUE estime que la mesure des débits par nuages radioactifs présente, par rapport à la mesure chimique, l'avantage de ne pas être sensible à la turbidité des eaux; ce qui est confirmé par M. SILBERSTEIN.

Abstract

Instantaneous full-pipe discharge measurement by dilution methods

by J.P. Silberstein *

The radio-active tracer method (one of the three in general used today) has become increasingly popular since the advent of radio-active solution generators. Research in this field of recent years has produced a lot of data which it has become urgent to synthesize. Mathematical proofs are supplied for the following:

- (i) Movement of the radio-active "cloud's" centre of gravity at the average flow velocity.
- (ii) The existence of a systematic measurement error depending on homogeneity of the mixture.
- (iii) The definition of mixing distance beyond which the mixture in a cross-section is homogeneous.
- (iv) Methods of estimating the mixing distance.

This method needs special equipment for its application, the main components of which are the radio-element generator, the injection and detection systems and recording and data-abstracting arrangements. The method is briefly described, with results obtained in various-sized pipes.

* E.D.F., Direction des Etudes et Recherches, Chatou.

