



**ENSEMBLE POUR  
LA MESURE INSTANTANÉE  
DU DÉBIT  
EN CONDUITE AU  
MOYEN DE RADIO-ÉLÉMENTS**

PAR R. WOLF \*

---

**Introduction**

---

De nombreuses méthodes utilisant des capteurs traditionnels ou originaux permettent la mesure d'un débit en conduite. Nous citerons :

- l'utilisation de capteurs déprimogènes dans des tronçons de conduite aménagés d'instruments « normalisés » comme les venturi, les diaphragmes, etc.;
- l'exploration du champ des vitesses dans une section à l'aide de capteurs considérés comme ponctuels : moulinets, tubes de Pitot, tuyères;
- l'emploi de méthodes thermodynamiques qui donnent directement le rendement d'une turbine;
- l'emploi de méthodes de dilution sous de nombreuses formes. L'examen des avantages et des inconvénients de chacune de ces méthodes fait souvent apparaître des aspects contradictoires en fonction des dominantes du problème à résoudre.

Quand le temps d'immobilisation de la conduite, la difficulté d'installer des capteurs intérieurs, l'absence de longueurs droites suffisantes, une faible hauteur de chute, sont des facteurs importants, on tend à utiliser une méthode de dilution.

Parmi les différentes variantes de la méthode de dilution, l'emploi d'un sel radioactif injecté dans la conduite et détectable de l'extérieur semble *a priori* très séduisant. L'utilisation de radio-nuclide est

envisageable dans tous les cas, mais c'est quand on cherche à suivre de l'extérieur d'une conduite l'évolution d'un nuage, ou quand on veut en détecter le passage, qu'à notre avis, on exploite tous les avantages des rayonnements ionisants.

Une condition nécessaire à l'emploi d'une méthode ne s'intéressant qu'à la détection du passage d'un nuage radioactif, est la connaissance de la valeur de la section des tuyaux du tronçon de mesure.

Par ailleurs le fluide circulant, sous réserve que le sel injecté puisse s'y diffuser, peut être chaud, froid, sous pression et circuler à grande vitesse.

Lors des études de mise au point de ces méthodes de mesure, on a essentiellement utilisé des radio-nuclides de période moyenne, comme l'iode 131, le brome 82, le sodium 24.

Ces mesures tendaient :

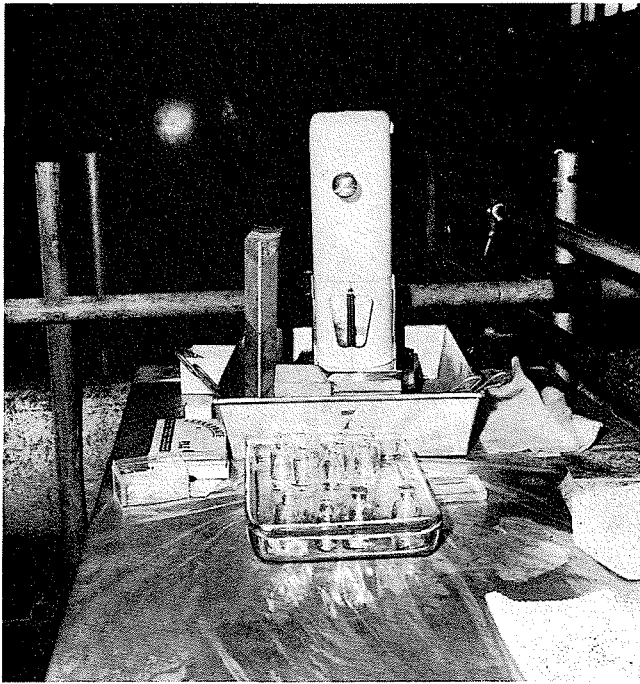
- à une mise au point de la méthode avec comme objectif principal une application à des conduites de courtes longueurs (moins de 80 fois le diamètre);
- à la justification expérimentale d'approches mathématiques;
- à l'étude et la réalisation du matériel nécessaire à une exploitation simple.

L'apparition d'un générateur de radio-nuclide, en l'occurrence du baryum 137, construit par la Société Saint-Gobain, donne un intérêt considérable à la mesure des débits en conduite par injection d'un sel radioactif.

Ce générateur, appelé « vache à radioélément », utilise la filière naturelle césium 137 → baryum 137. Le « parent », césium 137, est fixé sur une résine échangeuse d'ions très sélective. Le lavage à l'eau

---

\* Electricité de France, Centre de Recherches et d'Essais de Chatou.



1/ Le générateur de baryum 137.  
The barium 137 generator.

de cette résine entraîne le baryum 137 issu de la désintégration du césium, sans entraîner ce dernier. Une résine analogue à la précédente, mais vierge, dite « cartouche de garde », permet le cas échéant de retenir les quelques traces de césium qui auraient pu être entraînées avec le baryum. Ceci est extrêmement important du point de vue sécurité. Rappelons en effet que la période du césium est de trente-trois ans et que, de ce fait, sa présence en grande quantité dans un circuit quelconque peut être gênante. Par contre, son énergie relativement faible, 660 keV, permet une protection simple et peu encombrante. Après soutirage, le césium reforme du baryum 137 en se désintégrant, de manière qu'un équilibre radioactif soit à nouveau atteint.

Il est possible d'avoir également un fonctionnement continu, c'est-à-dire qu'on peut, sans attendre l'équilibre radioactif, prélever en permanence à la sortie d'un générateur une solution active, d'activité volumique connue, s'écoulant sous un débit constant. L'activité volumique de la solution peut être réglée dans une certaine plage.

Une vache à césium a déjà subi 400 soutirages sans que la cartouche active et les propriétés de la solution prélevée n'aient varié.

Avant l'apparition de ce générateur, le choix de la période du radio-nuclide à utiliser résultait du compromis suivant :

- période suffisamment longue, pour disposer d'une activité suffisante après transport du radio-nuclide de la pile au point de mesure;
- période faible, pour que la contamination disparaisse rapidement.

Le baryum 137 a une période de 2 minutes et demie environ, ce qui permet d'injecter dans la conduite des activités beaucoup plus fortes que pré-

cedemment sans que cela présente de danger : au bout de 100 minutes, l'activité n'est plus que  $2^{-40}$  fois ce qu'elle était. Il est même possible dans ce cas de faire des essais en circuit fermé et de les répéter.

Compte tenu de ces nouvelles possibilités, nous avons étudié en collaboration avec la Société Saint-Gobain-Techniques Nouvelles, qui fournit le générateur, un injecteur s'adaptant directement sur le générateur de manière à supprimer toute manipulation de la solution radioactive entre le moment de sa préparation et celui de l'injection.

Afin de sérier les principales questions étudiées, rappelons très brièvement la méthode envisagée :

On dispose d'une conduite dont la longueur minimale doit actuellement être de cinquante fois son diamètre et l'on connaît parfaitement les sections pour déterminer le débit d'un fluide qui y circule. On injecte une solution radioactive, et l'on va détecter, de l'extérieur, en fonction du temps et cela au droit de deux sections A et B, le passage du nuage.

On peut, lors de la description de cette méthode, considérer quatre centres d'intérêt :

- l'injection,
- la distance entre l'injection et la première section de détection;
- la distance entre les deux sections de détection,
- la détection.

Nous y ajouterons trois annexes traitant plus particulièrement des développements mathématiques.

- la première montrant qu'il est possible par une observation extérieure d'obtenir un débit en conduite à partir de la connaissance de l'abscisse du centre de gravité temporelle de la courbe correspondant au passage d'un nuage radioactif;
- la deuxième traite des déformations dues aux filtres des appareils de détection;
- la troisième conduit à l'appréciation de l'erreur sur le débit dans le cas d'un dépouillement utilisant un point géométrique particulier.

## L'injection

Les études mathématiques nous montrent que le temps d'injection et la forme de l'injection n'interviennent pas dans la détermination du débit. Ce résultat est très important, car on se trouve en présence d'un sel radioactif à forte concentration et toutes manipulations particulières, prise aliquote ou injection à débit constant, présentent avec des quantités faibles de produits actifs des difficultés non négligeables.

En principe, en dehors des problèmes de sécurité et de choix du radioélément que nous avons déjà situé, il n'y a aucune précaution particulière à l'injection. Pourtant, d'une part, la distance entre l'injection et la première section de détection dépend du mode d'injection, et d'autre part, la détection est d'autant plus facile et plus précise, non pas d'un point de vue mathématique mais du point de vue de

la mesure, que l'injection ne produit pas de « traînage ».

Par ailleurs, la distance entre l'injection et la première section de détection dépend essentiellement du mode d'injection. Pour tenir compte de ces éléments, on a essayé de nombreux types d'injecteurs et c'est en définitive un système de chasse sous pression (air comprimé) d'un volume de liquide radioactif introduit dans un « canon » dont la bouche est située dans l'écoulement, qui a donné les meilleurs résultats.

A l'intérieur du canon de l'appareil à injection se déplace sous l'action des pressions existantes, un ensemble « piston » comportant une chambre étanche, qui est utilisée comme chambre de réception du baryum 137 et de l'eau qu'on y ajoute pour obtenir le volume à injecter désiré. Un volume de 25 cm<sup>3</sup> environ a donné de bons résultats lors de manipulations préliminaires et a permis le dimensionnement de l'injecteur.

Dans les conditions initiales, le piston se trouve en position haute dans le « canon », sous l'action de la pression  $P_1$  régnant dans la conduite et qui fait remonter le piston en l'absence de toute autre pression.

En se reportant au schéma 2, nous pouvons suivre le processus du fonctionnement qui est le suivant :

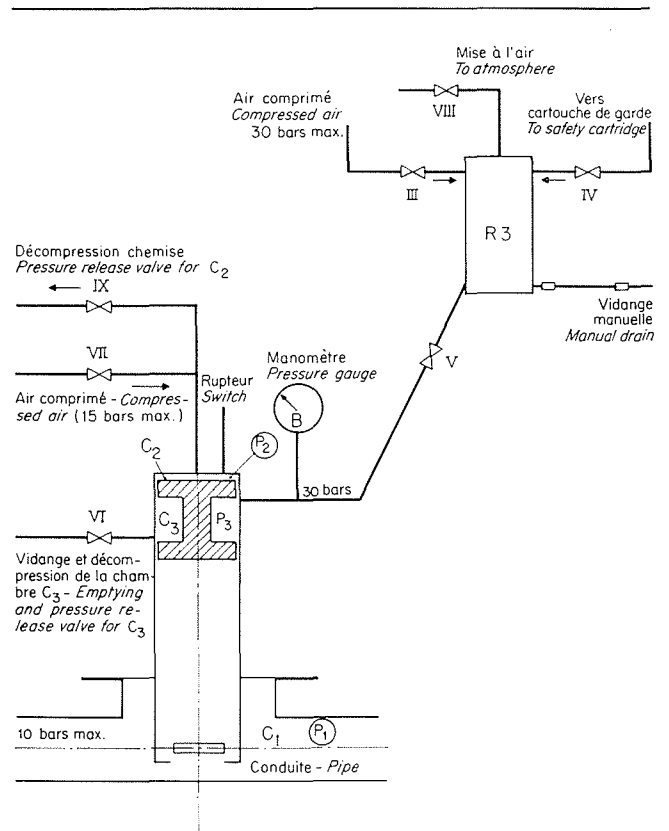
Quelques cm<sup>3</sup> (25 cm<sup>3</sup>) de liquide à injecter sont amenés dans le réservoir  $R_3$  venant de la cartouche de garde du générateur.

La vanne IV se ferme; la vanne III s'ouvre pour mettre le réservoir  $R_3$  sous pression (30 bars au maximum) puis après temporisation, la vanne V s'ouvre à son tour — le liquide est chassé dans la « chambre » de l'injecteur. La pression  $P_3$  sur le manomètre B est la pression qui règne dans cette chambre. Après temporisation, la vanne V se referme ainsi que la vanne III et l'ouverture de la vanne VII chasse le piston vers le bas. L'injection a lieu lorsque le piston est en position basse.

Différentes manipulations, et la visualisation à travers une manchette en plexiglass d'un liquide injecté (fluorescéine) lors d'expériences sur un circuit fermé, nous ont montré qu'il était préférable que la pression de la chambre soit environ trois fois supérieure à la pression de la conduite. Dans ces conditions, le nuage du liquide coloré injecté sortait compact des lucarnes usinées dans la partie inférieure du canon de l'injecteur. Il s'avère que ces « lucarnes », au nombre de deux, doivent être chanfreinées avec beaucoup de soins, afin que les joints du piston ne subissent pas de détérioration lors de leur passage. Leur résistance à l'usure a été éprouvée à la suite d'une centaine de manœuvres successives, au cours desquelles il s'est avéré que la pression  $P_2$  qui fait descendre le piston n'a pas besoin d'être très supérieure à la pression de la conduite.

L'utilisation de l'air comprimé offre l'avantage d'un réglage facile en fonction de la pression qui règne dans la conduite.

D'autre part, une bonne pulvérisation du liquide injecté ainsi qu'un temps d'éjection plus rapide, ont été obtenus en usinant en tronc de cône la base de la chambre du piston.



2/ Schéma de principe.  
General operation diagram.

Après un temps suffisant, la vanne VII est fermée, la vanne IX met la chambre  $C_2$  en communication avec l'atmosphère : le piston remonte. Le rupteur  $R_p$  indique qu'il a atteint sa position haute.

Les vannes VI, V et III étant ouvertes, on vidange la chambre et le réservoir  $R_3$  des reliquats de liquide qui pourraient y subsister.

Les vannes se ferment ensuite après un temps prédéterminé, dans l'ordre II, V, VI et l'appareil se retrouve dans les conditions initiales.

Cet appareil est facilement adaptable sur des conduites allant de 200 à 1 500 mm de diamètre, à l'aide de canons de différentes longueurs venant se visser sur la partie supérieure de l'injecteur; d'autre part son poids est relativement faible : 18 kg environ.

Son fonctionnement est entièrement automatique et de nombreuses sécurités ont été prévues en cas de fausses manœuvres ou de mauvais fonctionnement.

### La distance entre l'injection et la première section de détection

On touche ici aux phénomènes de diffusion turbulente, de nombreuses études conduisent à des approches mathématiques souvent complexes de ces phénomènes.

Pour établir un certain nombre de propriétés, nous avons dû faire reprendre un aspect de ces étu-

des qui nous conduit à des démonstrations originales faisant l'objet de rapports particuliers.

L'équation fondamentale de la diffusion dans un conduit cylindrique s'écrit, en coordonnées cylindriques :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \varepsilon \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \varepsilon_{\theta} \frac{\partial c}{\partial \theta} \right)$$

avec  $c$  concentration en un point de coordonnées  $x, r$ ;

$U$  vitesse au point considéré;

$\varepsilon$  coefficient de diffusion transversale.

Les conditions aux limites étant que la diffusion est nulle à la paroi c'est-à-dire  $(dc/dr) = 0$ .

Nous n'avons pas trouvé de méthodes rigoureuses de détermination du débit par observation spatiale ou temporelle de la répartition des concentrations. On a pensé que les expressions qui impliquent la forme des courbes ou un lieu géométrique particulier auraient, plus difficilement que celles qui intègrent les formes, des propriétés exploitables. En général, les solutions se présentent sous forme d'un développement en série dont les termes ne disparaissent pas par soustraction de deux observations.

En particulier, l'observation du passage du centre de gravité du nuage devant un observateur, — dans ce cas on a un relevé temporel —, ou son observation à un instant  $t$  dans l'espace, conduit à des écarts du même ordre et aucune propriété mathématique déterminante ne permet de choisir un type d'observation plutôt que l'autre. C'est la facilité d'observation qui nous a conduit à choisir des détecteurs fixes.

Aussi avons-nous étudié les expressions :

$$\int_0^{\infty} c dt \quad \text{et} \quad \int_0^{\infty} t c dt$$

qui interviennent dans la détermination de l'abscisse du centre de gravité temporel des courbes recueillies en une section.

Dans le cas des détecteurs extérieurs, il ne faut pas seulement considérer l'évolution de la concentration en un point, mais son intégration avec un coefficient de pondération, fonction de l'angle solide qui intéresse le détecteur.

C'est-à-dire que la mesure n'est plus :

$$D = \int_0^{\infty} c dt \quad \text{mais} \quad I = \int_V \int_0^{\infty} k \cdot c dt dv$$

Et l'on a montré (voir annexe I) que l'expression du débit ne change pas, sous réserve de ce que les détecteurs soient intéressés par des angles solides identiques et que le champ des vitesses soit invariant entre les deux sections de mesure. Cette condition est du reste requise dans le cas d'une mesure ponctuelle.

Si nous considérons l'évolution de la concentration en deux points donnés de l'écoulement situés dans une même section, l'écart entre les deux valeurs de cette expression caractérise le mélange.

Et si nous considérons plus particulièrement l'écart entre deux points  $e_1$  d'une première section et l'écart  $e_2$  dans une deuxième section pour des points analogues, on montre qu'ils varient comme les erreurs sur le débit. La méthode de mesure est

d'autant plus précise que ces écarts tendent vers zéro.

Le problème pour l'expérimentateur est la détermination d'une longueur dite de « bon mélange », où il pourra s'assurer de ce que la précision des résultats obtenus sur la mesure correspond à ses ambitions.

L'expression de l'erreur sur  $D = \int_0^{\infty} c dt$  est de la forme :

$$e_1 = \sum_i a_i g_i(r, \theta) \cdot e^{-\lambda_i x}$$

où  $a_i g_i$  sont déterminés par les conditions de mesure, et  $i$  forme une suite monotone et croissante.

L'expression de l'erreur sur :

$$I = \int_0^{\infty} A(t) dt = \int_V \int_0^{\infty} k \cdot c dt dv$$

est de la forme :

$$e_2 = \sum_i a_i \int_V g_i(r, \theta) k e^{-\lambda_i \alpha} dr \cdot d\theta \cdot d\alpha \cdot e^{-\lambda_i \xi} \\ = \sum_i A_i e^{-\lambda_i \xi}$$

avec  $x = \alpha + \xi$ ,  $\xi$  est l'abscisse au droit de la section de mesure.

Or, les termes d'erreur sont de la même forme et tendent vers zéro, c'est-à-dire que l'expression tend vers une constante quand  $x$  tend vers l'infini. C'est cette propriété qui va résoudre notre problème et conduire à la détermination de la longueur  $L$  minimale compatible avec la précision recherchée.

Il faut, à l'aide de détecteurs placés sur la conduite et intéressés par des angles solides identiques, tracer la courbe  $I$  de  $x$ , où  $I$  est le total des impulsions comptées par chaque détecteur. Dans le cas où les comptages sont très différents, il y a lieu de les extrapoler pour déterminer la longueur du mélange.

D'une façon globale, nous avons étudié l'influence de cette longueur  $L$  pour un débit donné. Pour cela, on dispose d'une conduite expérimentale à circuit ouvert installée sur les berges de la Seine à Chatou. L'eau pompée dans la Seine est restituée à 80 m en aval. Le plein d'eau se situe en moyenne à 2,5 mètres de l'axe de la pompe (45 ch, 100 l/s). Tout au long du tronçon de mesure la conduite a un diamètre de 350 mm et à l'amont se trouve l'injecteur permettant l'envoi du traceur dans la conduite. Les débits variables sont obtenus en agissant sur une vanne placée à l'extrémité du circuit. Ils sont mesurés par deux diaphragmes étalonnés et un déversoir. Ils ont été contrôlés par la méthode de dilution comparée en « palier » sur le circuit.

Un poste de mesure groupe les divers appareils (S.P.P.3, enregistreurs) et centralise toutes les informations pendant les essais.

La détection s'effectuait de l'extérieur à l'aide de trois détecteurs S.P.P.3. Les deux détecteurs aval restaient fixes et à plus de soixante-quinze diamètres de l'injection, le troisième était de plus en plus rapproché de l'injection et comportait différentes focalisations du détecteur.

Les résultats obtenus au cours de nombreuses mesures avec différents types de dépouillement ont montré que la détermination de la longueur  $L$  restait un élément fondamental de la méthode de

mesure, et que les erreurs de positionnement de la première section de mesure pouvaient entraîner des erreurs sur le débit de l'ordre de plusieurs %.

Avec cette détermination de L, c'est le choix d'un type de dépouillement des courbes relevées au droit des sections examinées, qui détermine la précision obtenue sur la mesure de débit. Ce dernier élément fera l'objet des considérations sur les modes de détection.

Nous avons vu précédemment l'expression de l'erreur sur :

$$I = \int_0^\infty k.c.dtdv$$

et sa forme, il nous reste à déterminer, au besoin même en la surdimensionnant, une longueur L pour laquelle cette erreur conduit à une mesure acceptable.

Connaissant la forme de la courbe, il suffit de placer les détecteurs en des points quelconques de la conduite et d'extrapoler les résultats obtenus pour déterminer la constante  $a_0A_0$  pour  $x$  tendant vers l'infini, et de situer la première section de mesure à une distance compatible avec la précision de la mesure.

$$D_\infty = a_0g_0 \quad I_\infty = a_0g_0 \int_{(v)} kdv = a_0A_0$$

(voir annexe de calcul).

Dans ce cas L est suffisant et nous ne conservons que les hypothèses suivantes pour chercher l'expression du débit :

- similitude du profil des vitesses aux endroits de mesure;
- sondes ponctuelles sensibles à tout rayonnement émis à l'intérieur d'un angle solide quelconque mais identique pour chacun des deux points de mesure.

Nous montrons que, si les sondes sont distantes de  $L_1$ , la vitesse moyenne  $U_0$  de l'écoulement est donnée par l'expression :

$$T_2 - T_1 = \frac{L_1}{U_0}$$

avec :

$$T_2 = \frac{J_2}{I_2} = \frac{\int_0^\infty tAdt}{\int_0^\infty Adt} \quad (\text{en } x_2)$$

et :

$$T_1 = \frac{J_1}{I_1}$$

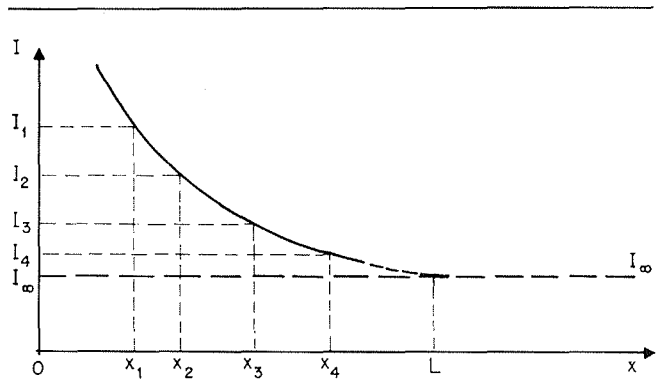
$L_1$  distance entre sondes;

$$I = \int_v \int_0^\infty k.c.dt.dv$$

$$J = \int_v \int_0^\infty k.c.t.dt.dv$$

$k(x, r, \theta)$  coefficient de pondération dû à l'atténuation et à la géométrie.

Pour avoir une expression de l'erreur sur le débit, supposons que la distance de bon mélange (c'est-à-dire la détermination L) ne soit pas suffisante. Dans



3/

ce cas,  $I_1$  et  $I_2$  sont différents, mais ils seront d'autant plus près de  $I_\infty$ , valeur limite, lorsque L tendra vers l'infini, que les sondes seront loin de l'injection.

Si l'on dispose de plusieurs sondes sur la conduite, de manière à étudier la valeur de I en fonction de x, on obtient la valeur de  $I_\infty$  par extrapolation. La précision de cette extrapolation sera d'autant plus grande que  $x_4$  sera voisin de L.

En deux points quelconques, on fait alors les comptages :

$$J_1 = \int_0^\infty A(t) tdt$$

$$J_2 = \int_0^\infty A(t) tdt$$

La théorie veut que :

$$J_1 = \frac{a_0A_0x_1}{U_0} + B + \eta_1$$

$$J_2 = \frac{a_0A_0x_2}{U_0} + B + \eta_2$$

Calculons :

$$\frac{J_2 - J_1}{I_\infty}$$

( $I_\infty$  valeur obtenue, si besoin est, par l'extrapolation précédente).

$N_1$  et  $N_2$  représentent l'écart entre  $J_1$ ,  $J_2$  et  $J_\infty$ .

Nous obtenons :

$$\begin{aligned} \frac{J_2 - J_1}{I_\infty} &= \frac{\frac{a_0A_0}{U_0} (x_2 - x_1) + \eta_2 - \eta_1}{a_0A_0} \\ &= \frac{L_1}{U_0} + \frac{\eta_2 - \eta_1}{a_0A_0} \end{aligned}$$

Le terme d'erreur est :

$$\frac{\eta_2 - \eta_1}{a_0A_0}$$

qui peut être minimisé en jouant sur  $a_0A_0$ .

Ce terme est proportionnel à la masse injectée et fait intervenir l'angle solide dans lequel on effectue le comptage.

Rappelons que  $A_0 = g_0 \int_v k.dv$ .

Si nous utilisons non plus  $I_\infty$ , c'est-à-dire  $a_0 A_0$ , mais les valeurs relevées  $I_1$  et  $I_2$ , la forme de l'erreur se complique et il n'apparaît pas de critères simples permettant de la minimiser; les expériences décrites précédemment peuvent nous en donner une idée. Nous préférons, en général, déterminer  $I_\infty$  à partir de  $I_1$  et  $I_2$  pour apprécier l'erreur de mesure. Cette détermination se fait en même temps que celle de  $L$  et les hypothèses sur la répartition du profil de vitesse nous permettent d'en déduire simplement les différentes valeurs de  $I_\infty$  pour chacune des injections.

### La distance entre les deux sections de mesure

On a quelquefois considéré cette distance comme devant présenter une longueur minimale pour que la méthode de diffusion soit applicable, il n'en est rien.

Dans le cas où  $L$  est choisi comme compatible avec la précision espérée, c'est la précision de la mesure du temps de parcours du nuage entre les deux sections de mesure, qui dimensionne la distance.

Nous verrons plus loin que dans le cas d'un dépouillement électronique, l'ordre de grandeur de la précision sur la mesure de ce temps est de  $1/100^{\circ}$  de seconde, ce qui nous permet de prévoir la distance entre les sections A et B. En effet, avec une vitesse moyenne de l'ordre de 1 m/s, le  $1/100^{\circ}$  de seconde correspond à 1 cm et la précision de 0,5 % est obtenue avec une distance AB de 2 m.

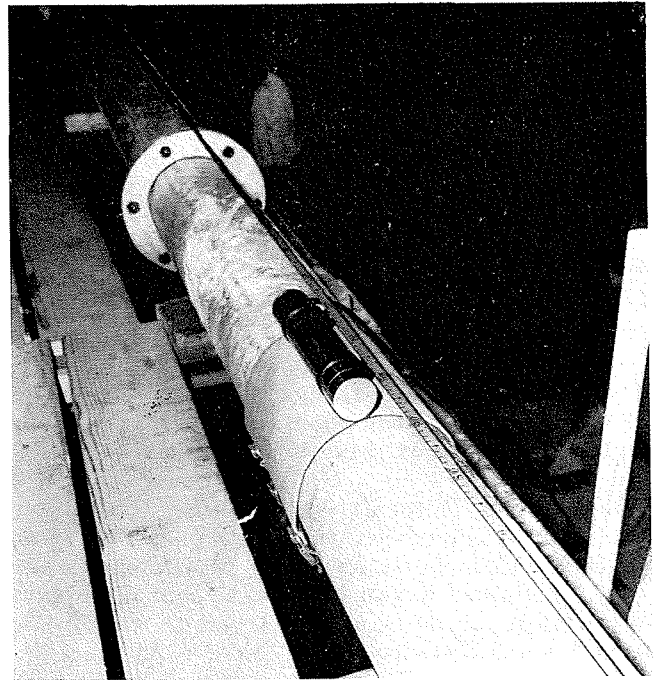
Si l'on raccourcit considérablement AB, on est conduit à admettre le chevauchement des nuages. Nous verrons que, dans ce cas, le calcul électronique utilisera une origine des temps commune; ceci diminue légèrement la précision sur le débit.

Dans le cas d'un dépouillement se rapportant à un enregistrement, cette distance doit en général être plus grande et compatible avec l'enregistreur utilisé. Dans le cas d'un monovoie, il est évident que les nuages ne doivent pas se chevaucher; par ailleurs, les déroulements rapides conduisent à des courbes difficiles d'exploitation et l'on utilise en général le  $1/10^{\circ}$  de seconde comme base de temps. Avec l'exemple précédent, la distance AB devrait alors être de 20 m.

En dehors de ces considérations, on ne voit apparaître la valeur de la distance AB dans l'expression de l'erreur sur le débit que dans le cas où la section A est en-deçà de la distance de bon mélange et qu'on n'a pas pu déterminer  $I_\infty$ , ce qui conduit à utiliser  $I_1$  et  $I_2$ .

### Détection

Nous venons de voir qu'il est possible de connaître la vitesse moyenne de l'écoulement à partir de l'observation du centre de gravité de la courbe recueillie par un observateur fixe. L'analyse de cette



4/ Un détecteur sur la conduite.  
A detector in position on the pipe.

courbe risque d'être compliquée et nous avons alors le choix entre deux types de détection :

- relever les courbes et déterminer un point dont les caractéristiques du point de vue de la mesure sont voisines de celles du centre de gravité;
- faire apparaître le centre de gravité du nuage en traitant directement les informations recueillies.

*A priori*, on ne sait pas quelle méthode présente le plus de simplicité. On risque ici de voir apparaître des aspects contradictoires entre les méthodes :

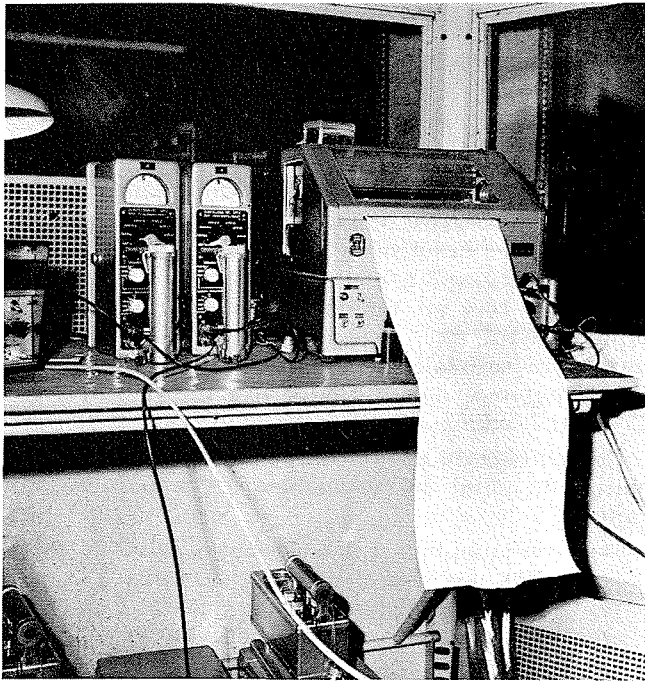
- suivre le phénomène physique et en garder trace dans le premier cas avec possibilité d'un traitement ultérieur plus élaboré;
- obtenir rapidement le débit avec une précision suffisante dans le deuxième cas.

Nous avons comparé les deux méthodes : de cette étude, il faut surtout retenir un certain nombre d'influences qui risquent de compromettre les résultats obtenus dans le cas de la première méthode.

#### a) Enregistrement des courbes et détermination d'un point représentatif.

La détection de la courbe pose d'abord le problème du choix de la constante d'intégration. Nous savons qu'un filtre va transformer de façon variable les deux courbes recueillies aux deux points d'observation A et B. En effet, leur forme est différente du fait de la diffusion et, si l'on peut ajuster les gains, on ne peut pas intervenir sur les formes.

Par ailleurs nous pouvons montrer que le centre de gravité n'est lui déplacé que d'une quantité qui ne dépend que de la fonction de transfert du filtre, et ainsi la distance entre les deux centres de gravité correspondant à la vitesse moyenne le long du parcours d'observation reste la même si les filtres d'intégration sont identiques (voir annexe).



5/ Enregistrement des courbes à l'aide d'ensembles SPP 3.  
SPP 3 recording equipment.

Dans le cas particulier de l'intégrateur, pour lequel :

$$H(p) = \frac{a}{1 + \tau p}$$

chaque centre de gravité est déplacé de :

$$\frac{H'(0)}{H(0)} = \tau$$

c'est-à-dire de la constante de temps du filtre utilisé. On voit que cette influence peut intervenir si les filtres sont différents et qu'on a tout intérêt à rendre les temps d'intégration courts.

L'utilisation de temps d'intégration courts a l'inconvénient de restituer les variations instantanées, et la détermination d'un point caractéristique géométriquement simple n'en est pas facilitée; par exemple, les essais V et X du tableau n'ont pu être utilisés.

Une étude sur une courbe type dont l'équation mathématique a été admise être celle d'une injection instantanée, nous a conduit aux résultats consignés en annexe, où l'on montre qu'en prenant un point situé au milieu du segment  $x_a x_b$  à  $y = 0,6 y_{\max}$  l'erreur était négligeable sous réserve :

- d'une courbe bien définie, c'est-à-dire d'une injection franche;
- d'une constante de temps très courte (0,1 seconde environ).

C'est ce procédé qui a été retenu pour presque tous les essais effectués.

On a par ailleurs montré l'écart correspondant au temps d'intégration en installant deux ensembles : un à 0,1 s, l'autre à 1 seconde de constante de temps. Les résultats obtenus font l'objet du tableau 1.

Chacun de ces essais a été effectué sur une

conduite de 200 mm de diamètre située à la station de tarage du C.R.E.C. Les débits sur cette station sont mesurés par pesée et donnés au 1/1 000°. L'injection s'est faite en baryum à partir du générateur césium-baryum. Chacun de ces essais a compté un train de dix injections successives dont nous présentons la moyenne.

Deux couples de détecteurs situés tous deux à environ cinquante diamètres pour le détecteur amont et cent vingt-cinq pour le détecteur aval avaient respectivement 0,1 et 1 seconde de constante de temps d'intégration. Il faut remarquer qu'à l'ensemble 1 seconde correspondent des résultats qui sous-estiment systématiquement le débit.

Tableau 1

	DÉBIT (l/s)	DÉBIT DONNÉ PAR L'ENSEMBLE 0,1 s	ECART (%)	DÉBIT DONNÉ PAR L'ENSEMBLE 1 s	ECART (%)
I	83,33	84,27	+ 1,1	82,37	— 1,2
II	83,33	84,81	+ 1,8	81,92	— 1,7
III	130,20	129,10	— 0,8	126,80	— 2,6
IV	38,68	38,82	+ 0,4	38,33	— 0,9
V	22,25			217,70	— 2,2
VI	56,83	57,45	+ 1,1	55,87	— 1,7
VII	95,44	96,03	+ 0,6	93,80	— 1,7
VIII	151,95	152,10	+ 0,1	150,30	— 1,1
IX	220,90	221,60	+ 0,3	217,90	— 1,4
X	220,90			211,73	— 4,3
XI	110,00	110,10	— 0,8	107,43	— 3,3

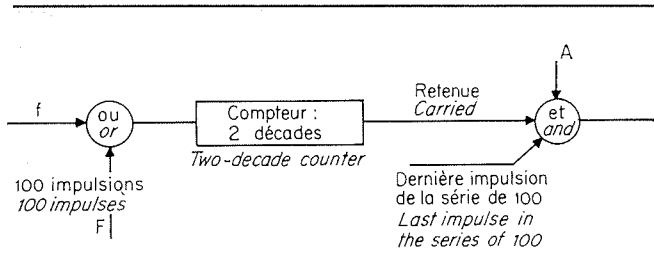
Les essais VI et VII avaient également été enregistrés sur bande magnétique, ce qui nous a permis un dépouillement numérique sur CAB 500 donnant le centre de gravité et les débits correspondants.

IV	56,83	55,87	— 1,7	56,75	— 0,2
VII	95,44	93,80	— 1,7	96,10	+ 0,8

D'autres essais plus analytiques consistaient à faire passer une source ponctuelle montée sur un chariot devant un détecteur dont on fait varier les constantes de temps. Les résultats corroborent les calculs théoriques et les expériences précédentes, mais les formes des courbes sont naturellement différentes de celles obtenues en conduite.

b) Faire apparaître directement le centre de gravité de la courbe.

Sur chacune des courbes de l'évolution de la concentration, l'expression du temps séparant le passage des deux centres de gravité conduit au débit.



6/

Sur chacune des expressions du type :

$$OG_1 = \frac{\int_0^T Atdt}{\int_0^T Adt} = \frac{J_1}{I_1}$$

on s'est proposé de déterminer et de conserver les numérateurs et les dénominateurs sans faire apparaître les rapports  $J/I$ .

Ceci nous permettra ou d'utiliser l'extrapolation de  $I_1$  et  $I_2$  en  $I_\infty$  ou de vérifier que l'écart entre  $I_1$  et  $I_2$  est suffisamment faible. Ce qui montrera que les hypothèses concernant la géométrie des détecteurs sont pratiquement satisfaites.

Les détecteurs délivrent un certain nombre d'impulsions qui correspondent à l'ionisation que les radiations provoquent.

Les expressions  $I_1$  ou  $I_2$  sont la simple totalisation sur une échelle de comptage des impulsions reçues.

Les causes d'erreurs dont il faut tenir compte au cours de cette opération sont :

- le bruit de fond, c'est-à-dire la radioactivité naturelle;
- les pertes au comptage qui pourraient provenir d'une inadaptation du détecteur ou de l'électronique au nombre de particules émises.

De nombreux moyens nous permettent de tenir compte du bruit de fond. On a d'abord choisi de régler la mise en forme des signaux pour favoriser l'énergie particulière du baryum.

La pollution dans le cas d'un circuit fermé s'atténue très vite, compte tenu de la très faible période du baryum et, dans le cas que nous avons rencontré, le bruit de fond n'était que de l'ordre du 1/1 000<sup>e</sup> des valeurs à mesurer.

Le calcul de la distance entre les centres de gravité des surfaces des courbes obtenus aux deux sections, se fera :

- s'il y a risque de recouvrement des nuages, à partir d'une origine commune des temps;
- si les détecteurs sont suffisamment éloignés et qu'il n'y ait aucun risque de recouvrement des nuages, à partir de deux origines des temps différentes, ce qui augmente la précision. L'appareil donne alors la valeur  $0,0_2$  séparant l'origine des temps de comptage, à la milli-seconde près.

Le calcul du numérateur  $\int_0^T Atdt$  est obtenu par échantillonnage; si  $\Delta t$  est le pas d'échantillonnage, et si les impulsions  $A(t)$  sont reçues sur un comp-

teur, le contenu de ce compteur au bout d'un temps  $T$  est :

$$\sum_{i=0}^n A_i t_i$$

et on a donc :

$$\int_0^T Atdt = \Delta t \sum_{i=0}^n A_i t_i$$

$n$  est le nombre de points d'échantillonnage.

Le produit  $A_i t_i$  est obtenu de la manière suivante : comptage des impulsions  $A_i$  pendant un temps proportionnel à  $t_i$  soit  $t_i/\alpha$  en désignant par  $\alpha$  le rapport du temps réel au temps machine  $\alpha = (t/t_m)$ ; ce rapport étant fixé, l'inégalité  $(T/\alpha) \leq \Delta t$  doit toujours être satisfaite, c'est-à-dire que le temps machine maximal doit toujours être inférieur au pas d'échantillonnage.

Le principe du produit de  $A$  par  $t$  peut être schématisé du point de vue logique de la manière suivante :

- soit un compteur à deux décades, donc de capacité 100. Ce compteur peut recevoir sur son entrée des impulsions de fréquence  $f$ ,  $f = 10$  Hz par exemple, ou des impulsions de fréquence  $F$  arrivant par séries de 100;
- soit également une porte logique commandée par la retenue du compteur précédent d'une part et la dernière des impulsions de la série de 100, d'autre part, la retenue commandant l'ouverture de la porte, l'autre impulsion la fermeture, cette porte laisse passer pendant son ouverture les impulsions  $A$ . La figure n° 6 représente les différentes liaisons. La série d'impulsions de fréquence  $F$  parvient sur l'entrée toujours entre deux impulsions  $f$  de la base de temps.

Voyons comment se fait le produit  $A_i t_i$ , supposons par exemple que  $t_i = 10 \Delta t$  [ $\Delta t = (1/f)$ ], c'est-à-dire que le compteur a pour contenu 10, arrive alors la série des 100 impulsions. Quand 90 de ces impulsions sont passées, la porte « et » s'ouvre, et elle se ferme à l'arrivée de la 100<sup>e</sup>, elle reste donc ouverte un temps égal à  $10/F$  comme :

$$F = \alpha f = \frac{\alpha}{\Delta t} \frac{10}{F} \frac{10}{\alpha} \Delta t = \frac{t_i}{\alpha}$$

et le nombre d'impulsions ayant traversé la porte « et » est donc  $Ax(t_i/\alpha)$ , ce qui était le but recherché.

L'avantage de ce système est très important, car il n'existe pas de temps mort, la valeur du temps se marque automatiquement dans le compteur durant l'opération  $A_i t_i$ ; ainsi, dans l'exemple précédent lors de la retenue, le contenu du compteur était zéro, mais il restait encore 10 impulsions de fréquence  $F$ , donc à la fin de l'opération, le compteur marque de nouveau 10. Du point de vue logique, ce système est d'autre part d'une très grande simplicité.

Le pas d'échantillonnage est déterminé en tenant compte des deux erreurs introduites par l'appareil lors du calcul de  $\int_0^T Atdt$ . L'une des erreurs est due à la méthode d'intégration qui, dans notre cas, est assimilable à une méthode d'intégration par trapèzes; on connaît sa borne supérieure et l'on peut dire que l'erreur est inversement proportionnelle au carré du nombre de points d'échantillon-

nage. L'autre erreur est due au fait que l'activité détectée, c'est-à-dire  $A$ , est un phénomène statistique; cette erreur est liée directement au coefficient  $\alpha$  défini précédemment. Pour savoir s'il existe un pas d'échantillonnage optimal conduisant à une erreur globale minimale, nous avons programmé sur CAB 500 les opérations qu'effectue notre appareillage, et cela en prenant les hypothèses suivantes :  $A(t)$  est une courbe gaussienne de forme :

$$A = e^{-(t-h)^2}$$

à laquelle on soustrait un terme constant, pouvant valablement représenter le bruit de fond du détecteur.

Nous avons montré que l'erreur statistique est d'autant plus faible que  $N$  est grand. On a donc intérêt à avoir une activité aussi grande que possible, à avoir  $n$  aussi proche que possible de  $\alpha$ ;  $n$  doit être supérieur à 10 pour que l'erreur d'intégration soit acceptable.

En fait, il n'est pas possible d'avoir  $n = \alpha$ , car il faudrait mesurer exactement la durée du phénomène : on fera donc toujours en sorte que  $\alpha$  soit légèrement plus grand que  $n$ .

D'autre part, il est également souhaitable d'avoir un temps de calcul en machine grand devant les temps de commutation des circuits électroniques, on essaie donc de fixer  $\alpha$  le plus près possible de  $n$ .

On a fixé la fréquence d'échantillonnage à 10 Hz ou à 5 Hz au choix, ce qui donne une valeur correcte pour  $n$  nombre d'échantillons dans les cas qui nous intéressent; or  $(T/\Delta t) = \alpha$ , le temps machine est donc d'autant plus près du temps réel que  $T$ , durée du phénomène, est faible.

L'appareil se compose des sous-ensembles suivants :

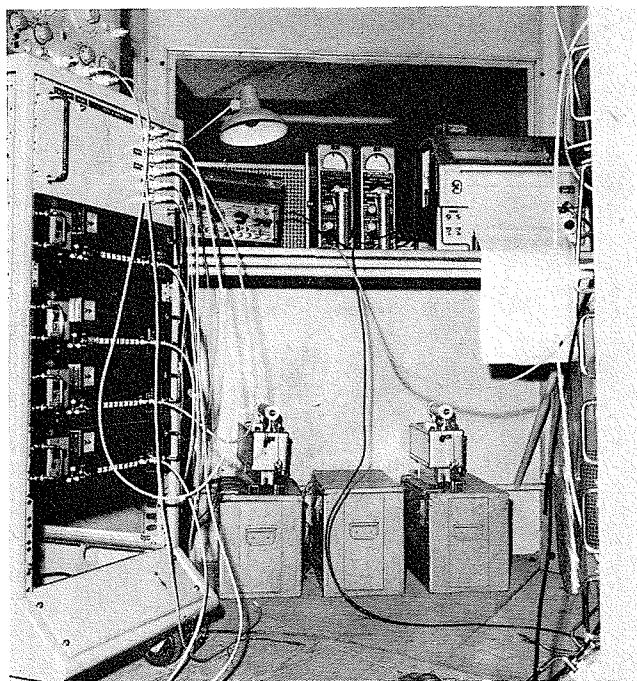
- 1° une base de temps qui permet de fixer la fréquence d'échantillonnage  $f$ , et qui permet également l'obtention de la fréquence  $F = \alpha f$  nécessaire pour générer un train de  $x$  impulsions dont le rôle est double, codage et réinscription du temps;
- 2° un circuit réalisant le produit.
- 3° quatre compteurs de capacité 10%, où viennent s'inscrire  $N_1N_2$ ,  $N_3N_4$  respectivement numérateurs et dénominateurs de  $O_1G_1$ ,  $O_2G_2$ .
- 4° un discriminateur de seuil.
- 5° un compteur, trois décades transistorisées plus des décades électromécaniques, associées à un circuit logique, ce qui permet la mesure de  $O_1O_2$ .
- 6° un compteur deux décades, permettant d'évaluer la valeur de  $O_2T_2$ , soit  $T$ , et donc de prendre  $\alpha$  aussi près que possible de  $n$ , puisque :

$$\frac{T}{\alpha} = \frac{1}{\Delta t}$$

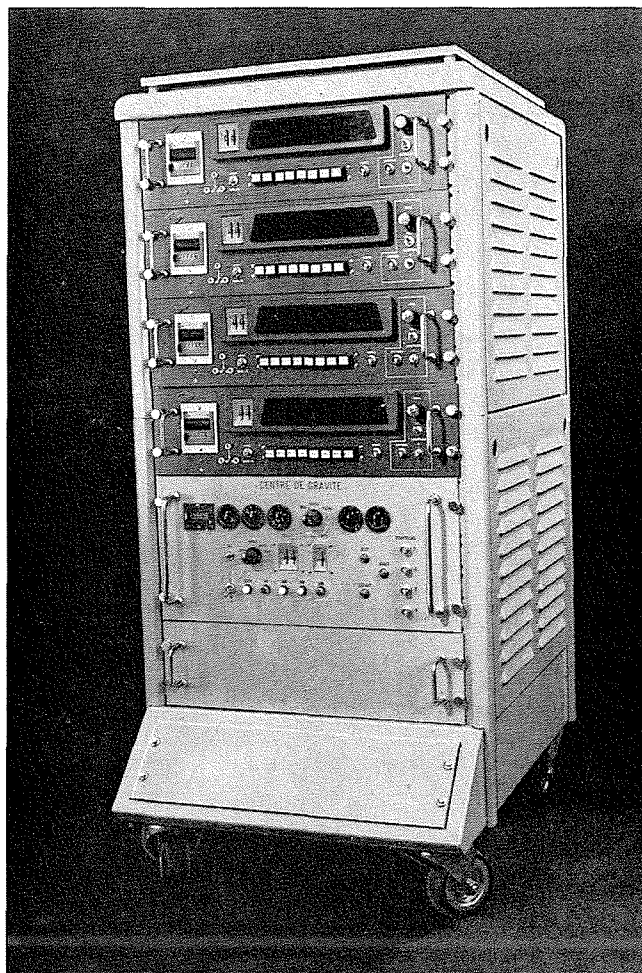
- 7° différents circuits, de temporisation, de tests, de mise en forme d'impulsions, de remise à zéro de circuits.

La figure 8 représente les diverses liaisons entre sous-ensembles.

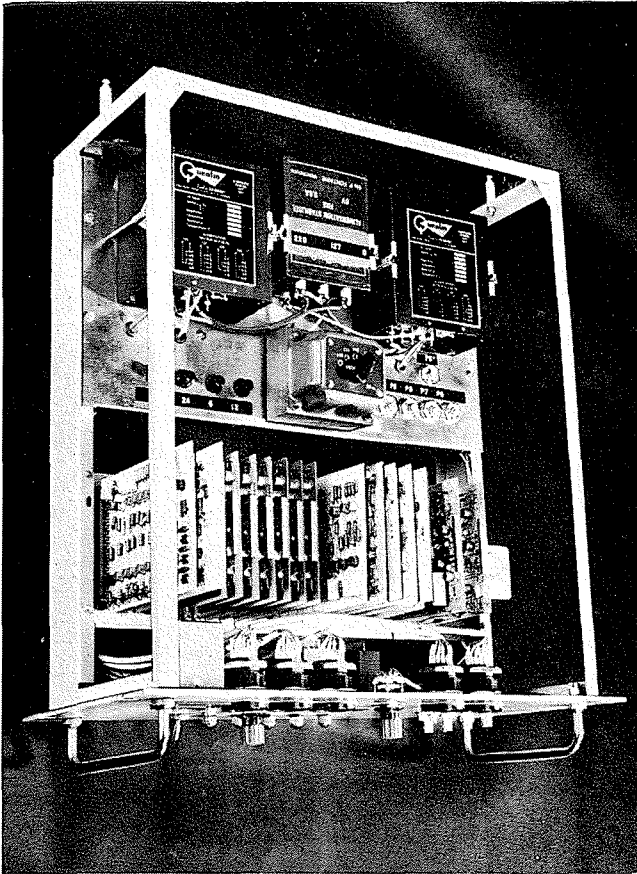
Nous ne décrirons pas en détail chacun de ces sous-ensembles; nous rappellerons simplement le circuit de test qui consiste à envoyer sur l'entrée



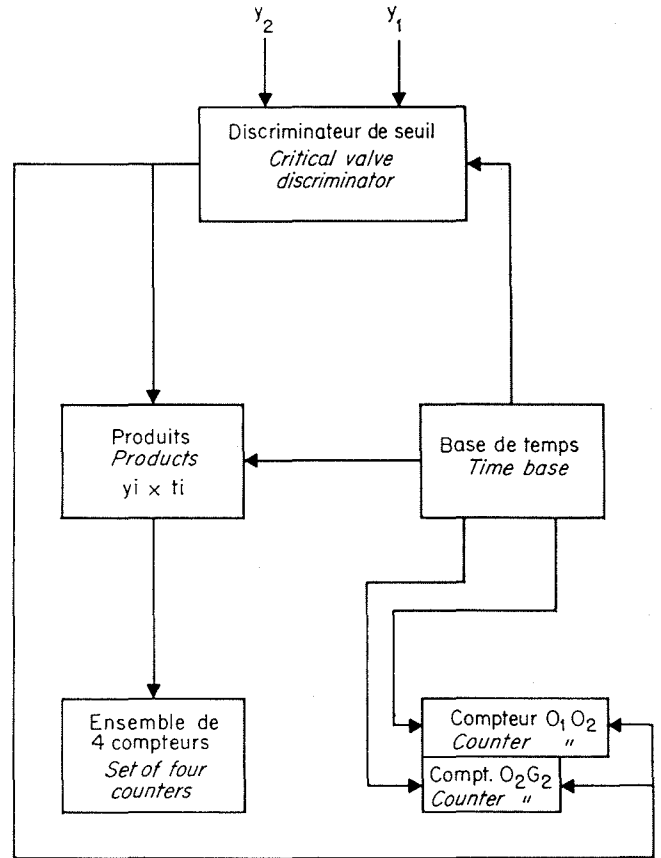
7/ Le poste de mesure : les détecteurs et, à gauche, la baie de comptage comportant le calculateur.  
The measurement station, showing the detectors, and the counting and calculating equipment on the left.



7 a/ Le calculateur / The calculator.



7 b/ Détail d'un élément du calculateur.  
Detail of a calculator component.



8/ Schéma de principe.  
Block diagram.

de l'appareil une courbe en forme de créneau, de durée variable, cette durée est mesurée par un compteur  $C_2$ ; si la durée est  $\theta$ , on doit obtenir :

$$\frac{\theta}{2} = \frac{N_1}{N_2} \frac{F}{f^2}$$

Le circuit suivant (fig. 9) permet de réaliser cette fonction.

L'exploitation des résultats obtenus au cours d'essais reste extrêmement simple, si  $N_1$  et  $N_3$  sont les résultats des compteurs associés au premier détecteur,  $N_2$  et  $N_4$  ceux des compteurs associés au second détecteur.

On a :

$$O_1G_1 = \frac{N_1}{N_3} \alpha \Delta t \quad O_2G_2 = \frac{N_2}{N_4} \alpha \Delta t$$

$$\Delta t = \frac{1}{f} \quad \text{donc} \quad \Delta t \text{ peut être égal à } \frac{1}{10} \text{ ou } \frac{1}{5}$$

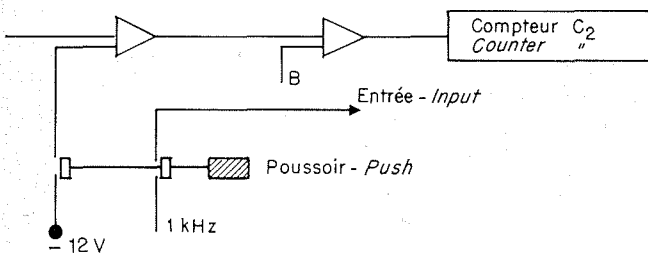
$$\alpha = \frac{F}{f} \quad \text{donc} \quad O_1G_1 = \frac{N_1}{N_3} \frac{F}{f^2} \quad O_2G_2 = \frac{N_2}{N_4} \frac{F}{f^2}$$

$O_1O_2$  est donné par le compteur  $C_1$ , la virgule étant placée entre le compteur mécanique et les trois tubes « Nixie ». La valeur en secondes de  $G_1G_2$  est donc :

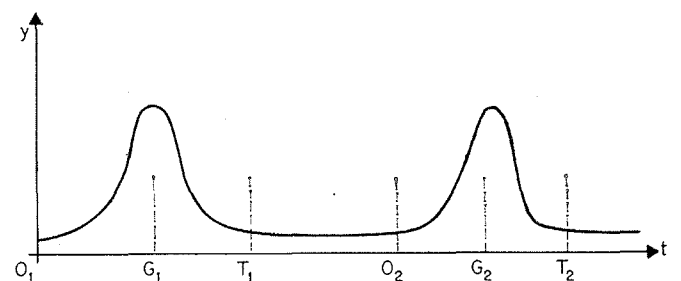
$$G_1G_2 = O_1O_2 + \frac{F}{f^2} \left[ \frac{N_2}{N_4} - \frac{N_1}{N_3} \right]$$

$O_1O_2$ ,  $G_1G_2$  sont définis sur la figure 10 :

Pour tester l'appareillage dans les conditions les plus proches de son utilisation réelle, on a utilisé un canal muni d'un chariot mobile, dont la vitesse



9/



10/

est rigoureusement constante, cette vitesse étant réglable de quelques millimètres par seconde à un mètre par seconde. Sur le chariot on a fixé une source de rayonnement et le long du canal deux sondes distantes de 6 mètres.

Dans le tableau 2 sont consignés les résultats obtenus pour différentes vitesses du chariot, les sondes n'étant pas focalisées, et les nuages étant donc symétriques.

Tableau 2

VITESSE AFFICHÉE (mm/s)	VITESSE MESURÉE AU CHRONOMÈTRE (mm/s)	RÉSULTATS DONNÉS PAR L'APPAREIL (mm/s)	ECARTS (%)	
204,8	203,6	204,7	0,05	0,5
256,0	257,4	256,9	0,30	0,2
307,2	308,1	307,2	0,05	0,3
358,4	358,4	358,9	0,10	0,1
409,6	411,5	412,2	0,60	0,1
512,0	514,1	513,3	0,20	0,2
614,4	619,1	620,1	0,90	0,1

Ces résultats sont obtenus dans l'utilisation en position manuelle de l'appareillage, c'est-à-dire dans les conditions les plus mauvaises; d'autre part la fréquence utilisée était  $F = 1$  kHz, c'est-à-dire celle qui conduit aux résultats les moins précis; on peut constater que la vitesse est néanmoins donnée avec une précision voisine de 0,5%.

D'autres essais ont été effectués sur des nuages rendus dissymétriques (en réduisant l'angle solide des sondes), les résultats sont aussi précis que les premiers.

Cet appareil, d'encombrement très réduit, permet l'obtention rapide du débit. Le fait de travailler directement sur les impulsions issues des détecteurs permet d'éviter les erreurs introduites par les conversions numériques analogiques. La mise en œuvre est très simple en position automatique, la seule manœuvre à effectuer étant une remise à zéro générale après chaque essai.

## Conclusion

Actuellement, le matériel expérimental a permis d'obtenir les résultats consignés précédemment; nous faisons réaliser une version industrielle comportant le générateur à baryum et l'injecteur.

Avec les deux détecteurs et l'organe de calcul décrit plus haut, nous pensons pouvoir mesurer les débits sur un grand nombre de conduites dans des cas très différents: en usine hydraulique, thermique et nucléaire.

Des développements sont dès maintenant envisagés. Ils portent essentiellement sur des mesures de moins grande précision mais à effectuer dans des

conditions très spéciales, par exemple: la circulation d'un liquide décapant lors du nettoyage d'une chaudière.

Nous pensons que le faible temps d'immobilisation des conduites et la rapidité d'exploitation de la méthode nous permettront d'établir des règles empiriques qui faciliteront la détermination des grandeurs caractéristiques qui correspondent aux meilleures conditions d'emploi.

## Annexe I

Rappelons tout d'abord un résultat général obtenu à partir des équations de la diffusion:

$$D = \int_{-\infty}^{+\infty} C(x, r, \theta, t) dt = a_0 g_0 + a_1 g_1 e^{-\lambda_1 x} + \dots + a_n g_n e^{-\lambda_n x} + \dots$$

$$N = \int_{-\infty}^{+\infty} t C(x, r, \theta, t) dt = -\frac{a_0 g_0}{U_0} x + \Phi_0(r, \theta) + a_0^* g_0 + \left[ \Phi_1(r, \theta) + a_1^* C_1 - \frac{a_1 g_1}{U_0} x \right] e^{-\lambda_1 x} + \dots$$

Lorsque  $x \rightarrow \infty$ :

$$D \rightarrow a_0 g_0 \text{ qui est une constante;}$$

$$N \rightarrow -\frac{a_0 g_0}{U_0} x + \Phi_0(r, \theta) + a_0^* g_0.$$

Lorsque  $x$  est grand, c'est-à-dire lorsqu'on a dépassé la « longueur du mélange »,  $D$  est sensiblement constant. On dit alors que la « condition de bon mélange » est remplie. Le terme d'erreur est de l'ordre de  $e^{-\lambda_1 x}$ .

Sous cette hypothèse, nous allons considérer ce qui se passe lorsqu'au lieu de suivre l'évolution de la concentration en un point, on intègre avec un coefficient de pondération variable la concentration à l'intérieur d'un volume solide.

Précisons:

L'élément de volume entourant un point de la conduite émet un rayonnement dont l'intensité  $a$  est directement proportionnelle à la concentration en radio-nuclide:

$$a = mc(x, r, \theta, t)$$

La sonde, supposée ponctuelle, reçoit ce rayonnement avec une atténuation qui dépend de sa position relative par rapport au point émetteur. Elle mesurera donc:

$$a^* = k [f(\xi - x), g(\rho - r), h(\tau - \theta)] c(x, r, \theta, t)$$

Simultanément, elle reçoit le rayonnement issu de tous les points compris dans le volume  $V$  commun à la conduite et à l'angle solide dans lequel elle est sensible au rayonnement.

À la sortie de la sonde nous avons donc l'information:

$$A(t) = \int_V k.c.dv$$

Nous allons déterminer alors ce que représente le centre de gravité des courbes A (t) ainsi relevées :

$$I = \int_{-\infty}^{+\infty} A(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_V k \cdot c \, dv dt$$

$$= \int_V k \int_{-\infty}^{+\infty} c dt dv$$

Or, par hypothèse, la condition de bon mélange est réalisée, d'où :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} c dt = Cte = a_0 g_0$$

d'après la théorie générale.

$$I = a_0 g_0 \int_V k dv \quad \forall x, r, \theta$$

$$J = \int_{-\infty}^{+\infty} t A(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_V k \cdot t \cdot c \, dv dt$$

Nous avons vu que, toujours sous l'hypothèse d'un bon mélange :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} t \cdot c \, dt = a_0^* g_0 - x \frac{a_0 g_0}{U_0} + \Phi_0(r, \theta)$$

$$\int_V k a_0^* g_0 \, dv = a_0^* g_0 \int_V k dv$$

$$\int_V \frac{a_0 g_0}{U_0} x k dv = \frac{a_0 g_0}{U_0} \int_V x k dv$$

Rappelons que les coordonnées cylindriques de la sonde ponctuelle sont :

$$\xi, \rho, \tau$$

Posons  $x = \xi + \alpha$  :

$$\int_V x k dv = \int_V \xi k dv + \int_V \alpha k dv$$

$$= \xi \int_V k dv + \int_V \alpha k dv$$

Supposons alors que nous fassions des mesures avec deux sondes distantes de L,  $L = \xi_1 - \xi_2$  :

$$I_1 = I_2 = a_0 g_0 \int_V k dv$$

sous l'hypothèse supplémentaire que les angles solides vus par les sondes soient les mêmes.

$$J_1 = a_0^* g_0 \int_{V_1} k dv - \frac{a_0 g_0}{U_0} \left[ \xi_1 \int_{V_1} k dv - \int_{V_1} \alpha k dv \right]$$

$$+ \int_{V_1} \Phi_0(r, \theta) k dv$$

$$J_2 = a_0^* g_0 \int_{V_2} k dv - \frac{a_0 g_0}{U_0} \left[ \xi_2 \int_{V_2} k dv - \int_{V_2} \alpha k dv \right]$$

$$+ \int_{V_2} \Phi_0(r, \theta) k dv$$

Sous réserve de l'hypothèse déjà faite

$$V_1 \equiv V_2 = V :$$

$$J_2 - J_1 = \frac{a_0 g_0}{U_0} L \int_V k dv$$

d'où :

$$G_2 - G_1 = \frac{L}{U_0}$$

Nous sommes donc conduit au même résultat que précédemment.

## Annexe II

Nous avons vu dans l'annexe I qu'il était possible de mesurer un débit en conduite à partir de la connaissance de l'abscisse  $G_A$  du centre de gravité temporel des courbes A (t).

$$G_A = \frac{\int_0^{\infty} A(t) t dt}{\int_0^{\infty} A(t) dt}$$

Il arrive que l'information A (t) issue de la sonde, qui est une suite d'impulsions, soit intégrée pour avoir une courbe A (t) continue.

D'une manière générale, soit un filtre linéaire dont la fonction de transfert est :

$$H(p) = \frac{\int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt}{\int_0^{\infty} e^{-pt} g(t) dt}$$

f (t), étant la fonction introduite à l'entrée du filtre; g (t), la fonction recueillie en sortie.

Dans notre cas, f (t)  $\equiv$  A (t) et g (t)  $\equiv$  B (t).

$$G_B = \frac{\int_0^{\infty} B(t) t dt}{\int_0^{\infty} B(t) dt}$$

Et nous cherchons à évaluer  $G_A - G_B$ .

$$\int_0^{\infty} e^{-pt} A(t) dt = H(p) \int_0^{\infty} e^{-pt} B(t) dt \quad (I)$$

Dérivons (I) par rapport à p; nous obtenons :

$$\int_0^{\infty} -te^{-pt} A(t) dt = H'(p) \int_0^{\infty} e^{-pt} B(t) dt$$

$$- H(p) \int_0^{\infty} -te^{-pt} B(t) dt \quad (II)$$

Pour  $p = 0$  le premier membre de (II) représente le numérateur de  $G_A$  au signe près — le premier membre de (I) représente le dénominateur de  $G_A$ .

$$-G_A = \frac{H'(0) \int_0^{\infty} B(t) dt - H(0) \int_0^{\infty} t \cdot B(t) \cdot dt}{H(0) \int_0^{\infty} B(t) dt}$$

$$G_B - G_A = \frac{H'(0)}{H(0)}$$

**Tableau 3**

<i>h</i>	L = 75	L = 125	L = 175	L = 225	L = 275	L = 325	L = 375	L = 425
0,1	1,01199	1,00720	1,00515	1,00400	1,00328	1,00277	1,00240	1,00212
0,2	1,00738	1,00443	1,00317	1,00246	1,00202	1,00171	1,00148	1,00130
0,3	1,00469	1,00281	1,00201	1,00156	1,00128	1,00108	1,00094	1,00083
0,4	1,00277	1,00166	1,00119	1,00092	1,00076	1,00064	1,00055	1,00049
0,5	1,00129	1,00077	1,00055	1,00043	1,00035	1,00030	1,00026	1,00023
0,6	1,00008	1,00004	1,00003	1,00002	1,00002	1,00002	1,00001	1,00001
0,7	0,99905	0,99943	0,99959	0,99968	0,99974	0,99978	0,99981	0,99983
0,8	0,99816	0,99889	0,99921	0,99939	0,99950	0,99957	0,99963	0,99967
0,9	0,99739	0,99842	0,99887	0,99912	0,99928	0,99939	0,99947	0,99954
1,0								0,99941

Le centre de gravité temporel est déplacé d'une quantité qui ne dépend que de la forme de la fonction de transfert à l'origine.

Si aux deux points de mesure nous avons les mêmes filtres :

$$G_{A2} - G_{A1} = G_{B2} - G_{B1}$$

puisque le déplacement du centre de gravité est indépendant de la forme de la courbe.

*Cas particulier :*

Le filtre linéaire est un intégrateur :

$$H(p) = \frac{a}{1 + \tau p} \quad \frac{H'(0)}{H(0)} = \tau$$

le centre de gravité est décalé de la constante de temps du filtre utilisé.

### Annexe III

Pour une injection instantanée, l'évolution de la concentration du traceur injecté en fonction de la distance *x* au point d'injection et du temps *t* compté depuis l'instant d'injection est donnée par :

$$y = \frac{K}{\sqrt{t}} e^{-(x-Ut)^2/4Dt}$$

où *K* dépend en particulier de la masse injectée et *D* caractérise la diffusion :

$$D \neq \frac{1}{2} UR \quad (R \text{ rayon de la conduite}).$$

On peut donc écrire, en posant :

$$\theta = \frac{Ut}{x}$$

$$y = \frac{K \sqrt{(U/x)}}{\sqrt{\theta}} e^{-L[(1-\theta)^2/\theta]} \quad (1)$$

en posant  $L = (x/2R)$ , distance au point d'injection exprimée en diamètres.

L'abscisse du barycentre est donnée par :

$$\theta_G = 1 + \frac{1}{4L}$$

Celle du maximum approximativement par :

$$\theta_S = 1 - \frac{1}{4L}$$

Pour  $\theta = 1$  nous avons :

$$y_1 = K \sqrt{\frac{U}{x}}$$

En posant :

$$y^* = \frac{y}{y_1}$$

nous obtenons une formule ne dépendant plus que de *L* et :

$$y^* = \frac{1}{\sqrt{\theta}} e^{-L[(1-\theta)^2/\theta]} \quad (2)$$

Les courbes  $y^*$  (*L* comme paramètre) ont approximativement toutes la même amplitude maximale, celle-ci ayant lieu à peu près pour  $\theta = 1$ .

Nous donnons dans le tableau 3 les valeurs des abscisses  $\tau$  du diamètre relatif à l'axe de temps pour des valeurs rondes  $h$  de  $y^*$  (0,1; 0,2; etc.) et diverses valeurs de *L*. On voit que  $\tau = 1 + \epsilon$  où  $\epsilon$  est toujours petit. La valeur exacte de la vitesse est donnée par :

$$U = \frac{\tau_2 x_2 - \tau_1 x_1}{t_2 - t_1}$$

La valeur approchée prise est :

$$U^* = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

---

**Abstract**
**Equipment for instantaneous flow measurement by radioactive tracer**

 by R. Wolf \*
 

---

This equipment features a radio-nuclide (barium 137) generator directly connected to a pneumatic injector, and two similar detectors on the outside of the pipe connected to an electronic counter giving a direct reading of the values from which the rate of flow is derived.

In developing these measurement methods, use was made mainly of such medium-period radio-nuclides as iodine 131, bromine 82 and sodium 24, with the following main purposes in view:

- (i) To find applications for short pipes (i.e. up to 80 diameters);
- (ii) Experimental confirmation of mathematical approaches;
- (iii) Design and development of equipment for simple use.

A barium 137 generator was developed, which has added considerable interest to the measurement of pipe flows by injection of radio-active salts. It relies on the natural caesium  $\rightarrow$  barium 137 relationship, with the "parent" caesium 137 being fixed to a highly-selective ion-exchange resin. Washing this resin in water carries the barium 137 bred by the disintegrating caesium away, but without moving the latter.

As barium 137 has a period of about 2.5 minutes, much higher radio-activity can now be fed into the pipe, for 100 minutes later finds it reduced to only 2-40 times its original value. This even makes repetitive closed-circuit tests feasible.

In view of these promising results, the author's team developed an injector fitting the generator jointly with Société Saint-Gobain-Techniques Nouvelles—who had supplied the generator—in order to eliminate any need to manipulate the radioactive solution between preparing it and feeding it into the pipe.

A brief description of the method now follows, in order to seriate the principal questions considered in the study:

In order to determine the rate of flow in a pipe at least 50 diameters long and whose cross-sections are known, a radio-active solution is injected and its times of passing two specific cross-sections A and B are detected from outside the pipe. The most important points considered in describing the method are the following:

- (i) Injection;
- (ii) Distance of point of injection from first detection section;
- (iii) Distance between the two detection sections;
- (iv) Detection.

The mathematical approaches are specifically dealt with in a three-part Appendix, as follows:

The first part shows that, knowing the abscissa of the temporal centre of gravity of the curve corresponding to the passage of the radio-active solution, the rate of flow in the pipe can be ascertained by outside observation.

The second part discusses deformation due to the detector filters.

The third part leads to the estimation of discharge error where interpretation is based on one particular geometrical point only.

The heading "injection" ((i) above) covers the injector and its operation.

Heading (ii) refers to a study of turbulent diffusion phenomena and the "efficient mixing" length where detection is outside the pipe, and especially the determination of  $I_{\infty}$  from observed  $I_1$  and  $I_2$  values.

The distance between detection sections (heading (iii)) does not enter into the method error calculations. It determines the accuracy of radio-active solution passage time measurement at the two sections.

Heading (iv) comprises the analysis of the two following data abstraction methods:

- (a) Plotting of curves and determination of a point with about the same characteristics as the centre of gravity as regards measurement.
- (b) Bringing the centre of gravity of the radio-active "cloud" into evidence by direct processing of observed data.

The discussion of (a) shows the difficulties of using a single geometrical point and defines one of them, and Table 1 lists the results obtained from 110 injections in successive groups of 10.

Under (b), the calculator associated with the detectors is described, sub-groups are listed, and the development tests involved are reviewed.

Finally, the advantages, applications and potential development scope of the method are discussed.

---

\* E.D.F., Centre de Recherches et d'Essais de Chatou.