

La méthode chimique pour la mesure du débit des cours d'eau

Chemical method for the gauging of streams

PAR HENRY DUMAS

INGÉNIEUR AU LABORATOIRE DE MÉCANIQUE DES FLUIDES DE L'E.N.S.I. DE GRENOBLE

Le principe de la méthode chimique, l'importance des conditions de mélange. Analyse détaillée de la propagation d'un nuage (salé ou coloré) dans un cours d'eau, dans le cas d'une injection instantanée, puis d'une injection prolongée. Conditions d'apparition d'un régime permanent, détermination de sa durée d'où l'on peut déduire une durée d'injection. Etude de la précision de la méthode, influence d'une non-homogénéité du mélange dans la zone de prélèvement. Causes d'erreur accidentelles.

The principle of the chemical method; importance of mixing conditions. Detailed analysis of the propagation of a salt or coloured cloud in a water course, first of all in the case of instantaneous injection and secondly, in that of a prolonged injection. Conditions of formation of a permanent regime; determination of its duration, from which can be deduced the duration of an injection. Study of the accuracy of this method; influence of non-homogeneity of mixture in the sampling zone. Causes of accidental error.

INTRODUCTION

Le problème de la mesure du débit des cours d'eau connaît de nos jours un regain d'actualité. L'importance des projets d'équipement élaborés, notamment par Electricité de France, justifiait, en effet, qu'une attention toute particulière fût apportée à l'étude des ressources hydrauliques des diverses régions exploitées.

Il convient de rappeler ici la remarquable organisation de stations hydrométriques qui fut réalisée au début de ce siècle par les Inspecteurs généraux des Ponts et Chaussées : DE LA BROUSSE et TAVERNIER. Leur action, continuée jusqu'à ce jour, se poursuit dans les Circonscriptions électriques administratives et l'importante documentation réunie par le Service des Grandes Forces hydrauliques et publiée par les *Annales de l'Agriculture* jusqu'en 1920 constitue un fonds d'une richesse considérable pour les études statistiques des débits de la plupart des cours d'eau du Sud-Est du pays. Nous rappelons également les travaux du Service hydrologique de la Société Hydrotechnique de France qui ont abouti, depuis 1939, à la publication de l'*Annuaire hydrologi-*

que de la France, dans lequel sont fournis les débits journaliers relevés à plus de 70 stations, ainsi que toutes les données caractéristiques intéressantes ces débits.

De plus, la connaissance des apports des portions des bassins versants situés à haute altitude s'est avérée nécessaire en raison des captages en haute montagne de plus en plus fréquents.

C'est alors que les techniciens des mesures de débit ont été amenés à étudier tout particulièrement les conditions d'exécution des jaugeages dans les régions d'accès difficile.

Bien que les diverses méthodes de mesure des débits soient familières aux techniciens, nous rappelons succinctement, ci-après, leurs caractéristiques générales.

Méthodes usuelles

Au premier plan des méthodes usuelles se place celle du moulinet qui consiste à explorer le champ des vitesses dans une section donnée du

cours d'eau. Il y a lieu, dans ce cas, de choisir un secteur de la rivière où l'écoulement s'organise en filets à peu près parallèles aux rives et où la turbulence est aussi réduite que possible. La méthode exige le plus souvent l'installation d'une passerelle, ou tout au moins d'un treuil téléférique. On peut profiter d'un pont s'il existe; il est même fréquent d'exécuter les mesures à l'aide d'une barque. Il est parfois nécessaire de régulariser le lit et les berges pour obtenir de bonnes conditions de mesures; ces derniers travaux sont toujours très coûteux.

- La méthode ancienne du flotteur lesté exige un tirant d'eau relativement grand, un écoulement bien parallèle et l'absence de turbulence. Sa précision est toujours faible.
- La méthode du déversoir peut être réalisée sur les petits cours d'eau. Elle nécessite toutefois des travaux en rivière assez importants et l'engravement des seuils compromet très souvent la fidélité des stations dont le contrôle par une autre méthode doit être fréquemment exécuté. Toutefois, notons l'existence de seuils jaugeurs dont l'engravement peut être extrêmement réduit.
- Toutes ces méthodes rencontrent leur difficulté majeure dans la nécessité d'éviter ou de calmer la turbulence de l'écoulement et leurs inconvénients principaux dans l'obligation d'exécuter des travaux importants et coûteux de régularisation ou d'accès.
- Enfin vient la méthode chimique qui transforme en avantages les effets précédemment nuisibles de la turbulence et s'accommode avec souplesse des particularités locales de l'écoulement et des conditions d'accès.

C'est le 20 juillet 1863 que SAINTE-CLAIRE DEVILLE présente à l'Académie des Sciences une note de Th. SCHLOESING sur une « Nouvelle méthode pour jauger les fluides ».

Il s'exprime en ces termes :

« Les méthodes qui ont servi à déterminer les quantités d'eau, de vapeur et d'air s'écoulant dans un canal ou par un orifice, ont toujours reposé sur des données et des expériences purement mécaniques et personne, je crois, n'a encore songé à faire intervenir la chimie dans de semblables questions... »

Th. SCHLOESING, dans sa note, propose l'emploi du chlorure de sodium ou de calcium. En 1896 et en 1905, STROMEYER publie les résultats de ses essais sur la New River à Ware et sur l'East London Water Works.

En 1906, VAN ITERSOM mesure le débit de ses machines élévatoires de la ville de La Haye à l'aide de l'hyposulfite de soude.

A partir de 1910, BOUCHET et MELLET, professeurs à l'Université de Lausanne, placent la méthode chimique sur le plan industriel et publient, dans le numéro de septembre 1910 de *la Houille Blanche*, un article de fond sur la méthode avec l'emploi du chlorure de sodium.

Parmi les chercheurs qui ont développé et expérimenté la méthode, on peut citer (1) :

En Suisse : Collet, E. Reichel, H. Dufour, F. Kuntschen, Winkler et Wipf, Zirilli.

En Allemagne : Kirschmer, Esterer, Thoma, Ott.

En Amérique : B. F. Groat.

Aux Indes Néerlandaises : C.G.J. Vreedenburgh.

En Italie : Barbagelata, Salvini et Pisa.

En France : J. Goguel, E. Pruvot, M. Dodero, la Société Hydrotechnique de France (Code d'Essais), le Laboratoire d'Hydraulique de l'Université de Grenoble.

CHAPITRE I

PRINCIPE DE LA MÉTHODE CHIMIQUE

I. — Exposé du principe de la méthode

On injecte dans une section donnée de la rivière dont on veut jauger le débit Q_1 une solution concentrée de titre connu N_1 d'un sel approprié. Cette injection est faite à un débit q rigoureusement constant.

Dans une autre section située en aval de la

précédente et suffisamment éloignée de la première pour que la solution injectée forme avec l'eau de la rivière un mélange parfaitement homogène, on prélève des échantillons dont on détermine le titre N_2 en sel injecté.

1. Cf. Bibliographie.

Les conditions idéales répondant aux hypothèses suivantes sont supposées réalisées :

1° La turbulence de la rivière est telle que le mélange de la solution concentrée avec l'eau de la rivière est parfaitement homogène dans la section où sont faits les prélèvements.

2° Aucune fraction du sel injecté ne disparaît avant son arrivée à la section de prélèvement, soit par adsorption au contact du terrain ou des matières en suspension, soit par voie chimique, soit par fuite quelconque.

Deux cas se présentent :

Premier cas : le sel injecté n'existe pas à l'état naturel dans l'eau de la rivière.

Dans ces conditions :

Il passe dans la section où se fait l'injection une quantité de sel égale à $q N_1$ grammes par seconde.

Il passe dans la section de prélèvement une quantité de sel égale à $Q_2 N_2$ grammes par seconde.

Q_2 étant égal à $Q_1 + q$, on peut écrire l'égalité :

$$q N_1 = (Q_1 + q) N_2$$

d'où :

$$Q_1 = q \left(\frac{N_1}{N_2} - 1 \right)$$

q étant généralement négligeable (de l'ordre de 1/100.000) par rapport à Q_1 , l'expression précédente se réduit à :

$$Q_1 = q \frac{N_1}{N_2}$$

Le débit de la solution concentrée et le débit de la rivière sont en raison inverse des titres.

Deuxième cas : l'eau de la rivière contient en son état naturel une certaine quantité du sel choisi pour l'injection. Soit n le titre des eaux naturelles en ce sel. Il passe cette fois dans la section d'injection :

$(Q_1 n + q N_1)$ grammes de sel par seconde.

Il passe dans la section de prélèvements :

$(Q_1 + q) N_2$ grammes de sel par seconde,

d'où :

$$Q_1 n + q N_1 = (Q_1 + q) N_2$$

On en tire :

$$Q_1 = q \frac{N_1 - N_2}{N_2 - n}$$

II. — Conditions de mélange

La première hypothèse formulée plus haut, d'un mélange aussi homogène que possible dans la section où sont faits les prélèvements, a une grande importance. Dans le cas d'un mélange non homogène, la distribution de la solution injectée, liée à la turbulence, est le plus souvent discontinue et en conséquence toute intégration dans la section transversale de prélèvement tendant à obtenir une valeur moyenne du titre N_2 s'avère impossible.

Si N_e est le titre local en un point et V la composante, normale à la section, de la vitesse moyenne en ce point :

Il passe dans un tube de courant de section ds une quantité de sel égale à :

$$V ds N_e \text{ g. par seconde.}$$

Dans ces conditions, le titre moyen est défini par la formule suivante que l'on peut mettre sous la forme :

$$N_2 = \frac{\sum N_e v ds}{\sum v ds} = \frac{\sum (N_e v)}{\sum v}$$

à condition de prendre pour ds des aires élémentaires égales entre elles.

Si l'homogénéité n'était pas parfaite, il serait donc nécessaire de tenir compte des vitesses en chaque point de prélèvement, donc de les mesurer, ce qui enlèverait tout intérêt à la méthode.

Nous verrons plus loin, dans le paragraphe IV, « Précision de la méthode », dans quelles limites s'entend l'homogénéité du mélange.

III. — Définition du régime permanent

Les équations données au début de cet exposé supposent que les débits en masse de sel soluble sont les mêmes au point d'injection et au point de prélèvement. Il ne doit donc y avoir ni apport, ni perte de matière soluble entre ces deux points.

Il faut donc être certain que la totalité du sel injecté passe par la section au moment de la prise des échantillons.

Ceci nous amène à étudier (indépendamment de la deuxième hypothèse formulée au début : absence de perte de sel soluble par une voie

physique ou chimique quelconque) comment se propage un nuage d'une solution chimique ou simplement colorée dans un cours d'eau.

a) PROPAGATION D'UN NUAGE DANS UN COURS D'EAU.

1° Injection instantanée :

Si l'on projette dans un cours d'eau en écoulement uniformé un certain volume V d'une solution colorée de titre N_1 , et ceci d'une façon quasi instantanée, on observe les effets suivants :

La solution saisie par l'écoulement se distribue dans le cours d'eau et envahit plus ou moins rapidement la section tout entière formant un nuage qui se répartit sur toute la largeur de la rivière (1) :

L'évolution de ce nuage remanié à chaque instant par la turbulence est soumise aussi à la dis-

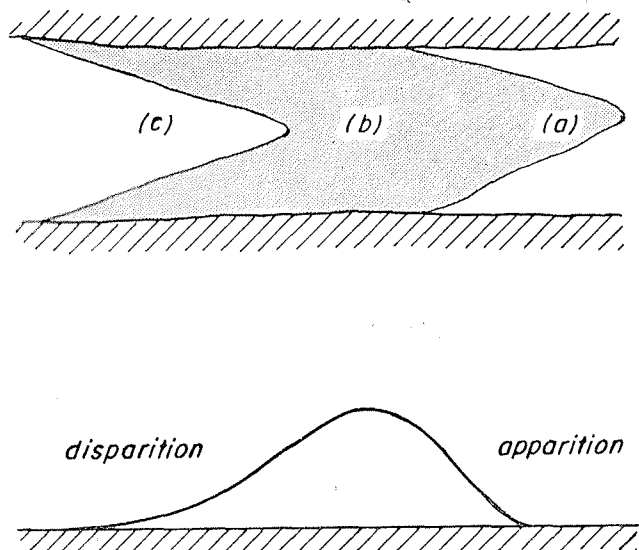


FIG. 1

tribution verticale et horizontale des vitesses, d'où un front coloré qui avance dans la rivière plus rapidement dans l'axe que sur les bords où il est freiné. De même, au bout d'un certain temps, le front arrière du nuage se trouve

1. La répartition des particules colorées dans l'écoulement est due ici uniquement à la turbulence vu la rapidité de cette répartition. C'est pourquoi nous n'employons pas à dessein l'expression « diffusion ». Celle-ci est réservée au phénomène toujours très lent qui exprime en unités-sec K ou unités-jours D la quantité de substance qui traverse en 1 sec ou 1 jour ($D = 86.400 K$) une section de 1 cm^2 quand la concentration du corps dissous passe, dans un intervalle de 1 cm de n à $n + 1$ g par cm^3 .

A titre d'exemple, pour les sels minéraux neutres, D est compris entre 0,5 et 1.

rejoint en son milieu par des masses d'eau pures qui le pénètrent peu à peu. Très rapidement, le nuage prend ainsi la forme plus ou moins bien définie d'une pointe de flèche qui s'étire en longueur, tout en progressant d'amont en aval. Un observateur placé à une certaine distance du point d'injection verra ainsi arriver, comme le montre la figure 1, un front coloré (a) dans l'axe de la rivière, puis un nuage (b) occupant toute la section et offrant, à un instant donné, une coloration maximum, et enfin le front arrière (c), divisé en deux parties latérales qui finiront elles-mêmes par disparaître au fur et à mesure du renouvellement plus ou moins accéléré des masses d'eau qui s'effectue le long des rives.

On se trouve donc en présence d'un nuage qui s'étire progressivement dans le sens de l'écoulement et dont le titre en sel soluble varie continuellement dans le temps et dans l'espace.

La courbe représentative de l'évolution dans le temps du titre d'un tel nuage prend théoriquement la forme d'une cloche présentant une partie montante (apparition du nuage — titre croissant) plus raide que la partie descendante (disparition du nuage) laquelle se rapproche asymptotiquement du titre nul (fig. 1) (1).

Dans tout ce qui suit, nous nous placerons dans l'hypothèse suivante :

Le brassage énergétique dû à la turbulence à échelle relativement grande que l'on rencontre dans les cours d'eau fortement agités où le renouvellement des masses d'eau est intensif et rapide (condition impérative fixant le choix du secteur de mesures) provoque un balayage tel que la courbe d'évolution du nuage dans sa phase finale n'est pas asymptotique mais finie. En fait, l'expérience montre que dans un secteur convenablement choisi, où le transit de l'eau est suffisamment rapide en tous les points des tranches successives de l'écoulement, un nuage d'un colorant aussi puissant que la fluoresceïne est balayé complètement en un temps relativement court (la fluoresceïne est encore très nettement visible à l'œil nu au titre de 10^{-5}).

2° Injection prolongée. — Régime permanent. — Durée d'injection :

Nous assimilons une injection prolongée à une suite ininterrompue d'injections instantanées de masses élémentaires de colorant. Toujours dans l'hypothèse précédemment adoptée, nous admettons que chacun des nuages élémentaires se propage dans l'écoulement suivant une courbe d'évolution finie. Nous admettons donc implicitement

1. Cf. Thèse de M. MARTIN A. MASON, Université de Grenoble.

que l'évolution dans le temps du titre du nuage total n'est pas héréditairement influencée par les résidus subsistant théoriquement aux extrémités asymptotiques des courbes d'évolution des nuages élémentaires. On pourrait craindre, en effet, que dans la section où seraient faites les prises d'échantillons, les « résidus » ne se retranchent et ne conduisent à une évaluation par défaut du titre N_2 final recherché pour le calcul du débit.

Injectons la solution de titre N_1 à débit constant q pendant un temps prolongé. Il tombe dans la rivière $N_1 q$ grammes de sel par seconde.

Les phénomènes se trouvent modifiés (fig. 2).

L'observateur verra, comme précédemment, le

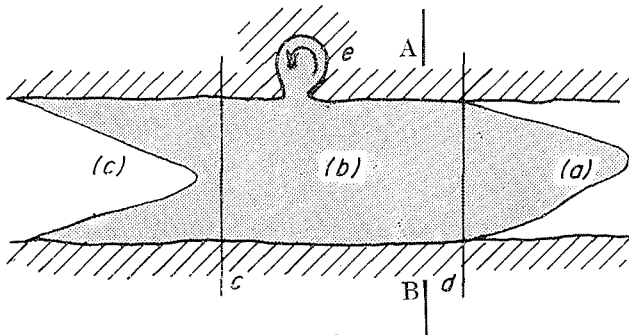


FIG. 2

front (a) du nuage progresser dans l'axe de la rivière. Puis viendra le nuage (b) de longueur $c d$ qui durera beaucoup plus longtemps que dans le premier cas; enfin viendra le front arrière divisé (c) du nuage lorsque l'injection aura cessé. Dans une section AB où le mélange de la solution colorée avec l'eau de la rivière se réalise à chaque instant suivant un cycle identiquement renouvelé, il passe $N_2 Q_2$ grammes par seconde de sel soluble et ceci d'une façon permanente, pendant une partie de l'injection. On a dans la section AB :

$$N_2 Q_2 = N_1 q$$

ce qui correspond bien à la définition de principe du débit. On observe donc dans la section AB un « régime permanent » de coloration dont la durée dépend en partie du temps d'injection. C'est donc pendant ce régime permanent que devront être prélevés les échantillons dont l'analyse fournira le titre N_2 .

Mais il peut arriver qu'une zone d'eau quasi morte, dans laquelle les échanges seraient très lents, existe en (c) par exemple sur l'une des rives ou dans le lit, sous la forme d'une fosse profonde. L'observateur verrait alors une partie du colorant pénétrer lentement dans cette zone, l'envahir complètement, puis y séjourner pendant un temps plus ou moins long, proportionné

à la durée d'injection, et enfin y subsister avant de s'effacer complètement longtemps même après la disparition totale du nuage proprement dit dans la rivière.

Toute zone d'eau morte se comporte ainsi pendant tout le temps préliminaire pris pour sa pénétration totale par le colorant comme un apport d'eau pure dans le nuage dont le titre final ne devient égal à N_2 que lorsqu'il entre dans cette zone autant de colorant qu'il en sort.

On conçoit dès lors que la durée d'établissement du régime permanent de coloration constante de titre N_2 peut être très variable selon la rapidité des échanges entre les diverses masses d'eau de la rivière. On remarquera, de plus, que le long du secteur de mesure les zones d'eau morte sont gagnées successivement par le colorant. Si donc ces zones étaient de volumes égaux et si la durée de renouvellement des masses d'eau était la même pour toutes, on devrait calculer le temps total d'injection, de manière à le rendre toujours, par sécurité, au moins égal à la somme de ces durées (1).

En fait, les zones d'eau mortes peuvent être de volumes très divers. Nous verrons plus loin comment une expérience préliminaire simple permet de déterminer la durée de l'injection.

3° Durée du régime permanent :

Supposons que, toutes conditions de bon mélange et de rapidité des échanges étant assurées, l'injection et la répartition du colorant puissent être réalisées de manière à obtenir au départ un nuage à fronts raides, tel que figure 3 (abscisse x_0).

Un observateur placé près de l'abscisse x_0 verrait apparaître subitement le nuage avec le titre N_2 normal, lequel subsisterait pendant le temps t de l'injection.

Le même observateur se transportant à des abscisses x_1, x_2 de plus en plus éloignées de x_0 verra le rectangle initial se déformer en raison des frottements et du remaniement par turbulence et notera une montée progressive du titre de zéro à N_2 , puis un palier ab de plus en plus petit correspondant au régime permanent, et ensuite une diminution du titre N_2 jusqu'à la fin du passage du nuage.

A une certaine abscisse x_3 , dite « abscisse limite », le palier ab sera réduit à un point. Au delà de ce point, le nuage étiré en longueur se dilue dans des quantités d'eau de plus en plus grandes et le titre maximum $N'_2 < N_2$ diminue progressivement pour s'annuler à une abscisse

1. C'est pourquoi l'on s'attache à choisir un secteur où ces zones sont aussi réduites que possible.

infinie. La durée du régime permanent dépend ainsi non seulement de la durée de l'injection, mais encore de l'abscisse du lieu où sont faits les prélèvements.

De ce qui précède, on peut déduire dès maintenant les premiers principes qui guideront l'expérimentateur dans l'application de la méthode :

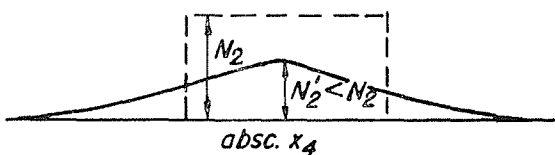
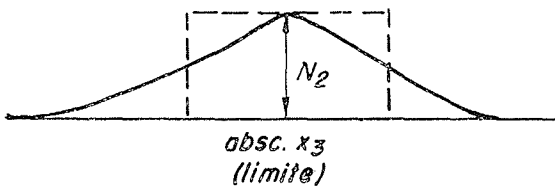
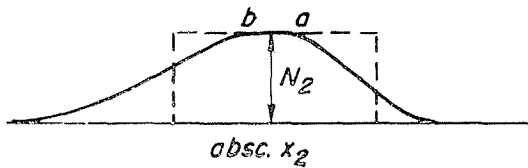
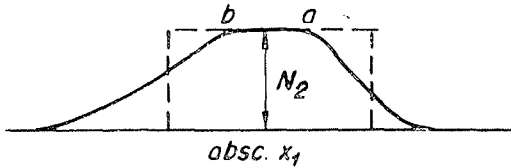
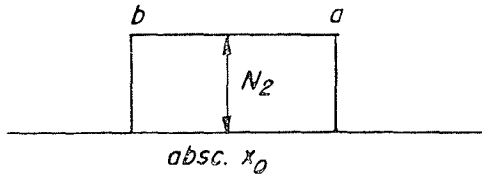


FIG. 3

1° Obtenir un mélange homogène :

Condition : Turbulence active dans tout le secteur de mesure.

2° Obtenir l'établissement rapide du régime permanent :

Condition : Renouvellement accéléré des masses d'eau en tous points du secteur de mesure. Eviter les zones d'eau morte.

3° Obtenir une durée suffisante du régime permanent :

Conditions : 1) Durée convenable de l'injection; 2) Choix judicieux de l'abscisse du lieu de prélèvement.

b) DÉTERMINATION DE LA DURÉE DU RÉGIME PERMANENT :

On comprend l'intérêt que présenterait pour un expérimentateur la connaissance préalable de la durée du régime permanent en tous les points du secteur choisi pour la mesure du débit. Un essai préliminaire de propagation d'un nuage coloré permet de la déterminer.

Reprenons l'étude de la propagation du nuage [par. III (a)].

Portant en abscisse (fig. 4) les distances et,

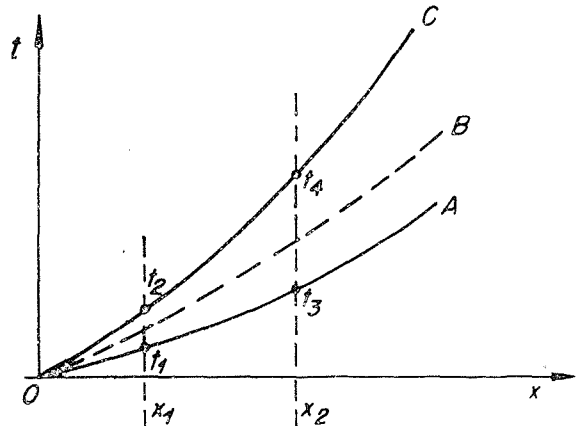


FIG. 4

en ordonnées, les temps, représentons le passage du nuage en considérant pour commencer le cas de l'injection instantanée du colorant.

Un observateur placé à l'abscisse x_1 voit arriver le nuage au temps t_1 et le voit disparaître au temps t_2 . A l'abscisse x_2 le nuage étiré en longueur apparaît au temps t_3 et disparaît au temps t_4 . Ce que l'on nomme « disparition du nuage » est l'effacement total de la coloration sur les rives du cours d'eau. Le séjour du colorant sur les rives caractérise en effet la durée des échanges

dans les zones où ces échanges sont les plus lents. Les mêmes observations peuvent être répétées en autant d'abscisses que l'on voudra. On obtient ainsi un système de courbes d'apparition et de disparition du nuage auquel on peut ajou-

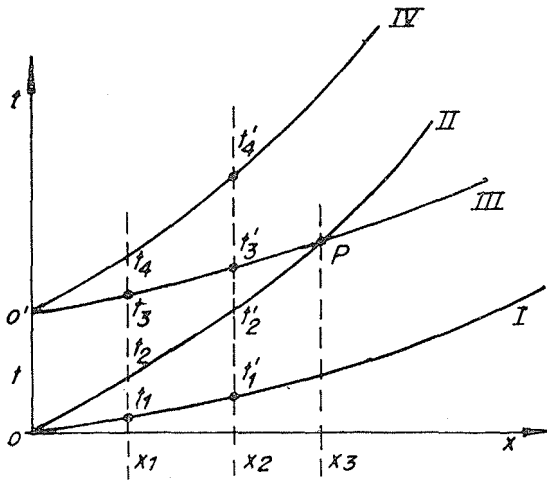


FIG. 5

ter la courbe en pointillé marquant le passage du maximum de coloration (1).

Répetons les mêmes observations, mais en faisant une injection prolongée de durée t (fig. 5).

L'observateur placé à l'abscisse x_1 note l'instant t_1 d'apparition du nuage, constate qu'à partir d'un temps t_2 la coloration reste constante et maximum (régime permanent) jusqu'au temps t_3 et voit disparaître le nuage au temps t_4 .

A l'abscisse x_2 , l'observateur constate une durée de coloration maximum uniforme $t'_2 t'_3$ (régime permanent) plus courte qu'à l'abscisse x_1 , le nuage ayant toutefois mis plus longtemps à passer ($t'_1, t'_4 > t_1 t_4$).

A l'abscisse x_2 la durée de coloration uniforme est nulle (point P) et au-delà de cette abscisse un observateur verrait l'intensité de coloration de nuage diminuer progressivement (voir également fig. 3). On peut remarquer que les premières particules de colorant se propagent dans la rivière de la même façon que dans l'injection instantanée. Il en est de même pour les dernières particules injectées.

Autrement dit, le triangle curviligne OPO' peut être obtenu à partir de la première expérience (injection instantanée) par une translation du couple de courbes (fig. 4) de O à O' (fig. 5).

1. La forme de ces courbes dépend essentiellement de la nature de l'écoulement dans le secteur choisi. Elles peuvent être très déformées si, par exemple, la rivière présente une succession de rétrécissements et d'élargissements.

Schématisons le phénomène en représentant le long d'une ordonnée d'abscisse x_2 par exemple (fig. 6) la variation de coloration dans les deux cas.

L'observateur placé en x_2 voit arriver les premières particules colorées en (a) (masse de particules par sec), observe un maximum en (b) et les voit disparaître en (c). De même, il voit arriver les dernières particules en (d), le maximum en (e), la fin en (f).

Il en résulte la loi de variation $N_2 = f(t)$ de la masse de particules passant par sec dans la tranche x_2 . Le palier commence en (c) et se termine en (d).

La surface de la courbe $N_2(t)$ représente bien la masse totale des particules de colorant injecté.

L'intervalle de temps cd correspond au « régime permanent » pendant lequel devront être faites les prises d'échantillons. En effet, considérons à nouveau le double couple de courbes de la figure 5 (fig. 7). La dernière particule d'une masse, partie de x_0 au temps t_0 arrive en C (absc. x_2) où elle est rejointe par la première particule d'une masse partie à l'instant t_1 ($t_1 < t_0$)

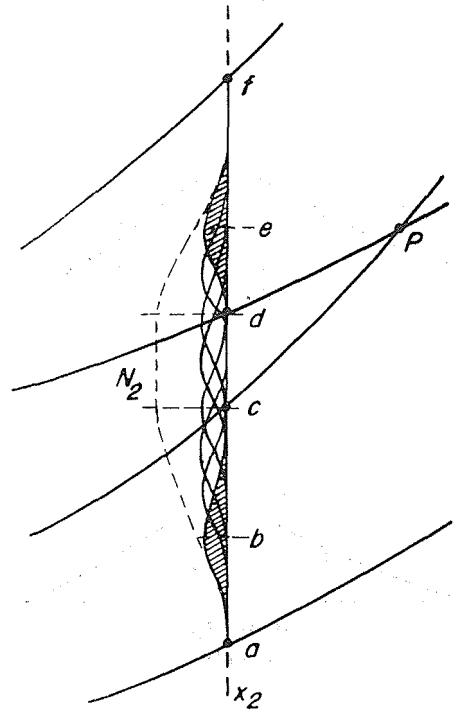


FIG. 6

parallèle à Oa). Il y a donc en C addition de ces particules et réalisation de la teneur N_2 et seulement à partir de C puisque toute particule, partie par exemple au temps $t'_1 < t_1$ et arrivant en x_2 , rencontre en a' des masses d'eau pure parties de x_0 au temps $-t_1$.

et :

$$\frac{\Delta Q_1}{Q_1} = \frac{\Delta q}{q} + \frac{\Delta(N_1 - N_2)}{N_1 - N_2} + \frac{\Delta(N_2 - n)}{N_2 - n}$$

Comme précédemment, on a :

$$\frac{\Delta q}{q} = \pm \frac{2}{1.000}$$

On peut remarquer ensuite que le rapport N_2/N_1 de la solution finale à la solution concentrée est toujours extrêmement faible :

$$\left(\frac{1}{500.000} < \frac{N_2}{N_1} < \frac{3}{1.000} \right)$$

On peut donc écrire :

$$\frac{\Delta(N_1 - N_2)}{N_1 - N_2} = \frac{\Delta N_1}{N_1}$$

soit, comme précédemment :

$$\frac{\Delta N_1}{N_1} = \pm \frac{3}{1.000}$$

On peut également remarquer que le titre final N_2 étant toujours assez voisin du titre n des eaux naturelles, les erreurs de titration sont du même ordre de grandeur. On peut donc écrire :

$$\Delta N_2 = \Delta n$$

d'où :

$$\frac{\Delta(N_2 - n)}{N_2 - n} = \frac{2\Delta N_2}{N_2 - n} = \frac{2\Delta N_2}{N_2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{n}{N_2}}$$

Cette expression met en évidence le rapport entre les titres n et N_2 .

On a finalement :

$$\frac{\Delta Q_1}{Q_1} = \frac{2}{1.000} + \frac{3}{1.000} + \frac{2\Delta N_2}{N_2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{n}{N_2}}$$

L'erreur globale sur le débit dépend ici non seulement de l'erreur relative commise à l'analyse sur le titre N_2 mais encore du rapport n/N_2 .

Si, dans l'expression précédente, on fait $n = 0$, $2\Delta N_2/N_2$ devient $\Delta N_2/N_2$ et l'on retombe sur le premier cas.

Si l'on admet que, par voie volumétrique, ou colorimétrique suivant le sel employé, on peut déterminer N_2 à 0,5 % près, on aura :

PREMIER CAS :

$$\frac{\Delta Q_1}{Q_1} = 1 \%$$

DEUXIÈME CAS :

$$\frac{\Delta Q_1}{Q_1} = \frac{5}{1.000} + \frac{10}{1.000} \cdot \frac{1}{1 - \frac{n}{N_2}}$$

Pour un rapport n/N_2 couramment adopté, tel que :

$$\frac{n}{N_2} = \frac{1}{5}$$

on a :

$$\frac{\Delta Q_1}{Q_1} = 1,75 \%$$

Pour :

$$\frac{n}{N_2} = \frac{1}{10}$$

on aurait :

$$\frac{\Delta Q_1}{Q_1} = 1,6 \%$$

On aperçoit dès maintenant l'avantage qui peut être apporté à la méthode par l'emploi d'un sel non présent dans les eaux naturelles.

En effet, le rapport n/N_2 n'intervenant plus, les quantités de sel à utiliser se trouvent réduites *ipso facto*. De plus, à égalité d'erreur, $\Delta N_2/N_2$, on a dans le premier cas une erreur finale environ moitié moindre que dans le second.

Enfin le titre n des eaux naturelles peut ne pas être constant dans le temps (notamment au cours de fortes précipitations) et il y aurait lieu de tenir compte de ses variations, d'où l'intérêt d'éliminer cette cause supplémentaire d'erreur.

b) INFLUENCE DE LA NON-HOMOGENÉITÉ DU MÉLANGE.

L'expression du titre N_2 , telle qu'on l'a donnée au paragraphe II ci-dessus :

$$N_2 = \frac{\sum N_e v}{\sum v}$$

montre qu'il n'est pas légitime, en principe, de prendre pour N_2 la moyenne arithmétique

$$N_2 = \frac{\sum N_e}{n}$$

des titres élémentaires N_e de n échantillons prélevés.

Les recherches de F. KUNTSCHEN (1926) et D. THOMA (1928) ont montré que dans le cas d'un

mélange non homogène l'erreur finale est d'autant plus grande que l'expression :

$$\frac{\text{moy. de } N_e v}{\text{moy. de } N_e \times \text{moy. de } v}$$

est plus différente de l'unité.

Or, l'écueil principal rencontré dans l'application de la méthode chimique réside dans la difficulté d'obtenir un mélange homogène.

En effet, mis à part les cours d'eau à grande turbulence où l'eau présente un aspect bouillonnant et où l'expérience montre que l'on obtient un mélange intime au bout d'un parcours très réduit, on peut se trouver en présence de rivières larges à tirant d'eau relativement élevé et dans lesquelles l'écoulement suit souvent des trajets électifs où la solution se propage de préférence sans se répartir dans la masse toute entière avec une homogénéité satisfaisante. La méthode chimique doit-elle être rejetée *a priori* dans ces cas? Seule l'expérience permet d'en décider.

Les études comparatives poursuivies par l'Institut de Recherches Hydrauliques allemand à la station d'Obernach sur la Walchensee et à l'usine d'Amsteg où les méthodes du moulinet (de divers types), du déversoir, de vitesse d'un nuage salé, de la capacité jaugée, ont été expérimentées pour des débits relativement élevés, ont donné l'avantage à la méthode chimique. A l'usine d'Amsteg où, dans un cas particulier, les différences de concentrations par rapport à la moyenne arithmétique variaient même de + 16,5 % à - 20,5 %, l'erreur finale sur le débit fut seulement de 1 % en partant de la moyenne arithmétique des titres des échantillons et par rapport à la capacité jaugée.

F. KUNTSCHEN et D. THOMA, dans un essai comparatif avec les moulinets, ont trouvé :

$$(a) N_2 = \frac{\sum N_e}{n} = 22,174 \quad Q = 3.987 \text{ l/s}$$

$$(b) N_2 = \frac{\sum N_e v}{\sum v} = 22,164 \quad Q = 3.989 \text{ l/s}$$

$$(c) \text{ Bassin jaugé.} \quad Q = 3.979 \text{ l/s}$$

avec des variations de N_e par rapport à la moyenne arithmétique allant de - 4 à + 9 %. Ils ajoutent qu'il est fréquent de trouver pour (a) une valeur plus précise que pour (b). L'explication qu'ils donnent de ces résultats paradoxaux est que, du fait de la turbulence, les mesures de vitesses sont toujours entachées d'erreurs qui ne se compensent pas toujours dans le calcul de :

$$N_2 = \frac{\sum N_e v}{\sum v}$$

Les études de l'Institut de Recherches allemand ont montré que :

— L'erreur est positive ou négative avec prédominance de l'erreur positive, le débit étant alors légèrement plus grand.

— Il suffit, dans la plus grande généralité des cas, de prendre pour N_2 , titre final, une simple moyenne arithmétique des teneurs élémentaires des échantillons.

Enfin les études comparatives poursuivies de 1905 à 1926 par STROMEYER, REICHEL, VREEDENBURGH, KIRSCHMER, COLLET, MELLET, LUTSCH, KUNTSCHEN et THOMA, GROAT, dans divers pays et pour des débits allant de 200 l/s à 20 m³/s ont montré la valeur de la méthode même dans des cas de mélange non absolument homogène.

On peut déduire de ce qui précède que des fluctuations relativement importantes du titre N_2 par rapport à la moyenne arithmétique des titres élémentaires N_e peuvent être tolérées sous réserve :

1° Que tous les points de la section où sont faits les prélèvements aient été touchés par la solution;

2° Qu'un régime permanent de concentration ait été constaté en chaque point de prélèvement.

Cette dernière condition implique en effet que dans tout le secteur précédant la section de prélèvement les zones d'eau morte aient été toutes et totalement gagnées par la solution ou, en d'autres termes, que les masses d'eau pures et colorées aient accompli leur cycle complet d'échange dans chacune d'elles. C'est là la condition de beaucoup la plus importante à observer.

c) AUTRES CAUSES D'ERREUR :

Parmi les autres causes qui peuvent avoir une incidence importante sur la précision finale, on notera :

1° Non homogénéité de la solution concentrée.

La préparation de cette solution doit être exécutée avec soin. Le mélange dans les réservoirs d'injection doit être intime. On doit éviter, d'une part, que du sel non dissous demeure à l'état solide dans le réservoir et, d'autre part, qu'un classement en couches de densités différentes ne s'opère dans celui-ci. Un brassage prolongé est donc nécessaire.

2° Variation du débit q d'injection.

L'injection doit être faite par un des procédés indiqués plus loin et dont la valeur est éprou-

vée par l'expérience. Comme le débit est toujours déterminé par un diaphragme alimenté sous charge constante, il y a lieu d'éviter l'obstruction de ce diaphragme par des corps étrangers. Le diaphragme sera étalonné au laboratoire au besoin en fonction de la température et de la densité du liquide.

On étudiera au chapitre III les divers procédés d'injection avec leurs avantages et inconvénients respectifs.

3° Pollution des flacons de prélèvement.

La plus grande propreté doit être observée dans les prises d'échantillons. Il est évident que si l'on introduit accidentellement des traces de sel dans les échantillons, ceux-ci ne peuvent être exploités.

4° Pertes de sel soluble. — Ces pertes sont de deux catégories :

a) Perte par fuite.

Si une partie de la solution est évacuée en dehors de l'écoulement avant réalisation du mélange complet avec l'eau de la rivière, par suite de la présence d'une fuite sur les rives ou d'un parcours souterrain, le débit sera mesuré par excès.

b) Pertes par adsorption ou réduction du sel.

Suivant le sel employé, une partie de ce sel pourrait être adsorbée au contact du terrain (effet qui peut être sensible en présence d'argiles) ou des sédiments en suspension dans l'eau. Par ailleurs, le sel pourrait être réduit par voie chimique en présence des sels solubles contenus à l'état naturel dans l'eau ou encore réduit par les matières organiques. C'est là qu'intervient, pour une part très importante, le choix du sel soluble à utiliser.

5° Pertes opératoires accidentelles de solution.

Dans la plus grande généralité des cas, l'injection est faite à la surface du courant d'eau à

mesurer. Il y a lieu d'éviter par exemple les projections de solution par le vent sur les berges. Lorsque l'injection est faite dans une rivière partiellement ou complètement recouverte de glace ou de neige, il peut y avoir projection de solution sur la neige où elle est retenue. Dans ce cas, il y a lieu de s'assurer que le mélange a pu se réaliser avant tout risque de contact avec la neige.

6° Erreurs propres d'analyse.

Les méthodes d'analyse se perfectionnant chaque jour, on peut affirmer que la précision des analyses est toujours surabondante par rapport aux autres catégories d'erreurs énumérées dans ce chapitre.

Parmi ces méthodes, la méthode colorimétrique doit être inscrite parmi les plus rapides et les plus précises. Des réactifs colorimétriques de plus en plus sensibles sont découverts par les laboratoires et autorisent de nouvelles recherches sur le sel soluble optimum à utiliser.

On peut dire que, très généralement, les méthodes industrielles actuelles permettent d'assigner à l'erreur $\Delta N_2/N_2$ une valeur au moins égale à 0,5 %. Des résultats plus précis peuvent être, à coup sûr, obtenus, le prix de l'analyse étant seul à considérer.

On verra plus loin (chapitre II) comment l'analyse colorimétrique permet de déterminer directement le rapport N_1/N_2 de l'expression $Q_1 = q N_1/N_2$ (dans le cas où le sel injecté n'est pas déjà présent dans les eaux naturelles), ce qui permet de se dispenser de connaître N_1 et N_2 en valeur absolue.

En conclusion de ce chapitre, on peut dire que toutes précautions étant prises pour éviter les erreurs opératoires signalées et pour obtenir un mélange optimum ainsi qu'un régime permanent stable, l'exactitude de la méthode se range au voisinage de $\pm 2\%$, une valeur de $\pm 5\%$ pouvant être considérée comme une très grande marge de sécurité pour les besoins de l'hydrologie par exemple.

(A suivre.)

Bibliographie

Th. SCHLOESING. — C. R. Ac. des Sciences, Paris, 20 juillet 1863.

F. VAN ITERSOM. — Méthode chimique pour la mesure du débit des conduites d'eau. *Génie Civil*, 1904, p. 141.

C. E. STROMEYER. — The gauging of Streams by Chemical means. *Inst. Civ. Eng.*, 1905.

A. BOUCHER et R. MELLET. — Jaugeages par titration. — Application de la titration des chlorures au jaugeage de débits.

Bull. Techn. de la Suisse Romande, n° 11, 1910, p. 125.

L. COLLET, R. MELLET, O. LUTSCHG. — Jaugeages par titration. — Essais comparatifs à l'usine de l'Ackersand. *Communication du Service de l'Hydrologie nationale*, n° 1, Berne, 1913.

- B. F. GROOT. — The chemical method of testing turbines.
Proc. of the Engineers' Society of Western. Pennsylvania, Vol. 30, n° 4, 1914, p. 324-383.
- Chemical hydrometry.
Proc. of the Am. Soc. Civ. Eng., vol. XLI, 1915, p. 2103-2423.
- E. REICHEL. — Chemische Wassermessung Schweiz Bauzeitung.
Bd 66. Seiten, 97-100, 1915.
- C. G. J. VREEDENBURGH. — De Chemische afvoermeting bij den Dienst vor Waterkracht en Elektriciteit in Nederlandsch-Indie.
De Ingenieur, 1920, n° 42.
- F. KUNTSCHEN. — Contribution à l'étude des méthodes de jaugeage.
Communication du Service Suisse des Eaux, n° 18, Berne, 1926.
- A. BARBAGELATA, E. BOTTANI. — Metodo Chimico elettrico.
Elettrotecnica, Fascicolo n° 5, 15-2-1926.
- D. J. THOMA. — Bemerkungen zum Titrationverfahren für Wassermessungen.
Wass. und Wass., 1928, p. 222.
- O. KIRSCHMER, B. ESTERER. — Die Genauigkeit einiger Wassermessverfahren.
V.D.I., 1930, p. 1499.
— Das Salzverdünnungsverfahren für Wassermessungen.
Wass. und Wass., 1931, heft. 18.
- E. SCIMENI, N. SALVINI, V. PISA. — Metodi Chimico e chimico-elettrico per la misura delle portate. Magistrato Alle acque.
Ufficio idrografico, pubblicazione n° 139, 1935.
- J. GOGUEL. — Jaugeage chimique continu du Guil.
La Houille Blanche, mai 1946, n° 3, p. 199-207.
- SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE. — Code d'essais des installations hydrauliques.
Fascicule n° 4, 1952.
- M. DODERO. — C. R. Ac. des Sciences. Tome 243, p. 1462-1464.
C. R. du 31 mars 1952.
- MARTIN A. MASON. — Contribution à l'étude de la mesure des débits d'eau par la méthode d'Allen.
Thèse présentée à l'Université de Grenoble.

