

Application de la mesure des débits par la méthode de dilution comparée à la détermination du rendement des turbines

Application of the method of measuring discharge by comparing dilutions to the determination of the efficiency of a turbine

PAR C. HERMANT

INGÉNIEUR AU SERVICE DES LABORATOIRES ET ESSAIS HYDRAULIQUES D'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

Communication présentée à la Société Hydrotechnique de France
au cours de sa séance du 21 novembre 1958

La méthode de dilution comparée, dite « méthode chimique », est utilisée avec succès depuis quelques années pour le tarage de certaines stations de jaugeage. Son application à la détermination des rendements de turbines, exigeant des précisions plus grandes, de l'ordre de 1 %, pour des débits relativement importants, a nécessité une étude expérimentale minutieuse. Un colorimètre de haute sensibilité et de grande fidélité, spécialement adapté au dosage comparatif du bichromate de sodium, a été mis au point. Une étude détaillée des facteurs susceptibles d'entraîner des erreurs systématiques, en particulier l'instabilité des solutions étendues (quelques dixièmes de milligramme par litre), a nécessité l'analyse de plusieurs centaines d'échantillons.

Le dernier essai industriel a permis de contrôler que l'erreur accidentelle peut rester inférieure à 1 % et que l'erreur systématique, déduite de la comparaison avec la méthode thermodynamique, était du même ordre de grandeur.

The dilution or "chemical" method has been used successfully for several years for determining the stage-discharge relation at certain river gauges. When applying it to the determination of the efficiency of a turbine, greater accuracy, to the order of 1 %, is required at relatively high discharges. This necessitated very exact experimental work.

A high fidelity and highly sensitive colorimeter, specially adapted for comparing sodium bichromate contents, was developed. Several hundred sample had to be analysed in the course of a detailed investigation of factors, such as the instability of the diluted solutions (a few tenths of a milligram per litre), that might cause systematic errors.

The last field test proved that the accidental error would be less than 1 % and that the systematic error, deduced from a comparison with the thermal method, was of the same magnitude.

La méthode dite « chimique » de mesure des débits a été proposée pour la première fois par R. Mellet [1, 2], en 1910. Elle utilisait le procédé de Mohr pour la titration des chlorures au moyen du nitrate d'argent. Elle nécessitait des concentrations finales en sel relativement élevées (30 mg/l) et son exactitude dépendait beaucoup de la concentration en sel des eaux naturelles. Pour remédier à cet inconvénient, plusieurs expérimentateurs utilisèrent des sels dont la titration est plus sensible, tels que le nitrite de so-

dium [3], ou dont la présence dans les eaux naturelles est exceptionnelle, comme le sulfate de manganèse utilisé pour la première fois en 1924 par M. Pruvot [4] et le bichromate de sodium proposé par M. Dodero [5] et mis en œuvre pour les mesures de débits en rivières par M. Dumas [6].

C'est cette dernière solution que l'Electricité de France utilise depuis une dizaine d'années avec succès pour la mesure des débits dans les cours d'eau de montagne. Grâce à l'extrême sensibilité

de la méthode, les concentrations finales en bichromate de sodium ont pu être réduites, et nous avons entrepris récemment une campagne de mesure dans laquelle le titre final ne dépasse pas 0,1 mg/l.

Les résultats obtenus par cette méthode nous ont conduits à l'envisager pour la mesure des débits absorbés par les turbines en vue d'en déterminer les rendements.

I. — PRINCIPE DE LA MÉTHODE DE DILUTION COMPARÉE

Cette méthode consiste à injecter pendant un temps suffisant, en un point des ouvrages d'aménée, un débit constant connu q d'une solution de bichromate de sodium homogène et relativement concentrée, et à prélever, à une certaine distance à l'aval, des échantillons de solution diluée. Sous réserve que la dilution soit homogène dans la section de prélèvement et que la concentration des échantillons prélevés ait un caractère permanent, le rapport $N = Q/q$, du débit Q de l'ouvrage d'aménée à celui d'injection q , représente la dilution réalisée par l'eau des ouvrages d'aménée entre les sections d'injection et de prélèvement.

Le débit q d'injection étant mesuré par ailleurs, la détermination du débit Q de l'installation se ramène à la connaissance de la dilution N .

Pour cela, on réalise une série de solutions de comparaison, de dilutions connues, en diluant la solution concentrée d'injection au moyen de fioles et de pipettes tarées. Ces solutions-témoins

sont passées dans un colorimètre dont les indications en fonction de la dilution peuvent être portées sur une courbe. Il suffit alors de passer les différents échantillons, prélevés dans le colorimètre, pour en déduire, d'après l'indication de cet appareil et la courbe d'étalonnage ci-dessus, la valeur de la dilution cherchée et, par suite, le débit.

Les échantillons-témoins étant dilués en utilisant l'eau de l'installation prélevée à l'amont de la section d'injection, cette méthode revient à admettre que deux échantillons obtenus en diluant dans la même proportion la même solution concentrée, l'un dans les ouvrages d'aménée et l'autre en laboratoire, sont identiques.

Le sel utilisé pour ces essais est le bichromate de sodium, qui, additionné d'un réactif composé essentiellement de diphénylcarbazine, communique à l'eau une coloration encore sensible au colorimètre pour des concentrations finales de l'ordre de 1 $\mu\text{g/l}$ (concentration relative de 10^{-9}).

II. — COLORIMÈTRE

Un appareil destiné à comparer les concentrations en bichromate de sodium, d'après l'absorption de la lumière par la solution, a été spécialement mis au point pour cette étude. Il ne diffère pas dans son principe de la plupart des « colorimètres » industriels. Il comporte, en effet, un dispositif optique produisant un faisceau lumineux sensiblement parallèle et monochromatique, et dans le trajet duquel on peut insérer, soit une cuve à faces planes et parallèles contenant la solution à étudier, soit un écran réglable. Cet écran est réalisé de telle sorte que le paramètre de réglage, en l'espèce une translation, soit proportionnel à la densité optique, c'est-à-dire au logarithme du rapport entre la lumière reçue par la cellule sans et avec écran.

La détermination de la densité optique d'une solution consiste donc à repérer l'intensité électrique émise par la cellule lorsque l'on interpose cette solution sur le trajet optique, puis, la solu-

tion étant enlevée, à déplacer progressivement l'écran réglable pour obtenir la même déviation de l'appareil de mesure raccordé à la cellule photo-électrique. La sensibilité de l'appareil est excellente (de l'ordre de $\pm 0,2\%$), grâce, en particulier, à l'emploi d'un galvanomètre de haute précision.

Le fait d'utiliser le même faisceau de lumière et la même cellule pour les deux lectures relatives à la mesure de la densité optique d'une solution, élimine toute infidélité du fait de la cellule ou de la lampe d'éclairage, sous réserve que la tension d'alimentation de cette dernière soit la même pour les deux lectures.

La fidélité de l'appareil en ce qui concerne la mesure de la concentration en bichromate d'une solution dépend donc, presque uniquement, de la constance du rapport entre la concentration et la densité optique.

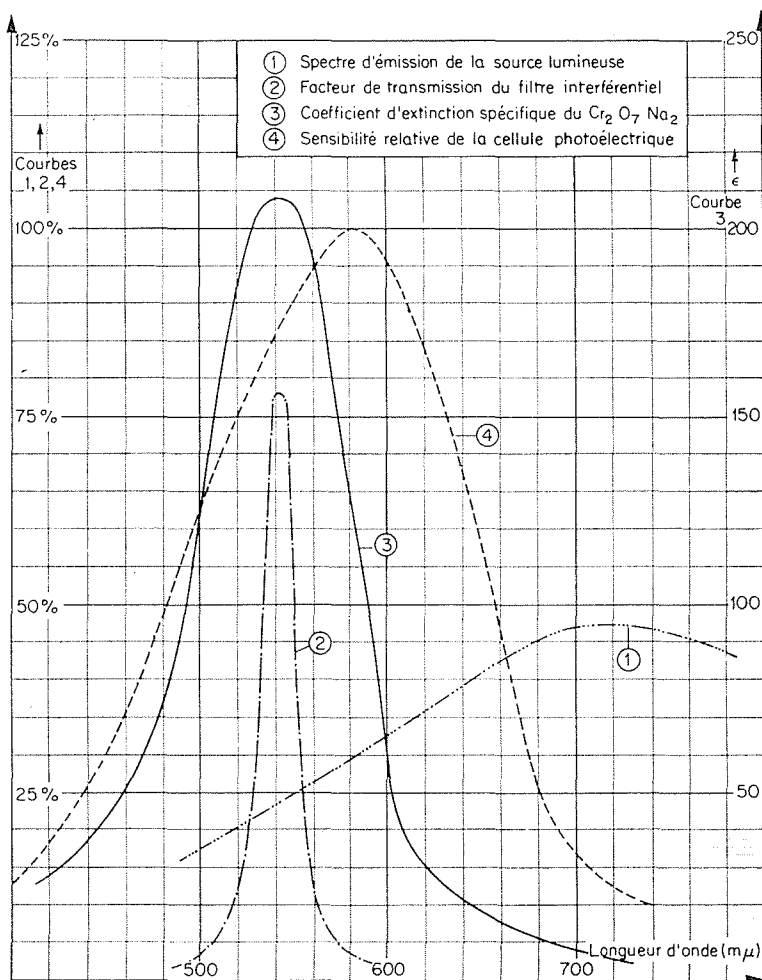


Fig. 1
Courbes spectrales des divers éléments intervenant dans la mesure de densité optique.

Pour une solution très étendue satisfaisant à la loi de Beer, on sait que dans la relation définissant la densité optique D :

$$D = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon lc$$

où I_0 et I désignent respectivement l'intensité de la lumière incidente et celle de la lumière trans-

mise après absorption, l et c l'épaisseur et la concentration de la solution traversée; le facteur de proportionnalité ϵ , que l'on désigne habituellement par coefficient d'extinction, ne dépend que du corps dissous, de la longueur d'onde de la lumière utilisée et de la température.

Pour le bichromate de sodium, la courbe de variation du coefficient d'extinction spécifique

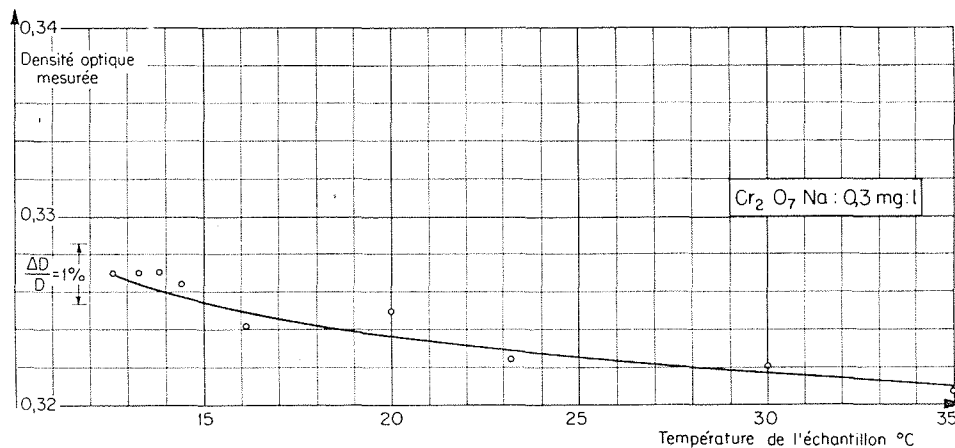


Fig. 2
Variation de la densité optique d'une solution de bichromate de sodium en fonction de la température.

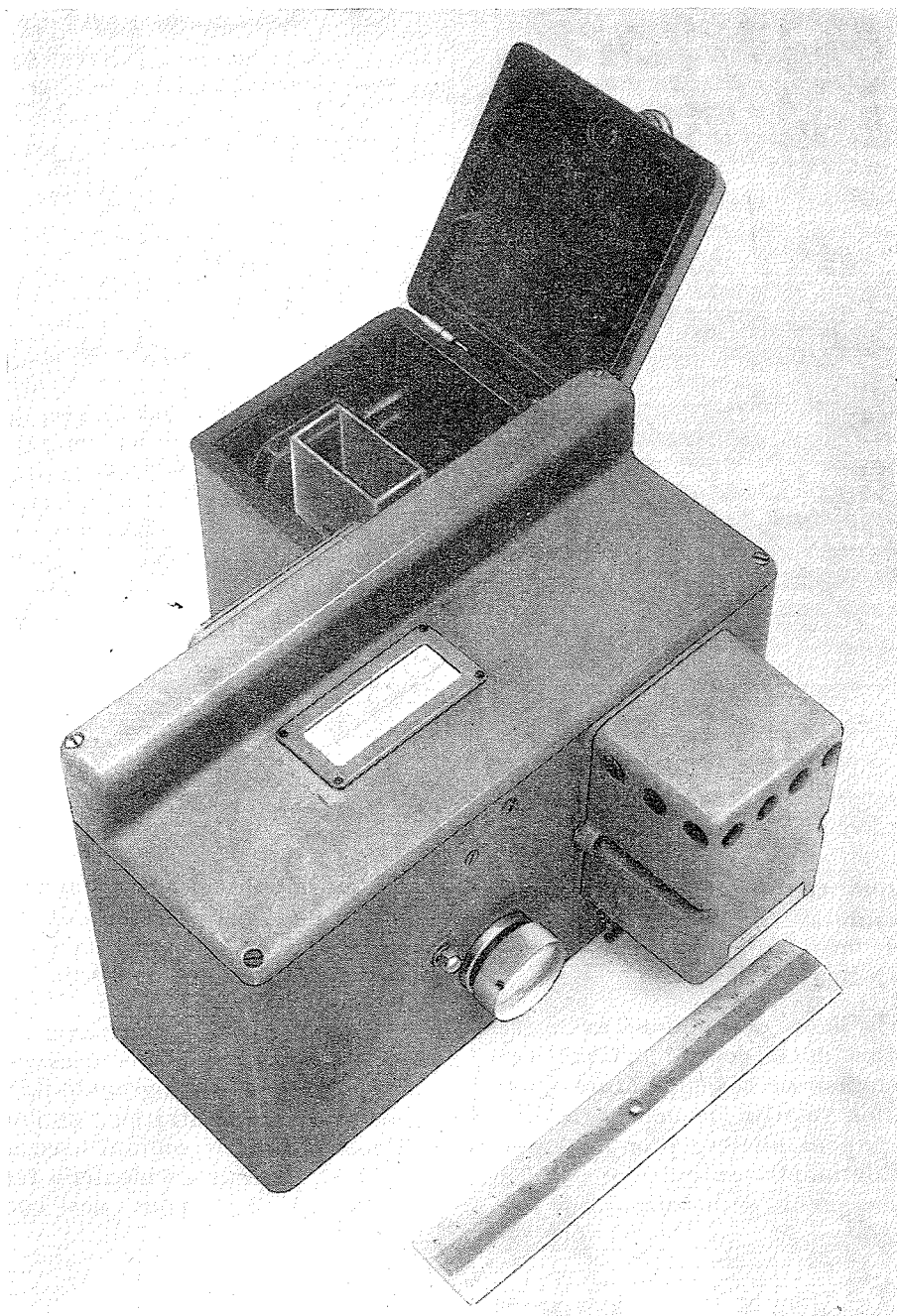


FIG. 3
Vue du colorimètre

ε (*) en fonction de la longueur d'onde, reproduite dans la figure 1, présente un maximum très accusé au voisinage de 540 m μ .

Une élévation de température déplace cette courbe vers les longueurs d'onde plus élevées, sans modifier beaucoup l'amplitude de son maximum.

(*) Lorsque c est exprimé en grammes par litre et l en centimètres, ε est appelé coefficient d'extinction spécifique.

De ce fait, l'influence de la température sur ε est surtout sensible pour les points de cette courbe dont la pente est importante. C'est pourquoi nous avons interposé dans le faisceau lumineux un filtre interférentiel dont la bande de transmission, représentée elle aussi sur la figure 1, est très étroite. De cette manière, et en prenant la précaution d'arrêter les rayons infrarouges par un filtre supplémentaire, la bande de longueurs d'onde traversant la solution est

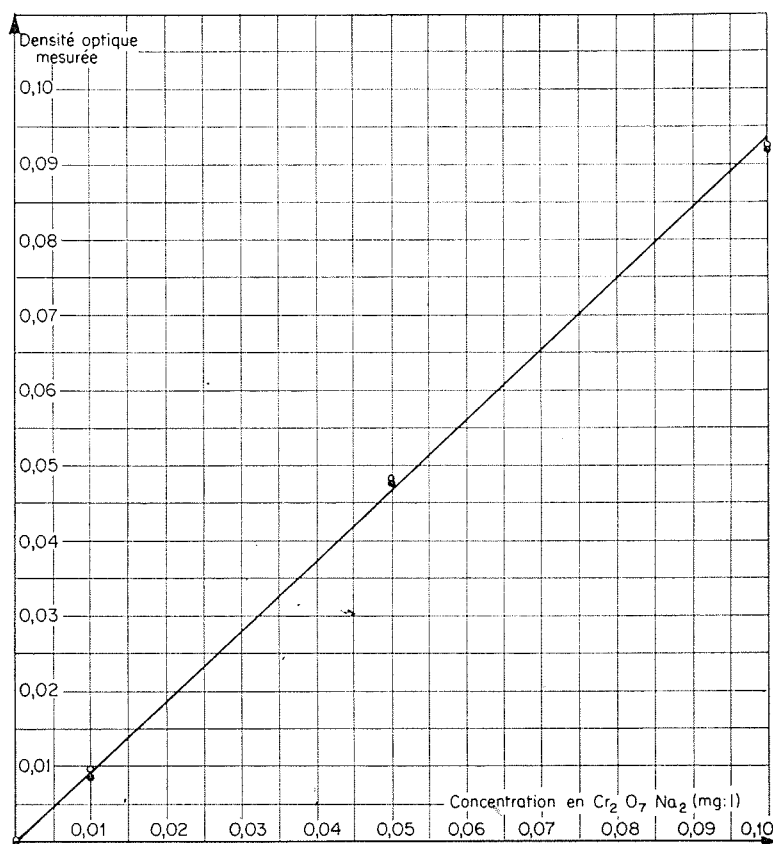


FIG. 4
Etalonnage du colorimètre
Concentrations en bichromate
de sodium inférieures à 0,1 mg/l.

suffisamment étroite et concorde en outre d'une manière satisfaisante avec le maximum du coefficient ϵ , de sorte que l'influence de la température soit négligeable.

La courbe de la figure 2, où nous avons reproduit la variation de la densité optique d'un échantillon en fonction de la température, montre que la variation relative de densité optique n'excède pas 0,1 % pour une variation de température de 1° C. Elle montre en outre que la dispersion relative des points de mesure est de l'ordre de $\pm 0,3$ %.

L'utilisation de filtres interférentiels nous a permis d'utiliser, pour produire le faisceau lumineux, une lampe à incandescence dont la courbe d'intensité spectrale est relativement plate.

Compte tenu de ces considérations et des nombreuses expériences effectuées, cet appareil, dont on peut voir la photographie figure 3, permet de repérer des concentrations de l'ordre de 0,3 mg/l de bichromate de sodium avec une précision de $\pm 0,3$ %, l'erreur accidentelle restant encore inférieure à 3 % pour des concentrations de 0,05 mg/l (fig. 4).

III. — DISPOSITIFS DE MESURE

Le dispositif d'injection de la solution concentrée de bichromate de sodium comporte essentiellement une cuve cylindrique tarée, et des pompes permettant, par un jeu de canalisations et de robinets, soit d'assurer l'homogénéisation de la solution de bichromate par brassage, soit d'injecter cette solution à débit constant dans les ouvrages d'amenée (on utilise, pour l'injection, une pompe volumétrique entraînée par un moteur synchrone). Un limnimètre de précision per-

met d'enregistrer le niveau de la solution dans la cuve cylindrique et d'en déduire le débit d'injection.

Pour les usines de haute chute, pour lesquelles la méthode de dilution est particulièrement utilisable, l'injection s'effectue généralement à la chambre des vannes ou à la cheminée d'équilibre. On dispose de ce fait de toute la longueur de la conduite forcée, soit en général au moins 200 fois le diamètre, pour réaliser, grâce à la

turbulence naturelle, une répartition homogène de la solution. De ce fait, l'injection peut se faire sans précaution spéciale, en un seul point de la conduite. Les travaux de préparation des essais se bornent ainsi à l'établissement d'une seule tu-

bulure d'injection aboutissant à la surface interne de la conduite.

Les prélèvements s'effectuent généralement, soit à l'entrée, soit à la sortie de la turbine, en plusieurs points de la section.

IV. — CONDUITE DES ESSAIS

Un régime stable de fonctionnement de la turbine étant réalisé — en éliminant par exemple l'action des régulateurs au moyen du limiteur d'ouverture et en maintenant constant le plan d'eau dans la prise d'eau —, on procède à une injection de bichromate dont la durée dépend du temps de parcours de l'eau entre les sections d'injection et de prélèvement, mais ne descend guère, par sécurité, en deçà de 20 minutes.

Au cours de l'injection, des échantillons de

solution concentrée sont soutirés sur l'aspiration de la pompe d'injection en nombre suffisant pour contrôler le degré d'homogénéisation de la solution-mère.

Les prélèvements s'effectuent en deux ou quatre points de la section (au moyen de prises de pression à la paroi pour les prélèvements en conduite). Pour éviter les dispersions de mesures dues aux fluctuations rapides de concentrations, la durée de remplissage des flacons de prise

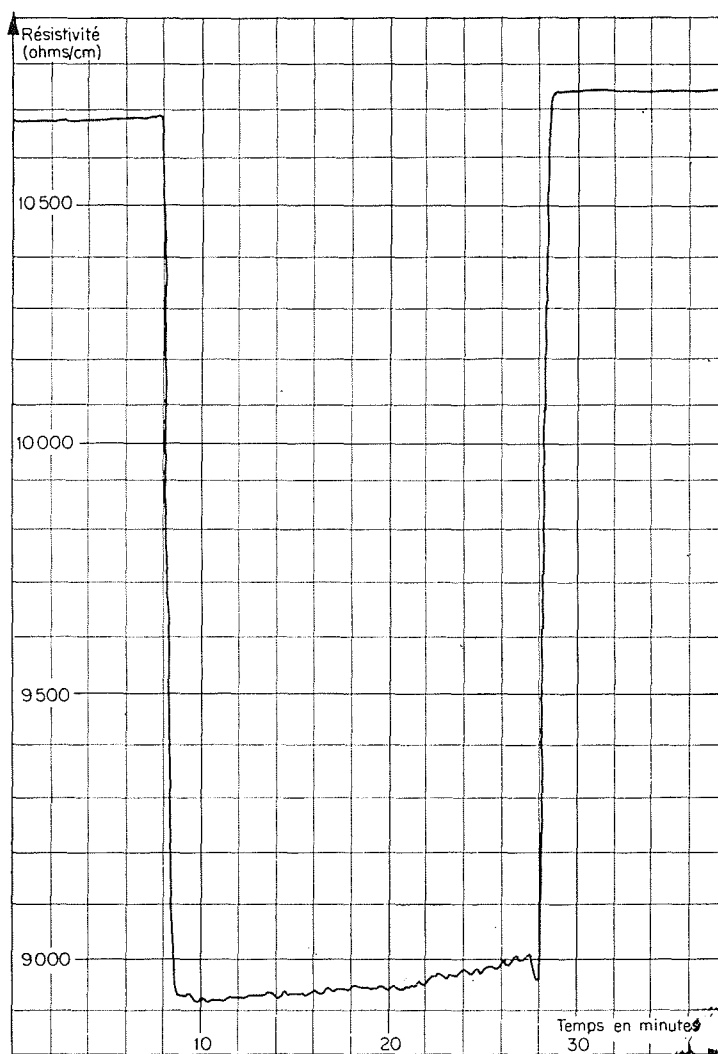


FIG. 5
Mesure de débit
par la méthode de dilution.
Enregistrement
de la variation de résistivité
de l'eau turbinée au cours d'un essai
(Usine du Chevril, 1957).

d'échantillons est fixée à 1 ou 2 minutes. Cinq échantillons, au moins, sont prélevés par prise. On dispose ainsi de 10 à 20 prélèvements permettant de contrôler l'homogénéité du mélange d'une part, et la permanence de la concentration d'autre part. Dans les conduites forcées, la détermination du moment opportun pour effectuer les prélèvements peut s'effectuer par calcul, à partir de la durée de parcours de l'eau entre les sections d'injection et de prélèvement; ce

calcul peut être contrôlé par quelques essais préliminaires ou même par enregistrement de la variation de résistivité produite par le passage de la solution saline (fig. 5). L'expérience montre d'ailleurs que la variation de concentration au début et à la fin du passage du nuage salin est très rapide et que, de ce fait, la durée du palier de régime permanent est peu différente de celle de l'injection.

V. — PRÉCISION DES MESURES DE DÉBITS PAR LA MÉTHODE DE DILUTION COMPARÉE

L'erreur sur le débit d'injection, mesuré par réservoir étalonné, pouvant être réduite à $\pm 0,1$ à $0,2\%$, la précision de la mesure du débit par la méthode de dilution comparée ne dépend pratiquement que des erreurs sur la détermination de la dilution N, qui peuvent résulter de cinq causes différentes.

1° Erreurs sur l'emploi du colorimètre.

Ces erreurs ont un caractère aléatoire pour les opérations effectuées au cours d'un essai. En intercalant en effet les mesures colorimétriques relatives aux échantillons dilués dans la conduite forcée, d'une part, et à ceux obtenus par dilution de la solution d'injection, d'autre part, on peut annuler tout effet de dérive éventuelle du colorimètre. La répétition de la mesure relative à un échantillon permet d'ailleurs de contrôler la stabilité de cet appareil. La seule erreur due au colorimètre revient alors au tarage en dilution à partir des échantillons de solution-mère diluée en laboratoire. Ce tarage est effectué à partir d'au moins cinq échantillons, dont la dispersion des résultats par rapport à la droite moyenne de tarage (*) ne dépasse pas en général $\pm 0,5$ à 1% . L'erreur sur un point de cette droite, pris à l'intérieur de l'intervalle d'étalonnage, est de ce fait de l'ordre de $\pm 0,2$ à $\pm 0,3\%$.

2° Erreur sur la dilution.

Indépendamment des « fautes d'opérations », qui peuvent être éliminées grâce à un soin méticuleux dans les manipulations, l'erreur sur la

(*) Ainsi que nous l'avons indiqué, le colorimètre a une loi de réponse (déplacement de l'écran de référence) proportionnelle à la concentration en bichromate. La courbe reliant les inverses des dilutions en fonction du déplacement de l'écran est donc une droite.

dilution résulte de l'incertitude concernant le calibrage des pipettes et des fioles tarées.

En utilisant du matériel de précision, cette erreur de calibrage peut atteindre $\pm 0,5\%$ pour une dilution de l'ordre de 100 000. Pour réduire l'influence systématique de cette erreur, il peut être bon d'utiliser, en variante, plusieurs jeux de pipettes ou de fioles jaugées, ou encore, d'en faire effectuer un tarage précis. Il n'est pas inutile, en outre, de faire contrôler les résultats des opérations de dilution en utilisant deux opérateurs travaillant séparément.

3° Erreur due à l'échantillonnage des prélèvements.

Les prélèvements à l'entrée ou à la sortie de la turbine sont effectués d'une manière quasi continue, le temps de remplissage de chacun des 5 à 10 flacons prélevés étant de l'ordre de grandeur du dixième du temps total de prélèvement. De ce fait, les fluctuations de concentration, d'ailleurs relativement faibles, ainsi qu'on peut en juger par l'examen de la figure 5 obtenue par mesure de la résistivité de l'eau au cours de l'essai, n'entraînent aucune erreur sur la dilution moyenne correspondant à un point de prélèvement.

4° Erreurs dues au défaut d'homogénéité de la solution dans la section de prélèvement.

La mesure de la dilution en aval de la turbine ne peut conduire à une estimation correcte du débit que si la concentration est uniforme dans toute la section de prélèvement et si, de plus, un régime permanent est obtenu.

Des études systématiques, effectuées sur la demande d'E.D.F. au Laboratoire de Mécanique

des Fluides de l'École Nationale Supérieure d'Electrotechnique et d'Hydraulique de Grenoble [7], sur des conduites de 50 et 250 mm de diamètre et pour des nombres de Reynolds compris entre 15 000 et 250 000, ont montré que, avec les dispositifs d'injection usuels, la concentration en un point présente, en général, des fluctuations. On a pu, d'une part, mettre en évidence les périodes de ces fluctuations spatio-temporelles de concentration, et, d'autre part, confirmer par les mesures le calcul de leur amortissement en fonction de la distance à l'injection.

Ces données, qui seront complétées par des mesures aux grands nombres de Reynolds, doivent être prises en compte pour l'élaboration d'un programme de prélèvement. La connaissance de l'amplitude maximale prévue pour les fluctuations, de leur période, et de leur amortissement escompté dans la section de prélèvement, permet de déterminer la durée de chaque prélèvement, si l'on désire qu'il représente la concentration moyenne en un point avec une précision donnée.

L'étude de l'homogénéisation de la solution en fonction de la distance à l'injection a également été effectuée à Grenoble, tant par voie théorique que par l'expérience, qui, ici encore, confirme bien les calculs.

Dans une section de référence en aval de l'injection, la distribution spatiale de concentration est bien représentée par une série convergente; chacun des termes autres que la constante initiale (représentant la concentration finale moyenne) s'amortit exponentiellement en fonction de la distance à l'injection, en général d'autant plus vite que son rang est plus élevé. Seul le premier terme variable est à prendre en compte pour prévoir l'homogénéité en aval, à moins qu'une combinaison judicieuse de plusieurs injections ne permette de l'annuler.

De telles combinaisons, qui imposent bien en-

tendu une bonne égalisation des débits partiels d'injection, permettent de réduire notablement les longueurs de conduite rectilignes nécessaires au mélange.

Au même titre, et de façon tout aussi légitime, on peut choisir, dans une section où l'homogénéité n'est pas atteinte, plusieurs points de prélèvement dont la moyenne soit bien représentative de la concentration finale.

L'utilisation concurrente de ces deux procédés pourrait théoriquement s'appliquer à des termes d'ordre différent, et permettrait ainsi de réduire encore la distance entre injection et prélèvement.

5° Erreur due à l'évolution des solutions à faible concentration.

Une étude antérieure, entreprise pour déterminer les moyens les plus convenables de conservation des échantillons prélevés au cours d'une mesure de débit de rivières, nous a montré que le pouvoir colorant d'une solution très étendue de bichromate de sodium était susceptible d'évoluer d'une manière relativement importante. On constate, en général, une diminution de la densité optique de la solution, phénomène qui se présente donc comme une réduction apparente du bichromate, analogue à celle constatée par MM. Guntz et Luxo sous l'influence des matières organiques. Cette diminution de densité optique est d'autant plus importante que les échantillons sont exposés à la lumière, et que le pH de la solution est élevé. En conservant les échantillons à l'obscurité et en utilisant des solutions tampons maintenant le pH à 7 (*), cette évolution est encore sensible.

On peut d'ailleurs s'en rendre compte par l'examen de la figure 6, où nous avons reproduit

(*) Les expériences ont montré qu'il était préférable de maintenir les solutions à l'état neutre.

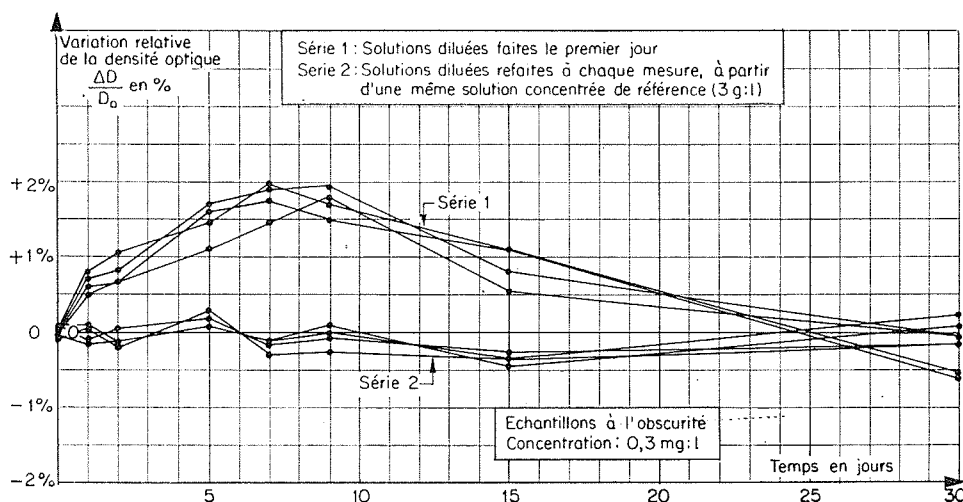


FIG. 6
Evolution comparée
de
deux séries de solutions
de bichromate de sodium.

la variation de la densité optique de deux séries de solutions diluées de bichromate pendant une période d'un mois. Les deux séries étaient constituées chacune d'échantillons identiques au départ, conservés à l'abri de la lumière et dont le pH était maintenu à 7. Une fraction de chacun des échantillons de la série 1, dont la concentration en bichromate était de 0,3 mg/l, était passée périodiquement dans le colorimètre. A partir des échantillons de la série 2, 10 000 fois plus concentrés, des fractions étaient périodiquement prélevées et diluées au 1/10 000 avant d'être passées au colorimètre. On peut constater sur la figure 6 que, malgré la préparation supplémentaire nécessitée par les opérations de dilution, la dispersion des résultats de la série 2 est particulièrement faible ($\pm 0,2\%$ en moyenne); sa fluctuation moyenne au cours du temps n'excède pas en outre $\pm 0,1$ à $0,2\%$. Les échantillons très dilués de la série 1 évoluent par contre avec le temps, l'écart moyen pouvant atteindre $1,5\%$, avec une dispersion apparente des résultats de l'ordre de $\pm 0,5\%$.

Ces études systématiques, qui avaient mis en jeu l'analyse de plusieurs centaines d'échantillons dans des conditions de conservation différentes, ne nous ayant pas permis de trouver un procédé de conservation convenable des prélèvements, ni d'ailleurs de mettre en évidence une loi systématique d'évolution dans le temps (*), il était nécessaire de limiter le plus possible l'intervalle de temps s'écoulant entre la prise des prélèvements et l'examen colorimétrique. C'est pourquoi, pour les essais de précision correspondant aux mesures de rendement de turbines hydrauliques, il fut décidé d'effectuer tous les dépouillements à l'usine même, au fur et à mesure de l'exécution des essais.

La durée d'évolution est ainsi très réduite; cependant, pour des raisons pratiques, l'intervalle de temps qui sépare la prise des échantillons de leur examen colorimétrique est, au minimum, de quelques heures. C'est pourquoi il est prudent d'effectuer un contrôle systématique de l'erreur éventuelle due à l'évolution des échantillons prélevés pendant cette période. La figure 7 nous donne un exemple constitué par la comparaison des densités optiques de deux séries de 5 échantillons, de dilution identique, préparés à huit heures d'intervalle à partir d'une même solution concentrée. On peut constater, qu'à part la dispersion relativement importante des points, due à des conditions très défavorables de mesure (turbidité relativement

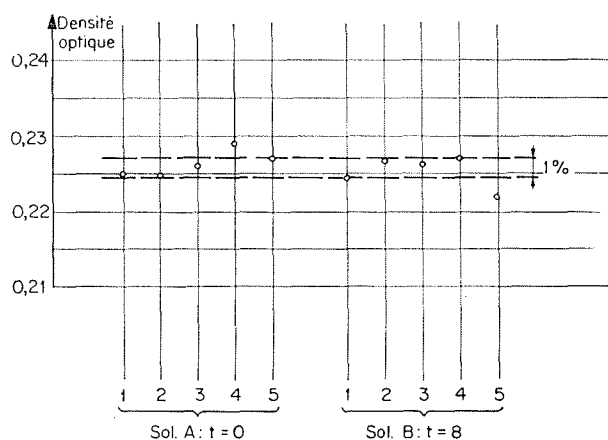


FIG. 7

Evolution de solutions de bichromate de sodium durant 8 heures.

importante), il n'y a pas d'écart systématique entre les densités optiques moyennes des deux solutions, telles qu'elles sont déduites des indications du colorimètre.

En définitive, grâce à ces précautions, on peut assurer que l'erreur due à l'évolution des solutions entre les opérations de prélèvement et les mesures colorimétriques, est pratiquement négligeable.

6° Erreur due aux différents modes de dilution.

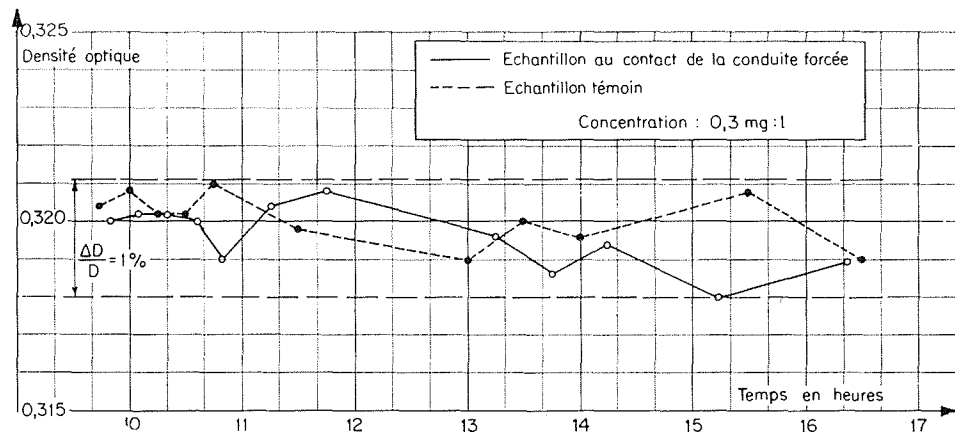
Malgré la précaution consistant à diluer les échantillons de solution concentrée avec l'eau de la conduite prélevée au moment de l'essai à l'amont de la section d'injection, le mode de dilution peut avoir éventuellement une influence sur la mesure colorimétrique.

Au cours d'un essai effectué dans une usine, une étude systématique de l'influence éventuelle de la conduite forcée a été entreprise. La figure 8 donne en particulier l'évolution comparée de deux échantillons dont l'un était en contact avec la conduite recouverte d'un enduit bitumineux, tandis que l'autre était conservé dans un flacon de verre à l'abri de la lumière. On ne constate aucune influence apparente de la paroi de la conduite.

S'il s'agit de parois métalliques non protégées, une étude analogue montre que, pour entraîner une erreur de l'ordre de 1% , il faudrait une différence de concentration de l'eau en ions fer, entre les sections d'injection et de prélèvement, correspondant à une perte de poids de la conduite de l'ordre de 1 kg par heure.

(*) Cette évolution pourrait être expliquée par la dissociation, à l'état dissous, d'un sel, comme le bichromate de sodium, sous forme d'un équilibre chimique entre divers composés de chrome à des valences différentes.

FIG. 8
Evolution
d'une solution
de bichromate de sodium
au contact
d'une conduite forcée.



Enfin, l'influence des sédiments en suspension dans l'eau peut être envisagée. L'analyse colorimétrique nécessite en effet dans ce cas

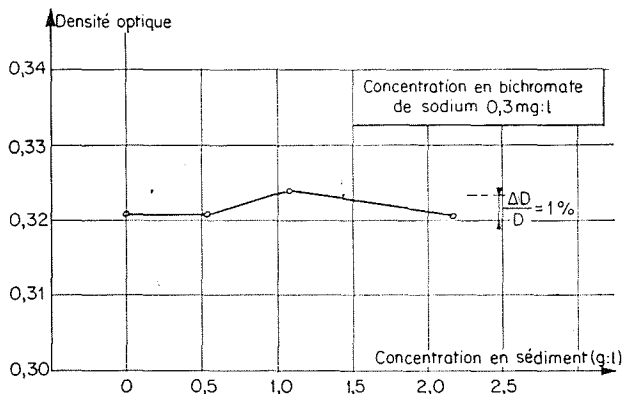


FIG. 9
Influence de la turbidité de l'eau.

une décantation soignée, d'où la possibilité de fixation préférentielle du bichromate par les sédiments. Il vaut évidemment mieux éviter de se placer dans ces conditions défavorables en choisissant judicieusement l'époque des essais. Toutefois, cela n'est pas toujours possible, et si l'on doit opérer en eaux chargées pour des raisons d'exploitation ou pour les besoins d'un programme, il est possible de se rendre compte de l'influence des sédiments au moyen d'un test préliminaire analogue à celui dont les résultats sont reproduits dans la figure 9. On peut voir que, dans ce cas, l'indication du colorimètre est indépendante de la concentration en sédiment (*).

(*) Si, malgré une décantation soignée, la turbidité de l'échantillon est encore appréciable, on procède par colorimétrie différentielle, en déduisant de la densité optique de l'échantillon additionné de réactif, un terme de correction fonction de la densité optique du même échantillon mesuré au préalable sans réactif.

VI. — CONDITIONS D'APPLICATION DE LA MÉTHODE

Selon ce qui précède, la méthode de dilution comparée offre l'avantage de ne présenter que très peu d'erreurs à caractère systématique, surtout si les conditions de brassage sont satisfaisantes et si les eaux sont peu chargées en sédiments. Son exécution proprement dite met en jeu un matériel simple et ne demande pas d'immobilisation des installations hydrauliques. Par contre, dans l'état actuel de son utilisation, la nécessité de procéder à l'analyse sur place des échantillons conduit à un temps de dépouillement relativement long qui ralentit la cadence des mesures. Les conditions de mélange et de consommation de bichromate la rendent surtout utilisable dans les installations de grande hauteur de chute

et de faibles débits. Son domaine d'emploi actuel est souvent commun avec la méthode thermodynamique, plus facilement utilisable en raison de sa grande simplicité d'exécution.

De ce fait, la méthode de dilution peut être réservée en cas de contestations concernant des essais effectués par une autre méthode de mesure, pour des chutes supérieures à 50 ou 100 mètres et des débits n'excédant pas 30 à 50 m³/s. ou comme seconde méthode de contrôle.

C'est à ce titre que nous avons eu l'occasion de l'utiliser récemment à l'usine du Chevril. A cette occasion, nous avons utilisé, en parallèle avec la méthode colorimétrique, une méthode basée sur la variation de la résistivité d'une solution

en fonction de la concentration saline, grâce à l'emploi d'un résistivimètre de précision; cet appareil, mis au point par notre Service, permet d'équilibrer simultanément en résistance et en capacité un pont de Wheatstone; grâce à un montage très étudié, la sensibilité est excellente et l'on peut équilibrer le pont en résistance à $\pm 10^{-4}$ près. Malheureusement, cette méthode exige que pendant une période s'étendant en deçà et au-delà de l'injection, la résistivité naturelle de l'eau soit très sensiblement constante, ce qui ne se trouvait pas réalisé à l'époque des essais. De ce fait, la méthode résistivimétrique n'a été en fait utilisée que pour contrôler la durée du palier de régime permanent de concentration, et pour tester la fluctuation aléatoire de la concentration au passage du nuage salin.

La méthode colorimétrique se heurtait de son côté à une difficulté due à une forte concentration des eaux en sédiments (de l'ordre de 1 à 2 g/l). De ce fait, les manipulations se sont avérées particulièrement délicates; mais toutes les précautions énumérées ci-dessus ont été prises pour s'assurer que la présence du sédiment n'altérerait pas les résultats de mesure.

Par sécurité, et pour contrôler l'ordre de grandeur de l'erreur accidentelle, il n'a été effectué que trois points de mesure correspondant à des charges différentes de la turbine, mais chacun des points était répété trois à quatre fois. Les valeurs absolues des rendements n'intervenant pas dans cette étude, le tableau suivant récapitule les résultats de ces essais, établis en « rendements relatifs », en donnant arbitrairement une valeur de 90 % à l'un des points de mesure.

On peut constater que l'écart entre le rendement moyen correspondant à un point d'essai et le rendement correspondant à l'essai le plus dispersé est de 0,9 % et que l'écart moyen est de l'ordre de $\pm 0,5$ %, c'est-à-dire de l'ordre de

N° de l'essai	Débit absorbé par les turbines (m ³ /s)	Hauteur de chute nette (m)	Rendements "relatifs" des turbines	
			Par la méthode de dilution	Par la méthode thermodynamique
A 1	2,95	405,2	90,1	90,9
2	2,98	404,7	89,4	
3	2,99	404,7	89,8	
4	3,00	403,9	90,2	
B 1	3,88	400,5	88,8	91,0
2	3,91	399,6	90,0	
3	3,87	401,0	90,2	
C 1	5,18	395,6	88,6	90,1
2	5,08	398,3	90,2	
3	5,25	393,8	89,1	
4	5,21	393,4	89,2	

grandeur de celui qu'on pouvait attendre de l'examen des causes d'erreurs accidentelles.

L'écart systématique avec les résultats de la méthode thermodynamique est plus important; il est de l'ordre de 1 %. Mais si l'on tient compte que les deux méthodes ne sont comparables (puisque la méthode thermodynamique donne directement le rendement de la turbine, tandis que la méthode de dilution permet de mesurer le débit) que par l'intermédiaire d'éléments étrangers, eux aussi susceptibles d'une erreur, tels que hauteur de chute nette, puissance électrique aux bornes et rendement du générateur, l'écart de 1 % entre les deux méthodes de mesure est très largement compris dans la marge d'incertitude de l'ensemble de ces mesures.

VII. — CONCLUSION

La méthode de dilution comparée, qui a fait l'objet de mises au point minutieuses, permet, dès à présent, d'effectuer des mesures de débit précises dans les installations hydro-électriques dont la hauteur de chute est supérieure à 50 ou 100 mètres. Elle ne nécessite aucune immobilisation de l'installation et met en œuvre un matériel d'essai relativement peu onéreux. Par contre, le dépouillement des résultats d'essais par voie colorimétrique est encore très long, ce qui limite l'utilisation de la méthode. Son domaine d'emploi

est relativement voisin de celui de la méthode thermodynamique, qui permet d'obtenir directement le rendement de l'installation et dont l'exploitation est plus simple et plus souple. De ce fait, elle ne peut guère être recommandable que lorsque les conditions de température ne sont pas favorables à l'emploi de cette dernière méthode ou en cas de contestation sur des résultats de mesure obtenus par un autre procédé, du fait que les erreurs systématiques dues à son emploi sont particulièrement faibles.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) MELLET (R.). — Application de la titration des chlorures aux jaugeages des débits. *La Houille Blanche*, novembre 1910.
- (2) BOUCHER (A) et MELLET (R.). — Modalités pour le titrage des solutions employées dans la méthode chimique pour la mesure des débits. Modalités d'utilisation du chlorure de sodium. *La Houille Blanche*, n° 2, mai 1953.
- (3) ZIRILLI (R.). — Modalités pour le titrage des solutions employées dans la méthode chimique pour la mesure des débits. Modalités d'utilisation du nitrite de soude. *La Houille Blanche*, n° 4, août-septembre 1953.
- (4) PRUVOR (E.). — Modalités pour le titrage des solutions employées dans la méthode chimique pour la mesure des débits. Modalités d'utilisation du sulfate de manganèse ou du cation Mn^{++} , en général. *La Houille Blanche*, n° 3, juin-juillet 1953.
- (5) DODERO (M.). — Modalités pour le titrage des solutions employées dans la méthode chimique pour la mesure des débits. Modalités d'utilisation du bichromate de sodium. *La Houille Blanche*, n° 6, décembre 1953.
- (6) DUMAS (H.). — La méthode chimique pour la mesure du débit des cours d'eau. *La Houille Blanche*, n° 5, octobre-novembre 1952.
- (7) BONNIN (J.), DUMAS (H.) et LIÈVRE (R.). — Etude de la diffusion saline en régime permanent dans une conduite circulaire. Note présentée au *Congrès de l'A.I.R.H.*, Thème D, n° 9, Lisbonne, 1957.

DISCUSSION

Président : M. BARRILLON

M. le Président remercie M. HERMANT de son excellent exposé et demande si ce travail entraînera des changements dans le fascicule n° 4 du Code d'Essais édité par la S.H.F. en avril 1952 pour normaliser la méthode qu'on a appelé : « chimique ».

M. REMENIERAS indique que la méthode de dilution qui figurait déjà dans le fascicule précité de la S.H.F. a été admise dans le Code International pour l'essai de réception des turbines.

M. le Président relève un point intéressant, l'évolution du bichromate avec le temps.

Au nom du Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Université de Grenoble, M. DUMAS exprime ici tout l'intérêt que ce laboratoire a porté à l'étude de M. HERMANT. Cette étude est un prolongement extrêmement intéressant à l'action que le Laboratoire a développée il y a quelques années dans le domaine des jaugeages des torrents de montagne, avec toutefois des prétentions plus modestes quant à la précision. Les résultats obtenus par M. HERMANT, en raison de leur précision, sont susceptibles d'apporter en retour, des améliorations sensibles aux jaugeages des rivières eux-mêmes.

En ce qui concerne la stabilité chimique des prélèvements, M. DUMAS signale que certains expérimentateurs ont trouvé efficace de conserver les échantillons dans la glace pendant le laps de temps qui s'écoule entre la collecte des prélèvements et le dosage.

M. HERMANT signale de son côté que des essais relatifs à l'influence de la température ambiante sur l'évolution des échantillons ne lui ont pas permis d'en retirer une doctrine bien nette.

De toute façon, on peut remarquer qu'actuellement le bichromate de sodium paraît difficilement remplaçable car il a un ensemble de qualités qui le rendent tout à fait remarquable.

M. DUMAS rappelle que, dernièrement, des expériences ont été faites à grande échelle sur le Rhône avec le bichromate de sodium. La question s'était posée de savoir si l'on devait employer le sulfate de manganèse utilisé autrefois par M. PRUVOR à Saint-Jean-de-Maurienne. La préférence fut finalement accordée au bichromate de soude.

M. le Président remercie M. DUMAS.