



## LES JAUGEAGES DES DÉBITS DES COURS D'EAU AU MOULINET HYDROMÉTRIQUE PAR LA MÉTHODE D'INTÉGRATION

par **M.-A. DICONNE**

Ingénieur des T.P.E.  
à la Circonscription électrique Est, Dijon.

Depuis 1959-1960, dates correspondant à la création des Comités techniques pour l'étude des problèmes de l'eau, l'activité « hydrométrie des cours d'eau » de la Circonscription électrique Est à Dijon s'est considérablement développée. Pour s'en convaincre il suffit de se reporter à la liste suivante donnant, pour chaque année, le nombre total de jaugeages des débits des cours d'eau qui ont été effectués :

ANNÉES	JAUGEAGES
1960	47
1961	70
1962	90
1963	107
1964	178
1965	278
1966	298
1967	333
1968	365
1969	459
1970	444

L'exécution de 450 opérations de jaugeage par an sur un territoire très étendu (14 départements), nécessite un personnel très spécialisé, effectuant de nombreux déplacements, et ayant à sa disposition un matériel parfaitement adapté, permettant de mesurer aussi bien un débit de quelques

dizaines de litres/seconde, qu'un débit de plusieurs milliers de mètres cubes/seconde.

La technique et les méthodes de travail utilisées jouent alors un très grand rôle dans le rendement des équipes et, dès 1969, nous avons été amenés à étudier diverses solutions en vue d'améliorer ce rendement pour pouvoir faire face à l'accroissement continu du nombre de jaugeages à exécuter chaque année.

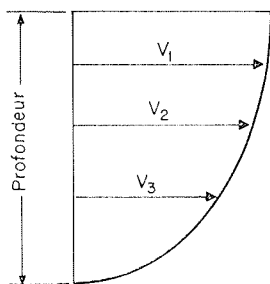
Or au début de l'année 1970, la Circonscription électrique Est a été sollicitée en vue de prêter son concours pour la mesure des débits des cours d'eau, dans le cadre des opérations prévues à l'Inventaire national du degré de pollution des eaux superficielles.

Ces opérations devant s'étaler sur l'année 1971 seulement, il n'était pas possible d'envisager, pour une période aussi courte, le recrutement d'un personnel d'appoint pour faire face à ce surcroît d'activité, car cela posait des problèmes de formation de ce personnel et surtout des problèmes d'ordre budgétaire pratiquement insolubles.

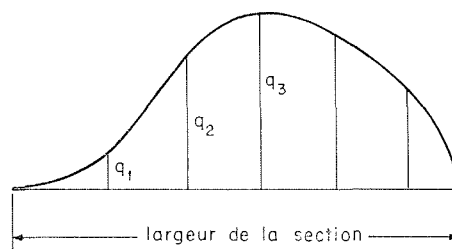
Il a donc fallu rechercher une autre solution consistant à obtenir, avec les équipes de jaugeage existantes, une rotation accélérée et, pour ce faire, avoir recours à des méthodes d'exécution plus rapides, tant pour les opérations sur le terrain que pour les calculs des débits effectués au bureau.

Au 1<sup>er</sup> janvier 1971, date à laquelle les opérations de l'Inventaire débutaient, nous avons à exécuter notre programme minimum annuel d'environ 450 jaugeages, auxquels s'ajoutaient 150 jaugeages supplémentaires au titre de l'Inventaire, soit un accroissement de 33 %.

Dès novembre 1969 nous avons pu acquérir un matériel permettant d'effectuer certains jaugeages par intégration



1/



2/

et consistant en une cyclo-potence électrifiée, du type E.D.F. - D.T.G., construite en un petit nombre d'exemplaires par les Etablissements Mécabolier à Villeneuve-le-Roi. Ce matériel a été utilisé très largement et avec entière satisfaction, pour l'exécution de la plupart de nos jaugeages de crue, au cours de la campagne de février et mai 1970. Nous avons alors apprécié la rapidité avec laquelle les opérations pouvaient être conduites sur le terrain et le gain de temps considérable obtenu dans les calculs des débits au bureau, d'où l'idée d'étendre ce procédé de jaugeage à la mesure des débits moyens, voire même des bas débits, ce qui supposait naturellement une modification du matériel existant ou l'acquisition d'un matériel nouveau.

L'objet de cette communication est d'exposer en quoi consiste la méthode de jaugeage dite « par intégration » et de décrire le matériel spécial que nous utilisons à cet effet. Toutefois pour en souligner les avantages, et aussi les quelques inconvénients, nous croyons nécessaire de rappeler au préalable les principes essentiels de la méthode de jaugeage traditionnelle dite « par points » (\*).

### Mesure du débit d'un cours d'eau au moulinet hydrométrique par la méthode dite "par points"

#### Opérations sur le terrain.

Dans la section à travers laquelle il veut mesurer le débit liquide, l'opérateur repère un certain nombre de verticales sur lesquelles il effectue en moyenne cinq mesures de vitesse (lorsque la profondeur de l'eau est inférieure à 0,50 m ce nombre est généralement réduit à trois; il peut être porté à six ou sept lorsque la profondeur dépasse 3 m).

Chaque mesure de vitesse nécessite un minimum de 35 à 40 s environ, compte tenu du temps nécessaire pour le déplacement du moulinet d'un point au suivant.

(\*) En 1962, M. J. Staimesse, alors ingénieur des Ponts et Chaussées à la Circonscription électrique, avait déjà mis au point une méthode de jaugeage par intégration discontinue qui consistait à décomposer la section de jaugeage S en petits éléments  $\Delta S$  égaux et de relever sur des compteurs d'impulsions le nombre total  $N_1$  de mesures effectuées durant le jaugeage et le nombre total  $N_2$  d'impulsions du moulinet pendant le jaugeage (cf. *Annales des Ponts et Chaussées*, mai/juin 1963).

La connaissance de ces paramètres permettait, avec la formule de tarage du moulinet, de calculer très rapidement et sur place, le résultat du jaugeage.

Toutefois pour que ce résultat fut suffisamment précis il était nécessaire de donner à l'élément  $\Delta S$  des dimensions très petites par rapport à la section de jaugeage. Il en résultait l'obligation d'effectuer un nombre important de mesures  $N_1$ , ce qui augmentait sensiblement le temps consacré aux opérations sur le terrain par rapport à la méthode de jaugeage traditionnelle.

En général, pour des sections comprises entre 5 et 40 m de largeur, les mesures sont effectuées sur une dizaine de verticales dont l'espacement est réparti en fonction de la largeur et de la régularité du profil en travers naturel de la rivière. Pour des sections plus importantes, il devient nécessaire d'augmenter le nombre des verticales.

De plus, il y a lieu de souligner que lorsque les jaugeages sont effectués à partir d'un pont comportant plusieurs travées séparées par des piles, chaque travée doit être explorée indépendamment, ce qui revient à exécuter autant de jaugeages qu'il y a de travées.

#### Calcul des débits.

Il existe plusieurs méthodes de calcul : la plus couramment utilisée était jusqu'à ces derniers temps la méthode graphique dite « des paraboles ».

Sur le terrain l'opérateur a noté à chaque mesure le nombre de tours d'hélice en fonction du temps. A l'aide d'un tableau établi une fois pour toutes d'après la courbe d'étalement du moulinet, il en déduit automatiquement la vitesse de l'eau. Ensuite, pour chaque verticale il trace la courbe des vitesses en fonction de la profondeur (cf. fig. 1). Le planimétrage de la surface ainsi obtenue donne le débit par unité de largeur au droit de la verticale considérée.

Il trace ensuite la courbe de variation de ces débits unitaires suivant la largeur de la section; le planimétrage de cette courbe donne le débit global (fig. 2).

Actuellement, avec les progrès de la mécanographie on a tendance à avoir recours à des méthodes arithmétiques beaucoup plus rapides mais bien souvent moins précises que la méthode graphique parce que trop sommaires. Il est évidemment possible d'obtenir une excellente précision en utilisant un polynôme de degré approprié permettant un lissage des courbes enveloppes mais il faut alors faire intervenir un ordinateur pour effectuer les calculs et ce mode d'exploitation devient très lourd si l'on n'a pas l'ordinateur à sa disposition, sur place.

En outre la méthode graphique permet de déceler facilement certaines erreurs, ou de comparer entre eux deux jaugeages effectués au même emplacement, ce qui n'est pas possible avec les méthodes arithmétiques.

#### Qualité des résultats obtenus par la méthode de jaugeage « par points ».

La précision du résultat final dépend essentiellement du soin qu'on aura apporté :

- au relevé du profil en travers de la section, donc du nombre et de la répartition des verticales;
- à la représentation fidèle du flux des vitesses, donc du nombre total de points de mesure de ces vitesses;
- au dépouillement des résultats.

Toutefois il est bien évident que pendant toute la durée des opérations tous les paramètres (section - vitesses) doivent rester stables, ce qui suppose que le débit, et par voie de conséquence, le niveau du plan d'eau, ne doivent pas varier sensiblement.

En définitive la méthode de jaugeage « par points » nécessite pour aboutir à un bon résultat, le relevé d'un maximum de points dans un minimum de temps.

D'une façon générale on considère que lorsque la section de jaugeage a été bien choisie et que toutes les opérations ont été conduites avec soin, le débit vrai a une probabilité d'environ 60 % d'être à  $\pm 2\%$  du débit mesuré.

## Mesure du débit d'un cours d'eau au moulinet hydrométrique " par intégration "

### Opérations sur le terrain.

Dans la section l'opérateur choisit un certain nombre de verticales, comme dans la méthode précédente, mais au lieu de mesurer la vitesse en trois ou cinq points, il dispose d'un appareillage spécial qui provoque la descente du moulinet à vitesse rigoureusement constante le long de chaque verticale (selon l'appareillage utilisé l'intégration peut également s'effectuer en remontant le moulinet du fond de la rivière à la surface du plan d'eau). La mesure de la vitesse de l'eau s'effectue alors en continu pendant toute la durée de la descente (ou de la remontée) du moulinet.

Le gain de temps par rapport à la méthode précédente est important. Supposons une verticale de 2 m de profondeur :

- avec la méthode « par points », on effectuera cinq mesures de vitesses soit, compte tenu du temps nécessaire pour le déplacement d'un point au suivant, environ 200'';
- avec la méthode « par intégration » et pour une vitesse de descente de 3 cm/s, le temps sera réduit à 67''.

Au cours d'essais comparatifs que nous avons effectués pour le jaugeage d'une rivière de 28 m de largeur, avec une profondeur moyenne de 1,20 m environ, le temps passé aux mesures s'est élevé à :

- 2 200'' avec la méthode « par points » ;
- 418'' avec la méthode « par intégration ».

Nous avons vu précédemment que la qualité des résultats pouvait dépendre de la stabilité du plan d'eau et qu'en conséquence il était toujours souhaitable de réduire au minimum la durée des opérations; la méthode de jaugeage par intégration va très largement dans ce sens.

Il faut toutefois se garder d'un optimisme exagéré et ne pas perdre de vue que, dans l'exécution d'un jaugeage, le temps employé au montage et au démontage du matériel peut être aussi important que celui nécessaire pour les mesures proprement dites. Or quelle que soit la méthode de jaugeage utilisée, ce temps reste le même, de sorte qu'en définitive le gain de temps total dans la méthode par intégration reste toujours très inférieur à celui des mesures. Nous donnerons d'ailleurs quelques évaluations comparatives en fonction des différents types de matériel utilisés.

### Calcul des débits.

Sur le terrain l'opérateur a noté pour chaque verticale le nombre total de tours d'hélice et le temps. En appliquant la formule de tarage du moulinet, laquelle est toujours li-

néaire, il obtient directement l'intégrale de la vitesse de l'eau à chaque verticale. Le produit de la vitesse moyenne par la profondeur donne le débit par unité de largeur au droit de la verticale considérée.

Le débit global peut ensuite être évalué graphiquement, comme dans la méthode précédente.

Au total le temps passé pour calculer un jaugeage par cette méthode est environ 1/3 du temps nécessaire par la méthode graphique dite « des paraboles ». Encore faut-il souligner que pour les jaugeages importants (rivières de plus de 60 m de largeur) le rapport des temps est encore plus favorable et peut aller jusqu'à 1/5.

### Qualité des résultats obtenus par la méthode de jaugeage « par intégration ».

Pour des rivières dont le niveau est peu stable en fonction du temps la supériorité de cette méthode est incontestable.

Des essais réitérés un grand nombre de fois sur une même verticale nous ont révélé que les résultats obtenus par intégration sont *toujours* plus homogènes entre eux que par la méthode par points.

Pour illustrer cette affirmation nous donnons dans le tableau 1 les résultats de plusieurs séries de mesures effectuées sur une même verticale, avec une profondeur d'eau de 3 m et une vitesse moyenne de l'eau de 1,50 m/s environ. Les valeurs Q représentent les débits ponctuels mesurés trois fois de suite, d'abord par points, ensuite par intégration.

	Q		OBSERVATIONS (écart maxi)
	Mesures par points	Mesures par inté- gration	
1 <sup>re</sup> série	4,23 4,265 4,06	4,145 4,195 4,175	<i>par points</i> ... 4,2 % <i>par intégrat.</i> ... 1,2 %
2 <sup>e</sup> série	4,12 4,23 4,33	4,287 4,338 4,247	<i>par points</i> ... 5,1 % <i>par intégrat.</i> ... 2,15 %
3 <sup>e</sup> série	4,30 4,18 4,30	4,196 4,175 4,247	<i>par points</i> ... 2,90 % <i>par intégrat.</i> ... 1,72 %
4 <sup>e</sup> série	4,185 4,175 4,350	4,41 4,47 4,39	<i>par points</i> ... 4 % <i>par intégrat.</i> ... 1,82 %

Pour comparer les deux méthodes, nous avons effectué une série de jaugeages en appliquant pour chaque verticale :

- la méthode par intégration, en descendant le moulinet de la surface du plan d'eau au fond de la rivière;
- la méthode par points, en remontant le moulinet.

Jaugeages effectués simultanément par intégration et par points avec le même moulinet

Tableau 2

DATES	RIVIÈRES	STATIONS	DÉBITS MESURÉS PAR INTÉGRATION	DÉBITS MESURÉS PAR POINTS	ECARTS EN % $\frac{(3) - (4)}{(4)}$
(1)	(2)	(2)	(3)	(4)	(4)
19-1-71	Ognon	Pesmes	13,52	13,22	+ 2,26
4-2-71	Saône	Ray-sur-Saône	46,94	46,92	+ 0,04
4-2-71	Loue	Champagne	31,12	31,16	- 0,13
11-2-71	Moselle	Blénod	72,00	74,16	- 2,90
11-2-71	Moselle	Hauconcourt	101,28	101,18	+ 0,09
15-2-71	Meuse	Chooz	135,20	132,12	+ 2,30
17-3-71	Meurthe	Malzeville	24,36	24,48	- 0,50
18-3-71	Moselle	Velle	21,97	21,84	+ 0,60
8-4-71	Moselle	Toul	43,37	42,60	+ 1,80
27-5-71	Moselle	Frouard	29,20	29,40	- 0,68
9-6-71	Doubs	Rochefort	52,06	50,96	+ 2,16

Ainsi les résultats sont absolument comparables, ils figurent dans le tableau 2.

Les écarts sont tantôt positifs, tantôt négatifs, avec un maximum de 2,90 % c'est-à-dire de l'ordre de grandeur de la précision d'un jaugeage effectué avec soins. On peut donc en conclure que les deux méthodes aboutissent à des résultats absolument identiques.

### Matériels utilisés par la Circonscription électrique Est pour l'exécution des jaugeages par intégration

D'une façon très schématique on peut diviser les jaugeages en trois catégories, chacune d'elle nécessitant généralement un matériel spécialement adapté :

a) *Les jaugeages de crue*, qui sont effectués le plus souvent à partir d'un pont ou d'une passerelle.

b) *Les jaugeages de moyennes eaux*, qui peuvent être effectués soit à partir d'une embarcation, soit avec un système à téléphérique.

c) *Les jaugeages de basses eaux*, qui sont effectués avec une tige dite « d'étiage », l'opérateur se déplaçant en cuisardes, dans le lit de la rivière.

Depuis novembre 1969 pour les jaugeages de crue et depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1971 pour les jaugeages de moyennes et de basses eaux, nous avons mis en service à la Circonscription électrique Est des matériels permettant d'effectuer les mesures de débit indifféremment, soit par la méthode traditionnelle dite « par points », soit par la méthode d'intégration.

Nous nous proposons de décrire sommairement ces matériels en indiquant au passage, leurs performances.

#### Matériel utilisé pour les jaugeages de crue.

Il s'agit, comme nous l'avons déjà indiqué, d'une cyclopotence électrifiée de type E.D.F. - D.T.G., dont le fonctionnement est entièrement mécanisé et qui permet d'effectuer les jaugeages par intégration à partir d'un pont ou d'une passerelle, sous réserve que celle-ci fasse au minimum 0,80 m de largeur pour le passage de l'engin.

Cet appareil dont la masse totale est de 150 kg environ est démontable pour le transport, en cinq éléments, dont le rangement a été bien étudié (cf. photo 1); l'élément le plus lourd pèse 45 kg. Il peut être monté ou démonté en 15 mn sans le secours d'aucun outil (clé - tournevis, etc.), cf. photos 2 à 4.

Les mesures par intégration s'effectuent dans le sens de la montée, à des vitesses que l'on peut faire varier de 1 cm/s à 8 cm/s et avec un équipage moulinet-saumon pouvant peser jusqu'à 80 kg. Un dispositif d'éclairage autonome alimenté par le groupe moteur permet d'effectuer les jaugeages de nuit.

Au cours de notre campagne de jaugeage de crues de février et mai 1970 nous avons utilisé couramment cet appareil avec un équipage moulinet-saumon de 80 kg. Nous donnons ci-après deux exemples avec les caractéristiques principales des sections mesurées et les performances de l'appareil :

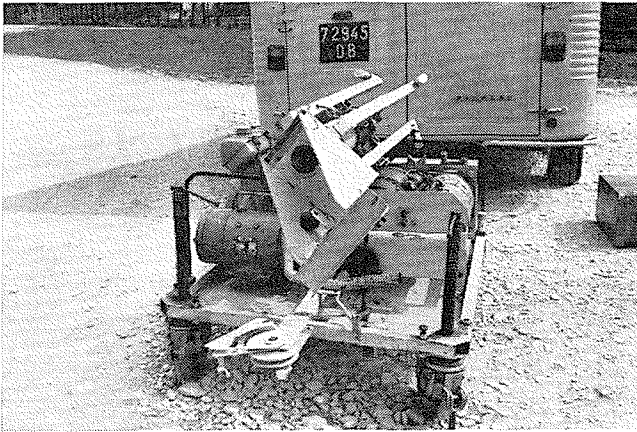
#### 1. Jaugeage de la Sarre à Sarreinsming en mai 1970.

- jaugeage effectué à partir d'un pont à quatre travées : largeur totale 74 m (non compris les piles);
- profondeur maximum de l'eau : 6 m;
- profondeur moyenne dans toute la section : 3,15 m;
- vitesse maximum de l'eau : 3,80 m/s;
- vitesse moyenne dans toute la section : 2,34 m/s;
- vitesse d'intégration : de 1,5 cm/s à 5 cm/s (selon les profondeurs);
- débit total mesuré par intégration des vitesses sur 33 verticales : 476 m<sup>3</sup>/s;
- temps passé par une équipe de deux opérateurs : 2 h (non compris le temps nécessaire au montage et au démontage du matériel).

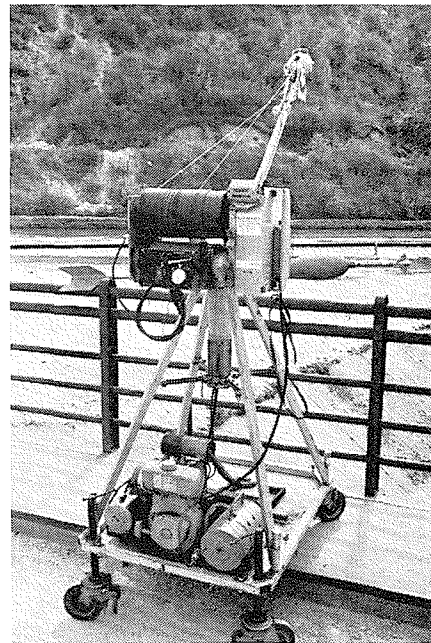
#### 2. Jaugeage de la Loue à Champagne en février 1970.

- jaugeage effectué à partir d'un pont à cinq travées : largeur totale 58 m (non compris les piles);
- profondeur maximum de l'eau : 3,50 m;
- profondeur moyenne dans toute la section : 3,10 m;
- vitesse maximum de l'eau : 4,70 m/s;
- vitesse moyenne dans toute la section : 2,58 m/s;
- vitesse d'intégration : de 1,6 cm/s à 3,6 cm/s (selon les profondeurs);
- débit total mesuré par intégration des vitesses sur 34 verticales : 410 m<sup>3</sup>/s;

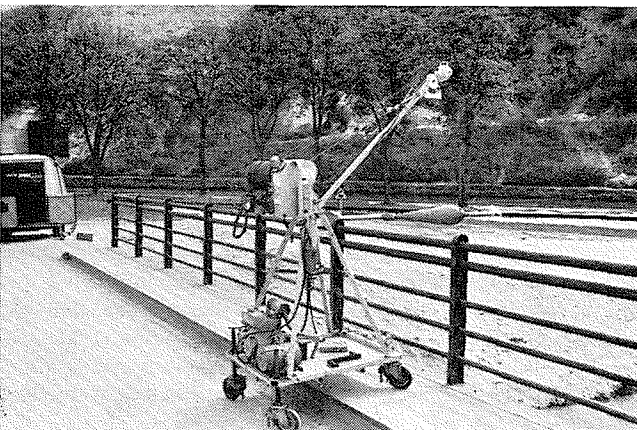
## MATÉRIEL UTILISÉ POUR LES JAUGEAGES DE CRUE PAR LA MÉTHODE D'INTÉGRATION



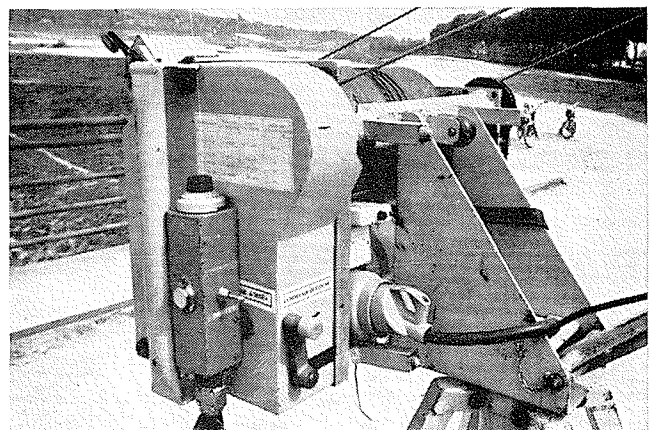
**Photo 1/**  
LA CYCLO-POTENCE ÉLECTRIFIÉE  
REPLIÉE POUR LE TRANSPORT.



**Photo 3/**  
On remarque :  
— le compteur d'ordonnées sur la droite du treuil;  
— le phare à l'extrémité de la flèche;  
— le moulinet monté en bout de saumon.



**Photo 2/**  
LE MATÉRIEL EN ÉTAT DE MARCHÉ.  
On distingue au bas le groupe moteur monté sur  
le chariot à roues télescopiques permettant de  
compenser la hauteur des trottoirs.



**Photo 4/**  
On remarque :  
— la prise de courant 24 V pour le phare;  
— le boîtier de commande montée-descente  
avec son potentiomètre de réglage des vi-  
tesses.

— temps passé par une équipe de deux opérateurs : 3,25 h (non compris le temps nécessaire au montage et au démontage du matériel).

Il est relativement facile de reconstituer approximativement le temps qui aurait été nécessaire aux mêmes équipes pour exécuter les mêmes jaugeages par la méthode « par points ». A Sarreinsming, il aurait été de 2,6 h environ tandis qu'à Champagne il aurait été de 4,4 h (ce dernier temps est trop important, aussi l'exécution de ce jaugeage par la méthode « par points » aurait justifié l'utilisation de deux équipes opérant simultanément pour réduire la durée des opérations).

En tout état de cause la méthode de jaugeage par intégration nous a donc permis d'obtenir un gain de temps de 23 % dans le 1<sup>er</sup> cas et de 26 % dans le second. A cet égard il y a lieu de noter que le gain de temps relatif sur le terrain est moins important lorsque les profondeurs augmentent et inversement.

Pour compléter cette comparaison il faut considérer aussi le temps passé au bureau par un agent pour le calcul des débits. Pour une méthode donnée on peut admettre que ce temps est approximativement le même pour les deux jaugeages.

Par la méthode de restitution graphique il faut environ 8 heures pour calculer un tel jaugeage; par la méthode d'intégration comportant le calcul arithmétique des débits ponctuels et l'évaluation graphique du débit final ce temps est réduit à 2,5 h, soit un gain de temps de 70 % environ.

**Matériel utilisé pour les jaugeages de moyennes eaux.**

Le matériel que nous utilisons se monte sur un bateau pneumatique « Zodiac » et, à notre connaissance, il n'en existe pas de semblable autre part. Il a été conçu par nous, à partir d'éléments de base que l'on trouve chez certains constructeurs.

Le moulinet est fixé au bas d'une perche métallique rigide qui se déplace verticalement entre deux trains de galets en nylon, montés sur roulement à billes (cf. photos 5 et 6). Le déplacement vertical de la perche est assuré par un câble de relevage, électropporteur, qui s'enroule autour d'un treuil Ott type Neva (cf. photo 7). Ce dernier est équipé d'un intégrateur de vitesse Ott qui permet de régler de façon rigoureusement constante la vitesse de descente de la perche entre 0,5 cm/s et 5 cm/s avec une précision de ± 2 % (cf. photo 8). Un dispositif de réglage permet d'utiliser des perches de formes semblables mais de modules différents que l'on trouve chez les fournisseurs; la verticalité de la perche est également réglable.

Ce matériel nous a permis d'exécuter des jaugeages jusqu'à 6 m de profondeur, pour des vitesses de l'eau ne dépassant pas 0,50 m/s ou à 3 m de profondeur avec des vitesses de 2,00 m/s (pour des vitesses supérieures l'utilisation du bateau pourrait devenir dangereuse).

Il existe certes des dispositifs de jaugeages par intégration se montant sur bateau, mais en « suspendu », c'est-à-dire que le moulinet est monté sur un saumon et l'ensemble est suspendu à un câble tout comme dans le cas de la cyclo-potence décrite précédemment. Or à partir d'un bateau léger on ne peut guère utiliser un saumon d'un poids supérieur à 20 kg, de sorte que pour des vitesses de l'eau de l'ordre de 2 m/s à 2 m de profondeur on a inévitablement une dérive qui compromet l'évaluation exacte des profondeurs. Ce n'est évidemment pas le cas avec notre perche rigide laquelle permet toujours d'apprécier la profondeur au centimètre près même lorsque la vitesse de l'eau dépasse 2 à 3 m/s.

De plus, lorsqu'on se trouve en présence de rivières à faibles vitesses et d'assez grande profondeur, ce qui est souvent notre cas, on n'est jamais certain, avec un équipage en « suspendu », de l'orientation correcte du moulinet. Cet inconvénient n'existe pas dans notre système où le moulinet reste toujours fixé sur la perche dans la même position.

Tous les jaugeages dont les résultats ont été donnés au tableau 2 ont été exécutés par ce procédé.

En particulier le jaugeage du débit de l'Ognon qui a été effectué à Pesmes simultanément par les deux méthodes, a nécessité au total 5 100'' se décomposant comme suit :

— temps consacré aux mesures par intégration ..	418''
— temps consacré aux mesures par points .....	2 200''
— temps consacré au déplacement du moulinet d'un point à un autre sur les verticales et au déplacement du bateau d'une verticale à l'autre .....	2 482''
TOTAL .....	5 100''

On en déduit que la durée totale du jaugeage effectué uniquement par l'une ou l'autre méthode aurait été :

- de 2 900'' avec la méthode d'intégration;
- de 4 800'' avec la méthode par points.

Le gain de temps obtenu par la méthode d'intégration est, dans cet exemple, de 40 %. La profondeur moyenne de l'eau était de 1,20 m. Cet exemple confirme ce que nous avons affirmé précédemment, à savoir que le gain de temps relatif sur le terrain augmente sensiblement lorsque les profondeurs diminuent.

**Matériel utilisé pour les jaugeages de basses eaux.**

Ce matériel a été conçu par M. Duboé, ingénieur à l'Agence Financière de Bassin Adour-Garonne et il est construit à Toulouse.

Il comprend essentiellement une tige métallique de 20 mm de diamètre le long de laquelle se déplace le moulinet équipé d'une dérive (cf. photo 9). Un boîtier, que l'on peut fixer en un point quelconque de la tige, contient un petit moteur électrique alimenté par piles et entraînant le mécanisme d'enroulement d'un ruban métallique perforé auquel est accroché le moulinet (cf. photo 10).

L'intégration s'effectue en remontant le moulinet du fond à la surface du plan d'eau et à des vitesses quasi constantes que l'on peut faire varier entre 0,5 cm/s et 1,5 cm/s grâce à un potentiomètre de réglage.

Le boîtier est en outre muni d'un compteur d'ordonnées ainsi que d'un tachymètre permettant le contrôle de la vitesse de remontée.

La descente du moulinet s'effectue manuellement.

Si la conception de ce matériel est très ingénieuse sa réalisation actuelle n'est pas sans reproche et nous avons dû lui apporter nous-mêmes quelques modifications en vue de pouvoir l'utiliser normalement. Toutefois une nouvelle série comportant d'importantes améliorations doit sortir prochainement et nous avons tout lieu de penser que le fonctionnement de ces nouveaux appareils donnera à l'avenir entière satisfaction.

Pour les mesures l'opérateur se tient en cuissardes dans le lit de la rivière, le boîtier étant à hauteur convenable en face de lui (cf. photo 11).

Il semble qu'on ne puisse guère dépasser une profondeur de 0,80 m pour une vitesse maximum de l'eau de 1,50 m/s environ, mais ces performances sont déjà très satisfaisantes.

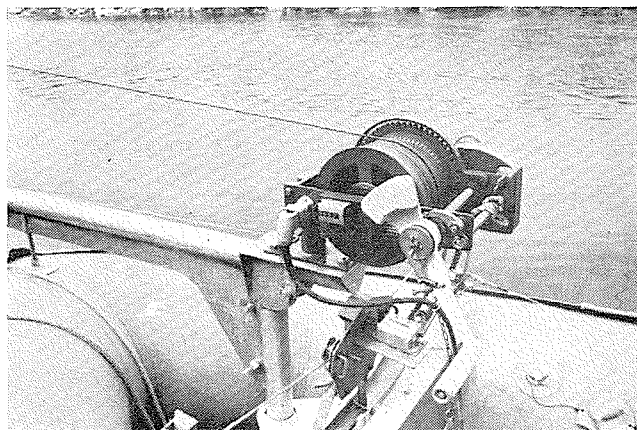
Comme dans les cas précédents nous citerons un exemple permettant de comparer l'exécution d'un jaugeage avec ce matériel, par rapport à la méthode dite « par points » :

## MATÉRIEL UTILISÉ POUR LES JAUGEAGES EN EAUX MOYENNES PAR LA MÉTHODE D'INTÉGRATION



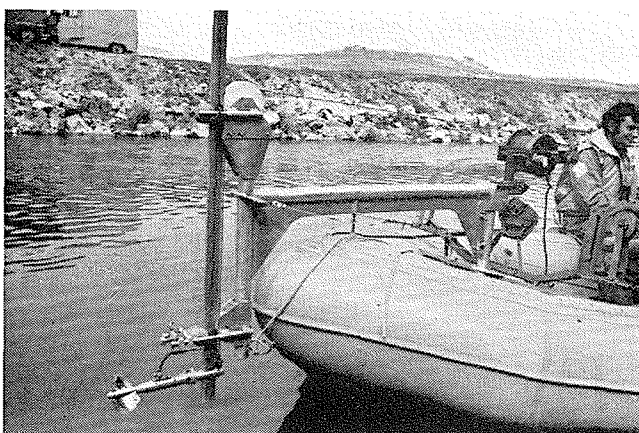
**Photo 5/**

LE MATÉRIEL EN ÉTAT DE MARCHÉ  
MONTÉ SUR CANOT PNEUMATIQUE  
ZODIAC.



**Photo 7/**

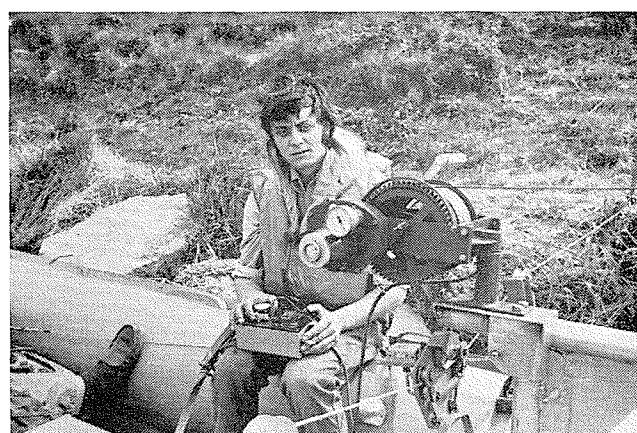
VUE DU TREUIL DE MANŒUVRE  
DE LA PERCHE AVEC LE COMPTEUR  
D'ORDONNÉES.



**Photo 6/**

DÉTAILS DE LA PERCHE PORTE  
MOULINET ET DE SON SYSTÈME DE  
GUIDAGE RÉGLABLE

(On distingue le câble électro-porteur de rele-  
vage de la perche ainsi que le treuil.)

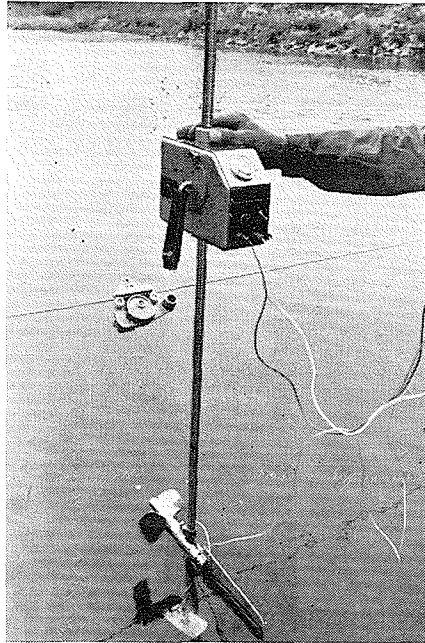


**Photo 8/**

VUE DE L'INTÉGRATEUR DE VITESSE  
AVEC SON TACHYMÈTRE.

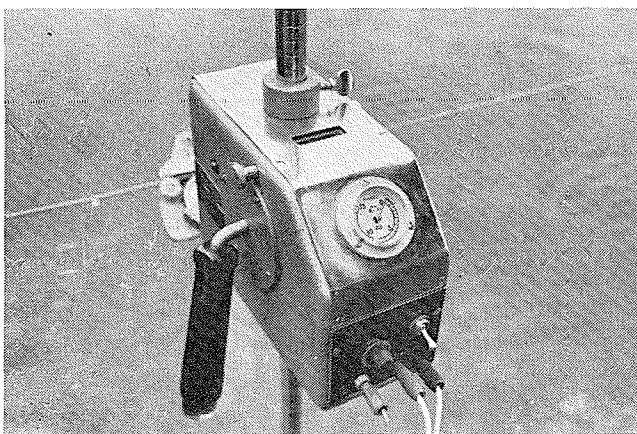
(On aperçoit au-dessous le câble traîlle du  
bateau avec le compteur des abscisses.)

MATÉRIEL  
UTILISÉ POUR LES JAUGEAGES DE BASSES-EAUX  
PAR LA MÉTHODE D'INTÉGRATION



**Photo 9/**

MATÉRIEL PRÊT A FONCTIONNER.  
(Le déclenchement de la montée du moulinet  
est synchronisé avec celui du compteur de tours  
d'hélice.)



**Photo 10/**

DÉTAIL DU BOITIER AVEC LE  
TACHYMÈTRE DE CONTRÔLE.  
L'INTERRUPTEUR ARRÊT-MARCHE ET  
LE BOUTON DE RÉGLAGE DU  
POTENTIOMÈTRE.



**Photo 11/**

POSITION DE L'OPÉRATEUR PENDANT  
LE JAUGEAGE.  
(On aperçoit le moulinet avec sa dérive et le  
câble avec le compteur d'abscisses.)

*Jaugeage du débit de la Bienne à Jeurre.*

- largeur de la section : 60,5 m;
- profondeur maximum de l'eau : 0,74 m;
- vitesse maximum de l'eau : 1,54 m/s;
- vitesse moyenne dans toute la section : 0,845 m/s;
- vitesse d'intégration : de 0,85 cm/s à 1,60 cm/s;
- débit total mesuré par intégration des vitesses sur 17 verticales (\*): 26,5 m<sup>3</sup>/s;
- temps passé par une équipe de deux opérateurs : 0,5 h.

L'exécution de ce jaugeage par la méthode « par points » aurait nécessité environ 1 h mais en effectuant les mesures sur une dizaine de verticales seulement. En tout état de cause, le gain de temps obtenu sur le terrain avec la méthode par intégration est au minimum de 50 %.

Quant au calcul du débit, dans les conditions déjà énumérées précédemment, le temps nécessaire à un agent serait de :

- 2 h par la méthode graphique des paraboles;
- 0,75 h par la méthode d'intégration.

Pour les petites rivières, dont la largeur est égale ou inférieure à 20 m, ce matériel permet d'effectuer les mesures de débit en moins de 15 mn; le calcul prend à peine plus de temps à un seul agent.

Après avoir souligné tous les avantages de la méthode de jaugeage par intégration nous voudrions énumérer aussi certaines incompatibilités ou inconvénients et terminer en rappelant les consignes spéciales à cette méthode que nous avons données à nos agents, tant pour les opérations sur le terrain que pour les calculs des débits.

**INCOMPATIBILITÉ DE LA MÉTHODE POUR L'EXÉCUTION DE CERTAINS JAUGEAGES.**

Alors que la méthode de jaugeage par points est applicable, moyennant quelquefois certaines précautions, à toutes les mesures de débit justifiant l'utilisation du moulinet hydrométrique, il n'en est pas de même pour la méthode par intégration.

En particulier, celle-ci ne peut être utilisée dans les cas suivants :

- vitesses de l'eau trop faibles, notamment dans les rivières à forte section et à faible pente — ou rivières encombrées par la végétation aquatique — ou sections soumises à l'influence d'un seuil naturel ou artificiel situé trop près en aval;
- eaux chargées, susceptibles de déposer sur l'hélice des particules en suspension (herbes - algues, etc.). Dans la méthode par points on peut pallier cet inconvénient en remontant le moulinet entre deux mesures pour vérifier que l'hélice n'est pas encombrée d'herbes.

**INCONVÉNIENTS INHÉRENTS A LA MÉTHODE.**

Nous avons vu précédemment que dans un jaugeage par points on s'applique à déterminer le flux des vitesses dans la section; on dispose donc d'un certain nombre de vitesses ponctuelles et parmi celles-ci la vitesse maximum, les vitesses de surface et de fond. Ces paramètres sont quelquefois très utiles à connaître pour certaines études particulières.

Dans un jaugeage par intégration on ne dispose que de la vitesse moyenne sur chaque verticale. On peut évidemment en déduire les paramètres énumérés ci-dessus par l'application de coefficients moyens, mais la précision n'est évidemment pas aussi grande que dans le cas précédent.

(\*) Le nombre de verticales peut paraître *a priori* élevé. En fait les mesures étant très rapides nous préférons gagner un peu en précision en augmentant le nombre des verticales.

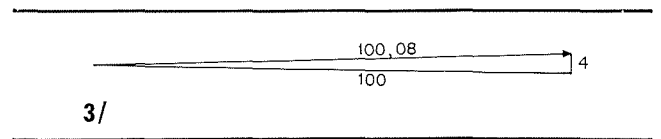
**CONSIGNES SPÉCIALES RELATIVES A L'APPLICATION DE LA MÉTHODE DE JAUGEAGE PAR INTÉGRATION.**

*a) Opérations sur le terrain.*

Eu égard à l'incompatibilité de la méthode avec les faibles vitesses de l'eau, nos agents ont reçu comme consigne de renoncer à pratiquer l'intégration lorsque la vitesse superficielle est inférieure à 0,25 m/s pour l'utilisation de la tige d'étiage et à 0,50 m/s pour l'utilisation du bateau ou de la cyclo-potence.

Quant au choix de la vitesse de déplacement du moulinet appelée aussi vitesse d'intégration nous allons voir qu'il doit être fixé plutôt en fonction de la profondeur à chaque verticale que de la vitesse de l'eau.

En effet si l'on considère le cas d'une vitesse de l'eau égale à 1 m/s et d'une vitesse d'intégration de 0,04 m/s, la vitesse réelle mesurée sera la résultante, soit : 1,0008 m/s (fig. 3), l'erreur relative est, dans ce cas, négligeable. Toutefois en appliquant la même vitesse d'intégration de 0,04 m/s pour une vitesse de l'eau de 0,25 m/s, l'erreur relative serait égale à 0,5 %; elle resterait cependant encore acceptable.



Mais quel que soit le système d'intégration utilisé (manuel - mécanique - intégration en remontant ou en descendant) on n'obtient jamais instantanément la vitesse d'intégration choisie; l'inertie de l'appareillage est telle qu'il faut un temps variant entre une fraction de seconde à plusieurs secondes pour atteindre réellement la vitesse d'intégration choisie. Ce temps est d'ailleurs d'autant plus élevé que la vitesse d'intégration est elle-même plus élevée.

Considérons à titre d'exemple une profondeur de 0,25 m. En adoptant une vitesse d'intégration de 0,04 m/s le temps théorique nécessaire à la mesure serait de 6,25 s; en supposant qu'au départ, la mise en vitesse du mécanisme demande une demie seconde, le temps réel sera de 6,75 s, d'où une erreur relative de 8 %.

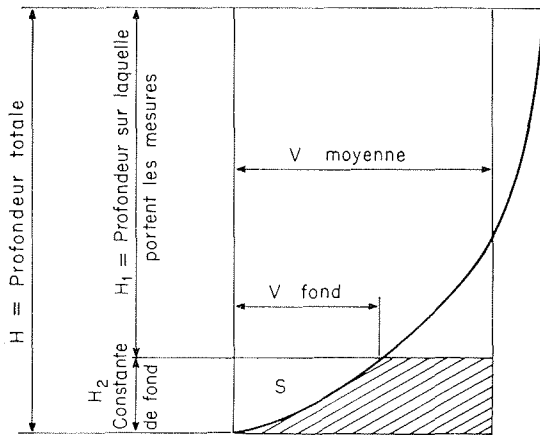
En choisissant une vitesse d'intégration de 0,01 m/s la mise en vitesse du mécanisme sera beaucoup plus rapide et l'erreur relative ramenée à un taux acceptable voisin de 1 % environ.

En fonction de ces considérations nous avons adopté la règle empirique suivante :

PROFONDEUR DE L'EAU (m)	VITESSE D'INTÉGRATION (cm/s)
$0 < H < 1$	1
$1 < H < 2$	3
$2 < H < 3$	4
$H > 3$	5

*b) Calculs des débits.*

Nous avons vu précédemment que pour chaque verticale de mesure on dispose du nombre total de tours d'hélice et du temps, ce qui permet, en appliquant la formule de tarage du moulinet, d'obtenir directement l'intégrale de la vitesse de l'eau à chaque verticale. Ensuite le produit de



4/

la vitesse moyenne par la profondeur donne le débit par unité de largeur.

En fait, ce calcul très simplifié, qui est d'ailleurs appliqué par certains Services, conduit à des erreurs systématiques par excès variant entre 2 à 7 %. En effet quel que soit le montage utilisé, il existe toujours pour chaque verticale ce qu'on appelle une constante de fond, qui est au moins égale au rayon de l'hélice augmenté de 1 cm, et sur laquelle il est impossible d'effectuer aucune mesure (cf. fig. 4) (\*).

En appliquant le calcul précédent on commet une erreur représentée par la partie hachurée sur la figure. Cette erreur est d'autant plus importante que la profondeur totale est faible.

Pour remédier à cet inconvénient il est préférable de décomposer le calcul en deux parties :

a) Calcul du débit sur la profondeur  $H_1$  comme il a été dit précédemment.

b) Calcul du débit sur la profondeur  $H_2$ . Pour ce faire on considère que celui-ci est égal à la surface désignée sous « S », laquelle est assimilable à une forme parabolique égale au produit :  $2/3 \times V_f \times H_2$ . Or l'expérience prouve que la vitesse  $V_f$  est toujours comprise entre 0,65 et 0,75 de la vitesse moyenne. Il en résulte en définitive que la surface « S » peut s'obtenir très simplement en multipliant la vitesse moyenne par un coefficient C variant avec la constante de fond et égal au produit :

$$0,7 \times H_2 \times 2/3$$

Cette décomposition du calcul nécessite pour chaque verticale une multiplication et une addition supplémentaires mais la précision du résultat est alors très satisfaisante puis-

(\*) En fait, sauf en tige d'étiage, la constante de fond est généralement égale ou supérieure à 10 cm afin d'avoir une garde suffisante pour la protection de l'hélice, surtout aux grandes vitesses.

qu'on élimine ainsi l'erreur systématique visée précédemment.

Enfin pour terminer, nous voudrions souligner aussi l'intérêt qu'il y a de vérifier par le calcul, et pour chaque verticale, la valeur de la vitesse d'intégration utilisée. Ce paramètre n'intervient évidemment pas directement dans le calcul du débit mais sa connaissance permet de déceler une erreur éventuelle de l'opérateur, soit dans l'évaluation du temps de la mesure, soit sur la profondeur de la verticale. Cette vérification ne demande que le temps nécessaire à une division pour chaque verticale.

Tous les temps que nous avons avancés pour les calculs des jaugeages par la méthode d'intégration tiennent compte de la décomposition du calcul comme nous venons de l'exposer et de la vérification de la vitesse d'intégration. Ils tiennent compte également du calcul du débit total par représentation graphique et planimétrage de la surface. Nous restons en effet très attachés à cette méthode parce qu'elle reste la plus précise, et qu'elle permet de visualiser le résultat et de déceler facilement une erreur et éventuellement de comparer deux ou plusieurs jaugeages successifs exécutés dans une même section.

## Conclusion

Pour conclure nous dirons tout d'abord que la mise en œuvre de la méthode de jaugeage par intégration a porté ses fruits puisque du 1<sup>er</sup> janvier au 30 juin 1971 nous avons exécuté et calculé 372 jaugeages, réalisant ainsi une confortable avance de 72 jaugeages sur le programme que nous nous étions fixé au départ, à savoir 600 jaugeages dans l'année.

Encore faut-il souligner que cette performance a été atteinte bien qu'une équipe sur deux seulement ait été dotée de tout le matériel nécessaire à l'exécution des jaugeages par intégration.

L'expérience acquise nous montre que cette méthode, lorsqu'elle est appliquée correctement, permet d'obtenir des résultats absolument identiques voire même supérieurs en qualité à ceux obtenus par la méthode traditionnelle de jaugeage par points, avec sur cette dernière les avantages suivants :

a) Gain de temps variant entre 20 et 50 % dans les opérations de mesure proprement dites, c'est-à-dire à l'exclusion du temps nécessaire au montage et au démontage du matériel qui reste le même quelle que soit la méthode employée. Ce gain de temps est doublement appréciable puisque d'une part, il concerne une équipe comportant deux opérateurs et d'autre part, il constitue un facteur important de la qualité du résultat en diminuant les risques d'erreurs consécutifs à des variations du plan d'eau, donc du débit, pendant les mesures.

b) Gain de temps de 70 à 75 % dans les calculs effectués au bureau par un seul agent.