Débitmétrie : précision des stations de jaugeage

Discharge measurements : gauging stations accuracy

J.M. Masson
M. Ghio
Ch. Lallement
C. Parsy
J.P. Philippe

Laboratoire d'hydrologie mathématique, USTL, Montpellier
SRAE-Centre, Orléans
EDF-DTG, Brive-la-Gaillarde
SHC de la Loire, Orléans
L.R.O.P., Trappes.

Les stations de jaugeage servent à élaborer les données de débits. Au cours de la chaîne des opérations qui aboutissent à l'édition d'un annuaire : mesure continue des hauteurs d'eau, mesure des débits instantanés à l'occasion de jaugeages intermittents, tracé des courbes hauteur-débit, le dernier maillon est la source principale des incertitudes. On s'interroge sur la manière de tracer la courbe et d'estimer la précision dans sa partie moyenne. Les problèmes les plus conséquents concernent les parties extrêmes et le suivi de la courbe face aux variations accidentelles ou saisonnières des conditions d'écoulement. Des jaugeages peu fréquents peuvent conduire à des erreurs systématiques importantes temporaires sur la série des débits.

Gaging stations data are used in order to establish annual reports of river's discharge. These data are continuous records of water level and intermittent discharge measurements. From them are established stage-discharge curves for a given river. This operation involves a lot of uncertainties. Are explored the ways to fit such curves to the data and to estimate their accuracy in the discharge medium range. The greatest uncertainties arise in the curve's extrema and with the curves fitting according to artificial or natural and seasonal flow conditions changes. Unfrequent gaging may lead to strong temporarily systematic errors.

Si l'annuaire des débits journaliers est leur production la plus connue, les stations de jaugeage permettent de constituer une banque de données beaucoup plus complète; l'obtention des débits résulte en effet du traitement de deux familles d'observations :

- série des couples : (hauteur d'eau-temps) provenant de la numérisation de l'enregistrement des hauteurs,
- série des jaugeages effectués sur la station, permettant l'établissement de la relation $Q(H)$.

Le traitement du fichier des jaugeages par le gestionnaire de la station fournit les courbes de tarage ou barèmes qui permettent de passer des hauteurs aux débits. L'application du barème au fichier hauteurs-temps donne un fichier débit-temps permettant d'obtenir par intégration le débit journalier.

Nous nous proposons d'examiner les répercussions, sur l'estimation des débits, des erreurs commises tant au niveau des observations utilisées, qu'au cours de la chaîne

des traitements qui aboutit à l'élaboration du fichier débit-temps.

Une attention particulière est portée au suivi des stations de jaugeage permanentes en canaux découverts qui sont la règle en milieu naturel, mais plus rares en hydrologie urbaine. La place accordée ici à l'hydrologie en milieu urbain n'est donc pas en rapport avec l'importance du travail qui y a été accompli ces dernières années, importance que ne manqueront pas de souligner les thèmes consacrés à la mesure.

1. La connaissance des hauteurs d'eau

La limnimétrie faisant l'objet d'autres thèmes de cette session, seuls quelques aspects particuliers liés aux stations de jaugeage seront rappelés ici.

Il semble difficile de parler d'une manière générale des conséquences des erreurs de mesure des hauteurs d'eau sur les débits. Tout dépend de la sensibilité de la station. En basses eaux, une différence de 1 cm sur la hauteur peut conduire à une variation de débit allant jusqu'à 50 %. La sensibilité est en général meilleure en hautes-eaux.

L'implantation de certains appareils est souvent hydrauliquement défavorable : dans le ressaut d'un ouvrage ou au droit d'un coude de rivière, par exemple. Si le site retenu est techniquement mauvais, c'est souvent le seul qui assure la pérennité de la station en permettant l'accès et la lecture des appareils notamment en crue. Dans ces situations, on observe, selon les états d'eaux, une différence de hauteur entre les indications de l'échelle et celles du limnigraphie. La hauteur de référence à prendre en compte pour la relation $Q(H)$ sera alors celle du limnigraphie, et on observera l'évolution éventuelle de la relation H limnigraphie — H échelle.

Avec des appareils à flotteur, les hauteurs sont obtenues à ± 0.5 cm dans les cas les plus favorables, mais le plus souvent à ± 1.0 cm.

Aux erreurs de mesure de niveau proprement dites s'ajoutent les erreurs dues au dépouillement :

Deux dépouillements d'un même limnigramme mensuel (0.5 mm/h) effectués au SRAE(*) Centre à la table à digitaliser ont conduit à des différences moyennes de 0.3 mm papier sur le temps et 0.15 mm papier sur la hauteur (70 points). Cette comparaison montre la bonne précision de la méthode (0.04 % de différence sur les débits journaliers) quand ce fastidieux travail est fait dans de bonnes conditions, c'est-à-dire quand l'opérateur n'y consacre pas plus de la demi-journée.

Quoiqu'il en soit, le dépouillement systématique de limnigrammes avec prise en compte d'une seule hauteur moyenne journalière est à proscrire.

C'est pourquoi l'on s'oriente de plus en plus vers la saisie automatique sur le site, avec mémoires statiques et interrogations périodiques par radio, satellite ou téléphone. La mesure horaire instantanée est la plus fréquente sauf en hydrologie urbaine où les intervalles sont beaucoup plus courts (eaux usées : 1/4 à 1/2 heure, eaux pluviales : 1 à 2 minutes).

(*) Service régional d'aménagement des eaux.

2. Les incertitudes associées aux jaugeages. Aspects théoriques et pratiques

L'esprit des normes actuelles (jaugeages au moulinet : Herschy [7], jaugeages par dilution : Gilman [5]) est de considérer l'incertitude limite associée à une mesure hydrométrique comme la somme quadratique d'erreurs élémentaires systématiques et aléatoires :

$$E_Q = \sqrt{X^2_Q + X'^2_Q}$$

Les erreurs systématiques, difficilement détectables, ne pourront être isolées que par l'amélioration des techniques et des matériels de mesure, voire la permutation des équipes hydrométriques.

Les normes assignent à cette erreur limite systématique X'_Q (95 %) une valeur de 1 %, faible vis-à-vis de celles proposées pour les erreurs limites aléatoires [9]. Les erreurs aléatoires ont fait l'objet d'analyses approfondies [1], [4], [5], [6], [7], [8], [9] que nous résumons ci-après :

2.1. Les jaugeages au moulinet [2], [3]

Le débit Q est déterminé à partir d'une exploration :

$$Q = \sum_{i=1}^m l_i p_i \bar{v}_i$$

avec :

- l_i = largeur d'application
- p_i = profondeur de la verticale
- $\bar{v}_i$ = vitesse moyenne, obtenue à partir de s_i mesures ponctuelles de vitesse effectuées à différentes profondeurs.

Cette opération correspond à une méthode de dépouillement par « rectangles ». Des comparaisons de méthodes de dépouillement menées au Service Hydrologique de Lille au cours des années 1960-1970 ont mis en évidence des écarts maximaux compris entre - 4 % et + 5 %.

2.1.1. Théorie des erreurs aléatoires

L'erreur limite aléatoire XQ (95 %) sur le résultat du jaugeage a pour expression :

$$X_Q^2 = X_m^2 + \frac{\sum_{i=1}^m (l_i p_i \bar{v}_i)^2 (x_{li}^2 + x_{pi}^2 + x_{vi}^2)}{Q^2}$$

avec :

- x_m : erreur associée au nombre limité de verticales explorées (tabulée sur [7])
- x_{li} : erreur limite aléatoire sur la largeur estimée
- x_{pi} : erreur limite aléatoire sur la profondeur estimée
- x_{vi} : erreur limite aléatoire sur la vitesse moyenne de la verticale = $\sqrt{X_v^2 + X_h^2 + X_n^2}$

Avec :

- x_v : erreur due à l'insuffisante durée du temps de comptage de la vitesse ; généralement limitée, elle devient très élevée (mais non chiffrable) pour les faibles vitesses d'écoulement sur les rivières lentes à faible tirant d'eau, notamment sur des courants à pulsations (tabulée sur [7]).
- x_h : erreur associée à l'étalonnage du moulinet (donnée par le constructeur). Très importante en basses eaux.

x_n : erreur liée au nombre de points par verticales (tabulée).

L'application des formules ci-dessus appelle deux remarques principales :

- La mise en œuvre du calcul sur une séquence de jaugeages à une station donnée montre que l'erreur se réduit en fait à 2 termes prépondérants :

- en basses eaux, x_{11} , et plus particulièrement x_h voire x_c ;
- en tous autres régimes, x_m .

La figure 1 montre les résultats du calcul de XQ sur 38 jaugeages effectués sur la Saône à Macon.

- Le poids du nombre de verticales a été étudié à E.D.F. (D.T.G.). Sur des populations de jaugeages à p (12 à 20) verticales, ont été testés tous les résultats de combinaisons obtenues en ne retenant que 4, 5, ... $p - 1$ verticales, 3 verticales étant obligatoirement retenues : Les 2 verticales explorées les plus proches des rives et la verticale la plus proche du milieu de la section.

Les premiers résultats obtenus montrent que 90 % des combinaisons approchent le résultat final à 9 % avec 60 % des verticales. Ceci laisse augurer d'une moindre sensibilité du résultat final au nombre de verticales que ne le laissent supposer les normes. Quelle que soit la largeur du bief mesuré, il semble bien que le poids d'une verticale explorée supplémentaire, au-delà d'une quinzaine de verticales « bien échantillonnées », soit sans incidence sur le résultat final.

Les simulations effectuées mettent également en évidence des écarts plutôt négatifs obtenus avec un nombre moindre de verticales, la courbure du champ de vitesse étant généralement sous-estimée par manque de verticales explorées.

2.1.2. Aspects pratiques

Devant les erreurs faites par ailleurs, la correction de la profondeur mesurée avec un câble est rarement prise en compte tant que le poids du saumon entraîne un angle inférieur à $10-11^\circ$.

Le nombre de points de mesure des vitesses par verticale a une influence certaine sur l'erreur commise. On ne se contente d'un seul point que si la hauteur d'eau est inférieure à deux diamètres d'hélice de micromoulinet. En eau profonde, on prend de 5 à 7 points par verticale ou on procède par intégration. E.D.F. a remarqué que les débits mesurés par intégration étaient plus dispersés et n'utilise plus ce mode d'exploration que lorsque le débit à mesurer évolue rapidement. Dans d'autres services la méthode par intégration ne se distingue pas de celle par points ou donne des différences systématiques dont il est plus facile de tenir compte. Avec un saumon suspendu à un câble, il est préférable d'intégrer les vitesses en remontant, ce qui diminue les évolutions désordonnées du saumon et raccourcit la trajectoire.

Quand le niveau varie rapidement, il est intéressant d'effectuer deux jaugeages en aller et retour sur les mêmes verticales en notant les hauteurs $H_1, H_2, \dots$ mettant en évidence la variation, avec le niveau, du débit unitaire sur une verticale.

La durée de mesure d'une vitesse ponctuelle, varie avec les organismes :

1. Précision des jaugeages effectués par EDF sur la Saône à Macon : Bornes de l'intervalle de confiance à 95 %. Nombre de jaugeages traités : 38.

- soit 50 à 100 tours d'hélice pour des vitesses supérieures à 1 m/s.

- soit 50 à 100 secondes pour des vitesses inférieures à 1 m/s.

En hydrologie urbaine (matières en suspension), les temps d'exploration sont très courts : 10 secondes en eaux pluviales, 5 secondes en eaux usées.

Il faut rappeler l'importance de l'entretien et de la propreté (interne) des moulinets. Le rééquilibrage systématique des moulinets ne paraît pas indispensable si l'appareil est en bon état mécanique (contrôle par rotation dans l'air : léger retour en arrière lors de l'arrêt de l'hélice). Le remplacement d'une hélice s'impose quand l'un de ses bords d'attaque est déformé. L'étalonnage spécifique d'un moulinet (erreur de 1 % sur les vitesses) plutôt que l'étalonnage standard (erreur de 2 % sur les vitesses) qui autorise l'échange standard des pièces défectueuses, ne semble pas présenter un intérêt marqué.

2.2. Les jaugeages par dilution [3], [4], [5], [6]

Nous ne traiterons ici que des jaugeages par dilution à injection à débit constant; la théorie des erreurs, dans le cas d'une injection instantanée, suit des principes identiques. L'obtention du bon mélange n'est toutefois que rarement contrôlée en injection instantanée, les prélèvements étant localisés en un point unique de la section de mesure.

Notons qu'en hydrologie urbaine, l'injection à débit constant sert de référence pour tracer la courbe $Q(H)$ [11].

Partant de l'équation de base :

$$Q = q \cdot D$$

avec :

q : débit d'injection (m^3/s)

D : facteur de dilution

on pose :

$$X_Q^2 = \left(\frac{S_q}{q}\right)^2 + \left(\frac{SD}{D}\right)^2$$

avec :

S_q : écart-type du débit d'injection

S_D : écart-type de la dilution.

S_q sera déterminé au laboratoire

S_D est la somme quadratique de 2 termes :

- dispersion de dilution des n échantillons prélevés, dont une estimation de l'écart-type est $\sigma/\sqrt{n}$;
- incertitude S_d associée à la verrerie entrant dans la réalisation des dilutions témoins (tabulée).

Remarques :

Les applications numériques menées par Gilman [6] montrent que la principale source d'incertitude réside dans la dispersion des échantillons prélevés (80 % de l'erreur finale). Or, le traitement statistique d'une centaine de jaugeages à EDF-DTG a mis en évidence des incertitudes élevées, liées à l'analyse colorimétrique au laboratoire :

La pratique usuelle est de tracer une droite de réponse du colorimètre aux rapports de concentrations $\frac{C_2}{C_1} = \frac{1}{D}$;

l'examen de ces tracés a montré que la dispersion des points autour de la droite :

- était supérieure aux rectangles d'incertitudes calculés à partir de la précision standard de la verrerie;
- constituait, dans la latitude laissée de ce fait au tracé de la droite d'étalonnage, la principale source d'incertitude (60 % de l'erreur finale).

COBB a défini un degré de mélange [4] intégrant la distribution transverse des vitesses dans un bief de mélange. A partir de simulations de vitesses et de concentrations théoriques, il apparaît que la précision du résultat final est très dépendante de ce degré de mélange :

- à 90 %, l'erreur sur le débit total est d'au moins 20 %;
- à 98 %, l'erreur sur le débit total est d'environ 4 %.

Ces résultats ne sont pas compatibles avec une incertitude liée à la dispersion en $\sigma/\sqrt{n}$.

2.3. Conclusions

— Dans tout ce qui précède, l'erreur aléatoire est considérée comme la somme quadratique d'erreurs élémentaires; dans la nature, ces erreurs élémentaires se combinent de façon aléatoire; il est délicat d'en effectuer une discrimination pour chiffrer leur contribution respective à l'erreur finale.

— Les incertitudes établies à partir des normes sont en conséquence souvent pessimistes car maximisées par leur mode de calcul.

— Une description de l'erreur associée à une mesure hydrométrique passe nécessairement par la définition d'une loi de probabilité de l'erreur finale.

Dans ce sens, quelques essais ont été menés à EDF-DTG en essayant de caractériser l'incertitude finale en tant que dispersion autour d'une courbe de tarage.

A partir d'une population de 2 N jaugeages effectués sur des ouvrages artificiels (gauge de stationnarité de la courbe de tarage), après élimination des débits les plus bas (non atteints 60 jours par an) et les plus élevés (dépassés 1 jour par an), EDF-DTG a procédé à la simulation suivante :

- tirage aléatoire de N jaugeages qui ajustent une courbe de tarage de la forme $Q = A(H - H_0)^n$,
- histogramme des écarts à la courbe pour les N jaugeages restants.

Le processus est reconduit 25 fois afin de cerner une dispersion « moyenne » et d'éliminer le biais introduit par l'équation préétablie de la courbe de tarage.

Les premiers résultats obtenus font varier l'écart-type global des écarts de 4 à 6.5 %, valeurs qui reflètent la qualité des conditions opératoires aux stations testées.

3. Les courbes de tarage

3.1. Leur précision en eaux moyennes

Formées de segments successifs de droites ou de courbes, elles doivent être impérativement soumises à un contrôle visuel de leur position au milieu du nuage de points des jaugeages [3], ce qui n'exclut pas l'emploi des tests recommandés par les normes. Elles doivent tenir compte des informations qu'on possède sur la station. Ainsi en présence d'un déversoir, on pourra imposer des courbes de la forme $Q = A(H - H_0)^n$ avec une valeur de $n \approx 1.5$.

La dispersion des points autour de la courbe de tarage se mesure par SD , écart-type de m jaugeages à la courbe de tarage :

$$SD = \left[\frac{\sum_{i=1}^m \left(\frac{Q_{\text{jauge}} - Q_{\text{calculé}}}{Q_{\text{calculé}}} \cdot 100 \right)^2}{m - 2} \right]^{1/2}$$

SD est un pourcentage.

Dans la partie moyenne des courbes de tarage et pour des stations stables, cet écart semble compris entre 5 et 8 %.

3.2. Extrapolation des courbes de tarage pour les débits de crue

Les méthodes d'extrapolation sont précisées dans les normes, mais en présence d'un champ d'inondation, sauf circonstances particulières, la section à considérer correspond essentiellement à la zone d'écoulement principal.

Des exemples (La Bouzanne à Velles — 434 km²) montrent que des erreurs supérieures à 50 % sont possibles en extrapolation, conduisant à des écarts au moins aussi importants sur l'estimation du débit centennal. Des modèles mathématiques d'écoulement permanent facilement utilisables sur micro-ordinateurs devraient maintenant permettre de mieux contrôler les valeurs annoncées.

Quand l'occasion de faire des jaugeages en crue se présente, les résultats montrent souvent une dispersion pouvant atteindre 25 % en conditions défavorables : mesures de nuit, variation rapide des niveaux, débris flottants, mouvements du saumon, ... Un jaugeage au flotteur bien préparé peut alors s'avérer plus satisfaisant qu'un mauvais jaugeage au saumon-moulinet. L'effet de boucle, peu perceptible sur les cours d'eau, introduirait en hydrologie urbaine une erreur de 7 à 16 %. Cependant tout jaugeage en crue doit a priori être considéré comme valable sauf à démontrer qu'il est faux.

L'extrapolation de la courbe de tarage doit être contrôlée par l'extrapolation des vitesses. En France métropolitaine, les vitesses moyennes maximales dans une section de mesure semblent s'étager entre 2.5 m/s (Ouest Massif Central, Bassin Parisien) à 6-7 m/s (cours d'eau cévenols).

Pour une station donnée J , on définit C_j « coefficient de jaugeage » [12], le rapport du plus grand débit jaugé au plus grand débit observé estimé par extrapolation ($0 < C_j \leq 1$). Une étude effectuée par les services du Ministère de l'Agriculture sur 57 stations de la région Centre donne pour ces coefficients la répartition suivante :

Classe de C	<0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	>0.9
Proportion %	7	14	16	28	14	10.5	10.5

Sur la moitié des stations, le débit maximum jaugé est inférieur aux 2/3 du débit maximum observé.

Le coefficient de jaugeage C_j mesure en fait assez approximativement l'incertitude sur les débits de crue : d'une part le débit maximal jaugé est souvent entaché d'une erreur non négligeable; d'autre part les typologies de C_j dressées ne reflètent la plupart du temps que les temps de concentration des bassins jaugés. C_j croît avec la taille du bassin versant et est directement corrélé avec le délai d'intervention laissé à l'équipe hydrométrique.

3.3. La courbe de tarage pour les bas débits

Quand les vitesses sont inférieures à 1 cm/s, les méthodes classiques ne permettent pas de mesurer correctement les débits, et l'imprécision peut atteindre 100 %. Sur 15 stations de jaugeage du bassin de la Seine, le terme SD de la partie basse des courbes de tarage dépasse 25 % dans 1/3 des cas [10] [13]. Les résultats sont meilleurs avec un aménagement artificiel.

Du fait des besoins en eau croissants, la mesure des bas débits va devenir le problème majeur de l'hydrométrie dans la prochaine décennie. Des techniques de mesure

plus efficaces sont à mettre au point pour les eaux de surface sans omettre les problèmes d'inféro-flux et les oscillations en masse dans les cours d'eau canalisés (les ultrasons ne sont pas toujours satisfaisants).

4. Suivi des courbes de tarage

Statistiquement sur ces dernières années, EDF fait en moyenne 5 jaugeages par an, surtout en basses eaux, partie la plus évolutive de la courbe. Au SRAE Centre, on passe 13 fois par an sur les stations, ce qui correspond à 8-9 jaugeages par an en moyenne. En présence de végétation, un jaugeage par mois semble un minimum. La technique du « chapeau de gendarme » ne se justifie en effet que si elle est étayée par des mesures, car on observe de grandes variations d'une année sur l'autre dans le développement et l'effet de la végétation.

En ce qui concerne les moyens en hommes, un bon équilibre semble atteint avec 1 jaugeur pour 10 stations.

Les fréquences et les moyens avancés permettent d'obtenir une précision de l'ordre de 10 % sur les débits moyens. Avec plus de moyens, on gagnera peu, mais avec moins de moyens, on ne sait plus ce qu'on fait et on pourra payer très cher le fait de ne pas être allé assez souvent sur une station (impossibilité, par exemple, de dater un détarage et d'avoir une idée de la précision des débits sur une période de plusieurs mois).

En eaux moyennes, il ne faut pas se contenter des 6 ou 8 derniers jaugeages pour définir la courbe de tarage, mais mettre tous les points datés (minimum 30) pour faire la sélection. D'une manière générale, et avec du recul, on se rend compte que le nombre de courbes de tarage retenu est trop important parce qu'on a tendance à considérer comme juste la dernière mesure qu'on vient de faire. Le cas extrême est la méthode du Yoyo qui transforme les erreurs aléatoires en erreurs systématiques [10].

Sur les rivières peu affectées par le transport solide, les détarages sont principalement consécutifs à des interventions artificielles sur le contrôle hydraulique : aménagements de rivière, etc. Sur 32 stations de jaugeage situées à l'Ouest du Massif Central, hors étiages, 50 % des stations ont une courbe stationnaire depuis 15 ou 20 ans.

5. Précision des estimations de débits

Elle résulte :

- de l'incertitude sur la position de la courbe de tarage construite avec m jaugeages,
- de l'incertitude sur la côte lue.
- de la pente locale de la courbe de tarage (sensibilité de la station).

Pour les normes, l'incertitude sur la position de la courbe de tarage est estimée par l'écart-type SE :

$$Se = S_D / \sqrt{m}$$

Cette expression nous semble trop optimiste. Dans le cas d'une régression linéaire par exemple, elle correspond à l'incertitude minimale : celle du point moyen.

Conclusion

Dans l'état actuel des choses, les stations de jaugeage sont capables de fournir des débits moyens journaliers à moins de 10 % près si on y consacre des moyens suffisants. L'incertitude sur les débits de crue ou les débits d'étiage est plus importante et varie avec les conditions d'implantation des stations. Une amélioration peut être obtenue vers les débits de crue en utilisant des modèles mathématiques pour l'écoulement permanent et vers les bas débits en mettant au point des dispositifs de mesure appropriés.

L'importance des erreurs systématiques sur un réseau insuffisamment suivi reste difficile à cerner. On pourrait

en avoir une idée en partant de stations bien suivies et en simulant la perte d'information. En étiage, en présence d'influences, l'insuffisance des mesures peut entraîner des erreurs systématiques pouvant atteindre 50 % sur plusieurs mois. Mais, sur une station donnée, ces erreurs sont quasiment impossibles à préciser et à dater.

Une lacune importante du réseau français tient à la formation insuffisante des jaugeurs. Chaque service a ses méthodes et son expérience qu'il transmet à ses jaugeurs, mais qu'ignorent les jaugeurs des autres services. Une formation où participeraient les différents services conduirait à uniformiser les méthodes de jaugeage et de dépouillement et serait une garantie de l'homogénéité des résultats du réseau français de stations de jaugeage.

Bibliographie

- [1] AFNOR. — *Recueil de normes françaises, Mesure de débit des fluides. Canaux découverts*, tome 2, 1983.
- [2] ALDEGHERI M. — *Manuel d'Hydrométrie*, tome IV, Mesure des débits à partir des vitesses, ORSTOM, 1979, 313 p.
- [3] ANDRE H., AUDINET M., MAZERAN G. et RICHER C. — *Hydrométrie pratique des cours d'eau*, Eyrolles, Collection EDF Etudes et Recherches, 1976, 259 p.
- [4] COBB E. — *Mixing length in open channels*, ISO TC 133 SC4 N 252 (226-01), 1985, 67 p.
- [5] GILMAN — *Estimation of uncertainties, proposition de norme ISO TC 113 SC4*, 1983, 15 p.
- [6] GILMAN. — *Errors in dilution measurements associated with incomplete mixing*, Proposed report of Work Group 2 on mixing length, ISO TC 113 SC4 N 226, 1982, 19 p.
- [7] HERSCHY R.W. — *Hydrometry, Principles and practices*, John Wiley and Sons, 1978, 511 p.
- [8] ISO Norme 748-1979 (F). — *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts. Méthodes d'exploration du champ des vitesses*.
- [9] ISO Norme 5168-1978 (F.). — *Mesure de débit des fluides. Calcul de l'erreur limite sur une mesure de débit*.
- [10] MASSON J.M. — *Méthodologie pour estimer la précision des stations de jaugeage*, AFBSN, note LHM 6/84, 60 p. + annexes.
- [11] PHILIPPE J.R. et RANCHET J. — *Pollution des eaux de ruissellement pluvial en zone urbaine. Synthèse de mesures sur 10 bassins versants en région parisienne. Première partie : méthodologie générale de mesures applicable à l'étude de la qualité des eaux de ruissellement pluvial urbain*, Rapport de recherche L.C.P.C. — L.R.O.P., 1986.
- [12] POTTER K.W. and WALKER John F. — *An empirical study of flood measurement error*, *Water Resources Research*, vol. 21, n° 3, pp. 403-406, mars 1985.
- [13] SOGREAH, *Etude des débits d'étiage en rivière canalisée sur la Seine, la Marne et l'Oise*, AFBSN, R 360851-2, décembre 1978.

Discussion

Président : M. M.H. ANDRÉ

M. ANDRÉ estime qu'une des raisons du pessimisme des intervenants sur la précision des mesures au moulinet en rivière provient essentiellement du fait qu'ils ont travaillé sur des rivières lentes et que par voie de conséquence les mesures sont plus délicates que dans les Alpes ou les Pyrénées.

Par contre dans ces dernières régions, les traînées des câbles pendant les mesures au moulinet sont souvent bien supérieures à 10° (valeur maximale annoncée par les intervenants). Des valeurs de 45° ont été atteintes dans les Alpes avec des corrections sur la profondeur qui atteignent alors 1 à 2 m.

Pour sa part, la comparaison entre des mesures faites dans de bonnes conditions au moulinet et des mesures par dilution n'a jamais mis en évidence d'écarts supérieurs à 3 %.

M. CRAVERO en qualité de producteur d'électricité et d'utilisateur d'un réseau temps réel de stations de jaugeage attire l'attention de l'auditoire sur la qualité des capteurs et leur fiabilité en période de crue. Il rappelle avec beaucoup de détails l'épisode

historique de septembre 1980 (sur la Haute Ardèche et les hauts bassins de la Loire et de l'Allier). Dans les phénomènes extrêmes, la plupart des systèmes sont malheureusement détruits.

D'où quelques conclusions :

1. Veiller comme à la « prunelle de ses yeux » aux stations stables bâties sur un seuil rocheux naturel — elles résistent mieux aux crues et demeurent stables au cours du temps.

2. Un système de capteurs à ultrasons serait plus efficace car à l'abri des flôts il ne risque pas d'être emporté, ni détérioré par les corps flottants.

Si on n'a pas la chance de disposer sur une rivière en crue d'un barrage EDF qui fournira des données précieuses à 10 ou 15 % près à l'aide des évacuateurs, il faut donc s'efforcer de respecter ces deux recommandations.

M. ANDRÉ rappelle que M. RENARD avait également préconisé les ultrasons en cas de crue.