

La qualification de différents systèmes de mesures de débit en rivière par les jaugeages : une expérience à partager

Gilles PIERREFEU¹

¹ Hydrologue, Compagnie Nationale du Rhône, 4 rue de Chalon sur Saône, 69007 Lyon, France – g.pierrefeu@cnr.tm.fr

RÉSUMÉ. – Ce document présente une synthèse des principales techniques de mesure et de contrôle des débits en rivière. Les avancées technologiques majeures ont eu lieu au cours des vingt dernières années avec le développement des techniques ultrasonores, radar et vidéo. Il sera montré les limites d'utilisation de ces équipements et/ou les précautions que l'utilisateur doit mettre en œuvre.

Il sera rappelé le contexte et les difficultés des mesures de débit en rivière qui sont très différentes des mesures de débit en laboratoire. En effet, les mesures sur site sont dépendantes des apports naturels ou de manœuvres d'ouvrages industriels ainsi que de l'évolution morphologique de la rivière, notamment approfondissement du lit ou atterrissement suite aux crues. Les essais en laboratoire sont plus facilement programmables aussi bien en termes de nombre d'essais de mesure, de gamme de débit à tester ou bien de la forme des sections d'écoulement à représenter. Quelques-unes de ces techniques de mesure seront illustrées au travers de l'expérience CNR pour sa concession ou via le partage avec d'autres organismes. Le panel des méthodes peut se répartir selon les axes suivants : jaugeage selon méthode volumique (pesée, dilution) ou discrétisation du champ de vitesse (exploration du champ des vitesses avec courantomètre ou profileur) et loi de transfert (loi hauteur débit seuil, rivière ou ouvrage hydraulique, index vitesse avec ultrason immergé ou radar Doppler, LSPIV).

Toutes ces méthodes présentent des avantages et des inconvénients. Il convient pour chacune d'elles, surtout pour les technologies innovantes, de les tester et les comparer avec des méthodes éprouvées. La validation interviendra souvent après une période d'observation. Après cette phase d'ajustement, ces équipements fourniront des données avec une fiabilité contrôlée. En effet, il faut souvent du temps pour explorer la gamme d'utilisation complète d'un équipement in-situ et pouvoir détecter ses limites ou le valider.

Dans le domaine de l'hydrométrie, l'amélioration de ces processus de mesure passe souvent, pour ne pas dire toujours, par le partage de l'expérience entre différents organismes. En effet, les enjeux et la typologie des rivières sont tellement différents qu'il est souhaitable de mutualiser les connaissances pour progresser efficacement.

Mots-clés : hydrométrie, débit, mesure, jaugeage,

Validation of river flow measurement systems by gauging: a practice to share

ABSTRACT. – This paper summarizes the main techniques for measuring and controlling river flows. Most of technological advances have been made in the course of the last twenty years with the development of ultrasound, radar and video technical. The limits of use of these equipments and / or precautions that the user must implement will be highlighted.

It will be reminded the context and challenges of river flow measurements that are very different in the laboratory. Indeed, in situ measurements are dependent on natural inputs or hydraulic structures operations as well as the morphological evolution of the river, including deepening of the bed or further aggradation following the floods. It's easier to plan laboratory tests in terms of repetition tests of measuring range or the shape of the flow sections to represent. Some of these measurement techniques will be illustrated by CNR experience for its concession or through experience shared with other agencies. The range of methods can be divided in the following areas : gauging method according to volume (weighing, dilution) or discretization the field velocity (exploration of the velocity field with current meter or profiler) and transfer law (rating curve for weir in river or hydraulic structure, index velocity with its ultrasound sensors immersed or non intrusive sensors like radar and LSPIV).

All these methods have advantages and disadvantages. It is suitable for each of them, especially for innovative technologies to test and compare them with proven methods. Most of the time, validation will occur after a period of observation. After this adjustment phase, the equipment will provide data which reliability has been controlled. In fact, it often takes time to be able to scan the full range of use of equipment in situ and to detect its limitations of uses in order to validate them.

In the field of hydrometry, improving the measurement process goes often, if not always, through the sharing of experience between different organizations. Indeed, the issues and the types of rivers are so different that it is desirable to gather the knowledge to move forward efficiently.

Key-words: hydrometry, flow, measurement, gauging

I. EVOLUTION DU CONTEXTE HISTORIQUE DE LA MESURE

La prise de conscience du bénéfice qu'apporte la connaissance des débits en rivière est assez récente. Les enjeux des besoins industriels ont davantage fait évoluer la mesure de débit en conduite ou en canal plutôt qu'à surface libre en rivière. Les objectifs de comptage ou de gestion de réseau ont très tôt guidé les industriels à développer les matériels concernant cette activité génératrice de retour sur investissement. De plus le milieu naturel est beaucoup plus varié que des sections fermées standardisées. Cette variabilité rend difficile la mise au point d'une technique fiable pour une grande étendue de mesure. Les innovations techniques pour la mesure de débit en rivière se trouvent principalement avec l'apparition des capteurs ultrason, radar et l'analyse d'images. Le principe technique est connu depuis plusieurs décennies. Le déploiement opérationnel est récent pour la vidéo et le radar Doppler, et plus ancien pour les méthodes ultrason immergés qu'elles soient selon l'analyse du temps de transit ou selon l'effet Doppler.

Concernant les évolutions techniques, trois étapes importantes ont eu lieu ces vingt dernières années pour l'amélioration des mesures hydrométriques :

- Etape 1 : les capteurs immergés de suivi de niveau en continu ;
- Etape 2 : les capteurs dédiés aux stations ultrason tant pour la mesure de niveau non intrusive que les capteurs immergés de vitesses d'écoulement à temps de transit ou effet Doppler et les profileurs de courant (Acoustic Doppler Current Profiler). Ces derniers permettent de jauger une rivière par scrutation du champ de vitesse complet de toute la section ;
- Etape 3 : les mesures non intrusives pour le suivi des débits comme l'imagerie vidéo (LSPIV) et les radars de vitesse de surface (SVR) pour l'estimation du débit en continu.

Il semblerait que les évolutions techniques aient été motivées pour répondre à un objectif de connaissance des valeurs de débit moyen à fort alors que les techniques de mesure concernant les faibles valeurs de débit seraient encore à développer. Ce propos mérite d'être nuancé par le développement d'enregistreurs autonomes équipés de fluorimètres ou conductimètres qui ont facilité le déploiement du jaugeage par dilution, notamment au sel pour les très faibles débits sous réserve d'avoir les conditions d'un bon mélange du traceur. La panoplie d'équipement pour répondre au risque d'inondations est néanmoins plus grande que celle nécessaire aux enjeux de la ressource en eau en période d'étiage.

A ce jour, les faibles débits nécessitent souvent d'adapter la section de mesure pour pouvoir utiliser les capteurs existants. Ce peut être la mise en place d'un seuil jaugeur associé à une mesure de niveau ou bien encore l'adaptation de la section d'écoulement pour recevoir un système à ultrason, lequel nécessite une hauteur d'eau suffisante et sans développement de végétation. Les contraintes d'écoulement, de génie-civil ou encore environnementales rendent parfois impossibles ces modifications de profil de rivière pour un budget réaliste. En effet, techniquement tout est possible. Il pourrait être installé une passe à poissons au droit de seuil jaugeur pour permettre la continuité piscicole. Toutefois, le montant prohibitif de cette solution la rend immédiatement caduque sauf à trouver une solution de seuil franchissable par les poissons tout en étant fiable d'un point de vue hydrométrie. Il n'existe donc pas de solution simple et fiable pour la mesure des faibles débits adaptée à l'ensemble des enjeux.

Avant d'aborder les équipements de mesure (Cf §III), les paragraphes suivants (cf §II) aborderont les contraintes

des mesures sur site et les méthodes potentiellement utilisables pour mesurer/déterminer le débit en rivière. D'autres contraintes existent pour toutes les mesures qui ne sont pas propres à l'hydrométrie. D'une manière générale, les mesures doivent être réalisées en conditions de sécurité, précises, fiables et robustes, tout en étant économiquement réalisables au regard des enjeux.

II. CONTRAINTES DES MESURES SUR SITE

II.1. Régime transitoire

Cette contrainte est inhérente à toutes mesures quelles qu'elles soient. Pour avoir une bonne mesure, il faut que le phénomène mesuré soit stable afin que la réduction des incertitudes dépende des instruments et de la méthode et non de la variabilité dans le temps du mesurand.

En milieu naturel, l'écoulement peut évoluer de façon non maîtrisée en fonction des apports naturels ou de manœuvres d'organes hydrauliques.

La contrainte d'apports naturels peut être gérée en partie par une bonne prévision des débits notamment pour les « coups d'eau ». L'évolution attendue des débits permettra de connaître la durée maximale admissible pour réaliser la mesure en situation stable. La stabilité en milieu naturel n'existe que rarement. Une situation est considérée comme stable au regard de l'incertitude de la méthode de mesure. Par exemple, la recherche d'une mesure à 5 % près nécessite, a minima, un écoulement stable à 5 % près, voire en dessous si cela est possible. Il faudra donc se donner les moyens de contrôler cette stabilité indépendamment des équipements de jaugeage. Cela peut être le suivi de niveau de loi univoque, le suivi d'organes hydrauliques sur des rivières aménagées ou encore la mesure d'une vitesse ponctuelle pendant la durée du jaugeage. Ces mesures annexes ne permettent pas de déterminer le débit mais quantifieront la stabilité ou non de l'écoulement. En période de crue ou décrue, il sera nécessaire d'avoir un protocole de mesure assez rapide pour considérer le régime stable.

La contrainte de manœuvres d'organes hydrauliques concerne le fonctionnement de : barrage, usine hydro-électrique, pompage irrigation, éclusage ou passage de bateaux. L'évolution du plan d'eau à débit constant peut également évoluer sans action humaine du fait de la marée pour les secteurs concernés.

La manœuvre d'organes hydrauliques doit être intégrée dans la préparation du protocole de mesure tant que faire se peut. Pour un tronçon de rivière donné, il est nécessaire de bien connaître l'ensemble des utilisateurs de ce cours d'eau pour convenir d'une situation stable ou a minima être informé de toutes évolutions susceptibles de perturber la stabilité de l'écoulement et bien entendu intervenir sur le terrain en toute sécurité.

Il existe des cas de mesures qui ont été « faussées » du fait de manœuvres intempestives d'organes hydrauliques. Il est donc impératif de s'assurer de la stabilité de l'écoulement avant de conclure à une mesure correcte alors qu'elle est mauvaise, ou erratique alors qu'elle serait correcte. De même, les variations de débit observées par les stations ultrason doivent être critiquées au regard des conditions limites avant de conclure quant à leur fiabilité ou leur défaut.

Certaines inter-actions sont plus difficiles à gérer, notamment la navigation ou la marée. Il est en effet difficile de contrôler les bas débits du canal de Savières qui est

navigable en période estivale, ou bien encore le débit du Rhin à Strasbourg Sémaphore-Nord avec une navigation de commerce importante. Pour réaliser des jaugeages de contrôle fiables à bas débit, il faudrait arrêter temporairement la navigation, ce qui semble peu réaliste au regard de l'enjeu de la mesure. A fort débit, les passages de bateaux pénalisent peu les mesures. De même, les écoulements à bas débits du Rhône à Arles ou du Petit Rhône à Fourques sont influencés par la marée aussi bien en niveau qu'en débit. Ces contraintes sont plus souvent subies que maîtrisées à la différence des mesures en laboratoire où il semble plus facile d'agir sur les conditions d'essais.

A titre d'exemples

- Station ultra son :
 - Sur la station ultrason à temps de transit de Roquemaure sur le Rhône, il est observé des pics erratiques alors qu'elle était identifiée comme fiable selon le constructeur ou même via les contrôles en régime permanent ! L'analyse des conditions de stabilité amont et aval via les données des aménagements hydrauliques, indépendamment de la mesure exacte de débit, a démontré au constructeur que le débit réel ne pouvait être que stable et que les pics mesurés par la station ultrason étaient bien des défauts du système. Ces défauts sont difficilement identifiables par jaugeages puisque de courtes durées et peu fréquents. Le §III.2.4 apporte quelques explications et pistes de solutions techniques ;
- Contrôle des bas débits en aval des barrages Rhône :
 - Sur le Rhône il est souvent observé des régimes transitoires compte tenu des manœuvres des organes hydrauliques. Il est nécessaire d'attendre de une à trois heures la stabilité des débits pour obtenir des mesures ADCP précises de l'ordre de 5 %. Cette stabilité passe par la maîtrise du protocole de mesure avec l'ensemble des acteurs du fleuve.

II.2. Régime influencé

Le régime sera sous l'influence d'une condition aval si, pour une même hauteur d'eau, plusieurs configurations de débit existent, ce qui est souvent le cas en amont des aménagements hydro-électriques. Une autre condition aval subie est celle de l'influence de la mer ou l'océan pour les estuaires.

Le § III.2 présente différentes solutions techniques pour pallier cette influence aval. Par anticipation sur ce paragraphe, ces solutions fonctionnent bien pour les débits moyens à forts. A l'inverse, elles peuvent présenter de fortes incertitudes pour les faibles valeurs de débit.

II.3. Evolution de la section

Les trois types d'évolution de la section sont :

- soit cyclique : le développement de la végétation est notamment pénalisant pour la mesure des faibles valeurs de débit. Elle modifie la section mais surtout la rugosité du lit freinant ainsi l'écoulement. Elle peut perturber le fonctionnement des stations ultrason en période estivale (Cf III.2.3) ;
- soit ponctuelle : comme lors des épisodes de crues ou après des phases de travaux ;
- soit en évolution naturelle et permanente de certains secteurs du cours d'eau.

Le développement de la végétation nécessite :

- Soit des jaugeages de contrôle fréquents puis éventuellement une adaptation de la loi Qh ;
- Soit d'assurer un entretien végétation régulier pour supprimer ces effets sur la cote ;
- Soit d'avoir un tronçon artificiel de rivière sans végétation.

Pour pallier le phénomène d'évolution des fonds, ou a minima le détecter, il peut être intéressant d'installer plusieurs stations simples et robustes, mesure de niveau avec capteur immergés ou radar de surface, sur un même tronçon de rivière. En cas de divergence d'estimation de débit par ces stations, il sera nécessaire de réaliser des mesures de contrôle de niveau et/ou de loi Qh via des opérations de jaugeages. La solution du tronçon artificiel de rivière est peu réaliste du fait des contraintes environnementales, sauf peut-être pour des canaux d'irrigation ou de drainage.

Ces évolutions conduisent le plus souvent à devoir modifier les relations hauteurs débit (Qh) ou les paramétrages des stations US/LSPIV (ultrason/vidéo). En fonction des enjeux, il peut également être décidé de ne rien modifier mais annoncer une incertitude plus grande sur la valeur de débit. Le choix de l'une ou l'autre solution dépendra des enjeux de la mesure et des moyens mis à disposition pour le contrôle du site.

II.4. Environnement

Outre les contraintes de végétation (voir II.3), la contrainte environnementale principale concerne les travaux et/ou aménagements qu'il est encore possible de réaliser dans le lit de la rivière. En effet, cette contrainte environnementale a fortement évolué au cours de la dernière décennie, que ce soit les démarches administratives pour supprimer des dépôts de matériaux suite aux crues et ainsi retrouver un fonctionnement normal de la station, ou bien encore pour installer des seuils jaugeurs afin de mesurer les faibles débits avec une bonne sensibilité. L'idéal serait des seuils jaugeurs permettant la continuité piscicole. Les intérêts de sites archéologiques ou de zones sensibles pour la flore et la faune peuvent également guider le choix d'implantation de stations de mesure en dehors de ces zones protégées, même si hydrauliquement c'était le site le plus approprié. Toutes ces contraintes doivent être examinées en concertation avec l'ensemble des acteurs de l'Eau pour répondre du mieux possible à la connaissance de débit, parfois elle-même rendue indispensable par les contraintes environnementales.

A titre d'exemples :

- Le Rhône à Arles :
 - Les bas débits du Rhône à Arles sont influencés par la mer. Il a donc été décidé d'installer une station ultrason. Elle a été implantée dans un virage en lieu et place d'un secteur en alignement droit initialement choisi mais non retenu en raison de son intérêt archéologique. Avec le temps, le secteur en virage s'est envasé et nuit au bon fonctionnement de la station. En effet, ce site était équipé d'une croix de mesures (deux cordes US dans le même plan) et d'une ligne courte (une mini corde mesurant le débit à proximité de la berge). Cette ligne courte permettait un calcul du débit même à fort taux de matières en suspension (MES) ou en cas de défaillance de la croix principale. Cette ligne courte est maintenant inopérante puisque totalement engravée ;
- Les Ussets sur le Haut-Rhône, zone sensible pour la faune piscicole ;
- Le Roubion à Montélimar, zone sensible pour l'urbanisation et la faune piscicole.

II.5. Fréquence d'apparition des débits

Contrairement aux conditions de laboratoire, les équipements de mesure de débit ne peuvent pas être contrôlés rapidement in situ sur toute la gamme de valeurs de débit.

Il faut d'une part que les valeurs de débit à contrôler soient présentes sur site, et d'autre part disposer d'une équipe de contrôle disponible pour se rendre sur place. La plupart du temps, la valeur de débit s'impose à l'opérateur en fonction des apports naturels. Ainsi les débits moyens seront contrôlés fréquemment, les étiages moins souvent et les crues de manière encore moins fréquente, notamment celles qui ont une durée courte comme les épisodes Cévenoles.

Certains phénomènes qui apparaissent ponctuellement seront rarement détectés et difficiles à corriger (pic erratique sur station, déficit de MES sur station Doppler ou excès de MES pour la technologie à temps de transit). De plus, à la différence du laboratoire d'essais, il est souvent difficile de refaire plusieurs fois la même mesure dans des conditions identiques afin de vérifier l'intérêt de tel ou tel correctif sur l'équipement.

III. TECHNIQUES DE MESURES USUELLES OU INNOVANTES

Comme indiqué en introduction au §I, il y a eu peu d'innovations de matériel opérationnelles sur ces dernières années pour le domaine des mesures en rivière. Les techniques ultrasonores aussi bien temps de transit, Doppler ou corrélation acoustique que les techniques d'imagerie vidéo sont apparues il y a une dizaine d'années voire plus. L'avancée observée se situe plutôt sur le retour d'expérience de ces technologies et principalement le contrôle de ces équipements afin d'en valider le fonctionnement. En effet, la plupart des technologies fournissent des valeurs de débit, encore faut-il qu'elles soient fiables au regard de l'incertitude attendue.

A noter également qu'il est difficile de traiter des matériels de mesure sans évoquer les incertitudes associées et les conditions d'utilisation. En effet, en fonction de l'incertitude attendue, un équipement peut être valide pour certaines applications et inadapté pour d'autres cas.

De même, il est important de différencier les incertitudes obtenues en temps réel de celles obtenues en post-traitement. Bien souvent, en hydrométrie il est possible de corriger/ajuster les données en post-traitement pour réduire l'incertitude de mesure. Le contrôle des données doit rester une constante dans le déploiement des équipements de mesure.

Une autre difficulté est l'incertitude relative (%) sur la mesure qui est d'autant plus grande que le débit est faible. Il est généralement plus facile d'avoir des mesures de vitesse fiables lorsqu'elles sont au dessus de 10cm/s qu'en dessous et ceci pour tous les types de technologies.

III.1. Jaugeage de contrôle

Les jaugeages sont des mesures ponctuelles de débit. Outre la connaissance du débit à un instant donné, ces opérations permettent de vérifier/calibrer les installations de mesure de débit en continu.

III.1.1. Jaugeage global

Pour les faibles débits, voire très faibles, il peut être utilisé les méthodes globales comme le comptage d'un volume d'eau sur une durée donnée ou bien la dilution d'un traceur de concentration connue. Pour des petits cours d'eau il peut également être installé un seuil jaugeur le temps de l'estimation du débit, puis démonté.

Ces méthodes ne sont pas toujours évidentes à mettre en œuvre. Toutefois, elles présentent l'avantage de pouvoir être raccordées aux étalons de référence sans hypothèse particulière sur la mesure de vitesse ou de la section d'écoulement. Dit autrement, tout le débit est mesuré sans loi d'extrapolation comme c'est le cas pour les moulinets ou les ADCP.

III.1.2. Jaugeage par scrutation du champ de vitesse

Pour les débits moyens à forts, l'exploration du champ des vitesses au moulinet et/ou à l'ADCP sera réalisée. L'ADCP sera privilégié, si possible, pour sa rapidité de mesure qui s'affranchit du régime transitoire notamment en crue ou en régime influencé (Cf §II.2). La technique ADCP permet également de tester la répétabilité. Au besoin, plusieurs équipes en simultané peuvent être déployées pour réduire l'incertitude si l'enjeu de la mesure l'exige. (Cf intercomparaison ADCP – Montélimar 2009 et Génissiat 2012 – Le Coz et al.2012).

Ces méthodes sont éprouvées. Toutefois leur raccordement aux étalons de référence fait souvent défaut. Les mesures au moulinet nécessitent de bien connaître la répartition de débit dans la section pour « placer » au mieux les points de mesure sauf à réaliser un grand nombre de points, ce qui n'est pas forcément compatible avec les conditions sur site. Les mesures ADCP « profilent » une grande partie de la section afin d'intégrer ces vitesses sur la section en vue d'obtenir le débit. Ces profileurs de courant sont validés par les constructeurs pour des conditions d'écoulement idéales. En milieu naturel, l'écoulement est plus varié et l'hypothèse d'écoulement homogène nécessaire au calcul du débit par ADCP est difficilement appréhendable.

Les intercomparaisons de jaugeage avec l'une et/ou l'autre de ces méthodes permettent de conclure à une valeur d'incertitude consensuelle. (Cf comparaison ADCP avec moulinet (SHF 2008) – ADCP entre eux ADCP (SHF 2013) – ADCP avec débit ultrason de Génissiat (étude CNR))

L'utilisation de plusieurs ADCP en simultané peut s'avérer utile pour valider/confirmier la valeur obtenue :

- Crue décembre 2003 :
 - Compte tenu des enjeux, en décembre 2003, il a été utilisé plusieurs ADCP en simultané pour réaliser les mesures de débit à Beaucaire. Cela a permis d'une part de valider la mesure proche de 11 000 m³/s et d'autre part de mettre en évidence le déplacement du fond du lit de la rivière ainsi que sa prise en compte dans l'estimation des débits. Cette crue est actuellement celle qui dispose du plus grand nombre d'observations en termes de jaugeage et de relevés de niveau sur Beaucaire. (Cf dossiers relatifs à la conférence de consensus de 2008). L'incertitude sur le débit max de 11 500 m³/s a été estimée à +/-5 % ;
- Bas débit en aval des barrages Rhône :
 - La mesure des basses valeurs de débit en aval des barrages Rhône est une opération particulière. En effet, il s'agit de mesurer le débit réservé dans des sections souvent peu profondes (1 à 3m) et très larges (100 à 200 m). Par conséquent les vitesses d'écoulement sont assez faibles (de 2 à 10 cm/s). Il est donc souvent utilisé plusieurs ADCP en simultané d'une part pour réduire l'incertitude de mesure (Cf intercomparaison ADCP) et d'autre part pour mieux appréhender l'usage de nouveaux profileurs Doppler arrivés sur le marché. Ainsi, dans la mesure du possible une à deux équipes munies chacune de deux à trois ADCP (Streampro, Workhorse, River Ray) sont mises en œuvre. L'analyse des mesures permet ensuite de sélectionner les ADCP les plus adaptés et d'exclure les autres, notamment

via les critères de Q_{mes}/Q_{tot} (ratio débit mesuré sur débit total) et BAD (nombre de mauvaises mesures élémentaires appelées BAD).

III.1.3. Jaugeage par mesure de vitesse ponctuelle

Des mesures de vitesses d'écoulement de surface sont faites lors d'épisodes avec des débits extrêmes ou lors de régimes transitoires rapides. Divers capteurs existent sur le marché allant du flotteur à l'ADCP en passant par le moulinet, le radar de vitesse ou l'imagerie. Le choix du nombre de mesures de vitesse de surface à réaliser sera fait pour avoir un compromis entre scruter au maximum la largeur de la section et avoir un régime stable pendant les mesures. Ce compromis influencera l'incertitude sur l'estimation du débit. Il faudra ensuite passer de la vitesse ponctuelle de surface à la vitesse moyenne de l'écoulement. Ce passage se fera au mieux sur la base de mesures complètes sur site, sinon sur la base d'une modélisation hydraulique ou en dernier ressort selon la littérature. Ce passage de la vitesse ponctuelle mesurée à la vitesse moyenne d'écoulement constitue l'un des points clés dans l'estimation du débit aussi bien pour les jaugeages ponctuels que pour les mesures de débit en continu (ultrason ou imagerie).

A titre d'exemple, la figure 1 montre l'analyse d'une trentaine de stations CNR. Elle permet de mettre en évidence que le coefficient moyen permettant de passer de la mesure de vitesse de surface à la vitesse moyenne est de l'ordre de 0.86, conforme à la bibliographie. Toutefois cette valeur évolue d'environ +/-10 % (valeur à 2 écarts types) en fonction des sites. Certains sites sont tout à fait dans la moyenne, et d'autres s'en écartent notablement. Ainsi, sans calibration ou vérification particulière, cette incertitude sur le coefficient

de surface impacte directement la valeur de débit estimé à partir de vitesses mesurées à la surface de l'eau.

Cette analyse (annexe IV contribution CNR à la conférence Consensus Crue de déc 2003 - étude Cétiat pour CNR référence 2360031 de juin 2005) a été conduite sur un échantillon de 511 jaugeages (avec 6 points par verticale) répartis sur 35 sites :

- Rhône : 145 jaugeages opérés sur 11 sites ;
- Rhône aval barrage : 34 jaugeages sur 5 sites ;
- Affluents : 332 jaugeages pour 19 sites.

La figure 3 montre que la dispersion de ce coefficient semble plus importante sur des sections à faible profondeur ($h < 2m$). Inversement pour des hauteurs d'eau nettement supérieures ($h > 4m$), le coefficient de surface tend à se rapprocher d'une valeur comprise entre 0.85 et 0.90

De même, il tendrait à évoluer à la hausse avec la vitesse (cf figure 2), la tendance étant moins marquée.

Les disparités, à l'intérieur d'un même groupe (Affluents ou Rhône), sont telles qu'il est impossible d'établir une règle fiable (à moins de 10 % près) conduisant à prédire l'évolution du coefficient de surface en fonction de la hauteur d'eau sans disposer de valeurs mesurées sur site. De plus, même si pour la plupart des sites il est observé une augmentation de la valeur du coefficient de surface en fonction de la hauteur d'eau, il y a des cas où cette tendance ne s'applique pas. Les mesures de contrôle sur site sont indispensables pour caler/ajuster ce coefficient à moins de 10 % près.

Ces dernières années ont vu le déploiement des équipements vidéo (LSPIV) et radar (SVR). Ces technologies ont le mérite d'être non intrusives et de pouvoir être déployées en sécurité sur site. Toutefois, elles nécessitent, a minima, de bien connaître le coefficient de surface pour le calcul du débit

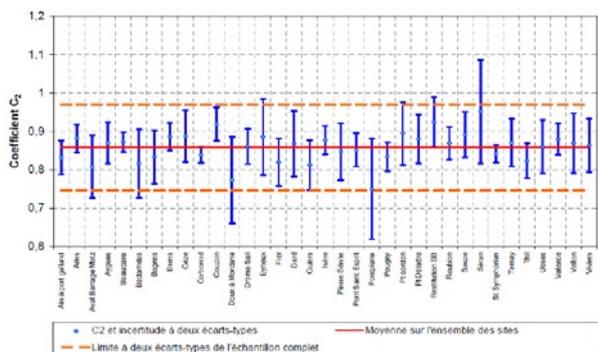


Figure 1 : Évolution du coefficient de surface C2 en fonction des sites - orange : limite à 2 écarts types de l'ensemble des valeurs.

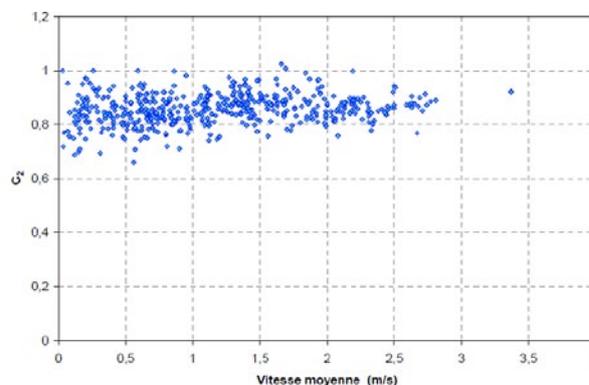
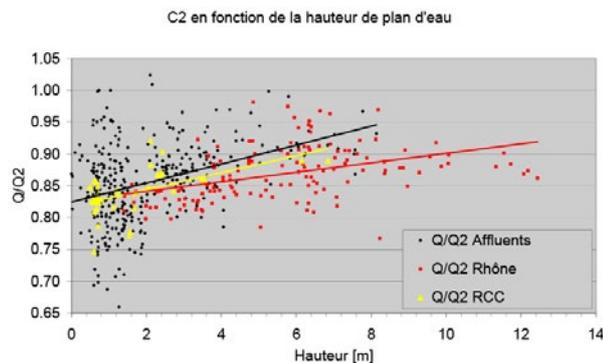


Figure 2 : Évolution du coefficient de surface C2 en fonction de la vitesse moyenne d'écoulement – tous sites confondus.



ci-contre en figure 3 : Évolution du coefficient de surface en fonction de la hauteur et de la typologie de la rivière (rouge : le Rhône, noir : affluents du Rhône, jaune : Vieux Rhône ou RCC).

total. De plus, lors d'opérations de tests certains équipements radar ont révélé des défaillances dans le calage des inclinomètres (intercomparaison Génissiat) qui conduisaient à des valeurs erronées de vitesses de surface. Après correction de ce défaut, les valeurs étaient correctes. D'autre part, ces équipements méritent d'être testés dans toutes les configurations (visées vers l'amont ou l'aval) pour bien cerner les conditions limites de bon fonctionnement (Cf SHF2013 Tamari).

Ainsi, ce qui doit guider l'hydromètre, c'est la validation des équipements de jaugeage par comparaison avec des références connues. Les certificats d'étalonnage en laboratoire sont nécessaires pour les mesures élémentaires de vitesse, mais insuffisants pour aboutir ensuite à une estimation fiable du débit en condition réelle d'utilisation.

Ce constat sur la variabilité du coefficient de surface ne doit pas être un frein sur l'utilisation d'équipement permettant d'estimer les débits des fortes crues. En effet, même avec une forte incertitude (+/-10 %), cette méthode permet d'ajuster ou de valider certaines hypothèses de modélisation hydraulique pour les épisodes de crues afin de consolider les hauts des courbes de tarage souvent extrapolés.

A titre d'exemples pour les crues extrêmes :

- Gard à Remoulins en 2002 :
 - La station de jaugeage a été emportée par la crue. L'estimation de la vitesse de surface par flotteur a conduit à estimer le débit de crue à environ 7000 m³/s. L'incertitude de cette valeur a été estimée à +/-10 % compte tenu des relevés historiques du coefficient de surface. Cette valeur a été un point d'entrée important pour la simulation numérique.

III.1.4. Jaugeage par différence de débit

Cette méthode de jaugeage par différence de débit concerne les rivières de grandes sections où les méthodes classiques « dilution » ou « moulinet » ne sont pas adaptées. L'utilisation de plusieurs équipes pour jauger en simultané a permis de montrer qu'il pouvait être plus facile de jauger un petit débit par différence de deux états stables le même jour plutôt que le faible débit isolé.

Pour des mesures particulières sur des aménagements hydrauliques, il a été contrôlé des débits issus d'organes barrage et/ou usine par différence de jaugeage. Ces opérations spécifiques ont été nécessaires pour qualifier la débitance d'un ou plusieurs organes hydrauliques alors que d'autres faisaient transiter l'excédent de débit. Cette configuration peut être nécessaire à cause du débit total amont qu'il faut évacuer. Un autre critère de choix de cette méthode est la présence de vitesses d'écoulement trop faibles qui seraient

générées au droit de la section de mesure avec l'utilisation du seul organe à contrôler actif. Générer une augmentation de débit par cet organe à contrôler sur un débit support stable permet d'avoir des vitesses mesurables.

Cette méthode a été employée lors de comparaison de mesures multi-ADCP avec des équipements en turbine soit ASFM (Montélimar), soit ultrason (Génissiat).

- En 2009, il a été contrôlé le débit d'un groupe Kaplan de l'usine de Montélimar (variant de 150 à 280m³/s) équipé de capteurs ASFM (Acoustic scintillation flow meter) alors que les autres fonctionnaient pour évacuer l'excédent de débit total en provenance de l'amont (600 à 1000 m³/s). Une dizaine d'ADCP a jaugé en simultané le débit total usine. L'écart de débit généré par le groupe équipé ASFM a été vu par la moyenne de l'ensemble des ADCP à moins de 2 % près (voir figure 5) ;
- En 2010 et 2012, il a été comparé les écarts de débit (environ 110 m³/s chacun) générés par les groupes équipés de capteurs ultrason des conduites de Génissiat avec les moyennes d'une dizaine d'ADCP mis en œuvre sur deux sections en aval (Cf figure 4). Cette méthode de contrôle permet de supprimer l'impact des apports intermédiaires entre l'usine et la section de mesure, apports supposés constant lors de cette opération. L'écart moyen tout palier confondu avec les données ultrason est de 2 %. Toutefois, la dispersion entre les différents paliers mesurés reste élevée à 5 % (à 2 écarts types) ;
- Les écarts observés à Montélimar semblent de meilleurs qualité (Cf dispersion de 2 % à 2 écarts types). L'explication est peut être à rechercher du côté des sections de mesures ADCP qui étaient hydrauliquement très intéressantes car très proches de l'usine tout en ayant une section régulière et homogène en vitesse. Sur Génissiat 2010, la meilleure section est celle de Pyrimont toutefois loin de l'usine (~4 km) et peut être influencée par de très mauvaises conditions météo en 2012 (fortes pluies pendant une partie des mesures).

III.2. Mesure en continu

Différents types d'équipement peuvent être utilisés pour déterminer le débit en continu d'un tronçon de rivière. Toutes ces méthodes utilisent des lois de transfert. Aucun de ces équipements ne mesure directement le débit, par ordre du plus simple au plus complexe :

- Loi hydraulique d'ouvrage calibré standard ;
- Loi hauteur débit construite à partir de jaugeages ;
- Loi de station de débit en continu.

synthèse sur les augmentations de débit d'environ 110 m ³ /s pas groupe				
intercomparaison Génissiat 2010 et 2012 - synthèse sur delta Q				
“+”=“adcp + fort que US”	2010 GE	2010 PY	2012 bognes	2012 pyrimont
G1	4.8 %	1.3 %	-1.7 %	2.8 %
G2	1.4 %	0.8 %		
G3	non équipé	non équipé	-3.5 %	2.7 %
G4	1.8 %	-0.8 %		
G5	non équipé	non équipé	3.2 %	5.5 %
G6	1. %	2.7 %		

Figure 4 : Analyse des écarts de paliers de débits jaugés à l'ADCP comparés aux valeurs ultrason en conduites – jaugeages multi ADCP lors intercomparaison ADCP Génissiat 2010 et 2012 – jaugeages sur 3 secteurs GE (aval immédiat Génissiat), BO (Bognes ~2 km aval GE) et PY (Pyrimont ~4 km aval GE).

synthèse des augmentations de débit, de 150 à 280 m ³ /s			
“+”=“adcp + fort que US”	150 m ³ /s	180 m ³ /s	280 m ³ /s
ASFM 2009 - Montélimar	-0.1 %	0.7 %	-0.9 %

synthèse sur les augmentations de débit, toutes configurations confondues			
Moyenne Génissiat (GE, 14 val.)	1.6 %	2 sigma	4.7 %
Moyenne Montélimar (MO, 3 val.)	-0.1 %	2 sigma	1.6 %
Moyenne GE et MO (17 val.)	1.3 %	2 sigma	4.5 %

Figure 5 : En haut - analyse des écarts de paliers de débits jaugés à l’ADCP comparés aux valeurs ASFM sur turbine Kaplan – jaugeages multi ADCP à Montélimar en octobre 2009.

En bas – synthèse des paliers ADCP sur 2009/2010/2012 avec ASFM et ultrason.

III.2.1. Loi hydraulique d’ouvrage calibré standard

Ces lois concernent : Seuil jaugeur, déversoir, canal Parshall (type Venturi). Ces ouvrages présentent l’avantage de n’avoir pas besoin de calibrage de la loi Qh sur site. Cette dernière est fournie par les lois de l’hydraulique ou bien les fournisseurs d’équipement (déversoir, venturi).

III.2.2. Loi hauteur débit construite à partir de jaugeages

Ces relations Qh, appelées encore courbes de tarage, s’appliquent à la plupart des cours d’eau. Elles sont construites à partir des jaugeages avec si possible un minimum de loi physique ou de modélisation sommaire afin de déterminer la loi d’extrapolation en dehors de la gamme jaugée. L’interpolation dans la plage observée se fait sans trop de difficulté. Pour les sites influencés, une multitude de relations Qh peuvent être déterminées pour aboutir à une Qh_D (Qh doubles entrées). C’est le cas de la Saône à Lyon ou à Mâcon. La retenue de Pierre Bénite à Lyon influence la cote de la Saône à Lyon. Une station hauteur débit Qh_D a été installée à Couzon, soit environ une vingtaine de kilomètres en amont. Cette relation hauteur à Couzon et débit (Qh_D) est constituée d’une multitude de Qhi dépendant du niveau de la retenue de Pierre Bénite. Ce type de relation conduit à de bonnes estimations de débit (10 à 15 % sur Couzon et Macon) si la différence de cote de plan d’eau entre le point de la station et le point aval est significative, a minima 5 voir 10 cm.

III.2.3. Loi débitance issue d’une modélisation numérique ou physique

Ces lois de transfert concernent les turbines des usines, les vannes ou volets de barrage. Les débits des groupes usines (turbine) fournis par les calculateurs de conduite de centrales hydro-électriques peuvent être connus avec une bonne incertitude via les lois de transfert puissance, hauteur de chute, rendement ou encore la position pale/vannage. Inversement, les valeurs de débit issues de la position des vannes ou volets d’un barrage présentent une incertitude très variable. Cette incertitude est liée à la connaissance exacte de la position des organes et des différents coefficients d’écoulement pour les vannes ou de restrictions de section pour les vannes. Ces derniers dépendent du régime d’écoulement qu’il est difficile à appréhender avec de simples algorithmes. Là encore, les mesures contradictoires par jaugeage sur site sont nécessaires pour valider ces lois de transfert.

III.2.4. Loi de station de débit en continu

Toutes ces stations fonctionnent sur le même principe. Elles mesurent ponctuellement des vitesses qu’il convient de transformer en vitesse moyenne d’écoulement afin de les multiplier par la section mouillée pour obtenir le débit total. A noter qu’il existe la technologie électromagnétique qui permet de mesurer globalement le débit par mesure de différence de potentiel entre l’amont et l’aval de l’écoulement traversant un champ électromagnétique. Ce principe est surtout utilisé pour mesurer les débits en conduite. En milieu naturel, les conditions de mise en œuvre d’une telle technique font perdre son avantage de mesure globale.

Ci-dessous les différents types de station de mesure de vitesse, puis du débit :

- station ultrason à temps de transit ;
- station de vitesse de surface via capteur radar SVR (Radar de vitesse de Surface) ;
- station Profileur Doppler horizontaux (H-ADCP) ;
- station Profileur Doppler verticaux (V-ADCP) ;
- station vidéo LSPIV (Large Scale Particle Image Video) ;
- station de jaugeage automatique par dilution.

Ces technologies sont détaillées avec quelques exemples dans les paragraphes suivants

■ Station ultrason à temps de transit :

L’équipement mesure une vitesse à une profondeur donnée entre une rive et celle opposée. Il convient ensuite de transformer cette vitesse observée le long de la corde acoustique à la vitesse moyenne dans la section pour déterminer ensuite la valeur de débit. L’incertitude peut être réduite par la mise en place de plusieurs cordes de mesure superposées afin de mieux cerner la vitesse moyenne d’écoulement. Bien souvent les cordes sont croisées pour éviter toute hypothèse sur la direction d’écoulement qui est nécessaire pour passer de la vitesse mesurée sur la corde (V_{corde}) à la vitesse moyenne (V_{Moy}). Si besoin était, plusieurs croix superposées peuvent être installées en fonction de l’évolution de la cote du plan d’eau. Outre le choix d’implantation de la station et les structures génie-civil à mettre en place, trois difficultés peuvent apparaître : le développement de la végétation, l’excès de matière en suspension (MES) et la stratification thermique au droit de la section.

La végétation peut constituer un obstacle pour l’onde acoustique ou bien générer des micro-bulles de gaz en période estivale et gêner/fausser la mesure de vitesse sur la corde ultrasonore.

La présence de MES en trop grande quantité peut atténuer le signal acoustique. En ce cas, il faut limiter la distance de la corde de mesure ou bien installer une ligne courte en complément quand cela est possible, sinon préférer des capteurs basses fréquences (20 kHz au lieu de 200 kHz). Le gradient vertical de température peut modifier le parcours de l'onde acoustique jusqu'à générer de fausses valeurs de vitesse.

Ces deux phénomènes s'observent principalement sur les sections de grandes largeurs associées à de faibles profondeurs. Pour pallier ces contraintes bathymétriques imposées par le site, il peut être intéressant d'installer une « ligne courte » en complément de ces équipements. Cette « ligne courte » permet de ne mesurer qu'une vitesse localisée à proximité de la berge. Il faudra ensuite relier cette vitesse « locale » à la vitesse moyenne. Cette relation sera d'autant plus fiable qu'elle aura été calée/ajustée avec les vitesses de la ligne de mesure principale.

Les solutions aux problèmes ci-dessus dépendent fortement du type de profils de rivières. Cinq illustrations sont proposées : Savières (20m), Perrache et Fourques (100 m), Chusclan (300 m) et Roquemaure (450 m).

- Le canal de Savières relie le lac du Bourget au Rhône depuis Portout jusqu'en aval du barrage de l'aménagement de Belley. En période normale, le Lac alimente le Rhône avec un débit ajusté via le barrage de Savières. En période de crue du Rhône, c'est l'inverse (Cf figures 6 à 9). Ce canal est également utilisé régulièrement par la navigation de plaisance en période estivale. Trois modes de détermination de débit existent : station ultrason, analyse du dénivelé entre Portout/Savières et loi de débitance du barrage de Savières. Cette station d'une largeur d'environ 20m est équipée de deux capteurs sur la même rive avec un miroir réflecteur

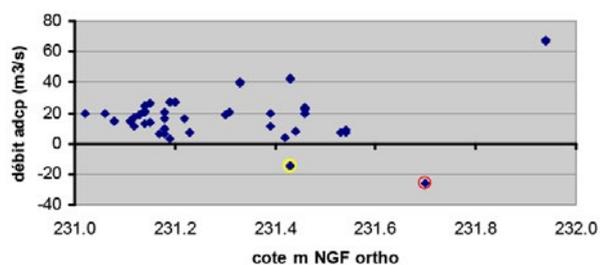


Figure 6 : Débit jaugé ADCP en fonction de la hauteur à la station – Période 2001-2011 .

sur la rive opposée. L'intérêt est de n'avoir aucun câble traversant le canal sous fluvial. La figure 8 montre un signal en débit « chahuté » sur août du fait du développement de la végétation qui génère des micro-bulles de gaz faussant la mesure. Un brassage manuel de ces végétaux disperse ce gaz et permet un retour à la normale de la station. La station ultrason fournit des valeurs à +/-10 % (Cf figure 7). Avant ajustement des paramètres, notamment le coefficient $k (= V_{Moy}/V_{corde})$, l'écart pouvait atteindre 20 %. Les jaugages de contrôle sont donc indispensables. L'analyse de la pente de la ligne d'eau conduit à des débits à +/-15 % tant que l'écart entre les deux niveaux est supérieur à 5 cm, alors que la débitance est plus précise autour de +/-10 % mais uniquement du lac vers le Rhône. L'équipement ultrason s'impose pour être précis sur toute la gamme de mesure. Toutefois, les autres méthodes d'estimation du débit permettent de critiquer les données US par la mise en alerte de l'opérateur en cas d'incohérence entre toutes ces valeurs.

- Les stations US de Perrache ou Fourques sont de taille moyenne, environ 100m de large entre berges. Elles sont équipées de une à deux croix de mesures. Les capteurs sont reliés au système de mesure via une traversée de câbles sous fluviale. Ces deux stations installées sur le Rhône à Lyon et l'autre sur le Petit Rhône en aval de Beaucaire fonctionnent bien aux défaillances de structures génie civil près. L'écart avec les jaugages de référence est à +/-10 %. Les absences de mesure ont quasiment toujours été générées par les arrachages de câbles lors de crues ou d'ancre à la dérive. Ainsi pour les installations de grandes largeurs CNR a privilégié un système sans traversée de câble sous fluvial (station avec système répondeur Cf station Chusclan et Roquemaure) ;

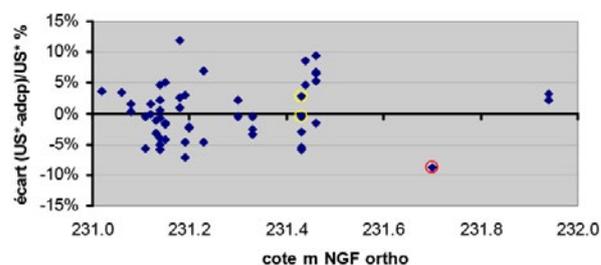


Figure 7 : Écart débit station US par rapport au jaugage ADCP (cerclée jaune ou rouge, débit négatif – Rhône vers Lac).

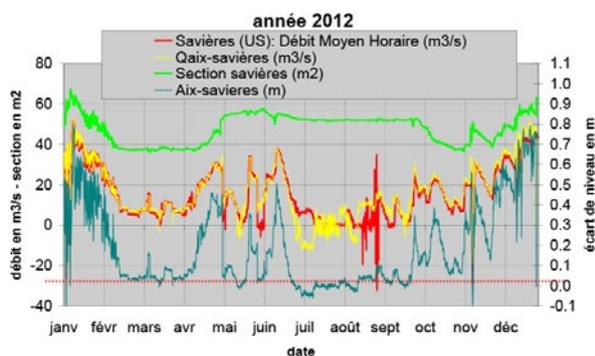


Figure 8 : Rouge débit ultrason – jaune débit calculé via les écarts cotes amont et aval – vert clair section – vert foncé écart de cote – pointillé rouge seuil de limite de validité 5 cm sur écart en dessous duquel le débit calculé via écart est douteux.

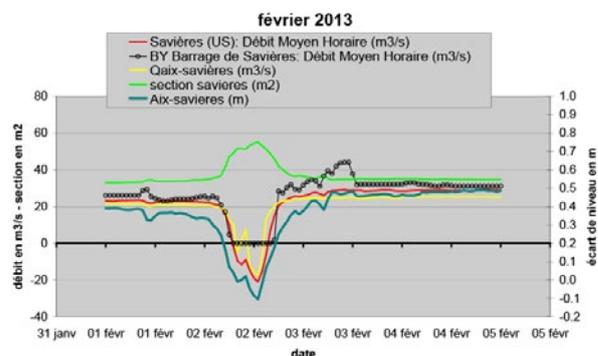


Figure 9 : Idem figure 8 en zoom sur le mois de février avec bonne cohérence ultrason et écart de cote aussi bien lac vers Rhône que l'inverse.

• Les stations de Chusclan et Roquemaure sont actuellement équipées de quatre capteurs formant une croix de mesure avec système répondeur (objectif : supprimer les traversées de câbles sous fluvial). Initialement la station de Chusclan a été construite en 1996 avec des capteurs à 200 kHz (Stork-Instromet) formant une croix de mesure à 3 m sous le plan d'eau complétée par une « ligne courte » mesurant la vitesse locale à proximité de la berge. Fin 2006, la station a été rénovée avec des capteurs Hydrovision à 20kHz sans « ligne courte » compte tenu du choix de la fréquence plus basse pour la mesure principale. Ce matériel fonctionne et conduit à écarts à +/- 5 % pour les forts débits et +/- 10 % pour les faibles valeurs. Cette technologie a été mise en œuvre sur Roquemaure. Le fonctionnement pour ce site est moins bon car il présente des pics erratiques (Cf § II.1). Ils sont actuellement attribués aux stratifications verticales de température de l'eau sans qu'il soit possible de réellement les mettre en évidence par des mesures du fait de la difficulté d'être présent lors de l'apparition de ces défauts. A noter que sur les six stations ultrason CNR, ce phénomène n'est observé que sur ce site de très grande largeur au regard de sa profondeur. A Roquemaure, la distance d'une berge à l'autre est de l'ordre de 450m. La corde de mesure se situe à 3m sous le plan d'eau pour une longueur de 456m pour une section de 6m à 10m de profondeur. Le site de Chusclan plus en amont ne pose pas de problème de ce type du fait d'une configuration de 430 m de berge à berge pour une corde de mesure de 305 m seulement avec 8m de profondeur. L'expérience passée (1996-2006) de la ligne courte sur Chusclan pourrait s'avérer un palliatif nécessaire pour compléter les grandes largeurs afin de garantir un débit même en cas de défaillance de la mesure principale. Il sera nécessaire d'établir une relation entre la vitesse « ligne courte » et la « croix principale ». Ceci sera réalisé lors du bon fonctionnement simultané de la croix de mesure et de la « ligne courte ». Ce système sera très certainement mis en place en 2013/2014 sur ces deux sites. A noter que la configuration de Roquemaure a été guidée pour limiter la gêne à la navigation et limiter les longueurs de câbles sous fluvial en rapprochant au maximum les pieux supports de sondes aux berges, 25 m pour Roquemaure en 2009 et 75 m pour Chusclan en 1996.

■ **Station de vitesse de surface via capteur radar SVR (Radar de vitesse de Surface) :**

Ces radars permettent de scruter une vitesse en un endroit donné du profil. Ce point sera choisi pour être représentatif de l'écoulement. Il est ensuite nécessaire de passer de l'unique mesure de vitesse de surface à la vitesse moyenne de l'écoulement. La mise en œuvre sur site est facile et rapide s'il existe un pont pour installer le capteur. Cette technique est efficace pour les sections droites où il est facile de relier la vitesse ponctuelle à la vitesse moyenne. Dans le cas contraire, il faudra installer plusieurs de ces capteurs entre la berge gauche et droite. Il faut également un minimum de rugosité de la surface de l'eau pour une mesure fiable de la vitesse. L'installation d'un RQ30 de la société Sommer à Pyrimont sur le Rhône en aval de Génissiat est validée par comparaison avec les informations amont de la station ultrason des conduites de l'usine. Il est constaté un écart inférieur à 5 % entre le débit RQ30 et les données de référence ultrason tant que la rugosité de surface est suffisante. Celle-ci est observée pour des vitesses minimales de 0.5 à 1.0m/s en fonction de la cote du plan d'eau influencé par la retenue de Seyssel. Lorsque le contrôle aval génère un plan d'eau lisse comme un « miroir », le RQ30 est aveugle et ne fournit pas des mesures de vitesse. L'intérêt est de disposer d'un critère de fiabilité validant la mesure (rapport signal sur bruit). Cet équipement convient pour les

sites à débits moyens et forts. A l'inverse il n'est pas adapté pour les sites où la surface de l'eau est trop lisse du fait des faibles valeurs de vitesse ou de fort contrôle aval.

■ **Station Profileur Doppler horizontal (H-ADCP) :**

L'équipement H-ADCP profile les vitesses à une profondeur donnée depuis la berge où il est implanté. En fonction de la bathymétrie, le H-ADCP ne peut scruter qu'une partie de la section à cause des réflexions parasites du fond ou de la surface de l'eau. Pour déterminer le débit, il est nécessaire de passer de la vitesse mesurée (bien souvent localement sur 1/3 de la largeur) à la vitesse moyenne. L'absence comme l'excès de MES peut rendre impossible le calcul de vitesse voire le fausser. L'expérience sur la Saône, l'Isère et le Rhône montre que l'estimation de débits moyens à forts est correcte à moins de 10 %. A l'opposé, l'estimation des faibles débits (faible vitesse) est soit juste, soit sous-estimée (lors de très faible taux de MES). Plus le ratio L/P (largeur sur profondeur) est petit (<10), et plus le système aura de chance de fonctionner correctement à faible débit. Pour les sites avec un ratio plus fort, il sera nécessaire d'établir une fonction de correction de cette vitesse H-ADCP. Cette correction s'effectuera à partir des mesures du H-ADCP (vitesse et intensité du signal rétrodiffusé) et de valeurs de référence (jaugeage, station hydrométrique fiable ou débit usine+barrage fiable) sur la gamme d'utilisation. La station sur la Saône à Lyon est fiable de 200 à 3000m³/s sans correction. La station de Romans sur l'Isère est fiable au-delà de 300m³/s. En dessous, il est nécessaire d'établir une formule de correction (travaux CNR-IRSTEA Thèse de S.Moore voir figures 10 et 11). L'avantage de cette correction est d'obtenir des meilleures valeurs de débit avec un seul capteur en berge à la différence des stations ultrason à temps de transit. L'inconvénient est très certainement de devoir requalifier la formule de correction en cas de remplacement du capteur ADCP par un autre.

■ **Station Profileur Doppler vertical (V-ADCP) :**

Ces V-ADCP profilent la vitesse localement sur une verticale depuis leur implantation sur le fond de la rivière en direction de la surface. Le phénomène d'échos parasites observé avec le H-ADCP n'existe pas avec le V-ADCP puisqu'en général il est installé loin des berges. La distance profilée est également courte et ne devrait donc pas être trop perturbée par l'excès de MES. A noter toutefois que cette technologie ne peut fonctionner correctement s'il y a un déficit de MES. Cette technique est intéressante lorsque le fond de la rivière est stable et n'est pas exposé au charriage. Il faudra toutefois établir la relation entre cette vitesse locale verticale et la vitesse moyenne. De même, la valeur minimale de MES pour une bonne estimation de la vitesse devra être testée par comparaison avec des valeurs de référence ou bien mettre en place un indicateur de qualité de la mesure afin de rejeter les mauvaises valeurs (cf Marchand 2013).

■ **Station vidéo LSPIV (Large Scale Particle Image Video) :**

La LSPIV permet de scruter le champ de vitesse de surface d'une berge à l'autre. Il est ensuite nécessaire de passer de la vitesse de surface mesurée sur la largeur du profil à la vitesse moyenne d'écoulement. Ce système fonctionne bien en crue (Cf CNR-IRSTEA JOH juin 2010). A bas débit, le manque de traceur rend difficile voire impossible l'estimation des vitesses de surface ;

■ **Station de jaugeage automatique par dilution :**

Une solution pour les faibles valeurs de débit pourrait voir le jour. En effet, des expérimentations de stations

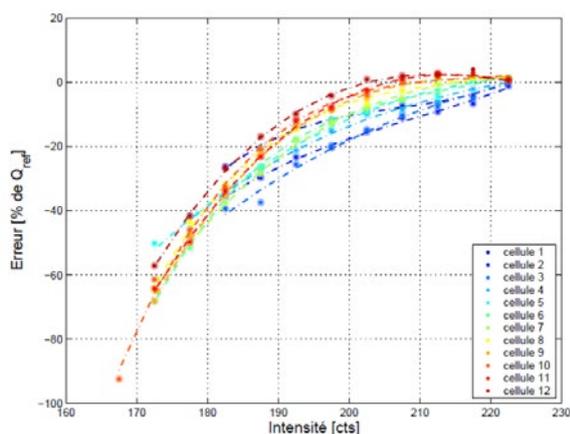


Figure 10 : Isère à Romans H-ADCP (300 kHz).

Écart de débit entre valeur de référence et valeur H-ADCP en fonction de la cellule de mesure et de l'écho intensité – relation qui servira de base pour la correction des débits - après correction écart en Q_{moy} horaire à $\pm 20\%$ faible débit et $\pm 15\%$ à fort débit.

de jaugeages automatiques par dilution ont été déployées en Norvège par le NVE (La Direction Norvégienne des Ressources en Eau et de l'Énergie). Ce concept n'est pas nouveau, toutefois sa mise en œuvre opérationnelle peut être source d'un renouveau de cette technique.

IV. CONCLUSION

L'évolution des techniques de mesure, qu'elles soient ultrason, imagerie vidéo, radar ou meilleure connaissance des ouvrages hydrauliques, nécessitent des mesures de jaugeage contradictoires pour qualifier le bon fonctionnement de ces équipements sur une gamme de débit donnée. De même, le contrôle continu de cohérence entre stations amont et aval permet de mettre en lumière soit le bon fonctionnement des stations contrôlées, soit des défauts ponctuels non identifiables facilement par jaugeage.

Sans ces valeurs contradictoires, il est difficile de pouvoir affirmer que tel ou tel instrument de mesure est fiable et si oui avec quelle incertitude. En effet, les tests ou certificats d'étalonnage en laboratoire sont nécessaires mais pas suffisants pour les mesures de débit en rivière. Bien souvent, il a fallu réajuster les fonctions de transfert (mesures sur site de niveau, vitesse) pour réduire l'incertitude sur l'estimation du débit.

En complément à ces mesures contradictoires, l'analyse des incertitudes selon des méthodes métrologiques normalisées et consensuelles (propagation des incertitudes ou essais interlaboratoire) est indispensable pour exploiter pleinement ces essais de validation sur site.

Un autre point essentiel est le partage de l'expérience entre utilisateurs qui à ce jour est le passage obligé pour avoir une valeur consensuelle sur la fiabilité des stations tant en termes de technicité que d'incertitude sur les résultats de débit. Ce partage d'expérience existe de manière plus ou moins formalisé.

Les échanges au travers du « groupe Doppler » ou des journées hydrométriques organisées par le SCHAPI sont

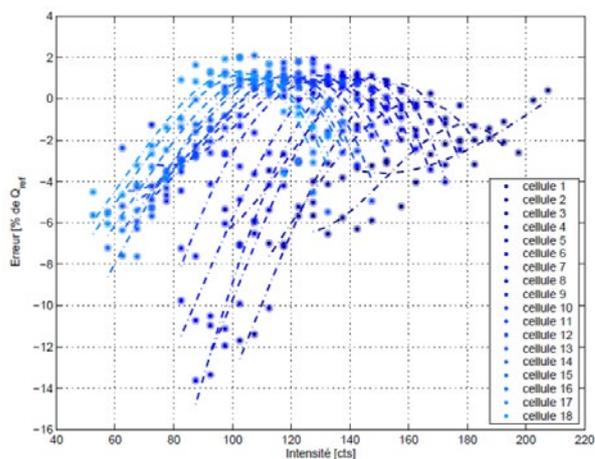


Figure 11 : Isère à Romans H-ADCP (1200 kHz).

Idem figure 10 mais pour un H-ADCP de 1200 kHz, la fonction de correction est déterminée à partir de mesures sur site - après correction écart en Q_{moy} horaire à $\pm 15\%$ faible débit et $\pm 20\%$ à fort débit.

des atouts pour progresser dans le domaine de l'hydrométrie de terrain.

V. REFERENCES

- COMITE SCIENTIFIQUE (ANSELMO V., GEORGAKAKOS KP. GOTTSCHALK L., HOLLY FM., KOSUTH JR P., OGINK H., SIGRIST B.) (2005) — Avis du comité scientifique du 4 aout 2005. « Conférence de Consensus, débit maximal de la crue du Rhône de décembre 2003 à Beaucaire - 26-28 juillet 2005 »
- CNR BUREAU D'ETUDE (2004) — Dossiers CNR pour la conférence Consensus relatif à la crue de décembre 2003
- LE COZ J., HAUET A., PIERREFEU G., DRAMAIS G., CAMENEN B. (2010) — Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *Journal of Hydrology*
- LE COZ J., POBANZ K., FAURE J-B., PIERREFEU G., BLANQUART B., CHOQUETTE Y. (2012) — Stage-discharge hysteresis evidenced by multi-ADCP measurements. *RiverFlow 2012, San José, Costa Rica*
- AFNOR (2009) — Hydrométrie – Mesurage du débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de débitmètres ou de flotteurs. *Nf En Iso 748*
- DRAMAIS G., BLANQUART B., LE COZ J., PIERREFEU G., HAUET A., ATMANE D., POBANZ K. (2014) — Les essais interlaboratoires en hydrométrie méthodologie et cas d'Applications. *SHF, congrès Hydrométrie 2013, Paris, La Houille Blanche* (à paraître)
- HAUET A., LE COZ J., DRAMAIS G., CARRE C., LEGRAS D., PIERREFEU G. ET GODAYER C. (2009) — Méthodes innovantes pour la mesure des débits fluviaux en continu : profilleur Doppler fixe horizontal (H-aDcp) et analyse d'images (LSPIV). *La Houille Blanche* 3 123-131
- HAUET A., LE COZ J., SEVREZ D., DRAMAIS G., HENAUET F., PERRET C., PIERREFEU G., POBANZ K., THOLLET F. — Intercomparaison ADCP. « *La Gentille 2011* »
- MARCHAND P., SALLES C., RODIER C., HERNANDEZ F., GAYARD E., TOURNOUD M.G. (2014) — Utilisation et qualification d'un débitmètre à effet doppler (ADC) sur une rivière intermittente. *La Houille Blanche* (à paraître)

- MOORE S. A. (2011) — *Fluxes of water and suspended sediment in rivers using side - looking acoustic Doppler current profilers. Thèse 2010-2011*
- OLIVIER A., BLANQUART B., PIERREFEU G., SCOTTI M. (2008) — Incertitude des mesures de débit réalisées à l'ADCP. *Congrès SHF Journées de l'hydraulique «Mesures hydrologiques et incertitudes», Paris 2008*
- OLIVIER A., BLANQUART B., PIERREFEU G., SCOTTI M. (2007) — Estimation des incertitudes sur les débits des écoulements à surface libre déterminés par jaugeage à l'ADCP ou au moulinet. *13^{ème} Congrès International de Métrologie, Lille*
- POBANZ KARINE, PIERREFEU GILLES, ROUMIEU PIERRE, MONTBROUSSOUS CHRISTOPHE, BUERMANS JAN (2010) — CNR Kaplan turbines assessment of flow rate measurements by acoustic scintillation using Winter-Kennedy and ADCP measurements. *Hydro2010, Lisbonne*
- TAMARI S., GARCIA F., ARCINIEGA-AMBROCIO J.I., PORTER A. (2014) — Testing a handheld radar to measure water velocity at the surface of channels. *La Houille Blanche* **3** 30-36