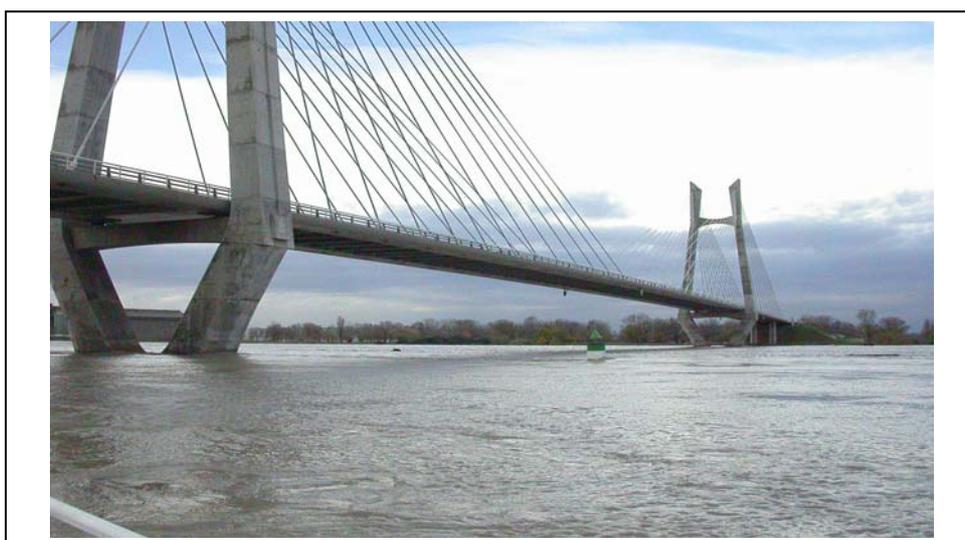


**Conférence de consensus sur le débit du Rhône à
Beaucaire pour la crue de Décembre 2003**

CONTRIBUTION CNR



Pont de Beaucaire-Tarascon PK 269.60 – photo prise le 3 décembre 2003

ANNEXE IV

**Estimation des incertitudes de mesure des débits issus d'un
jaugeage au moulinet ou à l'ADCP**

Etude du CETIAT pour le compte de la CNR

 <p>Compagnie Nationale du Rhône</p> <p>DPFI-PF-Labo Date: 15 juin 2005</p>	<p>COMPAGNIE NATIONALE DU RHONE Direction du Patrimoine Fluvial et Industriel Département Patrimoine Fluvial Laboratoire Hydraulique - Mesures 4 rue de Chalon sur Saône 69007 LYON Tél. : 04.78.61.60.00 - Télécopie : 04.78.58.69.38 Siège Social : 2 rue Bonin - 69316 LYON CEDEX 04</p>
--	--



Destinataire :

CNR

4, rue Chalon sur Saône

69007 Lyon

A l'attention de Monsieur M. Scotti

Villeurbanne, le 03/06/2005

Responsable de l'étude : **Bertrand Blanquart**

Signature :

Rapport d'étude N° 2360031

Révision : 07

**Estimation des incertitudes de mesure des débits
issus d'un jaugeage au moulinet ou à l'ADCP**

CENTRE TECHNIQUE DES INDUSTRIES AÉRAULIQUES ET THERMIQUES

Adresse postale : BP 2042 - 69603 Villeurbanne Cedex - France - Tél. +33 (0)4 72 44 49 00 - Fax. +33 (0)4 72 44 49 49

Adresse : Domaine Scientifique de la Doua - 25, avenue des Arts - 69100 Villeurbanne

Livraisons : Domaine Scientifique de la Doua - 54, avenue Niels Bohr - 69100 Villeurbanne

www.cetiat.fr - E. Mail : cetiat.commercial@cetiat.fr - Siret 775 686 967 00024 - Ape 731 Z

Révision	Date	Nature de la modification	Pages modifiées
00	07/06/2004	Première diffusion	
01	20/08/2004	Modifications suite à la réunion du 7/07/2004	toutes
02	08/11/2004	Modifications suite aux réunions de travail du 15/09/2004 et du 20/10/2004	toutes
03	02/02/2005	Modifications suite aux commentaires de M. Scotti	toutes
04	04/03/2005	Modifications suite à la réunion du 1 ^{er} mars 2005	toutes
05	14/03/05	Modifications suite à la réunion du 9 mars 2005	toutes
06	15/03/2005	Modification des annexes et de la comparaison ADCP/moulinet	-
07	03/06/2005	Version finale approuvée	-

Chaque révision annule et remplace la précédente.

Les résultats et les rapports d'essais sont la propriété exclusive du demandeur et le CETIAT s'interdit leur communication à des tiers sauf autorisation écrite.

Toute utilisation commerciale du nom du CETIAT et des résultats d'essais est soumise à l'accord préalable du CETIAT.

La reproduction de ce rapport d'essai n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Les rapports d'essais établis par le CETIAT ne sont valables que pour le matériel qui lui a été présenté, et dans les conditions particulières de l'essai.

Les informations relatives aux équipements de mesure utilisés pour les essais sont conservées dans le dossier archivé au CETIAT.

L'utilisation de ces résultats pour le dimensionnement d'installations utilisant ce matériel doit tenir compte des tolérances de fabrication, des conditions réelles d'exploitation et ne relève donc pas de la responsabilité du CETIAT.

Les formules ou codes utilisés pour prévoir soit le fonctionnement d'un appareil dans des conditions autres que celles de l'essai, soit les caractéristiques d'appareils semblables mais de dimensionnement différent tiennent compte de l'état des connaissances au moment de la livraison des résultats et sont susceptibles d'évolution. Les résultats obtenus par ces formules ou codes de calcul sont donnés de façon indicative.

L'exemplaire original du rapport est remis au client, une copie certifiée conforme est conservée au CETIAT.

SOMMAIRE

1	Introduction	9
2	Jaugeages au moulinet.....	11
2.1	Textes de référence pour l'estimation des incertitudes de mesure du débit	11
2.1.1	Norme NF EN ISO 748	11
2.1.2	Norme NF ENV 13005	11
2.1.3	Norme NF ISO 5725	11
2.1.4	Norme ISO/TR 5168	12
2.1.5	Différences entre les normes.....	12
2.2	Application des normes NF EN ISO 748 & ISO/TR 5168 ^{II}	12
2.2.1	Établissement de la formule d'estimation des incertitudes de mesure.....	12
2.2.2	Formule d'estimation des incertitudes de mesure	13
2.2.3	Estimation des composantes d'incertitude	14
2.2.4	Application à l'estimation de l'incertitude minimale.....	15
2.2.5	Écarts aux préconisations de la norme NF EN ISO 748	17
2.2.6	Conclusions	20
2.3	Application de la norme NF ENV 13005.....	21
2.3.1	Modélisation du processus de mesure	21
2.3.2	Estimation des incertitudes-types.....	24
2.3.3	Estimation des incertitudes de mesure associées au débit.....	26
2.3.4	Traitement des corrélations	26
2.3.5	Conclusion sur l'application de la norme NF ENV 13005 au moulinet.....	27
2.4	Comparaison de la norme NF EN ISO 748 et de la norme NF ENV 13005 pour les jaugeages complets ("toutes profondeurs").....	28
2.5	Opérations de jaugeages au moulinet en un point par verticale	29
2.5.1	Définitions	29
2.5.2	Détermination du coefficient C_2 pour le Rhône et ses affluents	29
2.5.3	Estimation de l'incertitude des coefficients et propagation de l'incertitude	29
2.5.4	Influence des paramètres (débit, vitesse, hauteur d'eau) sur le coefficient de surface C_2 et sur C_6	29
2.5.5	Coefficient de surface C_2 et incertitude associée	29
2.5.6	Application au cas particulier de Beaucaire.....	29
2.5.7	Application au cas de l'Isère – site où $u(C_2)/C_2$ est minimal.....	29
2.5.8	Préconisations	29
2.6	Estimation de l'incertitude de la moyenne de plusieurs jaugeages.....	29

2.6.1	Cas général.....	29
2.6.2	Application aux jaugeages au moulinet réalisés par la CNR.....	29
2.7	Conclusion sur l'incertitude liée à un jaugeage au moulinet	29
2.7.1	Application des normes NF EN ISO 748 et NF ENV 13005.....	29
2.7.2	Résultats	29
2.7.3	Préconisations pratiques	29
3	Jaugeages ADCP	29
3.1	Présentation de la méthode ADCP.....	29
3.2	Estimation des incertitudes par extrapolation des méthodes appliquées aux moulinets	29
3.3	Estimation des incertitudes des mesures ADCP par comparaison avec les mesures au moulinet.....	29
3.3.1	Qualification des valeurs retenues pour la comparaison.....	29
3.3.2	Évaluation de la reproductibilité	29
3.3.3	Évaluation de la justesse	29
3.3.4	Combinaison de la justesse et de la reproductibilité	29
3.3.5	Conclusion sur l'incertitude de mesure des jaugeages réalisés à l'ADCP	29
4	Détection et traitement des valeurs aberrantes.....	29
5	Conclusion générale	29
6	Annexes	29

Synthèse de l'étude « Incertitudes de mesure des débits »

La Compagnie Nationale du Rhône réalise des mesures de jaugeage du Rhône et de ses affluents, en un certain nombre de stations déterminées, par deux méthodes : la méthode dite point par point au moulinet et la méthode à l'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), qui par effet Doppler détermine la vitesse de l'écoulement en tout point d'une section. Les débits obtenus permettent de réaliser des courbes de tarage $Q=f(h)$ ^[1] qui sont ensuite utilisées pour déterminer le débit instantané à partir d'une mesure de hauteur d'eau.

La Compagnie Nationale du Rhône a demandé au CETIAT de conduire une étude pour déterminer l'incertitude de mesure associée à une mesure de débit issu d'un jaugeage au moulinet, en s'appuyant sur les méthodes de jaugeage utilisées, les résultats de jaugeages, les normes en vigueur et des analyses complémentaires définies en cours d'étude.

Après avoir quantifié l'incertitude liée à une mesure de débit au moulinet, il a été demandé de déterminer l'incertitude liée à une mesure de débit conduite à l'ADCP. Pour permettre une telle comparaison, la CNR a produit 19 campagnes de mesures réalisées de 1995 à 2004 et conduites systématiquement avec le moulinet et l'ADCP. Le présent document met en évidence les méthodes d'analyse retenues et les principaux résultats.

Les estimations d'incertitude cette étude^[2] sont basées sur les référentiels suivants :

- La norme NF ENV ISO 748 (Janvier 2002), norme spécifique aux mesures de débit par jaugeage au moulinet ;
- La norme NF ENV 13005 (Août 1999), norme générale sur l'estimation des incertitudes de mesure, applicable à tous les processus de mesure ;
- Les normes NF ISO 5725-1 à 5725-6 (Décembre 1994), normes d'application de la statistique à la détermination de la justesse et de la reproductibilité.

□ **Jaugeages au moulinet**

• **Comparaison des normes NF ENV ISO 748 et NF ENV 13005**

Deux méthodes normalisées coexistent pour la détermination des incertitudes de mesure des jaugeages au moulinet : la norme NF EN ISO 748 (norme spécifique aux mesures de débit) et la norme NF ENV 13005 (norme générale relative à l'estimation des incertitudes de mesure). Quelle que soit la méthode utilisée, des hypothèses simplificatrices importantes doivent être faites, notamment dans le traitement des corrélations des estimations des grandeurs. L'influence de ces simplifications est plus ou moins importante selon les cas et, pour chaque méthode, la prise en compte partielle ou totale des corrélations conduit à des résultats sensiblement différents.

De ce fait, ces méthodes aboutissent à des estimations d'incertitude qui sont généralement du même ordre de grandeur, mais qui peuvent être dans certains cas sensiblement différentes, sans qu'il soit alors possible de distinguer quelle méthode doit être considérée comme référence.

Les méthodes d'estimation des incertitudes de mesure visent à remplacer l'information que l'on pourrait obtenir en multipliant les mesurages dans des conditions de reproductibilité, pour chaque site

¹ Où Q est le débit (m³/s) et h est la hauteur du plan d'eau (m)

² Par nature, les incertitudes sont des estimations, établies à partir des informations disponibles à une date donnée. Des informations complémentaires améliorent toujours la connaissance de l'incertitude, qu'elles conduisent à une réduction ou à une augmentation de la valeur estimée de l'incertitude. Les résultats de cette étude s'appuient sur les informations fournies par la CNR à la date de rédaction, et pourront être modifiés ultérieurement, en fonction d'informations complémentaires issues de nouveaux mesurages ou de nouvelles analyses des mesures existantes.

et pour chaque débit. Ainsi, sous réserve de couvrir la plage de variation possible des conditions de mesure, l'incertitude estimée par une analyse des données des jaugeages en conditions de reproductibilité est une information *a priori* plus fiable que les estimations obtenues en appliquant les méthodes des normes NF EN ISO 748 et NF ENV 13005. Ceci n'est bien sûr possible que si le débit reste constant et que l'on peut alors considérer que les variations observées ne sont dues qu'à la méthode et aux conditions de mesure. Une possibilité pour estimer l'incertitude de mesure consiste à réaliser des jaugeages simultanés avec des méthodes de mesure différentes : moulinet différent, nombre de verticales différents, etc^[3].

En conclusion, les méthodes d'estimation des incertitudes de la norme NF EN ISO 748 et de la norme NF ENV 13005 peuvent toutes deux être appliquées aux jaugeages au moulinet, cependant :

- ✓ Les deux méthodes présentent une grande sensibilité aux paramètres d'entrée et au choix du modèle reliant ces paramètres d'entrée à la grandeur de sortie (le débit). Toutefois elles convergent vers le même ordre de grandeur d'incertitude sous réserve de certaines conditions (nombre et emplacement des verticales, par exemple) ;
- ✓ Les deux méthodes permettent d'estimer l'ordre de grandeur des incertitudes de mesure associées aux jaugeages au moulinet, et permettent ainsi de mettre en évidence des principes d'action pour la réduction des erreurs de mesure (voir ci-dessous le paragraphe « préconisations ») ;
- ✓ Dans le cas général, les deux méthodes sont complémentaires de l'analyse des résultats expérimentaux obtenus en conditions de reproductibilité. Dans le cas des jaugeages au moulinet, la CNR ne peut pas obtenir des conditions de reproductibilité sur le terrain, du fait de la gestion du Rhône. C'est pour cette raison que l'application de normes, même imparfaites, est une méthode privilégiée pour estimer l'incertitude de mesure de débit.

• Préconisations pour les opérations de jaugeage au moulinet

L'analyse des méthodes de mesure et des incertitudes de mesure associées conduit à distinguer les deux cas suivants :

- ✓ **Changement de régime d'écoulement** (crue par exemple) : privilégier la méthode d'un point par verticale, en surface (0,2 m). Si les conditions de réalisation du jaugeage le permettent, notamment les conditions de sécurité, le nombre de verticales sera choisi entre 20 et 30. Pour le calcul du débit à partir des vitesses mesurées à 0,2 m, utiliser de préférence le coefficient^[4] calculé du site. Si ce coefficient n'est pas calculé ou peu fiable, utiliser le coefficient moyen calculé sur un ensemble de sites (en fonction de la hauteur moyenne, se reporter aux cas A et B cités au paragraphe 2.5.5). Enfin, si les deux premières solutions ne sont pas possibles, utiliser le coefficient de surface théorique (0,85). Selon le site et selon que le coefficient utilisé est un coefficient du site, le coefficient moyen de l'ensemble des sites ou le coefficient théorique, l'incertitude minimale que l'on puisse obtenir sera de l'ordre de $\pm 8\%$ à $\pm 10\%$.
- ✓ **Pas de changement de régime** : privilégier la méthode en six points par verticale, avec le plus grand nombre de verticales compatible avec la durée totale du jaugeage, c'est à dire un nombre de verticales compris entre 20 et 30 pour une durée de jaugeage ne dépassant pas deux à trois heures. La répartition des verticales est un élément clef ; l'expérience du jaugeur permet de procéder à la répartition des verticales au cours du jaugeage (jaugeage à la perche) ou en fonction des mesures antérieures. L'incertitude minimale que l'on puisse alors obtenir est de l'ordre de $\pm 5\%$.

³ C'est cette méthode qui sera utilisée dans le cadre de la comparaison moulinet-ADCP, comme décrit page suivante

⁴ Voir la définition et le mode de calcul de ce coefficient page 29

□ **Jaugeages à l'ADCP**

• **Tentative d'application des normes pour déterminer l'incertitude liée à une mesure à l'ADCP**

Le modèle d'estimation des incertitudes mis en place par la méthode de la norme NF ENV 13005 peut être utilisé pour le cas des jaugeages à l'ADCP, en adaptant les méthodes permettant d'estimer les incertitudes-types. Les hypothèses faites pour l'établissement de la formule de propagation des incertitudes restent les mêmes, notamment pour ce qui concerne l'effet des corrélations. Le nombre de mesures de vitesse étant plus important, les réserves concernant la sensibilité du modèle aux corrélations sont encore plus importantes dans le cas de l'ADCP.

En conclusion, les formules d'estimation des incertitudes (norme NF EN ISO 748 ou norme NF ENV 13005) présentent une très grande sensibilité aux paramètres d'entrée et au choix du modèle^[5] de calcul du débit. Cette sensibilité est particulièrement marquée dans le cas des jaugeages à l'ADCP. Ainsi, les estimations d'incertitude obtenues peuvent être très différentes en fonction de l'interprétation des composantes d'incertitude et du traitement des corrélations.

- ✓ Les deux méthodes permettent de dégager des grands principes pour la réduction des erreurs de mesure (voir le rapport de projet de fin d'étude d'Audrey Olivier (Ecole Centrale de Lyon) « *Maîtrise de la précision de mesure de débit avec un profileur de courant à effet Doppler (ADCP)* », Septembre 2004),
- ✓ Les deux méthodes ne permettent pas d'estimer l'ordre de grandeur des incertitudes de mesure associées aux jaugeages à l'ADCP.

En conséquence, l'estimation des incertitudes de la méthode ADCP ne peut pas être réalisée en s'appuyant sur l'une ou l'autre de ces deux méthodes, et repose donc sur l'exploitation des résultats expérimentaux de comparaison avec des mesures au moulinet.

• **Détermination expérimentale de l'incertitude d'une mesure à l'ADCP par comparaison avec les mesures au moulinet**

- ✓ Le nombre de mesures analysées et les conditions d'obtention des mesures permettent d'évaluer la justesse et la reproductibilité de la comparaison ADCP BB 1200 kHz / Moulinet.
- ✓ L'incertitude de mesure associée aux jaugeages au moulinet n'étant pas négligeable devant la valeur de reproductibilité obtenue, il n'est pas possible de conclure que cette dernière est uniquement liée à l'incertitude de reproductibilité de la méthode ADCP seule.
- ✓ Il est par contre possible de conclure que l'incertitude de mesure de la méthode ADCP, pour l'appareil utilisé (modèle BB 1200 kHz), est nécessairement inférieure à la reproductibilité de la comparaison des deux méthodes, c'est à dire $\pm 7,9\%$ (valeur établie sur la base des jaugeages étudiés).

Cette valeur d'incertitude de la méthode ADCP a été déterminée pour le modèle BB 1200 kHz, qui a fait l'objet des comparaisons avec les jaugeages au moulinet. Cette valeur, issue des résultats de comparaisons, pourra être affinée en répétant les essais selon le même protocole.

La valeur de l'incertitude estimée pour le modèle BB 1200 kHz ne peut pas être extrapolée aux autres modèles utilisés par la CNR (BB 600 kHz, Workhorse 600 kHz, StreamPro 2 MHz) mais la même démarche pourra être conduite pour ces trois modèles, en les comparant soit à des mesures réalisées au moulinet, soit à des mesures réalisées avec le modèle BB 1200 kHz.

⁵ Le modèle est la formule de calcul du débit en fonction des paramètres d'entrée (largeur, profondeur, vitesse, etc) ; plusieurs modèles différents sont utilisés (voir paragraphe 2.3.1).

□ **Conclusions générales de l'étude**

La présente étude a permis de mettre en évidence les points suivants :

- ✓ Les méthodes d'estimation des incertitudes des normes NF EN ISO 748 et NF ENV 13005 peuvent être utilisées pour obtenir un ordre de grandeur des incertitudes de mesure associées aux jaugeages au moulinet ; si les résultats obtenus par l'application de ces deux normes sont trop sensibles aux paramètres d'entrée et au choix du modèle pour en permettre une estimation fine, ces deux méthodes permettent cependant de déterminer la valeur de l'incertitude minimale que l'on puisse obtenir en réalisant un jaugeage au moulinet.

⇒ **Dans le cadre des applications CNR, la valeur minimale d'incertitude est $\pm 5 \%$ pour un jaugeage au moulinet complet et de l'ordre de $\pm 8 \%$ à $\pm 10 \%$ pour un jaugeage au moulinet en surface.**

- ✓ En raison de la sensibilité aux paramètres d'entrée et au choix du modèle, l'application de ces méthodes n'est pas pertinente dans le cas des jaugeages à l'ADCP, pour lesquels on préférera une analyse statistique des données expérimentales. La CNR ayant réalisé une comparaison expérimentale sur plusieurs années, cette comparaison est utilisée ici pour estimer l'incertitude associée à un jaugeage ADCP. Il est possible de conclure que l'incertitude de mesure de la méthode ADCP est nécessairement inférieure à la reproductibilité de la comparaison des deux méthodes ADCP et moulinet, c'est-à-dire $\pm 7,9 \%$. Compte-tenu de la valeur minimale de l'incertitude d'un jaugeage au moulinet, une valeur de l'ordre de $\pm 5 \%$ semble être une valeur réaliste pour l'incertitude sur la mesure ADCP.

⇒ **Dans le cadre des applications CNR, une valeur raisonnable de l'incertitude de mesure d'un jaugeage ADCP est l'ordre de $\pm 5 \%$.**

L'ensemble des éléments permettant de dégager cette synthèse sont détaillés dans la suite du document.

1 Introduction

La société CNR réalise des mesures de jaugeage du Rhône et de ses affluents en un certain nombre de stations déterminées, par la méthode dite point par point au moulinet et à l'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), qui par effet Doppler détermine la vitesse de l'écoulement en tout point d'une section. Les débits obtenus permettent de réaliser des courbes $Q=f(h)$ qui sont ensuite utilisées pour déterminer le débit instantané à partir d'une mesure de hauteur d'eau.

La CNR souhaite déterminer l'incertitude de mesure sur l'ensemble de la chaîne de mesure, que le jaugeage soit réalisé au moulinet ou à l'ADCP.

Le processus d'estimation des incertitudes sur les débits issus des courbes de tarage $Q(h)$ peut se décomposer en 6 étapes :

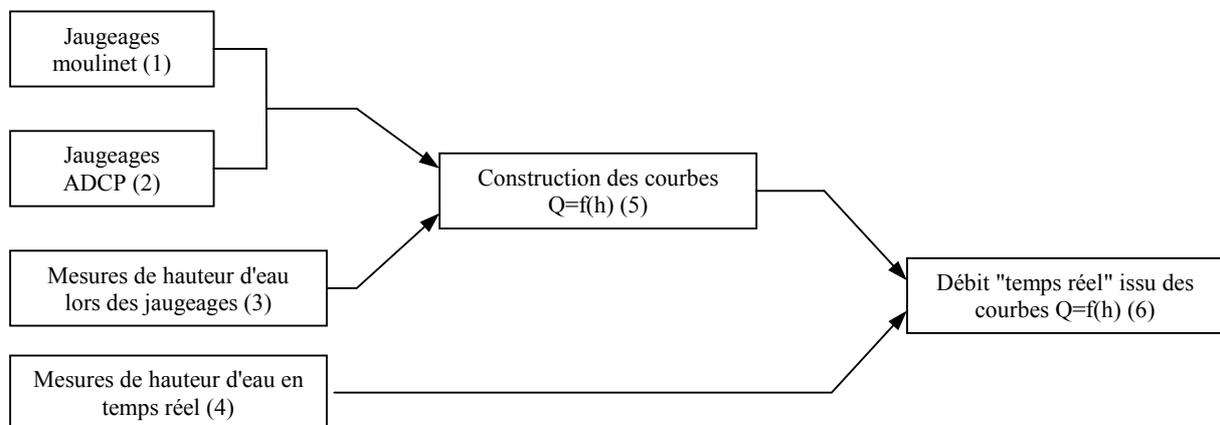


Figure 1 - Synoptique du processus de mesure

1° étape : Estimation des incertitudes de mesure sur les jaugeages au moulinet

- Comparaison entre la pratique et la norme NF EN ISO 748 « Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts », relevé des écarts ;
- Édition d'une feuille de calcul (Excel) permettant de calculer l'incertitude sur un jaugeage au moulinet en fonction des données d'entrées (nombre de verticales, nombre de points par verticale, incertitudes des moulinets, etc.) selon les normes ISO EN 748 et NF ENV 13005;
- Traitement du cas de plusieurs jaugeages réalisés dans des conditions de répétabilité ;
- Examen du compromis entre une mesure rapide (1 point par verticale) et la densité de points de mesure.

2° étape : Estimation des incertitudes de mesure sur les jaugeages à l'ADCP

- Détection et traitement des valeurs aberrantes ;
- Examen de l'utilisation pour l'ADCP de la feuille de calcul des incertitudes mise en place pour les moulinets ;
- Comparaison ADCP/moulinet.

3° étape : Estimation des incertitudes sur les mesures de niveau d'eau

- Estimation des incertitudes liées à la lecture sur site de l'échelle limnimétrique ;
- Estimation des incertitudes liées au calage des échelles limnimétriques dans le repère NGF ortho ;
- Combinaison des différentes sources d'incertitude sur les mesures de niveau d'eau ;
- Détection et traitement des valeurs aberrantes.

4° étape : Estimation des incertitudes sur les mesures de hauteur d'eau en temps réel

- Examen des performances annoncées par les constructeurs d'appareils de mesure de niveau et des capacités de raccordement métrologique ;
- Combinaison des différentes sources d'incertitude sur les mesures de niveau d'eau ;

5° étape : Estimation des incertitudes sur la construction des courbes hauteur – débit ($Q=f(h)$)

- Construction des courbes à partir de multiples valeurs débit-hauteur issues de jaugeages (avec leurs incertitudes) et incertitude résultante ;
- Examen des courbes simple et double entrée.

6° étape : Détermination des incertitudes sur les débits issus de la relation $Q=f(h)$

- Incertitudes des débit $Q=f(h)$.

Le présent document porte sur les étapes 1 et 2 uniquement (débits mesurés à l'ADCP ou au moulinet). Les étapes 3 à 6 sont abordées dans le rapport d'étude 2460059 (mesures de niveau d'eau, établissement des courbes de tarage $Q(h)$ et calcul d'un débit à partir de cette courbe et d'une mesure de niveau d'eau).

Avertissements

Cette étude traite des estimations d'incertitude, en s'appuyant sur les normes en vigueur (voir liste en page 29). Bien que récentes et en application à la date de rédaction du présent document, ces normes présentent des concepts, des méthodes et un vocabulaire qui diffèrent de l'une à l'autre. Pour la clarté du document, les préconisations de présentation des incertitudes de la norme NF ENV 13005 "Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure" ne sont pas respectées dans l'ensemble du document, de manière à adopter dans les paragraphes concernés une présentation conforme aux autres normes utilisées (paragraphe 2.2 notamment).

Un premier document faisant apparaître une comparaison ADCP/moulinet a été rédigé en septembre 2004 (rapport d'A.Olivier). Les données de comparaison y sont légèrement différentes de celles indiquées dans cette étude. En effet, un examen approfondi des données présentées initialement dans le premier document a mis en évidence la présence de jaugeages ADCP effectués avec un ADCP différent du BB1200kHz. Seuls les jaugeages ADCP BB1200kHz ont été conservés pour l'étude présente, d'où de légères différences dans les valeurs affichées

2 Jaugeages au moulinet

2.1 Textes de référence pour l'estimation des incertitudes de mesure du débit

Le texte de référence pour l'estimation des débits en canal et l'incertitude associée est le suivant :

- [1] NF EN ISO 748 « Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts. Méthode d'exploration du champ des vitesses », Janvier 2002.

Les textes de référence pour l'estimation des incertitudes de mesure des débits sont les suivants :

- [2] NF ENV 13005 « Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure », Août 1999. Ce texte est d'application universelle à tous les processus de mesure, quel que soit le domaine (mesures physiques, analyse chimique, etc.)
- [3] NF ISO 5725-1 à 5725-6, « Application de la statistique. Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure », décembre 1994.
- [4] ISO/TR 5168 « Mesure de débit des fluides – Calcul de l'incertitude », Avril 1998

Les références [2] et [3] sont citées comme textes de référence par la norme NF EN ISO/CEI 17025 « Prescriptions générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais », de Mai 2000.

Ces textes normatifs sont tous récents, mais ne sont pas issus des mêmes groupes de travail, il existe donc des différences entre ces différents textes, décrites succinctement dans les paragraphes suivants.

2.1.1 Norme NF EN ISO 748

Ce document présente la même démarche d'estimation des incertitudes que la démarche présentée en annexe dans la norme ISO/TR 5168, voir § 2.1.4 ci-dessous.

2.1.2 Norme NF ENV 13005

Cette méthode repose sur l'analyse du processus de mesure, l'identification des grandeurs d'entrée, la quantification des incertitudes propres à chacune des grandeurs d'entrée et l'écriture d'un modèle mathématique reliant les grandeurs d'entrée à la grandeur de sortie. Dans le cas des jaugeages, la grandeur de sortie est le débit, les grandeurs d'entrée sont les vitesses, la profondeur et la largeur associées à une section, etc.

Dans cette méthode, les composantes d'incertitude liées aux erreurs aléatoires et les composantes d'incertitude liées aux erreurs systématiques sont traitées de la même manière.

2.1.3 Norme NF ISO 5725

Cet ensemble de normes (6 documents : 5725-1 à 5725-6) traite de l'estimation de la justesse et de la fidélité des résultats de mesure sur la base de la répétition des essais lors de campagnes d'essais intra-laboratoire ou interlaboratoire. Les outils d'estimation de la justesse et de la fidélité peuvent être utilisés pour une estimation globale des incertitudes du processus de mesure ou pour quantifier une composante des incertitudes dans le cadre de la méthode décrite dans la norme NF ENV 13005.

2.1.4 Norme ISO/TR 5168

Le corps du document présente des généralités sur le calcul des incertitudes appliqué aux mesures de débit. Bien qu'il y ait des analogies, on note que les notations et les concepts présentés sont sensiblement différents de la norme NF ENV 13005.

L'annexe D (informative) traite l'exemple de l'estimation du débit en canal découvert par plusieurs méthodes, dont la méthode d'exploration du champ des vitesses.

Si les concepts d'établissement de la formule d'estimation des incertitudes sont identiques à la norme [1], les notations ne sont pas identiques entre les deux documents.

2.1.5 Différences entre les normes

Les normes [1], [2] et [4] présentent une approche basée sur l'analyse des sources d'erreur tandis que la norme [3] ne s'appuie que sur la dispersion expérimentale des résultats.

Les normes [1] et [4] sont des développements de la même méthode. Les différences fondamentales entre ces deux dernières et la norme [2] sont les suivantes :

- [1] et [4] : introduction des notions d'incertitudes systématiques et d'incertitudes aléatoires ;
- [2] : introduction des notions d'erreur aléatoire, d'erreur systématique, d'incertitude-type et d'incertitude élargie ;
- différences de notations et de vocabulaire ;
- enfin, la norme [2] ne présente pas une formule d'estimation des incertitudes de débit, mais un ensemble d'outils permettant à l'utilisateur de bâtir sa propre formule, en fonction du processus de mesure. Ainsi, pour un même processus de mesure, deux modélisations différentes du processus conduiront à des formules d'estimation des incertitudes différentes (voir 2.3).

2.2 Application des normes NF EN ISO 748 & ISO/TR 5168^[6]

2.2.1 Établissement de la formule d'estimation des incertitudes de mesure

La section de jaugeage est divisée en tronçons verticaux. Sur chaque tronçon, le débit élémentaire est le produit de la largeur, de la profondeur et de la vitesse moyenne (cf. méthode de la section médiane représentée sur la figure ci-après).

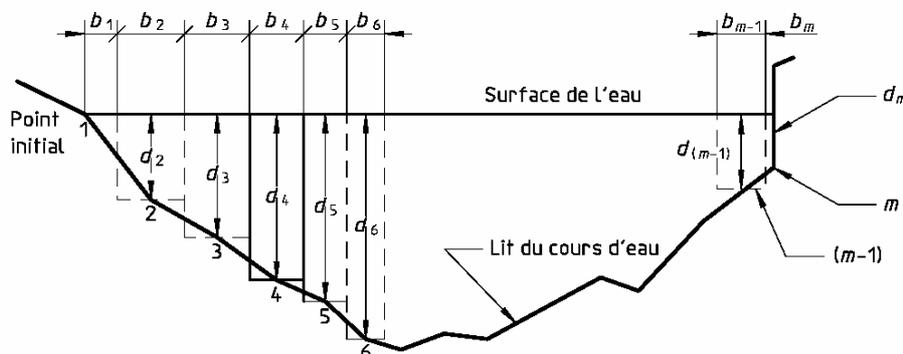


Figure 2 - Méthode de la section médiane

⁶ Les définitions, notations et concepts présentés ici sont propres aux normes NF EN ISO 748 et ISO/TR 5168, et diffèrent de la norme NF ENV 13005, comme mentionné dans l'avertissement page 10.

Le débit observé Q_0 est obtenu par sommation de tous les débits élémentaires. Le débit « vrai » est ensuite calculé par la relation suivante :

$$Q = F_m \cdot Q_0 \quad (1.)$$

où

- Q est le débit "vrai", défini par $Q = \iint_A v_x \cdot v_y \cdot dx \cdot dy$ (avec v_x et v_y les composantes de vitesse suivant les axes x et y, et A la section de mesure).
- Q_0 est le débit obtenu lors du jaugeage
- F_m est un coefficient qui tend vers 1 quand le nombre m de verticales tend vers l'infini.

Le concept de débit "vrai" présenté dans cette norme permet d'introduire le coefficient F_m , lequel est utilisé pour estimer l'influence du nombre de verticales sur la valeur de l'incertitude.

Selon l'annexe D de la norme ISO/TR 5168 : *"Dans la pratique, on peut évaluer F_m par analyse des mesures où m est suffisamment grand pour qu'on puisse déterminer l'effet sur Q_0 de l'omission de verticales par étapes [...]. Il peut s'avérer judicieux de considérer une variation de F_m avec m qui soit la moyenne des valeurs relevées pour des sections de plusieurs rivières différentes regroupées. Ainsi les variations réelles de F_m de rivière à rivière, comparées aux variations moyennes, présenteront-elles à la fois des incertitudes systématiques et des incertitudes aléatoires".*

Ainsi, le coefficient F_m et son incertitude X'_m peuvent être estimés à partir des jaugeages réalisés sur le terrain, en considérant que le débit obtenu avec le jaugeage complet est la meilleure estimation du débit "vrai" et en calculant les débits obtenus avec un nombre restreint de verticales : à partir du même jeu de valeurs, on supprime des verticales et l'on calcule à chaque fois le coefficient F_m .

A partir de ces considérations, l'établissement de la formule d'estimation des incertitudes proposée dans la norme NF EN ISO 748 repose sur les hypothèses suivantes :

- (a) le coefficient F_m et le débit observé Q_0 sont traités comme des variables indépendantes, ce qui peut être remis en cause (le coefficient F_m étant lui-même défini par une mesure de débit obtenue de manière identique à la mesure du débit Q_0).
- (b) le terme « d'interdépendance » entre les paramètres (équation (D.5) de l'annexe D.2.2 de la norme ISO/TR 5168) est supposé nul et aucune formulation n'est proposée pour prendre en compte ce terme.

La formule d'estimation des incertitudes ne tient donc pas compte des corrélations.

2.2.2 Formule d'estimation des incertitudes de mesure

La formule d'estimation des incertitudes est la suivante :

$$X_Q = \pm \sqrt{X'_Q{}^2 + X''_Q{}^2} \quad (2.)$$

où

- X'_Q est l'incertitude aléatoire, estimée par :

$$X_Q'^2 = X_m'^2 + \frac{\sum_{i=1}^m [(b_i \cdot d_i \cdot \bar{v}_i)^2 \cdot (X_{b_i}'^2 + X_{d_i}'^2 + X_{e_i}'^2 + X_{p_i}'^2 \cdot X_{c_i}'^2)]}{\left(\sum_i^m (b_i \cdot d_i \cdot \bar{v}_i) \right)^2} \quad (3.)$$

avec

- b_i est la largeur de la section i
- d_i est la profondeur de la section i
- \bar{v}_i est la vitesse moyenne de la section i
- X_m' est l'incertitude aléatoire associée au nombre de verticales m
- X_{b_i}' est l'incertitude aléatoire associée à la détermination de la largeur b_i
- X_{d_i}' est l'incertitude aléatoire associée à la détermination de la profondeur d_i
- X_{e_i}' est l'incertitude aléatoire associée à la durée d'exposition du moulinet e_i
- X_{p_i}' est l'incertitude aléatoire associée au nombre de points i sur chaque verticale
- X_{c_i}' est l'incertitude aléatoire associée à l'étalonnage du moulinet
- X_Q'' est l'incertitude systématique, estimée par :

$$X_Q''^2 = X_b''^2 + X_d''^2 + X_c''^2 \quad (4.)$$

avec

- X_b'' est l'incertitude systématique sur la largeur
- X_d'' est l'incertitude systématique sur la profondeur
- X_c'' est l'incertitude systématique sur l'étalonnage des moulinets

NOTES

- Les valeurs de X sont exprimées en pourcentage, au niveau de confiance de 95 %. Dans la norme [4], ces paramètres sont notés S_Q .
- Les variables X ne représentent pas des écarts-types mais sont quasiment analogues aux « incertitudes élargies », notées U dans la norme NF ENV 13005.

2.2.3 Estimation des composantes d'incertitude

Le paragraphe 1-Généralités de l'annexe E (p. 37) de la norme NF EN ISO 748 recommande à l'utilisateur de déterminer les valeurs de X'_m , X'_{b_i} , X'_{d_i} , X'_{e_i} , X'_{p_i} , X'_{c_i} , X''_b , X''_d , X''_c en fonction des conditions de mesure propres au site. La détermination de la composante X'_m est décrite dans la norme, en s'appuyant sur la dispersion du coefficient F_m lorsque le nombre de verticales varie (voir page 13). La même démarche peut être appliquée pour déterminer la composante associée à l'influence du nombre de points par verticale (X'_{p_i}). La détermination de ces deux composantes est donc basée sur une analyse statistique dont le principe est analogue à la méthode d'estimation de

l'incertitude-type $u(C_2)/C_2$ décrite au paragraphe 2.5.3. Pour les autres composantes, une estimation peut être conduite suivant l'approche décrite au paragraphe 2.3.2.

Dans le cas d'application de la CNR, l'estimation des deux composantes X'_m et X'_{pi} n'est pas disponible à la date de réalisation de cette étude. L'estimation de ces composantes pourra faire l'objet d'une étude spécifique ultérieure. En l'absence de valeurs propres à l'application CNR, la norme indique des valeurs de ces composantes, qui sont "*le fruit de recherches effectuées depuis la première publication de la présente Norme internationale, en 1968*", mais il n'est pas possible de déterminer si ces valeurs par défaut peuvent être appliquées telles quelles dans le cas du Rhône et de ses affluents. En l'absence d'autres informations, ce sont cependant ces valeurs qu'il convient d'utiliser.

La formule de calcul fait intervenir le nombre de verticales et le temps d'exposition, qui sont définis au préalable par l'opérateur. Par contre, la formule fait également intervenir les débits unitaires, donc les vitesses mesurées lors du jaugeage, qui ne sont connues qu'au cours du jaugeage. Ainsi, le calcul de l'incertitude ne peut pas être réalisé avant de réaliser le jaugeage. Il faut noter que le débit unitaire de chaque verticale est le critère qui permet de valider le bon emplacement des verticales, et donc le nombre de verticales à effectuer. Ainsi, effectuer un grand nombre de verticales n'est pas suffisant en soi, si on ne tient pas compte de leur bon emplacement.

Une première estimation peut cependant être conduite avant le jaugeage, en fonction de la connaissance antérieure des débits sur le site considéré. Cette première estimation peut permettre de simuler l'effet du nombre de verticales sur l'incertitude, de manière à optimiser le nombre de verticales à effectuer.

Remarque : Les formules de calcul et les valeurs par défaut proposées par la norme sont introduites dans le fichier « modèle incertitude.xlt ».

2.2.4 Application à l'estimation de l'incertitude minimale

Les relations (2) à (4) et les valeurs des composantes mentionnées en annexe de la norme permettent de réaliser le calcul de l'incertitude minimale que l'on peut obtenir pour un jaugeage au moulinet, en se plaçant dans les meilleures conditions.

En effet, si l'on considère les valeurs moyennes de X'_{bi} , X'_{di} , X'_{ei} , X'_{pi} , X'_{ci} pour toutes les verticales, si le nombre de verticales est supérieur à 10 et si les débits partiels sont approximativement égaux, alors l'équation (3) peut se simplifier en :

$$X'_Q = \pm \sqrt{\left[X_m^2 + \frac{1}{m} (X_b'^2 + X_d'^2 + X_e'^2 + X_p'^2 + X_c'^2) \right]} \quad (5.)$$

L'application numérique peut être conduite en s'appuyant sur les valeurs numériques des tableaux de l'annexe E de la norme NF EN ISO 748. Pour cette application, on distingue deux cas :

- le cas théorique "optimal", obtenu en choisissant les valeurs minimales des composantes d'incertitude ;
- le cas d'application CNR, obtenu en choisissant des valeurs correspondant aux conditions de mesure rencontrées par la CNR, comme détaillé ci-après :

Les conditions de réalisation des jaugeages sur le Rhône et ses affluents imposent des limites, dont la première est la durée du jaugeage. Celle-ci doit être limitée pour éviter une fluctuation trop importante du régime d'écoulement pendant le jaugeage. Ainsi, les jaugeages de la CNR sont réalisés sur une durée totale inférieure à trois heures. Cette durée comprend l'immersion et le déplacement du moulinet aux positions choisies, sur toute la largeur de la rivière, et la durée d'exposition du moulinet à chaque position. La durée nécessaire au déplacement du moulinet peut être évaluée à 30 secondes environ. Ainsi, pour un jaugeage en six points par verticale, une estimation rapide du nombre maximal de verticales est obtenue par la relation suivante :

$$6 \times m \times 30 + 6 \times m \times 30 \leq 3 \times 3600 \Rightarrow m \leq 30 \quad (6.)$$

où m est le nombre de verticales, le 1^{er} terme correspond à la durée moyenne de déplacement et de positionnement du moulinet (30 secondes), le second terme à la durée d'exposition (30 secondes). On retiendra donc, pour la construction de la figure 3, un nombre de verticales inférieur à 30 pour le cas d'application CNR.

Tableau 1 - Valeurs des composantes d'incertitude / Norme NF EN ISO 748

Composante	Cas théorique		Application "CNR"	
	Valeur minimale	Conditions	Valeur minimale	Conditions
X'_b	0,3 %	Utilisation d'un télémètre sur une largeur inférieure à 100 m	1 %	Suivant estimation des jaugeurs de la CNR
X'_d	0,4 %	Profondeur 14 m avec ligne de sonde et corrections dans l'air et dans l'eau	1 %	Suivant estimation des jaugeurs de la CNR
X'_e	4 %	3 minutes d'exposition, vitesses supérieures à 1 m/s	7 %	30 secondes d'exposition
X'_p	1 %	Méthode de distribution des vitesses	1 %	Méthode de distribution des vitesses
X'_c	1 %	Étalonnage individuel des moulinets, vitesse supérieure à 0,5 m/s	1 %	Étalonnage individuel des moulinets, vitesse supérieure à 0,5 m/s

La valeur de X'_m , qui intervient dans le calcul de X'_Q , dépend du nombre de verticales m . La figure suivante présente l'allure de X'_Q calculé suivant la relation (2), en fonction de m et des valeurs citées dans le tableau ci-dessus, pour les deux cas (cas théorique et application "CNR").

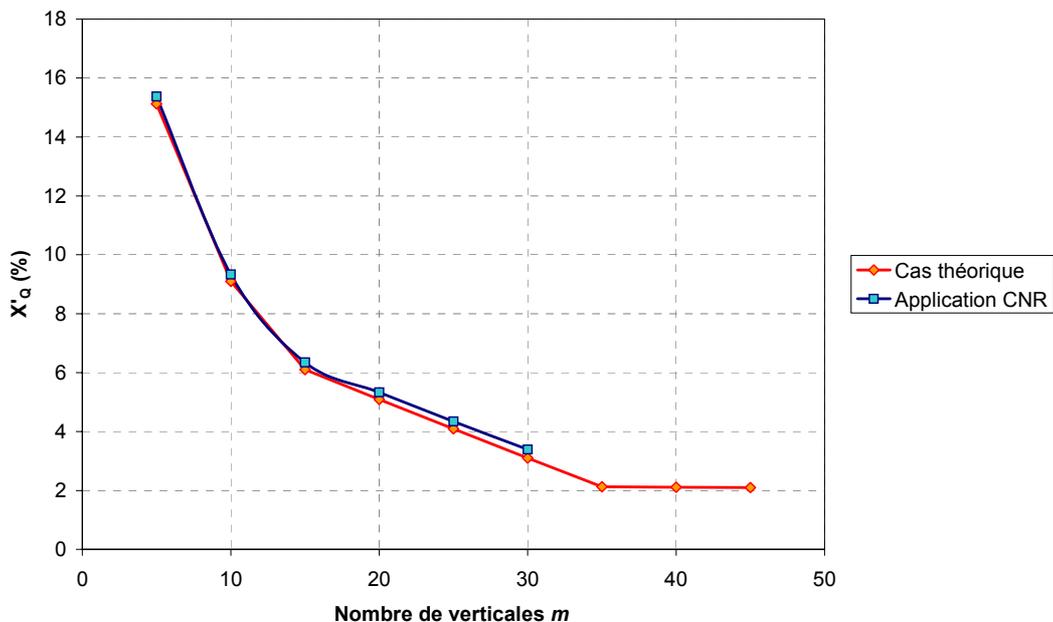


Figure 3 - Incertitude X'_Q en fonction du nombre de verticales, dans les meilleures conditions

Ainsi, dans le cas d'application de la CNR, l'incertitude aléatoire minimale X'_Q est égale à $\pm 3,3$ %.

Les valeurs permettant de déterminer l'incertitude systématique sont données dans l'annexe de la norme, dans le cadre d'un exemple, où $X''_b = X''_d = X''_c = 0,5 \%$. En l'absence d'autre information, nous prenons ici ces mêmes valeurs. Alors, l'application de la relation (5) conduit à la valeur de $X''_Q = 0,87 \%$.

La combinaison des deux composantes selon la relation (5) donne $X_Q = 3,4 \%$ pour $m = 30$ verticales.

Pour 20 verticales, le même calcul conduit à une valeur $X_Q = 5,4 \%$.

2.2.5 Écarts aux préconisations de la norme NF EN ISO 748

Certaines préconisations de la norme NF EN ISO 748 ont une influence directe sur l'exactitude des résultats de mesure. Cependant, ces préconisations ne peuvent pas toujours être satisfaites, en raison des conditions de mesure. Les principaux écarts aux recommandations de la norme observés sur le terrain, liés aux conditions de mesure, sont les suivants :

- (a) *Au § 6.3.3, la norme préconise d'effectuer deux mesurages de la profondeur et de faire le calcul de la moyenne ;*
- (b) *Au § 7.1.3, la norme préconise un temps d'exposition de 30 secondes pour les moulinets rotatifs (les relevés effectués par la CNR sont réalisés avec une durée d'exposition qui peut être réduite à 15 secondes dans certains cas. En effet l'expérience CNR a montré que les jaugeages réalisés et dépouillés sous 15 s ou 30 s étaient très proches. Ainsi, sauf cas particulier, c'est 15 s qui a été choisi comme temps d'exposition).*
- (c) *Au § 7.1.3, la norme préconise un nombre minimal de verticales en fonction de la largeur du chenal (pour une largeur de chenal supérieure à 10 m, la norme préconise un nombre de verticales supérieur à 20). Le nombre de verticales doit notamment être tel que le débit de chaque élément de section soit « dans la mesure du possible inférieur à 5 % du [débit] total et ne dépasse en aucun cas 10 % » ;*

La norme NF EN ISO 748 n'indique pas l'influence du respect ou du non-respect de ces préconisations sur l'estimation des incertitudes de mesure. On pourra cependant retenir que l'incertitude issue de l'application de la norme NF EN ISO 748 est nécessairement une valeur minimale. Les paragraphes ci-dessous présentent une analyse qualitative de l'influence de ces différents écarts aux préconisations de la norme.

2.2.5.1 Profondeur moyenne

Le mesurage de la profondeur n'étant effectué qu'une seule fois, l'influence de la répétition du mesurage ne peut être estimée.

2.2.5.2 Durée d'exposition

La durée d'exposition a deux effets sur la connaissance de la vitesse en un point :

- Effet lié à la stabilité de l'écoulement : quand la durée d'exposition augmente, la stabilité de l'écoulement est mieux prise en compte (intégration des fluctuations sur une durée plus importante). En l'absence d'informations sur la stabilité de l'écoulement, cet effet ne peut être estimé ;
- Effet lié à la résolution du compte-tours : cette composante peut être estimée en connaissant le nombre de tours et le pas du moulinet. La combinaison de ces deux composantes peut être estimée en utilisant les méthodes de calcul de la norme NF ENV 13005^[7]. Cette méthode est donc appliquée ici pour construire la figure 4, page suivante, qui montre la comparaison de l'incertitude

⁷ Cette norme est le "Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure", dont l'application aux mesures de débit par jaugeage fait l'objet du paragraphe 2.3. Les calculs présentés ici sont conformes à cette norme, qui fait référence en métrologie.

de résolution et de l'incertitude d'étalonnage des moulinets, dans le cas des hélices C31 (incertitude d'étalonnage de l'ordre de $\pm 1\%$ - valeur utilisée pour la figure 4 - comprise entre 0,6 % et 1,22 %, pour les plastiques comme pour les métalliques). Pour estimer l'influence de la durée d'exposition, on calcule l'incertitude élargie associée à la mesure de vitesse, en supposant qu'il y a deux composantes d'incertitude : étalonnage et résolution (ce calcul n'étant destiné qu'à déterminer s'il est possible de négliger l'influence de la durée d'exposition, on omet dans ce calcul les composantes liées à la dérive ou la répétabilité du moulinet). Alors, les composantes d'incertitude sont :

- la composante liée à l'étalonnage, dont l'incertitude-type est estimée en considérant une loi de distribution gaussienne : $u_{\text{etalonnage}} = \frac{U_{\text{etalonnage}}}{2}$

- la composante liée à la durée d'exposition, qui peut être assimilée à la résolution du moulinet, donc calculée en considérant une loi de distribution rectangulaire : $u_{\text{résolution}} = \frac{e_{\text{durée}}}{2\sqrt{3}}$ où $e_{\text{durée}}$

est l'échelon de résolution, égal à l'échelon de vitesse correspondant à un tour supplémentaire du moulinet pendant la durée de l'exposition. Pour les moulinets C31 de la CNR (dont le pas est de 0,25 m/s pour 1 tour/s), l'échelon de résolution est :

$$e_{\text{durée}} = 0,0166 \text{ m/s pour la durée d'exposition de 15 secondes}$$

$$e_{\text{durée}} = 0,009 \text{ m/s pour la durée d'exposition de 30 secondes}$$

Alors, l'incertitude associée à la mesure de vitesse est déterminée par application de la loi de propagation des incertitudes (norme NF ENV 13005) :

$$U(v) = 2 \cdot \sqrt{u_{\text{etalonnage}}^2 + u_{\text{résolution}}^2} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{\text{etalonnage}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{e_{\text{durée}}}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad (7.)$$

De cette formule, on déduit que ce sont les variances qui s'ajoutent et non les incertitudes-types.

De plus, l'incertitude associée à l'étalonnage est une incertitude proportionnelle à la vitesse, alors que l'incertitude associée à la résolution est constante en fonction de la vitesse, ne dépendant que de la durée d'exposition. Pour déterminer la vitesse au-delà de laquelle l'une des composantes est prépondérante devant l'autre, il est donc pertinent de comparer les variances en fonction de la vitesse, comme représenté sur la figure ci-dessous :

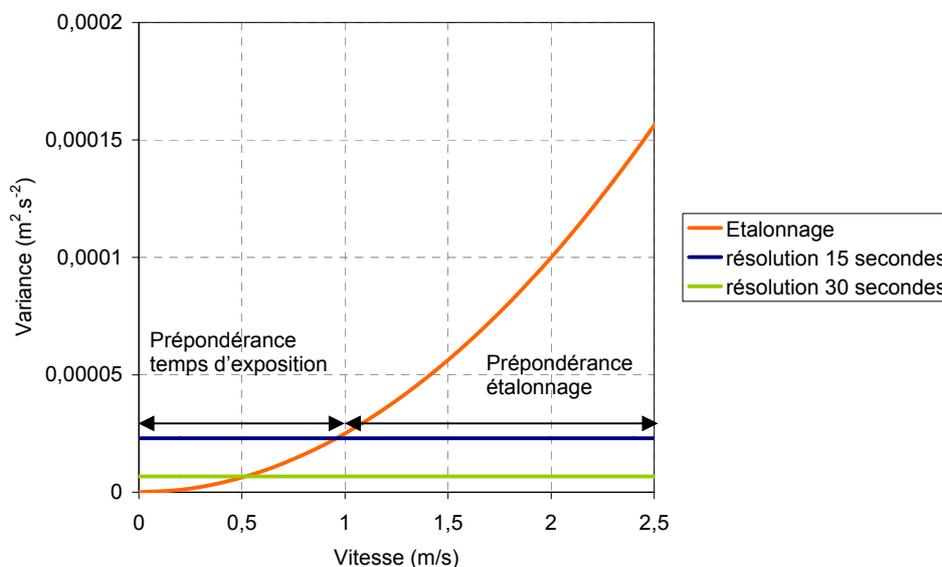


Figure 4 – Comparaison des composantes d'incertitude d'étalonnage et de résolution

La comparaison des variances associées à l'étalonnage et à la durée d'exposition montre que :

- pour la durée d'exposition de 30 secondes, les deux composantes sont du même ordre de grandeur pour une vitesse de 0,5 m/s
- pour la durée d'exposition de 15 secondes, les deux composantes sont du même ordre de grandeur pour une vitesse de 1 m/s

Ce calcul a été réalisé en omettant d'autres composantes d'incertitude, comme la dérive des moulinets dans le temps ou encore leur répétabilité, qui par nature sont proportionnelles aux vitesses. Ainsi, la composante d'incertitude associée à la résolution aura un poids plus faible dans un bilan d'incertitude complet. On peut en conclure les points suivants :

- la composante d'incertitude associée à la durée d'exposition de 15 secondes peut être négligée pour les vitesses supérieures à 1,5 m/s ;
- pour les vitesses inférieures à 1,5 m/s, deux cas sont à distinguer :
 - dans le cas du Rhône, où les vitesses sont supérieures à 1 m/s dans la majorité de la section (les faibles vitesses contribuent donc peu au débit total) : la durée d'exposition de 15 secondes aura une influence négligeable sur l'incertitude de mesure du débit ;
 - dans d'autres situations, notamment si les vitesses sont inférieures à 1 m/s dans une grande partie de la section (débits réservés), ce calcul simplifié ne permet pas de conclure si l'influence de la durée d'exposition peut être négligée ou non ; pour ce faire, il conviendrait de réaliser un calcul complet, prenant en compte les conditions de réalisation de jaugeage et les conditions de site (répartition des vitesses sur la section, etc.)

2.2.5.3 Répartition des débits unitaires

La norme recommande des débits unitaires inférieurs à 5 % du débit total (et tolère jusqu'à 10%), ce qui nécessite non seulement de choisir un nombre de verticales élevé (parfois supérieur à 20), mais également de connaître la répartition transversale des débits. Cette répartition des débits n'étant connue qu'à posteriori (après réalisation du jaugeage complet), le nombre minimal de 20 devrait être augmenté par précaution, mais il est bien sûr impossible de fixer le nombre minimal strict, puisque la répartition des débits unitaires dépend également du choix de l'emplacement des verticales.

2.2.6 Conclusions

- **Application de la norme NF EN ISO 748**

La norme NF EN ISO 748 fournit une formule de calcul de l'incertitude associée au jaugeage, en introduisant un certain nombre de paramètres représentant les sources d'erreur. Selon cette norme, les valeurs des incertitudes associées à chaque paramètre devraient être estimées par l'utilisateur pour chaque paramètre et pour chaque site. Une estimation de la composante associée au nombre de verticales et de la composante associée au nombre de points par verticale pourra être effectuée par une analyse statistique de l'ensemble des jaugeages du Rhône et de ses affluents.

En l'absence de valeurs propres au site et aux conditions particulières de l'écoulement, la norme donne des valeurs des paramètres à titre indicatif ; ce sont ces valeurs qui sont utilisées dans le cadre de cette étude.

- **Écarts aux préconisations de la norme NF EN ISO 748**

Un nombre restreint d'écarts entre la pratique et les préconisations de la norme sont relevés. L'écart le plus important concerne la répartition des débits (difficulté pratique). L'influence de cet écart sur les résultats de mesure dépend de chaque cas et pourra faire l'objet d'une évaluation en conduisant une analyse détaillée des jaugeages.

- **Valeurs minimales de l'incertitude selon la norme NF EN ISO 748**

Malgré les deux limites citées ci-dessus, la norme permet de réaliser une estimation de l'incertitude dans certaines conditions. Ainsi, **dans les meilleures conditions de mesure**, la valeur minimale de l'incertitude du débit jaugé est de l'ordre de $\pm 5\%$ pour un nombre de verticales égal à 20 (voir l'exemple de calcul au paragraphe 2.2.3). Cette valeur se dégrade fortement lorsque le nombre de verticales est inférieur à 10.

Cette valeur est obtenue pour des débits partiels proches les uns des autres, ce qui permet d'appliquer la relation (3). Dans la pratique, les débits partiels ne sont pas nécessairement proches les uns des autres^[8], et il convient alors d'appliquer la relation (5). Cette relation fait intervenir les résultats du jaugeage et aboutira donc à une valeur numérique différente dans chaque cas, en fonction des conditions de mesure (notamment de la répartition des débits partiels). Un tel calcul, suivant la relation (5), a été réalisé sur plusieurs exemples (voir IANNEXE 16) et conduit à des conclusions identiques : **l'incertitude minimale que l'on peut obtenir sur un jaugeage au moulinet est de l'ordre de $\pm 5\%$.**

⁸ En toute rigueur, l'équivalence des débits partiels ne peut être connue qu'**après** le jaugeage, sauf si l'expérience du jaugeur lui permet de définir au préalable une répartition des verticales adéquate, en fonction de l'écoulement.

2.3 Application de la norme NF ENV 13005

L'estimation des incertitudes selon la norme NF ENV 13005 repose sur la description du processus de mesure et sa modélisation.

2.3.1 Modélisation du processus de mesure

Le débit total peut être obtenu de plusieurs manières :

- méthode de la médiane (citée dans la norme NF EN ISO 748) : le débit élémentaire considéré est le débit d'une section verticale, il est construit à partir de la section associée à la verticale et de la vitesse moyenne sur la verticale (voir Figure 2 - Méthode de la section médiane). La vitesse moyenne sur chaque verticale est calculée à partir des mesures de vitesse en 1, 2, 3, 5 ou 6 points. Dans la norme NF EN ISO 748, les vitesses en chaque point sont pondérées en fonction du nombre de points.
- méthode « CNR » : le débit élémentaire considéré est le débit associé à un point de mesure de vitesse ; il est calculé pour chaque point de mesure de la vitesse, en lui associant la surface élémentaire correspondante, avec une pondération spécifique sur la vitesse du fond (voir formules programmées dans le logiciel de jaugeage de la CNR, détaillées en ANNEXE 2).
- méthode « globale » : le débit total est le produit de la surface totale par la vitesse débitante ; celle-ci est déterminée par pondération des vitesses mesurées en fonction des sections (pondération des vitesses par verticale ou des vitesses par point).

Selon que l'on choisit une méthode ou l'autre, le modèle associé au processus de mesure n'est pas le même et les composantes d'incertitude seront plus ou moins faciles à identifier et à quantifier.

2.3.1.1 Méthode de la médiane

Le débit est calculé par la relation :

$$Q = \sum_{i=1}^m Q_i = \sum_{i=1}^m S_i \cdot \bar{V}_i = \sum_{i=1}^m b_i \cdot d_i \cdot \bar{V}_i \quad (8.)$$

où les notations sont identiques à la Figure 2.

En supposant que les estimations des grandeurs ne sont pas corrélées (hypothèse identique à l'hypothèse formulée en 2.2.1), l'application de la loi de propagation des incertitudes conduit à écrire :

$$u^2(Q) = \sum_{i=1}^m \left[\left(\frac{\partial Q}{\partial b_i} \right)^2 \cdot u^2(b_i) + \left(\frac{\partial Q}{\partial d_i} \right)^2 \cdot u^2(d_i) + \left(\frac{\partial Q}{\partial \bar{V}_i} \right)^2 \cdot u^2(\bar{V}_i) \right] \quad (9.)$$

De même que dans la méthode vue en 2.2.1, l'hypothèse sur l'absence de corrélation entre les estimations des grandeurs est une hypothèse qui suppose que les erreurs d'origine aléatoire sont prépondérantes devant les erreurs systématiques.

Après regroupements et simplifications, l'équation précédente peut se mettre sous la forme :

$$\frac{u^2(Q)}{Q^2} = \sum_{i=1}^m \left[\frac{u^2(b_i)}{b_i^2} + \frac{u^2(d_i)}{d_i^2} + \frac{u^2(\bar{V}_i)}{\bar{V}_i^2} \right] \quad (10.)$$

avec

- b_i est la largeur de la section i
- d_i est la profondeur totale de la section i

- \bar{V}_i est la vitesse moyenne de la section i
- $u(b_i)$ est l'incertitude-type de la largeur
- $u(d_i)$ est l'incertitude-type de la profondeur
- $u(\bar{V}_i)$ est l'incertitude-type de la vitesse moyenne

2.3.1.2 Méthode « CNR »

Le débit est calculé par la relation :

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i = \sum_{i=1}^N S'_i \cdot V_i = \sum_{i=1}^N b_i \cdot e_i \cdot V_i \quad (11.)$$

avec

- N est le nombre total de points de mesure de la vitesse
- b_i est la largeur de la section associée au point i
- e_i est la hauteur associée au point i (la somme des e_i sur une verticale est égale à la profondeur notée d_i dans la méthode de la médiane)
- V_i est la vitesse au point i.

NOTE Dans le logiciel de jaugeage CNR, la vitesse entre le fond et le dernier point mesuré est pondérée d'un coefficient 2/3. La conformité de cette méthode aux préconisations de la norme NF EN ISO 748 est développée en ANNEXE 2 . La relation (27) de l'ANNEXE 2 et la relation (11) ci-dessus présentent ainsi une légère différence, sans influence sur l'application de la loi de propagation des incertitudes.

En supposant que les estimations des grandeurs ne sont pas corrélées (hypothèse identique à l'hypothèse formulée en 2.2.1), l'application de la loi de propagation des incertitudes conduit à écrire :

$$u^2(Q) = \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial Q}{\partial b_i} \right)^2 \cdot u^2(b_i) + \left(\frac{\partial Q}{\partial e_i} \right)^2 \cdot u^2(e_i) + \left(\frac{\partial Q}{\partial V_i} \right)^2 \cdot u^2(V_i) \right] \quad (12.)$$

De même que dans la méthode vue en 2.2.1, l'hypothèse sur l'absence de corrélation entre les estimations des grandeurs est une hypothèse relativement importante. Elle est cependant réaliste si l'on suppose que les erreurs d'origine aléatoire sont prépondérantes devant les erreurs systématiques.

Après regroupements et simplifications, l'équation précédente peut se mettre sous la forme :

$$\frac{u^2(Q)}{Q^2} = \sum_{i=1}^N \left[\frac{u^2(b_i)}{b_i^2} + \frac{u^2(e_i)}{e_i^2} + \frac{u^2(V_i)}{V_i^2} \right] \quad (13.)$$

avec

- $u(b_i)$ est l'incertitude-type de la largeur

- $u(e_i)$ est l'incertitude-type de la hauteur associée au point i
- $u(V_i)$ est l'incertitude-type de la vitesse au point i

2.3.1.3 Méthode « globale »

Le débit est calculé par la relation :

$$Q = S \cdot V_d = S \cdot \sum_i \frac{S_i \cdot V_i}{S} \quad (14.)$$

avec

- V_d est la vitesse débitante
- S est la surface mouillée totale
- S_i et V_i sont les sections et vitesses associées soit à une verticale soit à un point de mesure de la vitesse.

Avec cette écriture, en supposant que les estimations des grandeurs ne sont pas corrélées, l'application de la loi de propagation des incertitudes conduit à écrire :

$$u^2(Q) = \left(\frac{\partial Q}{\partial S} \right)^2 \cdot u^2(S) + \left(\frac{\partial Q}{\partial V_d} \right)^2 \cdot u^2(V_d) \quad (15.)$$

$$\text{soit encore } \frac{u^2(Q)}{Q^2} = \frac{u^2(S)}{S^2} + \frac{u^2(V_d)}{V_d^2} \quad (16.)$$

Cette méthode permet d'utiliser une estimation de la surface mouillée réalisée à partir de mesures indépendantes du jaugeage (relevé topo, etc.).

2.3.1.4 Comparaison des formules

En théorie, l'application de l'une ou l'autre des formules de calcul des incertitudes de mesure présentées ci-dessus devrait conduire sensiblement au même résultat. Cependant, les différentes formulations présentées ne sont pas identiques :

- sous une même notation, les incertitudes-types ne prendront pas en compte les mêmes composantes
- l'effet des corrélations entre les estimations des grandeurs sera plus ou moins atténué

Par exemple, l'application de la loi simplifiée de propagation des incertitudes^[9] à la méthode « globale » diminue l'effet des corrélations des mesures de largeur et des mesures de profondeur, mais renforce l'effet des corrélations des mesures de vitesse. Étant donné qu'il est impossible de tenir compte des corrélations, il est inutile de chercher à comparer les formules d'estimation d'incertitude ci-dessus.

⁹ Loi « simplifiée » : loi de propagation des incertitudes ne prenant pas en compte les termes de corrélation

2.3.2 Estimation des incertitudes-types

Les estimations des incertitudes-types sont effectuées selon les méthodes décrites dans la norme NF ENV 13005 "Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure" :

- Les incertitudes de type A sont estimées à partir de l'écart-type expérimental σ ;
- Les incertitudes de type B sont estimées à partir d'une information sur l'étendue ou la demie-étendue de la dispersion probable, associée à une loi de distribution. Les principales lois de distribution utilisées ici sont la loi de distribution gaussienne et la loi de distribution équiprobable (rectangulaire). Dans le cas de la loi gaussienne, le coefficient d'élargissement est égal à 2 pour un niveau de confiance de 95 %. Pour la loi rectangulaire, ce coefficient est égal à $\sqrt{3}$.

Exemples^[10] :

- Estimation de l'incertitude-type associée à l'étalonnage d'un instrument de mesure :

$$u_{\text{étalonnage}} = \frac{U_{\text{certificat}}}{2}$$

où $U_{\text{certificat}}$ est l'incertitude élargie mentionnée dans le certificat d'étalonnage de l'instrument.

- Estimation de l'incertitude-type associée à la résolution d'un instrument de mesure à affichage numérique :

$$u_{\text{résolution}} = \frac{r}{\sqrt{3}}$$

où r est la demie-étendue de l'afficheur numérique de l'instrument

Outre le choix de la loi de distribution, la quantification de l'incertitude-type repose bien évidemment sur le choix de la valeur du numérateur ; dans le cas des exemples ci-dessus, le choix est dicté par des documents (certificat d'étalonnage) ou l'observation directe de l'instrument (résolution). Dans le cas de sources d'erreur liées à la méthode de mesure, le choix de la valeur s'appuie en partie sur l'expérience des opérateurs, il est donc sujet à interprétation et peut être discuté.

2.3.2.1 Incertitudes associées à la largeur / méthodes « médiane » et « CNR »

La largeur de chaque section est obtenue par différence des abscisses des verticales. Les erreurs de mesure sont liées au dispositif permettant de positionner et de repérer les verticales, ainsi qu'à l'estimation des laisses.

L'incertitude-type associée à la largeur est estimée à partir de l'erreur maximale liée aux instruments, avec une loi de distribution rectangulaire. Une valeur typique de l'erreur maximale est 0,05 m, en tenant compte de la résolution des instruments, de leur justesse, de leur fidélité et des erreurs liées à la méthode et à la mise en œuvre.

2.3.2.2 Incertitudes associées à la profondeur / méthode « médiane »

La profondeur de chaque section verticale est déterminée par immersion d'une perche ou d'un saumon. Les erreurs de mesure sont liées au dispositif de mesure et à la représentativité du fond. Cette dernière composante de l'erreur reflète la méconnaissance du profil du fond entre deux verticales.

¹⁰ Pour des exemples complémentaires et les coefficients associés à d'autres lois de distribution, se reporter au Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure, norme NF ENV 13005

L'incertitude-type associée à la profondeur est une combinaison de ces deux composantes :

- Composante liée à l'instrument (prenant en compte la résolution, la fidélité, la justesse de l'instrument et sa mise en œuvre), estimée à partir de la valeur d'erreur maximale associée à une loi de distribution rectangulaire.
- Composante liée à la méconnaissance du fond, estimée à partir de l'écart entre les profondeurs des deux verticales voisines, associé à une loi de distribution rectangulaire.

2.3.2.3 Incertitudes associées à la hauteur / méthode « CNR »

Dans le cas où il n'y a qu'un point de mesure de vitesse par verticale, le cas est identique au cas ci-dessus (2.3.2.2).

Dans le cas plus général où il y a plusieurs points de mesure par verticale, il convient de distinguer trois cas :

- Point en surface (0,2 m) : les erreurs sont liées d'une part au dispositif de positionnement et de repérage vertical du moulinet, d'autre part au repérage et aux fluctuations de la surface ;
- Point au fond (0,9 h) : les erreurs sont liées d'une part au dispositif de positionnement et de repérage vertical du moulinet, d'autre part au repérage du fond et à la représentativité du fond ;
- Points intermédiaires : les erreurs ne sont liées qu'au dispositif de positionnement et de repérage vertical du moulinet.

L'incertitude-type associée au système de mesure est estimée à partir de l'erreur maximale (comprenant justesse, fidélité, etc.) associée à une loi de distribution rectangulaire.

L'incertitude-type associée à la méconnaissance du profil du fond est estimée à partir de l'erreur maximale de hauteur associée au point au fond (0,9 h), soit $0,15 h^{[1]}$, associée à une loi de distribution rectangulaire. Cette manière de traiter le cas permet de tenir compte de la « rugosité » du fond, mais ne permet pas de tenir compte de la pente moyenne du fond (cette méthode est donc à réserver pour les profils très plats).

2.3.2.4 Incertitude associée à la surface mouillée / méthode « globale »

La surface mouillée peut être estimée par sommation des sections élémentaires du jaugeage, ou encore par des relevés topo indépendants. Dans le premier cas, l'incertitude associée à la surface mouillée peut être estimée à partir des incertitudes-types associées aux mesures de largeur et de profondeur. Dans le second, une estimation des incertitudes doit être conduite à partir des données issues du relevé topo.

2.3.2.5 Incertitudes associées à la vitesse

Les erreurs de mesure de la vitesse sont liées d'une part au moulinet lui-même (justesse, dérive, résolution, etc.) et d'autre part à la représentativité temporelle et spatiale de la mesure de vitesse.

Une application de l'estimation des incertitudes associées au moulinet est réalisée au paragraphe 2.2.5.2. consacré à la durée d'exposition.

L'étalonnage est traité classiquement à partir des incertitudes du laboratoire d'étalonnage, en considérant une loi gaussienne.

En l'absence d'informations suffisantes pour estimer la dérive et la linéarité, ces composantes sont forfaitairement prises en compte à partir de l'incertitude d'étalonnage du laboratoire, en considérant une loi de distribution gaussienne.

¹¹ On estime que la valeur maximale de l'erreur sur le débit de la tranche associée au point à 0,9 h peut être égale au débit associé à ce même point.

La résolution est estimée à partir des informations concernant le pas du moulinet et la durée d'exposition, avec une loi de distribution rectangulaire.

La représentativité spatiale et temporelle des mesures correspond aux questions suivantes : est-ce que la vitesse mesurée en un point est représentative de la vitesse sur toute la surface associée à ce point et est-ce que les fluctuations de vitesse mesurées pendant la durée d'exposition reflètent les variations de vitesse dans le temps ? En multipliant le nombre de points, la méthode d'exploration des vitesses permet d'intégrer cette source d'erreurs. Plus le nombre de points est important, plus ces fluctuations seront prises en compte. En laboratoire, il est possible de quantifier ces composantes, en comparant les valeurs de débit obtenues par exploration avec le débit de référence obtenu par une autre méthode (débitmètre étalonné, méthode gravimétrique, etc.). Dans le cas de l'application CNR, ce débit de référence ne peut être déterminé.

2.3.3 Estimation des incertitudes de mesure associées au débit

Quelle que soit la méthode retenue (« médiane », « CNR » ou « globale »), les incertitudes-types doivent être estimées pour chaque site et sont calculées en fonction des paramètres du jaugeage et des valeurs de vitesse enregistrées. Le calcul de l'incertitude ne peut donc pas être réalisé avant de réaliser le jaugeage.

Les formules de calcul sont introduites dans le fichier « modèle incertitude.xlt » (cf. ANNEXE 15).

2.3.4 Traitement des corrélations

La norme NF ENV 13005 permet de traiter les corrélations entre les estimations des grandeurs, au moins du point de vue formel, par l'application de la forme généralisée de la loi de propagation des incertitudes.

Dans le cas de la méthode de la médiane, la forme généralisée de la relation (9.) est de la forme :

$$u^2(Q) = \sum_{i=1}^m \left[\left(\frac{\partial Q}{\partial b_i} \right)^2 \cdot u^2(b_i) + \left(\frac{\partial Q}{\partial d_i} \right)^2 \cdot u^2(d_i) + \left(\frac{\partial Q}{\partial \bar{V}_i} \right)^2 \cdot u^2(\bar{V}_i) \right] + \sum_{i,j} \left[\begin{aligned} & 2 \cdot r(b_i, b_j) \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial b_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial b_j} \right) \cdot u(b_i) \cdot u(b_j) \\ & + 2 \cdot r(d_i, d_j) \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial d_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial d_j} \right) \cdot u(b_i) \cdot u(b_j) \\ & + 2 \cdot r(\bar{V}_i, \bar{V}_j) \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial \bar{V}_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial \bar{V}_j} \right) \cdot u(\bar{V}_i) \cdot u(\bar{V}_j) \end{aligned} \right] \quad (17.)$$

- Les incertitudes-types $u(b_i)$, $u(b_j)$, $u(d_i)$, $u(d_j)$, $u(\bar{V}_i)$ et $u(\bar{V}_j)$ sont des termes positifs par définition.
- Les termes $\left(\frac{\partial Q}{\partial x_{i,j}} \right)$ sont les dérivées partielles du modèle, qui peuvent être positifs ou négatifs en fonction du modèle. Dans le cas du modèle traité (modèle de la médiane), tous les termes sont positifs (il en est de même pour les autres modèles, qui sont tous basés sur une somme de termes).
- Les termes $r(x_i, x_j)$ sont les coefficients de corrélation entre les estimations des grandeurs, qui sont positifs. Ces coefficients de corrélation reflètent la présence d'erreurs systématiques, qui sont notamment liées à l'utilisation du même instrument de mesure pour estimer une grandeur en

plusieurs endroits (par exemple la vitesse). Ces termes ne sont pas connus quantitativement, et introduisent donc un certain nombre de termes inconnus dans la relation de calcul de l'incertitude.

Ainsi, le terme complémentaire de l'équation (17.) par rapport à l'équation(9.) est un terme toujours positif. Il en est de même pour les modèles utilisés dans la méthode « CNR » ou dans la méthode « globale ».

2.3.5 Conclusion sur l'application de la norme NF ENV 13005 au moulinet

- Dans le cadre de cette étude, les termes de corrélation entre les estimations des grandeurs mesurées ne peuvent être quantifiés numériquement ; ils introduisent donc une part inconnue dans l'estimation des incertitudes de mesure. Ils seront d'autant plus petits que les erreurs aléatoires sont grandes devant les erreurs systématiques.
- Dans le cas du jaugeage au moulinet, les termes de corrélation sont des termes positifs, qui tendent à augmenter l'incertitude de mesure du débit. Cette augmentation est cependant limitée, dans la mesure où la plus grande partie des incertitudes de mesure est liée à des erreurs aléatoires et non à des erreurs systématiques (voir par exemple les valeurs d'« incertitude systématique » et « aléatoire » indiquées dans la norme NF EN ISO 748).
- Plus la relation de calcul du débit comprend de termes, plus le nombre de termes de corrélation est important. Ainsi, en multipliant le nombre de verticales (ou le nombre de points par verticale), l'incertitude liée aux corrélations augmente. Cet aspect ne peut pas être négligé pour le cas du jaugeage ADCP où le nombre de verticales est plus important. Ainsi, la formule mise en place pour l'estimation des incertitudes de mesure ne peut être utilisée pour les jaugeages ADCP.

Des points précédents, on peut conclure :

- ⇒ L'application de la norme NF ENV 13005 demande de pouvoir estimer les termes de corrélation, ce qui ne peut être réalisé en pratique pour les jaugeages au moulinet. Les calculs effectués sur certains cas particuliers (voir ANNEXE 16) sont donc réalisés en négligeant les termes de corrélation, bien qu'il ne soit pas possible de démontrer qu'ils sont réellement négligeables (ces termes ne peuvent pas être quantifiés). L'introduction d'un coefficient de corrélation maximal mène à des incertitudes irréalistes. Par contre, il est possible de montrer que l'existence des corrélations a un effet d'augmentation de l'incertitude de mesure. Ainsi, les valeurs d'incertitude estimées en appliquant la norme NF ENV 13005 sont des valeurs minorantes. **Il est donc possible de retenir qu'une valeur d'incertitude élargie de l'ordre de $\pm 5\%$ est une valeur minimale, pour un nombre de verticales supérieur à 20.**

2.4 Comparaison de la norme NF EN ISO 748 et de la norme NF ENV 13005 pour les jaugeages complets ("toutes profondeurs")

Les deux normes citées présentent des avantages, mais également des limites dans leur application aux jaugeages au moulinet, dont les principales sont rappelées dans le tableau ci-dessous. Ce tableau fait apparaître les points communs entre les deux méthodes :

- Pour les deux normes, le traitement des corrélations ne peut pas être conduit et entraîne une sous-estimation de l'incertitude ;
- Pour les deux normes, une difficulté importante réside dans l'évaluation des composantes d'incertitude-type associées à chacun des paramètres. Cette difficulté est notamment liée à l'absence d'une méthode de mesure présentant des incertitudes de mesure plus faibles (nettement inférieures à 1 %), qui permettrait d'étudier chacun des paramètres et d'estimer sa composante d'incertitude associée.

Indépendamment des différences de notations et de concepts (voir paragraphe 2.1.5), la différence fondamentale entre les deux normes réside dans le choix des paramètres sur lesquels sont attribuées les erreurs :

- La norme NF ENV 13005 s'appuie sur une modélisation au sens "physique", s'appuyant uniquement sur les paramètres mesurés : largeur, profondeur et vitesse. Dans l'application de cette norme, les erreurs de mesure sont donc attribuées aux seuls paramètres mesurés ; l'une des difficultés réside dans l'affectation des sources d'erreur aux paramètres considérés.
- La norme NF EN ISO 748 s'appuie sur une modélisation au sens "statistique", qui introduit des paramètres supplémentaires qualifiés de paramètres "explicatifs", déterminés par analyse des corrélations entre ces paramètres et la dispersion des mesures observée. Les erreurs de mesure sont attribuées à ces paramètres explicatifs; qui peuvent être des paramètres mesurés ou non, comme par exemple le nombre de verticales ou le nombre de points par verticale.

Tableau 2 - Comparaison des normes NF EN ISO 748 et NF ENV 13005

	NF EN ISO 748	NF ENV 13005
Limites	Difficulté dans l'évaluation des valeurs d'incertitude de chacun des paramètres : les valeurs utilisées pour le calcul sont des valeurs informatives (arbitraires) de la norme	Difficulté dans l'évaluation des incertitudes-types
	Impossibilité d'estimer l'influence des écarts entre la pratique et les préconisations de la norme	
	Impossibilité de tenir compte des corrélations, qui ont pour effet d'augmenter l'incertitude de mesure	Impossibilité de tenir compte des corrélations, qui ont pour effet d'augmenter l'incertitude de mesure
Avantages	Permet un calcul rapide de l'incertitude sur un débit	Permet de tenir compte des valeurs réelles des incertitudes associées à l'instrumentation et à la méthode mises en œuvre

Quelle que soit la norme utilisée, il est nécessaire de réaliser le jaugeage avant d'effectuer le calcul d'incertitude associé. La comparaison des deux normes doit donc s'appuyer sur leur application à un certain nombre de cas particuliers. L'application de ces deux normes à différents cas particuliers (voir exemples en ANNEXE 16) met en évidence les éléments suivants :

- ⇒ Pour un faible nombre de verticales (< 15), les incertitudes estimées selon une norme ou l'autre peuvent être très différentes ;

- ⇒ Au-delà de 30 verticales, la norme NF EN ISO 748 conduit à une valeur d'incertitude plus basse, jusqu'à $\pm 2 \%$ dans le cas théorique optimal et de l'ordre de $\pm 3,4 \%$ dans le cas d'application de la CNR, tandis que la norme NF ENV 13005 reste à un niveau de l'ordre de $\pm 5 \%$.
- ⇒ **Pour une répartition homogène des débits partiels avec un nombre de verticales suffisamment important (entre 20 et 30), c'est à dire pour la situation d'application CNR présentant le meilleur compromis entre la durée du mesurage et la quantité d'informations recueillies, les valeurs d'incertitude minimale obtenues par les deux normes convergent vers une valeur proche de $\pm 5 \%$ pour un jaugeage en 6 points par verticale (jaugeage standard).**
- ⇒ De ces éléments, on peut également émettre des préconisations pour le choix de la norme à appliquer :

	NF EN ISO 748	NF ENV 13005
Préconisée pour	Obtenir rapidement une valeur de l'incertitude de manière opérationnelle	Optimiser le processus de mesure ou comparer l'influence des sources d'erreur

2.5 Opérations de jaugeages au moulinet en un point par verticale

Par la définition même de la méthode de mesure du débit par exploration du champ des vitesses, l'estimation du débit est améliorée par l'augmentation du nombre de points de mesure :

- Meilleure connaissance de la surface mouillée, notamment par une meilleure connaissance du profil du fond lorsque le nombre de verticales augmente ;
- Meilleure estimation de la vitesse débitante, lorsque le nombre de mesures de la vitesse locale augmente.

Dans des conditions de mesure stables, l'incertitude liée à la méthode d'exploration des vitesses est d'autant plus faible que le nombre de points de mesure est grand. Cependant, il n'est pas possible de réaliser les mesurages simultanément et la durée du mesurage augmente de manière quasi proportionnelle avec le nombre de points.

Lors de certaines crues rapides, les opérateurs de jaugeages ne disposent que d'un temps limité pour réaliser la mesure de débit. Il en est de même pour des cours d'eau en crue présentant un transport de corps flottants ou quand la mesure doit être réalisée rapidement pour des raisons de sécurité.

Dans ces cas de figure, les opérateurs sont amenés à réaliser un mesurage comprenant un seul point par verticale, généralement à 20 cm sous la surface de l'eau. Il est aussi possible de choisir une méthode où le point est situé à 60 % de la hauteur sous la surface (que l'on appellera par la suite mesure à 0,6 h). Le dépouillement du jaugeage nécessite alors de connaître les coefficients reliant ces débits mesurés à partir d'un point par verticale au débit total, coefficients définis dans le paragraphe 2.5.1 ci-après.

La méthode de mesure en un point à 0,6 h n'est pas pratiquée par la CNR car elle est longue et le maintien en position verticale du moulinet pour ce type de mesure présente de réelles difficultés. Cependant, le développement de l'estimation de l'incertitude de mesure est identique pour les deux méthodes. Il est donc présenté ci-dessous pour les jaugeages en surface, et fait l'objet de l'ANNEXE 7 pour le jaugeage à 0,6 h.

2.5.1 Définitions

- Détermination du coefficient de surface C_2

Le débit total $Q_{\text{mesuré}}$ est déterminé par un jaugeage au moulinet en six points selon la méthode CNR (cas particulier de la norme NF EN ISO 748, cf. ANNEXE 2). Pour chaque verticale, la valeur de vitesse mesurée à 20 cm sous la surface est multipliée par la section de la verticale associée. En sommant ces valeurs, on obtient le débit noté Q_2 . Le coefficient de surface C_2 est déterminé à partir de $Q_{\text{mesuré}}$ et Q_2 :

$$C_2 = \frac{Q_{\text{mesuré}}}{Q_2} \quad (18.)$$

La méthodes de détermination du coefficient C_2 permet de constituer une base de données pour chaque station hydrométrique (voir ANNEXE 4 à ANNEXE 6). La moyenne de ces coefficients est ensuite calculée, ce qui permet d'estimer un coefficient $C_{2\text{moyen}}$ sur chaque station.

- Cas d'un jaugeage de surface

Dans le cas d'un jaugeage de surface, on calcule Q_2 à partir des vitesses mesurées à 20 cm sous la surface. On utilise le coefficient de surface (dont la valeur varie selon les situations ; ceci est étudié dans la suite de cette étude) pour calculer le débit total :

$$Q_{\text{calculé}} = C_2 \cdot Q_2 \quad (19.)$$

2.5.2 Détermination du coefficient C_2 pour le Rhône et ses affluents

Par définition, le coefficient C_2 est déterminé à partir des jaugeages complets réalisés à une station hydrométrique, et utilisé lorsqu'il n'est pas possible de réaliser un jaugeage complet à cette même station. Le coefficient C_2 étant issu de mesures, une incertitude de mesure doit lui être associée.

De même, la valeur du coefficient C_2 peut différer d'un site à l'autre. Pour certains sites, la valeur du coefficient peut ne pas être connue, et un coefficient arbitraire (valeur par défaut) peut alors être utilisé (voir tableau ci-dessous).

Le coefficient C_2 a été déterminé pour 35 sites du Rhône et de ses principaux affluents. Plus de 500 jaugeages complets, effectués entre 1991 et 2003, ont été exploités afin d'en déduire le coefficient C_2 (pour chacun de ces jaugeages). Ensuite, le coefficient moyen C_2 a été calculé pour chaque site. Les moyennes et écarts-types pour les 35 sites sont consignés dans les tableaux des annexes (ANNEXE 3 à ANNEXE 6).

La valeur moyenne de C_2 , pour l'ensemble des sites répertoriés, figure dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3 - Coefficient C_2

Valeurs expérimentales CNR (ensemble de l'échantillon)		Valeurs usuelles de la littérature	
Valeur moyenne	Écart-type σ	Valeur moyenne	Écart-type σ
0,858	0,056	0,85	Non cité

2.5.3 Estimation de l'incertitude des coefficients et propagation de l'incertitude

Le tableau 3 ci-dessus montre que la valeur moyenne des coefficients déterminés expérimentalement sur les sites considérés ne diffère pas notablement de la valeur usuelle de la littérature. On observe une dispersion des valeurs des coefficients C_2 sur l'ensemble des sites, comme pour un site donné (voir ANNEXE 9). La dispersion des valeurs des coefficients C_2 est une composante d'incertitude dont il faut tenir compte lors du calcul du débit $Q_{\text{mesuré}}$.

Le coefficient C_2 a été calculé à partir d'un grand nombre de valeurs (> 500) obtenues sur des sites différents (35), au cours de plusieurs années (13), pour des régimes d'écoulement couvrant la plage de débits de fonctionnement du Rhône et de ses affluents. **L'écart-type calculé à partir de ces valeurs représente alors l'incertitude de reproductibilité du coefficient C_2 (normes [2] et [3]) et peut être utilisée comme estimation de l'incertitude.** Cette valeur d'écart-type peut être considérée comme une incertitude-type de type $A^{[12]}$, avec $k = 1$.

L'estimation de l'incertitude du débit $Q_{\text{calculé}}$ à partir d'un jaugeage de surface doit tenir compte d'une part l'incertitude du jaugeage, d'autre part de l'incertitude associée au coefficient retenu. La loi de propagation des incertitudes décrite dans la norme NF ENV 13005 permet de mener ce calcul :

- Cas d'un jaugeage à 20 cm sous la surface :

Le débit $Q_{\text{calculé}}$ est :

$$Q_{\text{calculé}} = C_2 \cdot Q_2$$

L'application de la loi de propagation des incertitudes à la relation ci-dessus conduit à estimer l'incertitude élargie $U(Q)$ par la relation suivante^[13] :

$$\frac{U(Q_{\text{calculé}})}{Q_{\text{calculé}}} = k \cdot \frac{u(Q_{\text{calculé}})}{Q_{\text{calculé}}} = k \cdot \sqrt{\left(\frac{u(Q_2)}{Q_2}\right)^2 + \left(\frac{u(C_2)}{C_2}\right)^2} \quad (20.)$$

Avec :

- $u(Q_2)$: incertitude-type associée au débit Q_2 ;
- $u(C_2)$: incertitude-type associée au coefficient C_2 ;
- k : facteur d'élargissement, pris égal à 2 pour un niveau de confiance de 95%.

2.5.4 Influence des paramètres (débit, vitesse, hauteur d'eau) sur le coefficient de surface C_2 et sur C_6

La dispersion observée sur les coefficients C_2 et C_6 est relativement importante (voir les graphiques dans les annexes : ANNEXE 10 à ANNEXE 13), et incite à déterminer s'il existe un facteur expliquant cette variation. Ce paramètre d'influence peut être le débit, la vitesse ou encore la hauteur d'eau. L'analyse porte ici essentiellement sur le coefficient de surface C_2 . En effet, le coefficient C_6 est rarement utilisé du fait de la difficulté de mesurer Q_6 en comparaison de Q_2 . L'analyse détaillée des facteurs d'influence du coefficient C_6 n'est donc pas conduite en détail dans le cadre de cette étude.

On note cependant que la représentation graphique du coefficient C_6 en fonction du débit ou de la vitesse moyenne ne montre pas de tendance significative (voir ANNEXE 10 et ANNEXE 12). Le calcul des coefficients de corrélation conduit au même résultat.

Pour le coefficient C_2 (ANNEXE 11 et ANNEXE 13), une tendance peut être observée : la valeur moyenne du coefficient augmente légèrement en fonction de la vitesse moyenne comme en fonction du débit, avec un coefficient de détermination R^2 ^[14] identique dans les deux cas ($\approx 0,03$). Cependant, la dispersion est telle pour les petites valeurs de vitesse que cette tendance ne peut raisonnablement être interprétée comme une corrélation entre la valeur du coefficient et la vitesse moyenne ou le débit.

¹² Voir norme NF ENV 13005

¹³ En raison de la forme de la relation, le calcul est réalisé sur les incertitudes relatives (voir NF ENV 13005)

¹⁴ Le coefficient de détermination R^2 est un paramètre de la régression, estimateur de la corrélation entre les valeurs : il est égal à 1 pour une corrélation totale.

Une analyse plus fine a été conduite par la CNR pour étudier l'influence de la hauteur d'eau sur le coefficient de surface C_2 .

Comme indiqué au paragraphe 2.5.1., le coefficient C_2 est déterminé à partir de jaugeages standards (c'est-à-dire avec six points par verticale). Ces jaugeages standards ont été regroupés suivant la nature de la rivière. Ainsi, 3 grands groupes sont distingués dans l'échantillon de jaugeages moulinet toutes profondeurs choisis pour cette étude (voir ANNEXE 4 à ANNEXE 6) :

- Rhône : 145 jaugeages opérés sur 11 sites différents ;
- Rhône Court-Circuité (noté RCC) : 34 jaugeages sur 5 sites ;
- Affluents : 332 jaugeages pour 19 sites répertoriés.

Chaque jaugeage (donc chaque débit mesuré) est associé à un niveau de plan d'eau relevé sur le terrain par l'opérateur lors du jaugeage.

Les résultats obtenus lors du traitement du jaugeage standard sont principalement :

- le débit total Q (jaugeage standard : débit mesuré en six points par verticale) ;
- le débit Q_2 mesuré à 20 cm sous la surface ;
- la section mouillée.

Pour chaque site, une hauteur moyenne est déterminée à partir de la section mouillée et d'une largeur moyenne. Cette dernière est déterminée en utilisant une loi de régression linéaire à partir des cotes aux échelles lues sur site et des sections mouillées calculées lors du traitement du jaugeage. Ces valeurs de largeur moyenne ne sont que des estimations permettant de comparer les mesures entre elles. Toutefois les largeurs ont été vérifiées par les personnes ayant réalisé les jaugeages.

La figure suivante représente l'ensemble des coefficients de surface C_2 pour les trois groupes retenus.

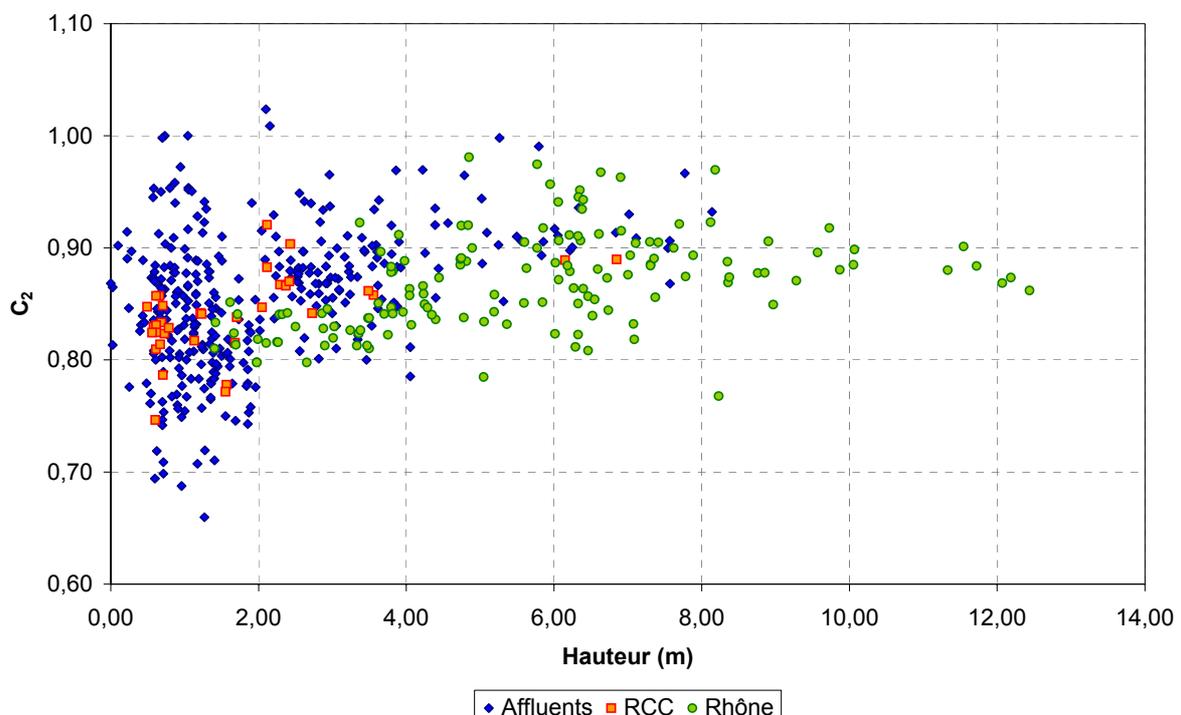


Figure 5 - Valeurs de C_2 par groupe (Rhône, Affluents et RCC)

Cette figure montre que deux domaines peuvent être distingués, en fonction de la hauteur moyenne, indépendamment du groupe (Rhône, RCC ou affluents) :

- un domaine pour des hauteurs moyennes jusqu'à 2,2 m, où la dispersion des coefficients de surface C_2 est très importante. Cette dispersion peut s'expliquer par la forte influence de la rugosité et de la forme du profil à faible profondeur.
- un domaine pour les hauteurs moyennes supérieures à 2,2 m, où la dispersion des coefficients de surface C_2 est moins importante

Par la suite, on regroupe les valeurs des trois groupes, pour ne retenir que deux domaines, en fonction de la hauteur moyenne, comme résumé dans le tableau 4 :

Tableau 4 - Coefficients de surface C_2

	Moyenne	Écart-type (k=1)	Écart-type relatif
Échantillon complet	0,858	0,056	6,5 %
Domaine $h > 2,2$ m	0,880	0,041	4,6 %
Domaine $h < 2,2$ m	0,835	0,061	7,3 %

Sur la figure suivante, les traits rouges représentent les valeurs moyennes pour le domaine $h < 2,2$ m et $h > 2,2$ m ; les pointillés oranges représentent les limites de l'intervalle à deux écarts-types (incertitude à 95%).

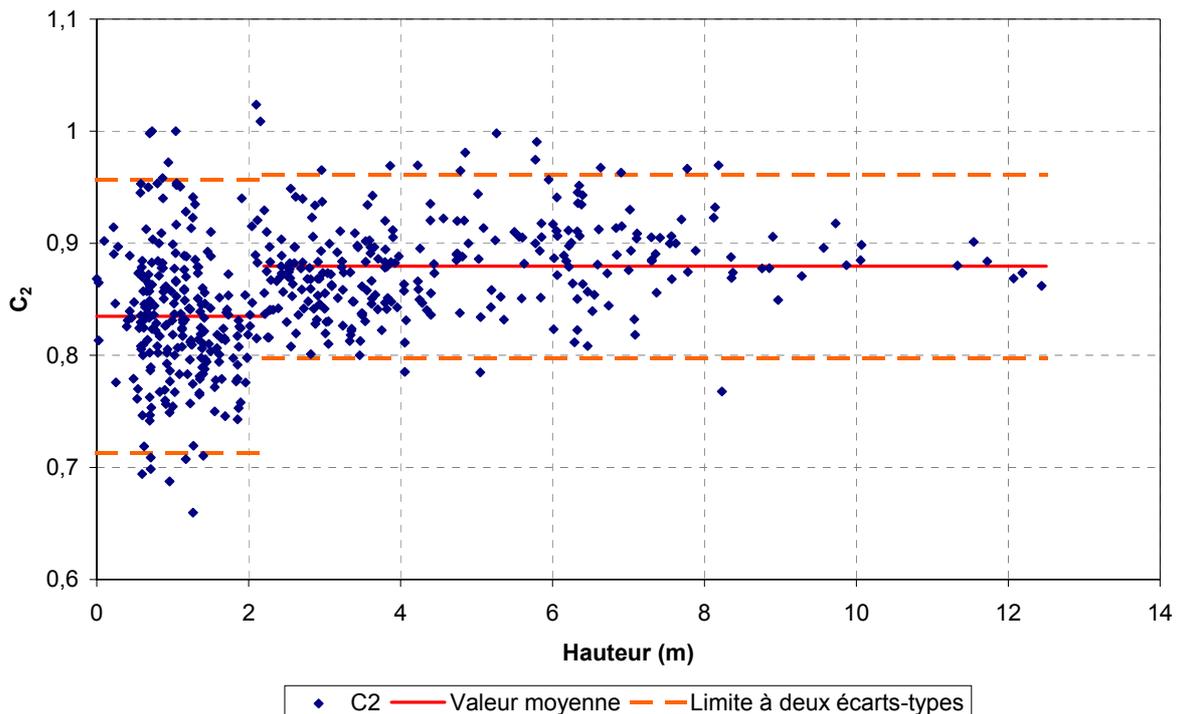


Figure 6 - Valeurs de C_2 en fonction de la hauteur moyenne

On observe que la hauteur a une influence sur la valeur du coefficient de surface C_2 , puisque la valeur moyenne du coefficient augmente légèrement avec la hauteur. Cependant, cette corrélation reste relativement faible et il n'est pas pertinent de proposer une modélisation du coefficient en fonction de la hauteur. Par contre, l'influence de la hauteur sur la dispersion des valeurs est plus visible, avec la distinction en deux domaines : hauteur moyenne inférieure à 2,2 m et hauteur moyenne supérieure à 2,2 m, avec une valeur moyenne et une dispersion propres sur chaque domaine.

L'application de cette distinction intervient dans le choix du coefficient de surface à utiliser, comme détaillé dans le paragraphe suivant.

2.5.5 Coefficient de surface C_2 et incertitude associée

Le paragraphe précédent montre qu'il existe plusieurs choix possibles pour le coefficient C_2 , et que le choix de la valeur de C_2 a une influence sur l'incertitude qu'il convient de lui associer. Le choix du coefficient C_2 et le calcul de son incertitude-type sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5 - Choix de C_2 et de $u(C_2)$

Situation		C_2	Incertitude-type $u(C_2)$
Site disposant de nombreux jaugeages complets (>10)		$C_2=C_{2m}$, où C_{2m} est la valeur moyenne des n valeurs de C_{2i} calculées sur le site : $C_{2m} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i C_{2i}$	$u(C_2) = \sigma$, où σ est l'écart-type expérimental des n valeurs de C_{2i} calculées sur le site : $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (C_{2i} - C_{2m})^2}{n-1}}$
Quelques jaugeages (< 10)	Hauteur $h > 2,2$ m	$C_2=C_{2m}$	$u(C_2) = 0,041$
	Hauteur $h < 2,2$ m	$C_2=C_{2m}$	$u(C_2) = 0,061$
Aucun jaugeage complet (site sur le Rhône ou ses affluents)	<i>Hauteur inconnue (Cas "échantillon complet")</i>	$C_2=0,858$	$u(C_2) = 0,056$ (soit $\frac{u(C_2)}{C_2} = 6,5\%$)
	Hauteur $h > 2,2$ m (Cas A)	$C_2 = 0,880$	$u(C_2) = 0,041$ (soit $\frac{u(C_2)}{C_2} = 4,6\%$)
	Hauteur $h < 2,2$ m (Cas B)	$C_2 = 0,835$	$u(C_2) = 0,061$ (soit $\frac{u(C_2)}{C_2} = 7,3\%$)
Site totalement inconnu	(Cas C)	$C_2=0,85$	$u(C_2) = 0,060$ ^[15] (soit $\frac{u(C_2)}{C_2} = 7,1\%$)

En grisé - italique dans le tableau : cas théoriques non rencontrés dans le cadre CNR

¹⁵ L'écart entre la valeur de C_2 utilisée pour le calcul et la valeur C_{2m} représentant la meilleure estimation du coefficient C_2 est considérée comme une correction non appliquée, donc ajoutée linéairement à l'incertitude élargie (selon la norme NF ENV 13005) : $U(C_2) = 2 \cdot \sigma + |C_2 - C_{2m}|$, où σ est l'écart-type des coefficients déterminés expérimentalement, C_2 est la valeur utilisée par défaut dans le calcul (ici égale à 0,85) et C_{2m} la valeur du coefficient calculée à partir des jaugeages.

$$\text{Alors, } u(C_2) = 0,056 + \frac{|0,85 - 0,858|}{2} \approx 0,060 \text{ d'où } \frac{u(C_2)}{C_2} \approx 7,1\%$$

Ce tableau présente quatre cas particuliers : cas "échantillon complet", cas A, cas B et cas C. Le cas "échantillon complet" et le cas C sont cités de manière à être exhaustif (en grisé dans le tableau) : ils sont intéressants d'un point de vue théorique mais ne seront pas utilisés en pratique. En effet, dans le cadre des applications de la CNR, aucun site de jaugeage n'est totalement inconnu, le cas C ne sera donc a priori jamais rencontré. De même, pour les sites ne disposant pas de jaugeages complets, la hauteur moyenne est connue, on pourra donc choisir le cas A ($h > 2,2$ m) ou le cas B ($h < 2,2$ m).

La comparaison de ces quatre cas est représentée sur le graphique suivant, où l'incertitude du débit Q_2 est portée en abscisse (incertitude élargie avec $k=2$) et l'incertitude du débit Q est portée en ordonnée, pour les cas suivants :

- Cas "complet" : $C_2 = 0,858$, $u(C_2) = 0,056$, $\frac{u(C_2)}{C_2} = 6,5\%$
- Cas A : $C_2 = 0,880$, $u(C_2) = 0,041$, $\frac{u(C_2)}{C_2} = 4,7\%$
- Cas B : $C_2 = 0,835$, $u(C_2) = 0,061$, $\frac{u(C_2)}{C_2} = 6,5\%$
- Cas C : $C_2 = 0,85$, $u(C_2) = 0,060$, $\frac{u(C_2)}{C_2} = 7,1\%$

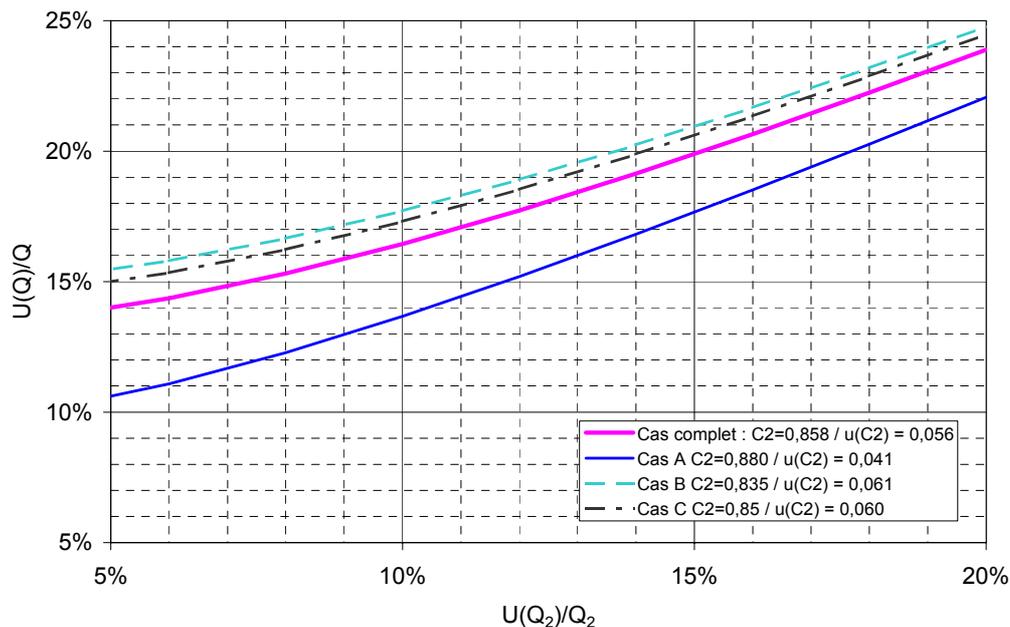


Figure 7 – Incertitude sur le débit Q calculé à partir de C_2 – Cas général

LECTURE DU GRAPHIQUE :

- en abscisse, on porte l'incertitude $U(Q_2)/Q_2$ associée au débit Q_2 déterminée lors du jaugeage de surface. En aucun cas, cette incertitude ne peut être inférieure à $\pm 5\%$ qui est la valeur minimale de l'incertitude associée à un jaugeage complet effectué dans les meilleures conditions (voir 2.4 et note ^[16]), d'où la valeur minimale de 5 % portée sur l'axe des abscisses.

¹⁶ On attribue ici, pour la clarté de la démonstration, une incertitude minimale de $\pm 5\%$ à un jaugeage de surface. Quelle que soit la norme appliquée, l'incertitude d'un jaugeage en un point est nécessairement dégradée par rapport au jaugeage complet. Ainsi, par exemple, le tableau E.4 de la norme NF EN ISO 748 mentionne que

- en fonction du cas dans lequel on se situe (voir tableau page précédente), on reporte sur l'axe des ordonnées pour obtenir l'incertitude $U(Q)/Q$ associée au débit total calculé avec la relation $Q = C_2 \cdot Q_2$.

Par exemple : dans le cas A, avec $U(Q_2)/Q_2 = \pm 9 \%$, $U(Q)/Q$ est de l'ordre de $\pm 13 \%$.

Analyse de la figure 7

- le cas A, représenté en bleu sur la figure, est le plus favorable : c'est en effet le cas où l'on a la plus faible incertitude-type associée au coefficient C_2 .
 - le cas B, représenté en pointillés bleu clair, est le plus défavorable : c'est le cas où l'on utilise le coefficient pour une hauteur moyenne inférieure à 2,2 m ;
- ⇒ dans le meilleur des cas, si l'on suppose que l'incertitude du jaugeage en surface est de l'ordre de $\pm 5 \%$ (valeur minimale que l'on peut attendre sur un jaugeage "complet"), alors l'incertitude associée au débit Q calculé par la relation $Q = C_2 \cdot Q_2$ est au minimum supérieure à $\pm 10 \%$.

2.5.6 Application au cas particulier de Beaucaire

L'analyse menée aux paragraphes précédents est pertinente pour des sites que l'on ne dispose pas des informations suffisantes sur les coefficient C_2 et C_6 du site donné (d'où l'utilisation de coefficients de substitution dans les cas répertoriés "A" à "C" pour C_2 , "D" et "E" pour C_6). Il peut être intéressant de conduire une analyse identique sur un site où ce coefficient est connu, comme le site de la trailla de Beaucaire (PK 272.000).

Sur ce site, le coefficient C_2 calculé à partir des jaugeages complets est $C_{2 \text{ Beaucaire}} = 0,873$, avec un écart-type $\sigma(C_{2 \text{ Beaucaire}}) = 0,036$ (soit 4,1 %). En s'appuyant sur la même démarche que dans les paragraphes précédents, on obtient la figure suivante :

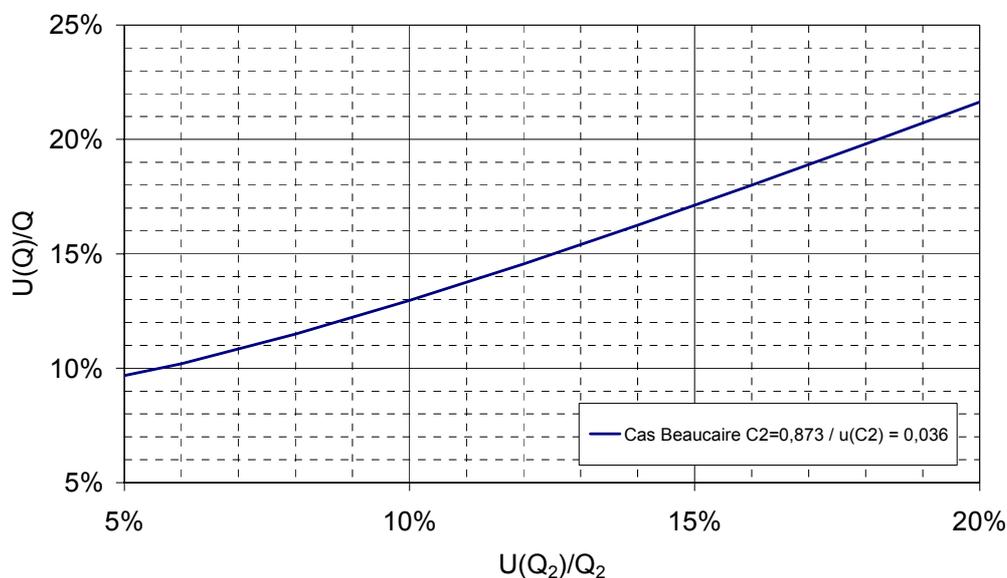


Figure 8 – Incertitude sur le débit Q calculé à partir de C_2 – Exemple de la trailla de Beaucaire

l'incertitude associée au nombre de verticales passe de $\pm 1 \%$ pour une méthode en six points à $\pm 15 \%$ pour une méthode en un point, l'application de la relation (5) page 15 conduit alors à une valeur minimale de l'incertitude de l'ordre de $\pm 6,2 \%$. Ainsi, la valeur de $\pm 5 \%$ qui est utilisée dans le cadre de cette démonstration est une valeur "minimum minimorum".

Ainsi, on peut estimer que la meilleure incertitude que l'on puisse obtenir sur le débit $Q = C_2 \cdot Q_2$ calculé à partir d'un jaugeage de surface sur le site de la traile de Beaucaire est de l'ordre de $\pm 10\%$.

2.5.7 Application au cas de l'Isère – site où $u(C_2)/C_2$ est minimal

Le même calcul que précédemment est mené avec les données du site de l'Isère, site où l'écart-type du coefficient C_2 est le minimum de l'ensemble des sites.

Sur ce site, le coefficient C_2 calculé à partir des jaugeages complets est $C_{2 \text{ Isère}} = 0,877$, avec un écart-type $\sigma(C_{2 \text{ Isère}}) = 0,028$ (soit 3,2 %).

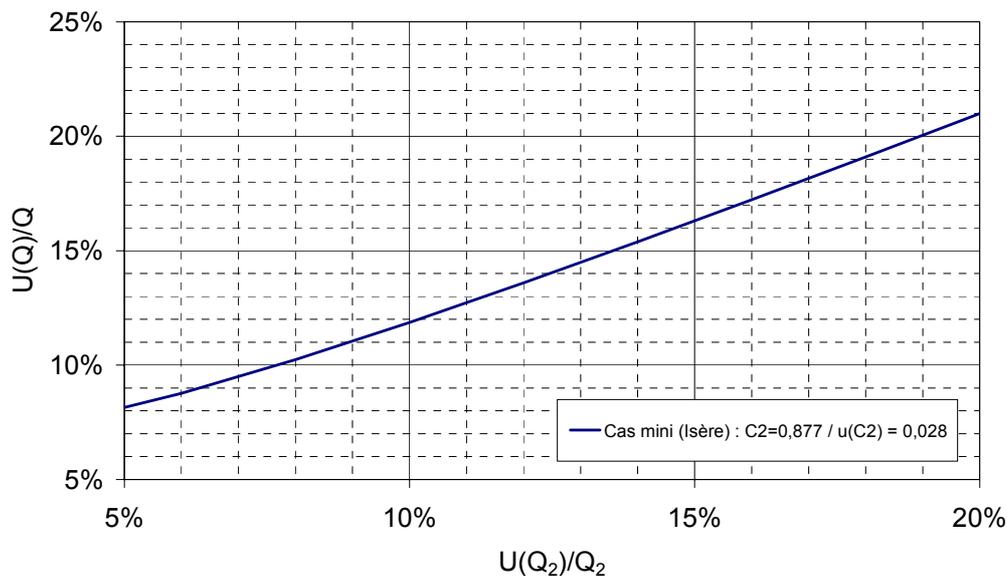


Figure 9 – Incertitude sur le débit Q calculé à partir de C_2 – Exemple de l'Isère

Ainsi, on peut estimer que la meilleure incertitude que l'on puisse obtenir sur le débit $Q = C_2 \cdot Q_2$ calculé à partir d'un jaugeage de surface, dans le cas le plus favorable parmi l'ensemble des sites considérés, est de l'ordre de $\pm 8\%$.

2.5.8 Préconisations

- Le gain d'incertitude réalisé en utilisant le coefficient à 0,6 h plutôt que le coefficient de surface est à comparer à la durée de mise en œuvre du jaugeage. Si, pour une raison pratique, le jaugeage doit être effectué rapidement, il est plus intéressant de réaliser un jaugeage à 0,2 m, en augmentant le nombre de verticales, que de réaliser un jaugeage à 0,6 h.
- Quelle que soit la méthode retenue, il est préférable d'utiliser le coefficient calculé pour la station considérée. A défaut, il est recommandé d'utiliser le coefficient moyen calculé sur un ensemble de sites (cas A et B du tableau 5 page 29), et en dernière solution (site inconnu) le coefficient par défaut donné dans la littérature (voir figure 7)
- Dans tous les cas de figure, l'utilisation du coefficient de surface C_2 pour calculer le débit $Q_{calculé} = C_2 \cdot Q_2$ ne permet pas d'avoir une incertitude inférieure à $\pm 8\%$ sur le débit total.

2.6 Estimation de l'incertitude de la moyenne de plusieurs jaugeages

Sur un site donné, à une date donnée, la CNR réalise généralement plusieurs jaugeages. En fonction des conditions, ce sont soit plusieurs jaugeages complets, soit un jaugeage complet et des jaugeages de surface. Ces jaugeages étant réalisés au cours d'une même journée, les paramètres mesurés peuvent refléter des conditions d'écoulement de la rivière très proches et se pose alors la question de calculer les valeurs moyennes du débit et de la hauteur, ainsi que les incertitudes associées à ces valeurs moyennes.

2.6.1 Cas général

Pour des mesures en laboratoire, lorsqu'il est possible de répéter les mesurages dans des conditions maîtrisées, les mesurages sont systématiquement répétés de manière à estimer la composante d'erreur aléatoire globale, qui tient compte de l'ensemble des erreurs aléatoires liées à l'instrumentation. Ces conditions de mesure maîtrisées sont des conditions se rapprochant au maximum des conditions de répétabilité : même mesurande, même méthode utilisant le même instrument de mesure, par le même opérateur dans des conditions d'environnement identiques. Les méthodes d'estimation des incertitudes décrites dans la norme NF ENV 13005 permettent alors d'estimer l'incertitude associée au résultat, en appliquant la loi de propagation des incertitudes au modèle suivant :

$$Y = \bar{Y}_{lu} + C \quad (21.)$$

avec :

- \bar{Y}_{lu} la valeur moyenne des mesures ;
- C la valeur de la correction destinée à corriger les erreurs systématiques.

L'application de la loi de propagation des incertitudes conduit à :

$$u^2(Y) = u^2(\bar{Y}_{lu}) + u^2(C) \quad (22.)$$

avec

- $u(\bar{Y}_{lu})$ l'incertitude-type associée à la valeur moyenne des mesures ;
- $u(C)$ l'incertitude-type associée à valeur de la correction C .

L'incertitude-type associée à la valeur moyenne des mesures est :

$$u(\bar{Y}_{lu}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (23.)$$

où σ est l'écart-type des valeurs mesurées et n est le nombre de valeurs^[17].

Ainsi, lorsque l'on répète les mesurages dans des conditions de répétabilité :

- l'incertitude correspondant aux erreurs aléatoires est divisée par \sqrt{n} ;
- l'incertitude correspondant aux erreurs systématiques reste constante.

¹⁷ Par application de la loi d'additivité des variances, pour des variables aléatoires de même moyenne et de même variance σ^2 : ce qui implique donc d'être dans des conditions de répétabilité, conditions pour lesquelles "on mesure le même mesurande".

2.6.2 Application aux jaugeages au moulinet réalisés par la CNR

Dans la mesure du possible, la CNR réalise plusieurs jaugeages successifs sur le même site, au cours de la même journée. Cependant, les conditions dans lesquelles les mesurages sont réalisés ne sont pas des conditions de répétabilité. En effet, plusieurs paramètres ne sont pas identiques d'un jaugeage à l'autre :

- tout d'abord, le moulinet utilisé peut connaître un dysfonctionnement au cours du jaugeage (impact d'un corps flottant, etc.) et il n'est pas possible physiquement de procéder à un étalonnage ou une vérification du moulinet sur site. Le protocole de mesure prévoit donc, s'il est possible de refaire un jaugeage sur le même site au cours d'une journée de mesure, d'utiliser des moulinets différents. L'instrument de mesure n'est donc pas le même ;
- ensuite, le mesurande (le débit de la rivière) n'étant pas maîtrisé par les opérateurs, rien ne permet de penser que celui-ci sera identique pour les deux jaugeages. En pratique, les jaugeages au moulinet étant relativement longs, il est même possible que le débit change au cours d'un même jaugeage (comme décrit dans la norme NF EN ISO 748) ;
- pour des raisons opérationnelles, le 2^{ème} jaugeage réalisé sur un même site est souvent un jaugeage de surface et non un jaugeage complet¹⁸ ; la méthode de mesure n'est donc pas la même.

Ainsi, l'instrument de mesure et la méthode ne sont pas identiques, et le mesurande est susceptible d'avoir changé : les conditions de répétabilité ne sont pas remplies et l'écart entre les valeurs de débit qui va servir à estimer $u(\bar{Y}_{lu})$ reflète à la fois les variations possibles du débit entre les deux jaugeages et la dispersion des valeurs liées à la méthode de mesure et à l'instrumentation, déjà prise en compte – au moins partiellement - dans la composante $u(C)$. En l'absence de méthode de mesure présentant des incertitudes nettement plus petites (nettement inférieures à 1 %), il n'est pas possible de mettre en œuvre des expériences permettant de distinguer les contributions relatives de ces deux composantes afin d'éliminer les redondances partielles. En l'absence d'informations permettant de mieux estimer chacune des composantes entrant dans l'incertitude $u(C)$, on suivra les principes classiques de la métrologie et on appliquera alors la relation (22) ce qui aboutira au résultat suivant :

Dans les conditions des jaugeages au moulinet réalisés par la CNR telles que décrites ci-dessus, l'incertitude associée à la valeur moyenne de deux jaugeages (ou plus) sera supérieure à l'estimation de l'incertitude associée à un jaugeage unique. Cette particularité est liée au fait que les jaugeages ne sont pas réalisés en conditions de répétabilité.

¹⁸ Ce jaugeage est utilisé pour qualifier le résultat du jaugeage complet : si l'écart entre les deux paraît important aux jaugeurs (supérieur à 15 %), cela indique soit une variation du régime au cours du jaugeage complet soit un dysfonctionnement au cours de l'un des deux jaugeages.

2.7 Conclusion sur l'incertitude liée à un jaugeage au moulinet

2.7.1 Application des normes NF EN ISO 748 et NF ENV 13005

Les deux normes étudiées ne sont pas complètement comparables, car ne s'appuyant pas tout à fait sur les mêmes approches. Toutes deux présentent des limites dans leur application aux jaugeages au moulinet (voir Tableau 2 - Comparaison des normes NF EN ISO 748 et NF ENV 13005, page 28):

Il n'est pas possible de distinguer des domaines sur lesquels une norme ou l'autre serait préférable, mais il convient de noter que dans le cadre de comparaisons de l'influence des sources d'erreurs (nombre de verticales, influence du moulinet, etc.), il est bien sur nécessaire de rester dans l'un ou l'autre des deux référentiels.

On note également que pour un faible nombre de verticales, les deux normes présentent des résultats qui peuvent être très différents.

Par contre, pour un nombre de verticales entre 20 et 30, l'incertitude minimale vers laquelle les deux normes convergent, pour un jaugeage complet ("toutes profondeurs"), est de l'ordre de $\pm 5\%$.

2.7.2 Résultats

A l'issue de cette analyse, on peut retenir les valeurs suivantes :

- L'incertitude **minimale** pour un **jaugeage complet** est de l'ordre de $\pm 5\%$;
- l'incertitude minimale pour un jaugeage en un point à 0,6 h est de l'ordre de $\pm 8\%$ (ANNEXE 7) ;
- l'incertitude **minimale** pour un **jaugeage de surface** est **supérieure à $\pm 8\%$** pour un site dont le coefficient de surface est connu (voir figure 9), sur le Rhône ou ses affluents (ANNEXE 3) ;
- l'incertitude **minimale** pour un **jaugeage de surface** est **supérieure à $\pm 14\%$** pour un site inconnu (voir figure 7).

2.7.3 Préconisations pratiques

L'objectif des jaugeages est de positionner des points $\{h, Q\}$ pour construire la courbe $Q=f(h)$ propre au site, en utilisant des points $\{h, Q\}$ présentant les incertitudes les plus faibles possibles. Dans les conditions d'application de la CNR, plusieurs jaugeages au moulinet sont réalisés le même jour, mais ces jaugeages ne sont pas réalisés en conditions de répétabilité, il n'est donc pas utile de faire le moyenne de plusieurs jaugeages successifs réalisés sur un même site.

D'après l'expérience des jaugeurs de la CNR et l'étude des incertitudes conduite par le CETIAT, les jaugeages en un point à 0,6 h ne sont pas pertinents : ils apportent beaucoup moins d'informations qu'un jaugeage complet (donc une incertitude plus importante), pour une durée de mesurage importante. Ces jaugeages ne font donc pas l'objet de préconisations particulières et l'on retiendra les deux situations suivantes :

- si les conditions le permettent, on effectuera un jaugeage complet en six points par verticale, qui permettra de placer le point $\{h, Q\}$ sur la courbe avec les meilleures incertitudes (dans le meilleur des cas autour de $\pm 5\%$), et d'affiner la connaissance de la valeur du coefficient de surface C_2 du site en complétant la base de données (cf. ANNEXE 3 à ANNEXE 6) ;
- pour des conditions particulières telles qu'une variation rapide du débit ou encore des conditions dans lesquelles la sécurité des opérateurs interdit de réaliser un jaugeage complet, on effectuera un jaugeage de surface et on utilisera le coefficient C_2 déterminé pour le site, ou à défaut un coefficient de surface C_2 forfaitaire (cf. tableau 3). L'incertitude minimale sur le débit obtenu sera alors bien sûr plus forte que dans le cas d'un jaugeage complet, puisque supérieure à $\pm 8\%$ dans le cas le plus favorable, et de l'ordre de 14% dans le cas le plus général (cas "complet" de la figure page 29).

3 Jaugeages ADCP

La méthode de mesure de débit par ADCP connaît une progression croissante d'utilisation. Elle présente un avantage considérable en période de crue : la rapidité de réalisation du mesurage. Ce qui permet de réduire l'incertitude de mesure liée à l'évolution de l'écoulement et de sécuriser davantage l'intervention des équipes de jaugeage.

A ce jour, il n'existe pas de résultats formalisés quant à la détermination de l'incertitude associée à une mesure de débit réalisée à l'ADCP. Deux voies sont explorées dans le cadre de cette étude :

- application des méthodes utilisées pour les jaugeages au moulinet ;
- exploitation des mesures comparatives entre des jaugeages au moulinet et des jaugeages à l'ADCP menés par la CNR sur 15 sites différents représentant 19 mesures.

3.1 *Présentation de la méthode ADCP*

Le principe de la mesure par ADCP est de déterminer la vitesse des particules en suspension dans l'écoulement (par effet Doppler). Ces vitesses sont scrutées sur plusieurs verticales, et ce sur plusieurs verticales le long de la section. Le profileur est embarqué, ce qui permet de faire une traversée d'une rive à l'autre. Au fur et à mesure que le profileur se déplace, les vitesses sont intégrées sur la section.

Les principales sources d'erreur sont les suivantes :

- (a) Justesse de la mesure de vitesse (avec l'hypothèse qu'il n'y a pas de phénomène de glissement des particules : la vitesse des particules est supposée représentative de la vitesse de l'eau) ;
- (b) Justesse de la mesure de section ;
- (c) Extrapolation du champ des vitesses pour la zone sous la surface et pour le fond, zones pour lesquelles le profileur ne valide pas de mesure de vitesse ;
- (d) Déplacement du fond.

Les sources d'erreur (a), (b) et (c) sont de même nature que dans le cas des jaugeages au moulinet, tandis que la source d'erreur (d) est propre à la méthode ADCP. Il est possible de déterminer si le fond du cours d'eau se déplace ou non en appliquant la méthode présentée dans le rapport de projet de fin d'études d'Audrey OLIVIER de l'Ecole Centrale de Lyon effectué à la CNR en 2004 « *Maîtrise de la précision de mesure de débit avec un profileur de courant à effet Doppler (ADCP)* », et lors du congrès « ADCPs in action » (Nice, France, Juin 2004) par la CNR.

3.2 *Estimation des incertitudes par extrapolation des méthodes appliquées aux moulinets*

L'établissement des formules d'estimation des incertitudes de mesure, dans le cas de la norme NF EN ISO 748 comme dans le cas de la norme NF ENV 13005, repose sur l'hypothèse d'absence de corrélations entre les estimations des grandeurs (voir 2.2 et 2.3). Dans le cas de l'application de ces formules à la méthode ADCP, cette hypothèse est tout aussi importante. Les sources d'erreurs liées aux instruments sont différentes du cas du jaugeage au moulinet, la répartition des composantes d'erreur systématiques et des composantes d'erreur aléatoires est également différente du cas du jaugeage au moulinet et le nombre de mesures est très supérieur. Ainsi, l'effet des corrélations sera plus important, mais impossible à estimer ou à comparer au cas du jaugeage au moulinet. Pour ces raisons, il n'est pas pertinent d'appliquer les méthodes des normes NF EN ISO 748 ou NF ENV 13005 au cas des jaugeages à l'ADCP pour estimer les incertitudes. Ces méthodes peuvent cependant être appliquées pour identifier les sources d'erreur sur lesquelles jouer pour réduire l'incertitude.

3.3 Estimation des incertitudes des mesures ADCP par comparaison avec les mesures au moulinet

Compte tenu de ce qui précède, le seul moyen de déterminer l'incertitude de mesure à l'ADCP est d'établir une comparaison avec des mesures réalisées au moulinet.

Depuis près de 10 ans, la Compagnie Nationale du Rhône a réalisé des mesures comparatives entre l'ADCP 1200kHz (premier ADCP de la CNR acheté en 1994) et des moulinets. Ces mesures comparatives ont été effectuées dans les conditions suivantes : deux équipes étaient présentes sur le site, une équipée d'un ADCP, l'autre d'un moulinet, et elles effectuaient leur jaugeage en parallèle. Les débits déterminés par ADCP ont été comparés aux débits obtenus par jaugeage au moulinet pour estimer l'incertitude de mesure des jaugeages réalisés à l'ADCP (cf. ANNEXE 14).

3.3.1 Qualification des valeurs retenues pour la comparaison

- Les valeurs retenues pour cette comparaison sont issues de 19 jaugeages réalisés sur 15 sites, pour des débits allant de 11 m³/s à 3 500 m³/s, des vitesses de 0,1 m/s à 2,5 m/s et des hauteurs supérieures à 2 m, sur une période de près de 10 années (ANNEXE 14).);
- la méthode ADCP étant sensible à une source d'erreur supplémentaire par rapport aux jaugeages au moulinet (déplacement du fond), la stabilité du fond a été vérifiée pour les 19 jaugeages considérés ;
- selon le mode opératoire de la CNR, les débits ADCP sont calculés à partir de 4 valeurs au moins ;
- les 19 jaugeages considérés ont été réalisés avec un même modèle d'ADCP (1200 kHz).

En utilisant une partie des principes décrits dans les normes NF ISO 5725-1 à 6, il est possible de déterminer la justesse et la répétabilité des mesures à l'ADCP, en considérant que la méthode au moulinet constitue la référence. Cette considération suppose que l'incertitude d'un jaugeage au moulinet est faible devant celle de l'ADCP. Or, on verra par la suite que cette hypothèse n'est pas vérifiée. Nous verrons alors plus loin les implications de cette hypothèse.

Les 19 valeurs analysées^[19] figurent en ANNEXE 14 . Ces mesures sont issues d'un fichier plus important, dont les valeurs suspectes ont été analysées. Les valeurs déclarées aberrantes ont été éliminées, les valeurs suspectes non déclarées comme aberrantes ont été conservées. Ainsi, en considérant le mode d'obtention des valeurs analysées, on peut considérer que ces mesures permettent d'estimer la justesse et la reproductibilité de la méthode ADCP (modèle 1200).

Tableau 6 – Justesse et reproductibilité de la comparaison Moulinet / ADCP (modèle 1200)

Justesse ^[20]	Reproductibilité
0,5 %	3,7 %

¹⁹ Au sens de l'analyse statistique, l'échantillon peut paraître petit (19 valeurs) ; c'est cependant une information exploitable pour mener l'analyse.

²⁰ Ces valeurs de justesse et de reproductibilité sont calculées à partir des valeurs des comparaisons, elles sont donc liées à l'échantillon utilisé. De nouvelles comparaisons permettront d'affiner ces valeurs.

- La justesse est la moyenne des écarts relatifs $(Q_{ADCP}-Q_{moulinet})/Q_{moulinet}$ sur toute la plage de débits.
- La reproductibilité est l'écart-type des écarts relatifs $(Q_{ADCP}-Q_{moulinet})/Q_{moulinet}$ sur toute la plage de débits.

Les valeurs de justesse et de reproductibilité obtenues dans le tableau ci-dessus sont calculées en considérant que l'incertitude de la valeur de référence (moulinet) est faible devant l'incertitude de la valeur obtenue par la méthode étudiée (ADCP). Nous savons que cette hypothèse n'est pas vérifiée puisque l'incertitude minimale des jaugeages au moulinet est estimée à $\pm 5\%$ (voir paragraphe 2.7). Ainsi, la reproductibilité et la justesse ici estimées ne sont pas attribuables uniquement à la méthode ADCP, mais également à la méthode utilisée pour obtenir la valeur de référence.

3.3.2 Évaluation de la reproductibilité

Lors de cette comparaison, la reproductibilité des écarts a pu être estimée. L'écart-type de reproductibilité est de 3,7 % pour l'ADCP 1200 kHz. L'incertitude élargie correspondante est donc de $\pm 7,4\%$ ($k = 2$). Cette incertitude de reproductibilité comprend la combinaison des composantes associées au moulinet et des composantes associées à l'ADCP, sans qu'il soit possible de les distinguer.

3.3.3 Évaluation de la justesse

Lors de la comparaison des résultats obtenus par la méthode ADCP et par la méthode moulinet dans des conditions de reproductibilité, une erreur de justesse de 0,5 % a été évaluée. En raison de l'incertitude de mesure des jaugeages au moulinet et de l'incertitude de reproductibilité de la comparaison, ce biais de 0,5 % ne peut être jugé comme significatif²¹.

3.3.4 Combinaison de la justesse et de la reproductibilité

L'application des principes de calcul de la norme NF ENV 13005 permet de combiner les incertitudes associées à l'erreur de justesse et à la reproductibilité. L'erreur de justesse ne pouvant être attribuée à l'ADCP ou au moulinet, on traitera cette composante comme une correction non appliquée, c'est à dire par un ajout linéaire à l'incertitude élargie. Ainsi, l'incertitude de mesure associée à la comparaison des deux méthodes est :

$$0,5 + 2 \times 3,7 = 7,9\% \quad (k = 2). \quad (24.)$$

L'incertitude ainsi obtenue est due à la combinaison des erreurs de mesure des deux méthodes de mesure, c'est donc la somme quadratique des composantes d'incertitude de chacune des deux méthodes, soit :

$$2 \sqrt{\left(\frac{U_{ADCP}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{Moulinet}}{2}\right)^2} = 7,9\% \quad (25.)$$

d'où

$$U_{ADCP} = 2 \sqrt{\left(\frac{7,9}{2 \cdot 100}\right)^2 - \left(\frac{U_{Moulinet}}{2}\right)^2} \quad (26.)$$

²¹ Si la mobilité du fond échappe aux jaugeurs lors du dépouillement des mesures, le débit déterminé par l'ADCP est sous-évalué. L'ensemble des valeurs utilisées dans cette comparaison ont été vérifiées et aucun fond mobile n'a été détecté. Le biais de 0,5 % est de sens contraire à une sous-évaluation du débit, ce qui renforce l'idée que cet écart n'est pas significatif.

avec :

- U_{ADCP} l'incertitude élargie relative du débit ADCP ;
- $U_{Moulinet}$ l'incertitude élargie relative du débit Moulinet.

La figure suivante représente la composante d'incertitude de l'ADCP en fonction de la composante d'incertitude du moulinet de manière à ce que la somme quadratique des incertitudes-types de ces deux composantes corresponde à une incertitude élargie constante à $\pm 7,9\%$ ($k = 2$).

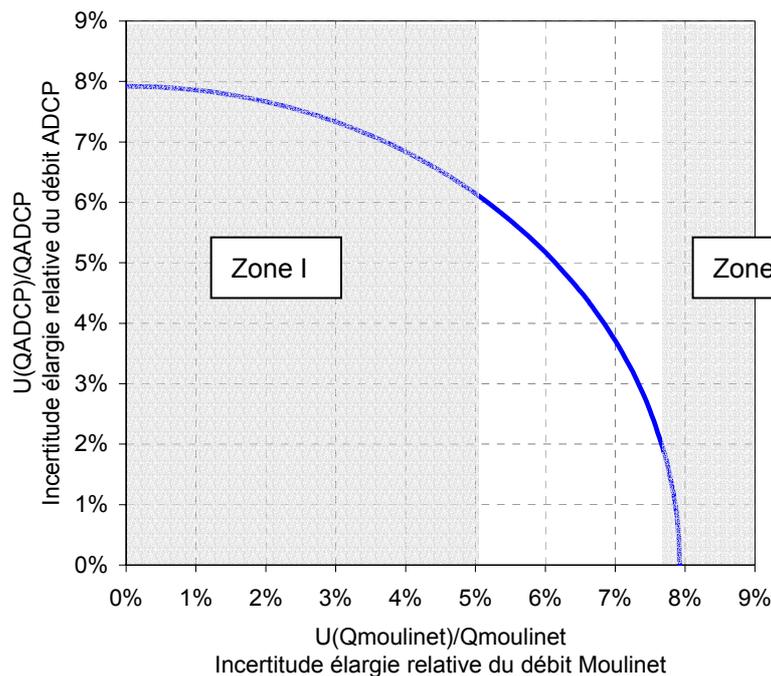


Figure 10 – Combinaison des composantes de l'ADCP BB 1200 kHz et du moulinet

La courbe obtenue sur la figure ci-dessus est issue d'un calcul – il est nécessaire de restreindre le domaine d'application en fonction des possibilités réelles. Ainsi, les deux zones extrêmes de la courbe doivent être analysées :

ZONE I Dans cette zone du graphique, l'incertitude élargie du jaugeage au moulinet est inférieure à $\pm 5\%$, ce qui ne semble pas raisonnable au vu de l'expérience acquise sur le terrain et des estimations d'incertitude réalisées à partir des méthodes vues au paragraphe 2.2. Cette zone ne doit pas être exploitée pour notre analyse (elle apparaît en grisé sur la figure).

ZONE II Dans cette zone du graphique, l'incertitude élargie du jaugeage à l'ADCP est inférieure à $\pm 2\%$, ce qui paraît peu probable au vu des éléments acquis au cours de cette étude (justesse des mesures de vitesse, justesse des mesures de section, etc., voir paragraphe 3.3.1). Comme la zone I, cette zone ne doit pas être exploitée (elle apparaît en grisé sur la figure).

UTILISATION DE LA COURBE Avec les données étudiées, la comparaison des jaugeages au moulinet et à l'ADCP présente une incertitude élargie de $\pm 7,9\%$. Supposons que la valeur moyenne de l'incertitude élargie des jaugeages au moulinet soit de $\pm 6\%$. Reportons cette valeur sur l'axe des abscisses ; l'intersection de la courbe avec la droite passant par cette abscisse donne une ordonnée à environ $\pm 5,0\%$ ($k = 2$). Cette valeur est l'incertitude élargie (avec $k = 2$) que l'on peut attendre sur les jaugeages ADCP.

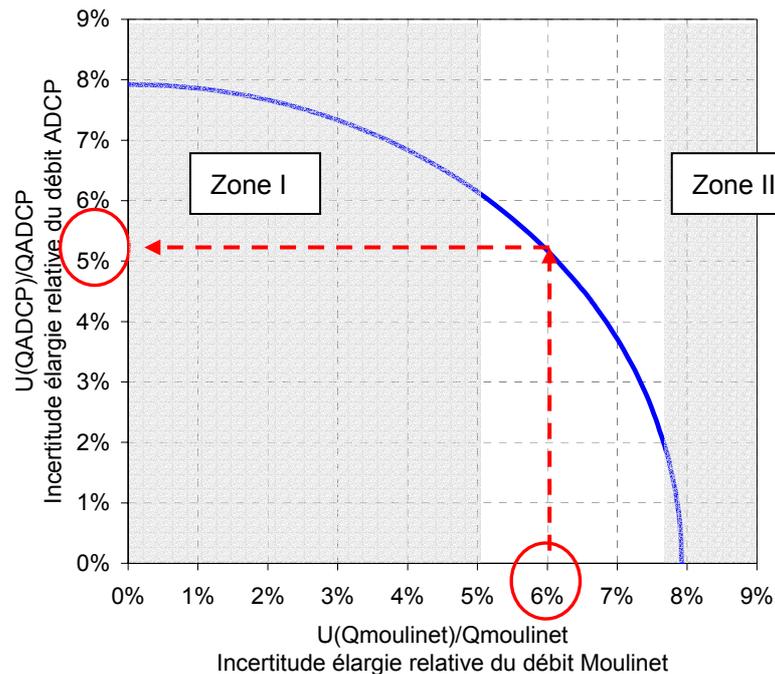


Figure 11 - Exemple d'application

ANALYSE Cette courbe a été construite à partir d'un ensemble de résultats, elle est donc valide en moyenne et non pour des cas particuliers. Si l'on considère que l'incertitude des jaugeages au moulinet est généralement supérieure à $\pm 5\%$ (c'est à dire hors de la zone I), alors l'incertitude des jaugeages à l'ADCP est au maximum égale à $\pm 6,0\%$. Cette valeur constitue, sur la base des cas étudiés, la valeur maximale de l'incertitude que l'on peut attribuer à la méthode ADCP.

On peut donc en conclure que la méthode ADCP présente des incertitudes inférieures à $\pm 6\%$.

Si l'on considère que la valeur de $\pm 5\%$ attribuée aux jaugeages au moulinet est optimiste, alors on en conclut que l'incertitude de jaugeage à l'ADCP est du même ordre de grandeur que l'incertitude de jaugeage au moulinet, voire inférieure.

En conséquence, il n'est pas judicieux d'utiliser les mesures au moulinet pour servir de référence dans la caractérisation des performances métrologiques de l'ADCP, puisque ces dernières présentent des performances métrologiques du même ordre que les mesures au moulinet.

3.3.5 Conclusion sur l'incertitude de mesure des jaugeages réalisés à l'ADCP

- Le nombre de mesures analysées et les conditions d'obtention des mesures permettent d'évaluer la justesse et la reproductibilité de la comparaison ADCP 1200 kHz – Moulinet en menant une analyse statistique selon les normes de la série 5725.
- L'incertitude de la méthode de jaugeage au moulinet n'étant pas négligeable devant la valeur de reproductibilité obtenue, il n'est pas possible de conclure que la valeur estimée est l'incertitude de reproductibilité de la méthode ADCP seule.
- Il est par contre possible de conclure que l'incertitude de mesure de la méthode ADCP, pour l'appareil utilisé (modèle 1200 kHz), est nécessairement inférieure à la valeur de $\pm 6,0 \%$ ($k = 2$), et très certainement inférieure à $\pm 5 \%$ si l'on considère que les incertitudes moyennes des jaugeages au moulinet sont supérieures à $\pm 5 \%$ ^[22]. On rappelle que ces valeurs ont été obtenues par l'analyse de 19 jaugeages réalisés sur 15 sites, pour des débits allant de 11 à 3 500 m³/s, des vitesses de 0,1 à 2,5 m/s et des hauteurs supérieures à 2 m, sur une période de près de 10 années. Ces valeurs d'incertitude s'appliquent au débit issu d'un jaugeage réalisé selon le protocole CNR, c'est-à-dire sur la moyenne d'au moins quatre mesures effectuées avec l'ADCP ;
- Cette valeur d'incertitude pourra être affinée en répétant les essais selon le même protocole, pour le modèle 1200 kHz d'une part et pour d'autres modèles d'autre part.
- A l'issue de cette analyse, les incertitudes des mesures obtenues par l'ADCP et par jaugeage complet au moulinet semblent proches. Toutefois, dans le cas d'un régime transitoire, la rapidité de mise en œuvre de l'ADCP permet de réduire l'influence de la variation du débit, ce qui limite l'incertitude due à ce phénomène.

4 Détection et traitement des valeurs aberrantes

Lors de l'analyse des données, certaines valeurs peuvent paraître suspectes car très écartées des autres valeurs. L'incertitude de mesure représente un intervalle de mesure dans lequel, statistiquement, chacune des valeurs observées a 95 % de chances de se situer (incertitude élargie avec $k = 2$). Il y a donc 5 % de chances qu'une valeur soit hors de l'intervalle défini par l'incertitude élargie, mais qu'elle appartienne à l'échantillon et qu'elle ne soit pas à rejeter.

Après repérage des valeurs suspectes (par exemple à l'aide d'un tri des valeurs), les causes d'erreur associées à ces mesures doivent être analysées.

Si cette analyse permet de déceler une erreur flagrante, relevant d'un dysfonctionnement d'un instrument de mesure, d'une mauvaise application d'une méthode de mesure, d'une erreur dans le relevé des valeurs, etc. alors cette valeur peut être considérée comme aberrante. Une valeur aberrante sera retirée de la série analysée, mais l'on prendra garde à conserver la trace de cette valeur et des dysfonctionnements ayant conduit à cette valeur.

Si l'analyse ne permet pas de considérer que la valeur est aberrante, alors elle doit être considérée comme faisant partie de l'échantillon. Si le nombre de valeurs suspectes (mais « non-aberrantes ») est important, il se peut que l'incertitude ait été sous-estimée. Une étude doit être conduite pour identifier quelle source d'erreur n'a pas été prise en compte, ou mal prise en compte, dans l'estimation de l'incertitude de mesure.

²² Toutes les valeurs d'incertitude élargie sont données avec un coefficient d'élargissement $k = 2$, correspondant à un niveau de confiance de 95 %.

5 Conclusion générale

La CNR réalise des mesures de jaugeage du Rhône et de ses affluents, en un certain nombre de stations déterminées, par deux méthodes : la méthode dite point par point au moulinet et la méthode à l'ADCP. La présente étude porte sur la détermination des incertitudes de mesure associées à chacune de ces deux méthodes.

Deux méthodes d'estimation des incertitudes de mesure ont été appliquées pour les jaugeages au moulinet : méthode de la norme NF EN ISO 748 (norme spécifique aux mesures de débit) et méthode de la norme NF ENV 13005 (norme générale d'estimation des incertitudes de mesure). Un modèle de calcul d'incertitude a été mis en place (feuilles de calcul Excel) et le calcul a été conduit sur les données de jaugeage de plusieurs sites. Ces deux méthodes montrent des résultats convergents mais très sensibles aux paramètres d'entrée et au choix du modèle, en raison notamment des termes de corrélation. La sensibilité est telle qu'il n'est pas possible de déterminer par ces méthodes une valeur « absolue » de l'incertitude. Cependant, ces méthodes peuvent être utilisées pour obtenir un ordre de grandeur des incertitudes de mesure minimales associées aux jaugeages au moulinet :

- l'incertitude **minimale** pour un **jaugeage toutes profondeurs** est de l'ordre de **$\pm 5 \%$** ;
- l'incertitude **minimale** pour un **jaugeage de surface** est **supérieure à $\pm 8 \%$** si le site est connu, dans le cas le plus favorable
- l'incertitude **minimale** pour un **jaugeage de surface** est **supérieure à $\pm 15 \%$** si le site est inconnu

En raison de la sensibilité aux paramètres d'entrée et au choix du modèle, l'application de ces mêmes méthodes n'est pas pertinente dans le cas des jaugeages ADCP. L'estimation de l'incertitude associée aux jaugeages ADCP est alors réalisée par une analyse statistique de données expérimentales. Ainsi, en s'appuyant sur les données historiques des comparaisons menées par la CNR sur un nombre de sites importants, pour une large gamme de conditions de débit et de vitesse (voir ANNEXE 14), il est démontré que l'incertitude des jaugeages ADCP est du même ordre de grandeur que l'incertitude moyenne des jaugeages réalisés au moulinet soit $\pm 6 \%$ à $\pm 7 \%$.

L'estimation des incertitudes de mesure de hauteur et l'estimation des incertitudes liées à la construction et à l'utilisation des courbes $Q=f(h)$ sont décrites dans la 2^{ème} partie du rapport : « Rapport d'étude CETIAT n°2460059 - Estimation des incertitudes de mesure des débits. Mesures de hauteur et construction des courbes ».

Enfin, à l'issue de cette étude, plusieurs pistes peuvent être explorées pour enrichir et affiner l'estimation des incertitudes :

- Pour l'application de la norme NF EN ISO 748, les incertitudes liées à l'influence du nombre de verticales et du nombre de points par verticale peuvent être estimées en exploitant l'ensemble des jaugeages disponibles (en analysant la dispersion des résultats lorsqu'on rejoue le même jaugeage avec un nombre restreint de verticales ou un nombre restreint de points par verticale).
- De la même manière, les incertitudes liées à la méthode de dépouillement peuvent être estimées en exploitant l'ensemble des jaugeages disponibles, en analysant la dispersion des résultats lorsqu'on rejoue le même jaugeage avec une autre pondération de la vitesse au fond.
- Cette étude montre que la variation du débit au cours du jaugeage ou entre deux jaugeages successifs est un élément important. Les méthodes d'estimation des incertitudes mises en place reposent sur l'hypothèse d'un régime établi ; une piste de travail est donc la prise en compte de l'incertitude liée à la variation de débit (régime transitoire). Cette variation de débit se traduit notamment par une fluctuation du niveau d'eau, donc une incertitude associée à la hauteur d'eau, qui doit être prise en compte dans le positionnement des points $\{h, Q\}$ lors de la construction des courbes $Q=f(h)$. Cet aspect sera traité dans le rapport d'étude CETIAT n° 2460059.

6 Annexes

ANNEXE 1	Références bibliographiques	29
ANNEXE 2	Formule d'interpolation au fond du logiciel de jaugeage de la CNR	29
ANNEXE 3	Coefficients C_6 et C_2 par site	29
ANNEXE 4	Données brutes C_2 et C_6 - Affluents	29
ANNEXE 5	Données brutes C_2 et C_6 - Rhône	29
ANNEXE 6	Données brutes C_2 et C_6 - Rhône court-circuité	29
ANNEXE 7	Coefficient C_6 - Définitions et calculs.....	29
ANNEXE 8	Coefficient $C_6 = \frac{Q_{mesuré}}{Q_6}$	29
ANNEXE 9	Coefficient $C_2 = \frac{Q_{mesuré}}{Q_2}$	29
ANNEXE 10	Coefficient $C_6 = \frac{Q_{mesuré}}{Q_6}$ en fonction du débit	29
ANNEXE 11	Coefficient $C_2 = \frac{Q_{mesuré}}{Q_2}$ en fonction du débit	29
ANNEXE 12	Coefficient $C_6 = \frac{Q_{mesuré}}{Q_6}$ en fonction de la vitesse.....	29
ANNEXE 13	Coefficient $C_2 = \frac{Q_{mesuré}}{Q_2}$ en fonction de la vitesse.....	29
ANNEXE 14	Comparaison ADCP - Moulinet.....	29
ANNEXE 15	Mode d'emploi de « modèle incertitude.xlt »	29
ANNEXE 16	Illustration de l'influence du nombre de verticales.....	29

ANNEXE 1 Références bibliographiques

- [1] NF EN ISO 748 « Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts. Méthode d'exploration du champ des vitesses » Janvier 2002.
- [2] NF ENV 13005 « Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure », Août 1999. Ce texte est d'application universelle à tous les processus de mesure, quel que soit le domaine (mesures physiques, analyse chimique, etc.).
- [3] NF ISO 5725-1 à 5725-6, « Application de la statistique. Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure », décembre 1994.
- [4] ISO/TR 5168 « Mesure de débit des fluides – Calcul de l'incertitude », Avril 1998

ANNEXE 2 Formule d'interpolation au fond du logiciel de jaugeage de la CNR

La formule de calcul de la vitesse introduite dans le logiciel de jaugeage de la CNR est la suivante :

$$v = \frac{1}{h} \cdot \left[\begin{aligned} &0,2 \cdot V_{0,20} + \frac{(0,2h-0,2)}{2} \cdot V_{0,20} + \frac{(0,2h-0,2)}{2} \cdot V_{0,2h} + 0,1h \cdot V_{0,2h} + 0,2h \cdot V_{0,4h} \\ &+ 0,2h \cdot V_{0,6h} + 0,15h \cdot V_{0,8h} + 0,05h \cdot V_{0,9h} + \frac{2}{3} \cdot 0,1h \cdot V_{0,9h} \end{aligned} \right] \quad (27.)$$

En regroupant les termes, cette relation s'écrit :

$$v = \frac{1}{h} \cdot \left[\begin{aligned} &(0,1h + 0,1) \cdot V_{0,20} + (0,2h - 0,1) \cdot V_{0,2h} + 0,2h \cdot V_{0,4h} \\ &+ 0,2h \cdot V_{0,6h} + 0,15h \cdot V_{0,8h} + \left(\frac{2}{3} \cdot 0,1h + 0,05h\right) \cdot V_{0,9h} \end{aligned} \right] \quad (28.)$$

Par ailleurs, la pondération des vitesses par l'épaisseur de chaque tranche (voir figure ci-dessous) conduit à écrire :

$$v = \frac{1}{h} \cdot \left[\begin{aligned} &(0,1h + 0,1) \cdot V_{0,20} + (0,2h - 0,1) \cdot V_{0,2h} + 0,2h \cdot V_{0,4h} \\ &+ 0,2h \cdot V_{0,6h} + 0,15h \cdot V_{0,8h} + 0,15h \cdot V_{0,9h} \end{aligned} \right] \quad (29.)$$

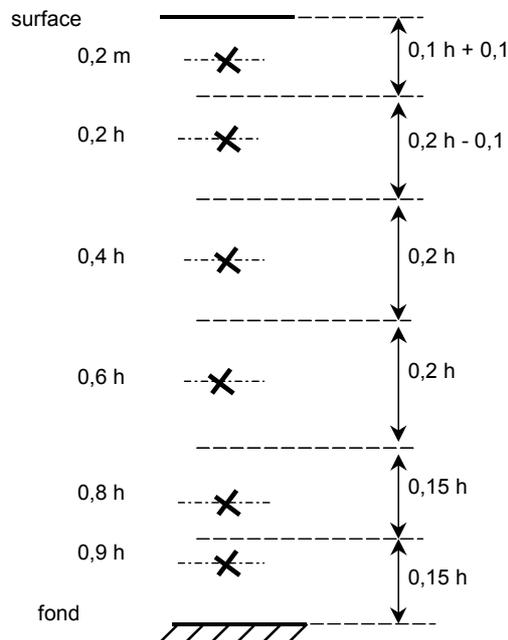


Figure 12 - Méthode de distribution des vitesses

La différence entre les formules (26) et (27) est la pondération du terme $V_{0,9h}$. Dans le cas de la formule (26), le terme est multiplié par un coefficient $0,05h + \frac{2}{3} \cdot 0,1h$ alors que dans le cas de la répartition proportionnelle à l'épaisseur de la couche (formule (27)), ce terme est de $0,15h$.

Ainsi, la formule du logiciel de jaugeage de la CNR est une pondération des vitesses par l'épaisseur de la couche d'eau, sauf pour le terme du fond, où un facteur de correction est introduit pour la couche comprise entre le point à 0,9 h et le fond. Ce coefficient de pondération est de 2/3.

Les formules d'extrapolation pour la vitesse moyenne entre un point mesuré et le fond, citées en note dans la norme ISO 748, sont de la forme :

$$\bar{v}_{fond} = \frac{m}{m+1} \left(\frac{d}{a} \right)^{1/m} \cdot V_a = k \cdot V_a \quad (30.)$$

où m est un coefficient compris entre 2 (fond rugueux) et 10 (fond lisse)

d est la hauteur totale de l'écoulement

a est la distance entre le fond et le dernier point mesuré

Dans notre cas, $d = a$ et on cherche s'il existe une valeur de m telle que $k = 2/3$.

$$\bar{v}_{fond} = \frac{m}{m+1} \left(\frac{1}{1} \right)^{1/m} \cdot V_a = \frac{m}{m+1} \cdot V_a \quad (31.)$$

$$\frac{m}{m+1} = \frac{2}{3} \Leftrightarrow m = 2 \quad (32.)$$

Ainsi, la formule de pondération de la vitesse de la couche comprise entre le dernier point mesuré (0,9 h) et le fond correspond à la valeur de m pour un fond rugueux, telle que définie dans la note 2 du § 7.1.5.2 de la norme ISO 748.

En conséquence de quoi, la formule de la méthode CNR correspond à la méthode de distribution des vitesses décrite au paragraphe 7.1.5.2. de la norme ISO 748.

ANNEXE 3 Coefficients C_6 et C_2 par site

Site	C_6	
	moyenne	écart type σ
Ain à port galland	0,973	0,022
Arles	0,961	0,018
Aval Barrage Motz	1,003	0,041
Aygues	0,969	0,027
Beaucaire	0,969	0,013
Bedarrides	0,984	0,044
Bognes	0,977	0,035
Brens	0,949	0,018
Cèze	0,950	0,034
Corbonod	0,978	0,011
Couzon	0,954	0,022
Doux à Mordane	0,986	0,056
Drome Sail	0,953	0,023
Eyrieux	0,973	0,049
Fier	0,980	0,031
Gard	0,965	0,043
Guiers	0,988	0,033
Isère	0,954	0,018
Pierre Bénite	0,976	0,037
Pont Saint Esprit	0,967	0,021
Pontpierre	1,024	0,065
Pougnny	0,965	0,019
Pt cordon	0,933	0,041
Pt Delattre	0,957	0,032
Restitution SB	0,940	0,032
Roubion	0,964	0,022
Sauze	0,962	0,030
Séran	0,914	0,068
St Symphorien	0,985	0,012
Ternay	0,965	0,031
Thil	0,963	0,023
Usses	0,976	0,035
Valence	0,957	0,020
Vallon	0,952	0,039
Viviers	0,959	0,035
Ensemble des sites	0,967	0,038

Site	C_2	
	moyenne	écart type σ
Ain à port galland	0,832	0,053
Arles	0,882	0,057
Aval Barrage Motz	0,808	0,069
Aygues	0,870	0,048
Beaucaire	0,873	0,036
Bedarrides	0,816	0,068
Bognes	0,833	0,040
Brens	0,887	0,038
Cèze	0,888	0,049
Corbonod	0,839	0,049
Couzon	0,919	0,032
Doux à Mordane	0,773	0,083
Drome Sail	0,861	0,047
Eyrieux	0,886	0,070
Fier	0,820	0,048
Gard	0,867	0,073
Guiers	0,813	0,047
Isère	0,877	0,028
Pierre Bénite	0,847	0,051
Pont Saint Esprit	0,852	0,060
Pontpierre	0,750	0,106
Pougnny	0,834	0,064
Pt cordon	0,894	0,051
Pt Delattre	0,880	0,052
Restitution SB	0,925	0,043
Roubion	0,869	0,045
Sauze	0,891	0,053
Séran	0,951	0,046
St Symphorien	0,842	0,067
Ternay	0,871	0,044
Thil	0,823	0,079
Usses	0,860	0,060
Valence	0,879	0,069
Vallon	0,869	0,068
Viviers	0,863	0,059
Ensemble des sites	0,857	0,066

NOTE C_6 et C_2 et sont calculés à partir des débits issus du logiciel de jaugeage de la CNR.
La moyenne et l'écart-type sur l'ensemble des sites sont calculés à partir de l'échantillon complet.

ANNEXE 4 Données brutes C₂ et C₆ - Affluents

Site	Date	Niveau (m)	Section (m ²)	Q (m ³ /s)	Q ₆ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	C ₆	C ₂
Ain à port galland	18/05/1994	191,07	120,00	107,00	108,00	130,00	0,99	0,82
Ain à port galland	18/05/1994	191,07	120,00	108,00	112,00	131,00	0,96	0,82
Ain à port galland	18/05/1994	191,09	120,00	105,00	105,00	130,00	1,00	0,81
Ain à port galland	22/01/1997	191,72	201,00	284,00	293,00	344,00	0,97	0,83
Ain à port galland	22/01/1997	191,68	200,00	273,00	270,00	338,00	1,01	0,81
Ain à port galland	30/01/1997	190,71	95,50	74,00	77,00	86,00	0,96	0,86
Ain à port galland	15/03/2000	190,80	103,00	94,00	95,00	121,00	0,99	0,78
Ain à port galland	13/02/2002	190,66	98,20	66,60	67,20	80,50	0,99	0,83
Ain à port galland	13/02/2002	190,67	99,60	72,00	76,50	89,40	0,94	0,81
Ain à port galland	*20/11/1992	193,36	357,00	930,00	966,00	1064,00	0,96	0,87
Ain à port galland	*20/11/1992	193,35	345,00	905,00	958,00	1030,00	0,94	0,88
Ain à port galland	*26/01/1994	193,49	415,00	953,00	998,00	1124,00	0,95	0,85
Ain à port galland	*26/01/1994	193,46	410,00	944,00	978,00	1109,00	0,97	0,85
Aygues	29/01/1998	45,62	12,00	11,00	11,00	13,00	1,00	0,85
Aygues	**09/11/1994	46,47	36,00	50,40	50,30	58,40	1,00	0,86
Aygues	**21/11/1996	46,11	27,00	33,80	35,90	38,70	0,94	0,87
Aygues	**24/04/1995	47,25	85,40	171,00	175,00	196,00	0,98	0,87
Aygues	*10/09/1992	46,86	72,00	108,00	111,00	121,00	0,97	0,89
Aygues	*10/09/1992	46,78	70,00	101,00	108,00	118,00	0,94	0,86
Aygues	*23/09/1992	46,66	64,00	85,00	89,00	96,00	0,96	0,89
Bedarrides	18/05/1994	22,99	35,00	34,30	35,00	43,80	0,98	0,78
Bedarrides	28/06/1994	22,45	17,10	13,70	13,40	18,00	1,02	0,76
Bedarrides	26/09/1994	23,66	72,00	81,00	87,00	89,00	0,93	0,91
Bedarrides	26/09/1994	23,62	71,00	79,00	88,00	85,00	0,90	0,93
Bedarrides	24/10/1994	24,06	84,00	104,00	106,00	116,00	0,98	0,90
Bedarrides	24/10/1994	24,03	82,00	106,00	110,00	122,00	0,96	0,87
Bedarrides	15/02/1995	22,79	52,00	43,40	43,50	54,20	1,00	0,80
Bedarrides	24/08/1995	22,08	31,00	10,30	9,90	13,10	1,04	0,79
Bedarrides	18/10/1995	21,92	29,00	11,70	11,40	15,40	1,03	0,76
Bedarrides	06/11/1996	21,87	23,10	11,00	10,60	14,60	1,04	0,75
Bedarrides	06/11/1996	21,87	22,50	10,90	10,20	14,60	1,07	0,75
Bedarrides	04/02/1997	22,89	57,80	63,00	64,50	79,00	0,98	0,80
Bedarrides	04/09/1997	21,69	19,23	5,90	5,80	8,50	1,02	0,69
Bedarrides	29/01/1998	22,16	38,40	26,00	26,00	33,20	1,00	0,78
Bedarrides	15/06/1999	21,73	19,60	8,00	8,00	10,00	1,00	0,80
Bedarrides	** 17/06/1997	21,84	31,95	12,30	12,60	14,80	0,98	0,83
Bedarrides	** 28/05/2001	22,33	43,54	34,80	32,90	45,50	1,06	0,76
Bedarrides	** 28/05/2001	22,30	43,54	34,80	34,44	45,40	1,01	0,77
Bedarrides	**13/03/1996	22,36	43,10	34,20	35,00	42,00	0,98	0,81
Bedarrides	**24/02/1995	22,50	50,00	33,00	32,00	44,00	1,03	0,75
Bedarrides	**24/04/1995	25,54	169,00	204,00	223,00	226,00	0,91	0,90
Bedarrides	*04/05/1995	23,43	71,00	77,00	80,00	90,00	0,96	0,86
Bedarrides	*04/05/1995	23,43	72,00	77,00	81,00	88,00	0,95	0,88
Bedarrides	*10/01/1996	23,35	65,00	93,60	98,70	113,30	0,95	0,83
Bedarrides	*10/01/1996	23,34	65,00	94,40	100,90	112,90	0,94	0,84
Bedarrides	*24/01/1996	23,76	81,20	133,10	143,00	153,00	0,93	0,87
Bedarrides	*24/01/1996	23,73	81,50	129,40	139,00	148,00	0,93	0,87
Cèze	11/10/1984	36,87	24,00	7,70	8,30	10,00	0,93	0,77

Site	Date	Niveau (m)	Section (m ²)	Q (m ³ /s)	Q ₆ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	C ₆	C ₂
Cèze	07/11/1984	39,85	120,00	196,00	217,00	222,00	0,90	0,88
Cèze	08/11/1984	41,47	187,00	350,00	395,00	361,00	0,89	0,97
Cèze	10/04/1986	38,47	98,00	82,00	91,00	98,00	0,90	0,84
Cèze	13/02/1987	40,46	120,00	234,00	257,00	249,00	0,91	0,94
Cèze	15/01/1988	43,13	233,00	511,00	580,00	512,00	0,88	1,00
Cèze	28/01/1988	37,57	49,00	36,00	36,00	43,00	1,00	0,84
Cèze	22/12/1988	36,93	26,00	4,80	5,00	5,50	0,96	0,87
Cèze	26/11/1990	37,51	45,00	33,00	33,00	39,00	1,00	0,85
Cèze	18/05/1993	36,99	35,60	14,50	15,10	16,40	0,96	0,88
Cèze	23/09/1993	43,00	212,00	410,00	453,00	425,00	0,91	0,96
Cèze	24/09/1993	39,50	129,00	182,00	189,00	206,00	0,96	0,88
Cèze	24/09/1993	39,70	131,00	195,00	205,00	202,00	0,95	0,97
Cèze	22/10/1994	39,62	133,00	207,00	209,00	242,00	0,99	0,86
Cèze	13/03/1995	37,21	39,00	16,50	17,50	19,40	0,94	0,85
Cèze	18/10/1995	37,53	55,00	48,00	51,00	59,00	0,94	0,81
Cèze	10/12/1996	37,57	37,72	53,20	55,80	60,60	0,95	0,88
Cèze	20/12/1996	39,83	141,90	228,60	237,00	251,00	0,96	0,91
Cèze	21/01/1997	39,24	113,00	185,00	204,00	195,00	0,91	0,95
Cèze	21/01/1997	39,17	111,00	181,00	188,00	206,00	0,96	0,88
Cèze	03/07/1997	37,70	40,30	56,70	58,60	65,80	0,97	0,86
Cèze	07/10/1997	42,80	315,00	517,00	559,00	569,00	0,92	0,91
Cèze	07/10/1997	42,89	335,00	455,00	487,00	502,00	0,93	0,91
Cèze	07/10/1997	42,57	334,00	476,00	500,00	529,00	0,95	0,90
Cèze	04/03/1998	37,00	9,70	6,40	6,80	7,00	0,94	0,91
Cèze	04/03/1998	37,00	9,90	6,50	6,80	7,30	0,96	0,89
Cèze	06/05/1998	37,40	30,16	38,40	39,16	44,03	0,98	0,87
Cèze	21/10/1999	41,84	266,00	376,00	375,00	410,00	1,00	0,92
Cèze	21/10/1999	41,84	268,00	368,00	395,00	404,00	0,93	0,91
Cèze	12/12/2000	37,72	46,00	61,50	64,00	69,00	0,96	0,89
Cèze	10/10/2001	38,09	63,00	88,00	88,00	104,00	1,00	0,85
Cèze	10/10/2001	38,04	61,00	82,00	85,00	97,00	0,96	0,85
Cèze	19/11/2003	38,16	92,43	66,00	71,50	74,20	0,92	0,89
Cèze	01/12/2003	38,85	137,00	131,00	132,00	152,00	0,99	0,86
Cèze	05/12/2003	39,27	107,42	168,00	173,00	191,00	0,97	0,88
Cèze	05/12/2003	39,24	107,84	172,00	177,00	197,00	0,97	0,87
Couzon	21/11/1992	0,00	930,00	1500,00	1566,00	1671,00	0,96	0,90
Couzon	21/11/1992	0,00	935,00	1519,00	1597,00	1687,00	0,95	0,90
Couzon	18/03/1993	0,00	430,00	127,00	129,00	136,00	0,98	0,93
Couzon	18/03/1993	0,00	424,00	120,00	130,00	130,00	0,92	0,92
Couzon	18/03/1993	0,00	426,00	125,00	133,00	138,00	0,94	0,91
Couzon	04/10/1993	164,22	664,00	886,00	902,00	1005,00	0,98	0,88
Couzon	04/10/1993	164,22	657,00	925,00	956,00	1005,00	0,97	0,92
Couzon	12/10/1993	166,53	1023,00	1756,00	1836,00	1922,00	0,96	0,91
Couzon	12/10/1993	166,56	1050,00	1777,00	1894,00	1911,00	0,94	0,93
Couzon	11/01/1994	167,63	1163,00	2252,00	2360,00	2330,00	0,95	0,97
Couzon	14/01/1994	167,98	1218,00	2350,00	2490,00	2521,00	0,94	0,93
Doux à Mordane	14/02/1989	150,60	10,06	0,36	0,34	0,51	1,08	0,72
Doux à Mordane	12/03/1991	151,79	30,00	18,70	18,50	24,00	1,01	0,78
Doux à Mordane	12/03/1991	151,78	30,00	18,20	17,60	24,50	1,03	0,74
Doux à Mordane	12/03/1991	151,78	30,00	18,60	18,80	23,50	0,99	0,79

Site	Date	Niveau (m)	Section (m ²)	Q (m ³ /s)	Q ₆ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	C ₆	C ₂
Doux à Mordane	30/09/1991	151,83	30,20	19,20	21,20	25,50	0,91	0,75
Doux à Mordane	30/09/1991	151,80	29,70	17,40	17,80	22,40	0,98	0,78
Doux à Mordane	25/11/1993	150,80	12,30	1,03	1,14	1,22	0,90	0,84
Doux à Mordane	20/09/1995	152,10	31,70	28,70	29,00	37,00	0,99	0,78
Drome Sail	05/01/1996	263,04	29,20	60,20	63,60	70,90	0,95	0,85
Drome Sail	05/01/1996	263,02	28,60	58,30	60,50	70,30	0,96	0,83
Drome Sail	12/11/1996	263,87	64,00	171,00	178,00	195,00	0,96	0,88
Drome Sail	12/11/1996	263,87	65,00	171,00	176,00	198,00	0,97	0,86
Drome Sail	20/11/1996	262,45	29,00	61,00	65,00	71,00	0,94	0,86
Drome Sail	20/11/1996	262,45	29,00	64,00	67,00	72,00	0,96	0,89
Drome Sail	27/11/1996	262,68	29,00	60,50	64,70	70,50	0,94	0,86
Drome Sail	27/11/1996	262,70	29,60	63,00	68,00	72,40	0,93	0,87
Drome Sail	10/12/1996	262,37	26,40	42,20	42,90	49,50	0,98	0,85
Eyrieux	04/09/1991	171,80	2,60	0,52	0,50	0,64	1,05	0,81
Eyrieux	04/09/1991	171,80	2,60	0,53	0,54	0,61	0,98	0,86
Eyrieux	30/09/1991	172,35	81,30	40,70	42,30	45,05	0,96	0,90
Eyrieux	11/10/1994	171,85	88,00	6,33	6,50	6,64	0,97	0,95
Eyrieux	20/10/1995	172,33	108,00	54,00	53,00	63,00	1,02	0,86
Eyrieux	24/01/1996	172,73	137,50	154,00	152,80	190,20	1,01	0,81
Eyrieux	24/01/1996	172,71	135,00	151,20	149,70	189,90	1,01	0,80
Eyrieux	27/11/1996	172,19	116,00	26,70	29,00	28,00	0,92	0,95
Eyrieux	27/11/1996	172,17	116,00	27,70	29,00	29,10	0,96	0,95
Eyrieux	07/01/1998	172,00	104,00	21,00	21,90	21,60	0,96	0,97
Eyrieux	14/01/1998	172,30	115,00	45,70	52,80	52,80	0,87	0,87
Fier	14/09/1994	252,94	113,00	215,00	218,00	251,00	0,99	0,86
Fier	01/02/1995	252,45	90,00	111,00	113,00	130,00	0,98	0,85
Fier	12/10/1995	251,89	69,00	32,00	30,00	38,00	1,07	0,84
Fier	30/05/1996	251,83	63,86	35,80	35,60	44,40	1,01	0,81
Fier	28/05/1997	251,47	47,20	40,00	39,70	50,00	1,01	0,80
Fier	12/12/1997	253,50	137,00	290,00	300,00	332,00	0,97	0,87
Fier	12/12/1997	253,20	129,00	259,00	275,00	295,00	0,94	0,88
Fier	27/10/1998	252,34	86,00	123,00	125,00	148,00	0,98	0,83
Fier	16/02/1999	251,88	63,00	48,80	48,80	59,60	1,00	0,82
Fier	16/02/1999	251,89	63,00	47,50	49,50	57,60	0,96	0,82
Fier	15/02/2001	251,86	64,50	36,20	37,20	46,20	0,97	0,78
Fier	15/02/2001	251,87	64,00	36,30	38,40	46,00	0,95	0,79
Fier	21/03/2002	252,29	85,19	81,20	83,48	99,35	0,97	0,82
Fier	21/03/2002	252,32	87,19	96,87	102,12	117,51	0,95	0,82
Fier	17/04/2002	251,84	62,36	31,66	32,11	40,52	0,99	0,78
Fier	17/04/2002	251,86	63,31	30,46	31,59	38,18	0,96	0,80
Fier	07/06/2002	252,74	104,90	176,50	186,70	210,00	0,95	0,84
Fier	13/02/2003	251,90	66,64	34,31	33,64	43,20	1,02	0,79
Fier	13/02/2003	251,96	69,13	35,96	36,86	44,75	0,98	0,80
Fier	09/07/2003	251,96	65,44	27,07	28,97	34,36	0,93	0,79
Fier	09/07/2003	252,00	67,94	27,64	27,49	34,12	1,01	0,81
Gard	19/03/1986	18,34	129,00	27,00	29,00	30,00	0,93	0,90
Gard	19/03/1986	18,34	129,00	27,00	27,30	31,00	0,99	0,87
Gard	10/04/1986	18,57	161,00	93,00	97,00	106,00	0,96	0,88
Gard	10/04/1986	18,58	158,00	98,00	100,00	109,00	0,98	0,90
Gard	04/02/1987	18,97	237,00	263,00	273,00	289,00	0,96	0,91

Site	Date	Niveau (m)	Section (m ²)	Q (m ³ /s)	Q ₆ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	C ₆	C ₂
Gard	04/02/1987	18,96	237,00	263,00	279,00	296,00	0,94	0,89
Gard	12/02/1987	19,96	413,00	1031,00	1115,00	1095,00	0,92	0,94
Gard	15/01/1988	20,48	483,00	1300,00	1375,00	1445,00	0,95	0,90
Gard	28/01/1988	18,49	185,00	71,00	75,00	76,50	0,95	0,93
Gard	28/04/1988	18,38	168,00	35,50	35,30	44,00	1,01	0,81
Gard	27/11/1990	18,32	158,00	23,90	25,40	29,20	0,94	0,82
Gard	18/04/1991	18,26	151,00	17,60	15,90	25,60	1,11	0,69
Gard	18/04/1991	18,26	151,00	17,00	16,50	22,70	1,03	0,75
Gard	03/07/1991	18,16	115,00	3,00	2,90	3,00	1,03	1,00
Gard	12/06/1992	18,31	162,00	25,70	26,20	33,50	0,98	0,77
Gard	12/06/1992	18,31	161,00	24,10	25,40	28,80	0,95	0,84
Gard	02/07/1993	18,20	141,00	5,00	5,00	6,50	1,00	0,77
Gard	23/09/1993	18,64	204,00	129,00	137,00	138,00	0,94	0,93
Gard	23/09/1993	18,62	196,00	116,00	115,00	127,00	1,01	0,91
Gard	22/10/1994	19,01	301,00	329,00	358,00	350,00	0,92	0,94
Gard	05/11/1994	20,18	468,00	1175,00	1264,00	1254,00	0,93	0,94
Gard	17/10/1995	18,63	210,00	131,00	137,00	150,00	0,96	0,87
Gard	13/11/1996	19,65	360,00	772,00	812,00	874,00	0,95	0,88
Gard	14/11/1996	18,75	220,00	172,00	181,00	200,00	0,95	0,86
Gard	19/03/1997	18,24	143,50	11,50	11,60	15,20	0,99	0,76
Gard	07/10/1997	19,47	322,00	626,00	672,00	684,00	0,93	0,92
Gard	28/01/1998	18,35	173,00	30,70	33,70	32,30	0,91	0,95
Gard	11/05/1998	18,39	186,00	35,00	39,40	39,40	0,89	0,89
Gard	12/12/2000	18,55	223,00	92,00	94,00	112,00	0,98	0,82
Gard	10/10/2001	18,52	183,00	89,00	91,00	107,00	0,98	0,83
Gard	10/10/2001	18,50	178,00	79,00	83,00	95,00	0,95	0,83
Guiers	22/01/1992	222,24	17,20	13,30	13,30	16,00	1,00	0,83
Guiers	22/01/1992	222,18	16,60	10,90	11,50	13,20	0,95	0,83
Guiers	31/03/1992	222,33	20,40	18,70	19,00	24,00	0,98	0,78
Guiers	04/06/1992	222,43	29,50	33,00	32,10	44,50	1,03	0,74
Guiers	04/06/1992	222,43	29,50	33,40	31,80	43,80	1,05	0,76
Guiers	07/04/1993	223,28	69,50	162,00	168,00	208,00	0,96	0,78
Guiers	07/04/1993	223,28	69,50	163,00	162,00	200,00	1,01	0,82
Guiers	15/09/1993	222,48	34,00	37,70	37,20	47,00	1,01	0,80
Guiers	03/01/1994	223,00	53,00	102,00	105,00	126,00	0,97	0,81
Guiers	14/09/1994	223,12	68,00	135,00	132,00	170,00	1,02	0,79
Guiers	14/09/1994	223,09	66,00	132,00	136,00	164,00	0,97	0,80
Guiers	19/11/1994	222,28	29,40	20,70	20,60	25,80	1,00	0,80
Guiers	19/11/1994	222,28	30,00	21,00	20,40	26,60	1,03	0,79
Guiers	01/02/1995	222,55	42,30	51,00	49,60	67,60	1,03	0,75
Guiers	02/06/1995	222,80	52,00	82,00	80,00	101,00	1,03	0,81
Guiers	02/06/1995	222,79	52,00	81,00	77,00	107,00	1,05	0,76
Guiers	13/09/1995	223,23	80,00	166,00	164,00	219,00	1,01	0,76
Guiers	28/09/1995	222,41	35,00	33,00	32,00	43,00	1,03	0,77
Guiers	22/01/1996	222,10	24,50	11,80	12,10	14,60	0,98	0,81
Guiers	22/01/1996	222,10	24,60	11,60	11,70	14,40	0,99	0,81
Guiers	27/03/1996	222,92	57,30	98,80	97,54	126,84	1,01	0,78
Guiers	27/03/1996	222,95	58,90	99,90	101,10	127,60	0,99	0,78
Guiers	27/03/1996	222,96	60,30	105,04	103,90	131,90	1,01	0,80
Guiers	28/08/1997	222,20	27,40	16,70	17,30	18,30	0,97	0,91

Site	Date	Niveau (m)	Section (m ²)	Q (m ³ /s)	Q ₆ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	C ₆	C ₂
Guiers	28/08/1997	222,23	29,60	22,40	22,90	26,00	0,98	0,86
Guiers	24/09/1997	221,88	18,30	4,00	4,30	4,50	0,93	0,89
Guiers	12/12/1997	223,08	67,00	124,00	129,80	151,50	0,96	0,82
Guiers	12/12/1997	223,05	66,80	122,00	122,50	151,30	1,00	0,81
Guiers	19/01/1998	222,75	53,40	79,00	78,00	102,00	1,01	0,77
Guiers	02/04/1998	222,16	25,30	15,30	16,00	17,30	0,96	0,88
Guiers	08/04/1998	222,41	35,00	33,50	33,50	41,00	1,00	0,82
Guiers	16/02/1999	222,20	29,38	18,50	19,00	21,80	0,97	0,85
Guiers	16/02/1999	222,18	29,23	18,00	19,00	21,00	0,95	0,86
Guiers	28/04/1999	222,44	39,00	37,70	37,50	47,00	1,01	0,80
Guiers	28/04/1999	222,45	39,00	38,20	37,80	48,20	1,01	0,79
Guiers	30/11/2000	222,36	38,00	35,70	36,50	43,20	0,98	0,83
Guiers	21/02/2001	222,02	26,90	9,45	10,41	11,21	0,91	0,84
Guiers	21/02/2001	222,02	26,40	9,10	9,70	10,76	0,94	0,85
Guiers	22/03/2002	222,22	31,76	22,28	23,34	26,65	0,95	0,84
Guiers	22/03/2002	222,27	32,72	25,84	25,54	31,43	1,01	0,82
Guiers	07/06/2002	224,27	119,00	278,00	289,00	347,00	0,96	0,80
Guiers	07/06/2002	224,12	108,00	248,00	253,40	307,00	0,98	0,81
Guiers	19/02/2003	222,01	24,97	9,90	10,44	11,27	0,95	0,88
Guiers	19/02/2003	222,02	25,05	10,85	11,27	12,47	0,96	0,87
Isère	23/11/1992	118,60	402,00	881,00	946,00	984,00	0,93	0,90
Isère	07/10/1993	118,19	359,00	712,00	741,00	796,00	0,96	0,89
Isère	07/10/1993	118,34	366,00	770,00	827,00	872,00	0,93	0,88
Isère	09/10/1993	119,42	481,00	1312,00	1378,00	1436,00	0,95	0,91
Isère	21/10/1993	117,32	279,00	351,00	365,00	393,00	0,96	0,89
Isère	15/09/1994	117,98	350,00	654,00	695,00	738,00	0,94	0,89
Isère	01/06/1995	119,34	475,00	1312,00	1369,00	1481,00	0,96	0,89
Isère	15/06/1995	117,91	305,00	563,00	598,00	637,00	0,94	0,88
Isère	15/06/1995	117,79	299,00	504,00	538,00	565,00	0,94	0,89
Isère	15/11/1995	116,99	230,00	192,00	206,00	216,00	0,93	0,89
Isère	15/11/1995	117,12	240,00	247,00	257,00	280,00	0,96	0,88
Isère	24/10/1996	116,98	243,00	201,00	205,00	235,70	0,98	0,85
Isère	24/10/1996	117,01	245,59	205,00	211,60	228,60	0,97	0,90
Isère	20/03/1997	117,24	266,00	368,00	378,00	424,00	0,97	0,87
Isère	20/03/1997	117,24	263,00	374,00	385,00	441,00	0,97	0,85
Isère	26/03/1997	117,47	291,00	389,00	407,00	446,00	0,96	0,87
Isère	26/03/1997	117,49	292,00	403,00	418,00	467,00	0,96	0,86
Isère	14/05/1997	117,17	262,00	290,00	297,00	334,00	0,98	0,87
Isère	14/05/1997	117,19	266,00	293,00	316,00	341,00	0,93	0,86
Isère	14/05/1997	117,33	278,00	349,00	362,00	413,00	0,96	0,85
Isère	28/01/1998	117,14	255,00	286,00	300,00	333,00	0,95	0,86
Isère	29/01/1998	117,28	275,00	343,00	370,00	402,00	0,93	0,85
Isère	30/01/1998	117,36	277,00	356,00	363,00	410,00	0,98	0,87
Isère	16/02/1998	117,12	254,00	258,00	269,00	294,00	0,96	0,88
Isère	13/05/1998	117,75	306,00	473,00	494,00	551,00	0,96	0,86
Isère	13/05/1998	117,75	307,00	478,00	504,00	547,00	0,95	0,87
Isère	18/05/1999	118,30	325,00	727,00	769,00	811,00	0,95	0,90
Isère	18/05/1999	118,30	324,00	712,00	762,00	793,00	0,93	0,90
Isère	22/03/2000	116,95	215,00	226,00	243,00	252,00	0,93	0,90
Isère	09/11/2000	117,58	287,00	455,00	473,00	521,00	0,96	0,87

Site	Date	Niveau (m)	Section (m ²)	Q (m ³ /s)	Q ₆ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	C ₆	C ₂
Isère	27/02/2002	117,24	275,00	330,00	338,00	380,00	0,98	0,87
Pontpierre	12/05/1998	121,14	34,65	14,20	14,83	17,57	0,96	0,81
Pontpierre	09/11/2000	121,72	55,34	44,60	41,87	62,00	1,07	0,72
Pontpierre	13/11/2000	123,24	114,00	259,00	255,00	316,00	1,02	0,82
Pontpierre	16/11/2000	122,20	73,50	86,50	86,50	116,00	1,00	0,75
Pontpierre	01/12/2000	121,52	55,16	31,00	29,00	47,00	1,07	0,66
Pontpierre	01/12/2000	121,47	51,00	29,00	27,00	41,00	1,07	0,71
Pontpierre	11/01/2001	121,82	61,00	54,70	52,00	77,00	1,05	0,71
Pontpierre	19/07/2001	120,81	30,90	4,68	4,42	6,70	1,06	0,70
Pontpierre	19/07/2001	120,81	30,90	5,04	4,64	7,11	1,09	0,71
Pontpierre	25/11/2002	124,53	198,48	668,00	771,80	724,38	0,87	0,92
Roubion	27/04/1993	77,31	24,80	27,15	27,60	30,77	0,98	0,88
Roubion	27/04/1993	77,31	25,00	27,30	28,49	31,10	0,96	0,88
Roubion	23/09/1993	77,44	39,05	44,65	46,08	53,22	0,97	0,84
Roubion	23/09/1993	77,41	38,15	41,50	42,63	48,79	0,97	0,85
Roubion	01/10/1993	79,20	91,00	246,00	249,00	289,00	0,99	0,85
Roubion	05/10/1993	77,20	30,00	22,00	24,00	24,00	0,92	0,92
Roubion	20/12/1996	77,85	33,00	39,00	40,70	44,50	0,96	0,88
Roubion	21/01/1997	78,00	38,40	51,50	53,00	58,60	0,97	0,88
Roubion	21/01/1997	78,03	38,00	49,40	51,20	56,20	0,96	0,88
Roubion	21/10/1999	79,40	86,00	186,00	194,00	221,00	0,96	0,84
St Symphorien	09/12/1988	180,00	495,00	609,00	620,00	712,00	0,98	0,86
St Symphorien	28/02/1989	178,95	377,00	249,00	251,00	303,00	0,99	0,82
St Symphorien	28/02/1989	178,94	376,00	261,00	270,00	319,00	0,97	0,82
St Symphorien	18/02/1992	179,23	407,00	390,00	392,00	461,00	0,99	0,85
St Symphorien	18/02/1992	179,24	407,00	389,00	393,00	449,00	0,99	0,87
Sauze	14/10/1988	47,82	295,00	230,00	244,00	250,00	0,94	0,92
Sauze	23/10/1990	47,30	279,00	102,00	109,00	113,00	0,94	0,90
Sauze	23/10/1990	47,37	282,00	115,00	123,00	122,00	0,93	0,94
Sauze	26/11/1990	47,64	305,00	165,00	174,00	187,00	0,95	0,88
Sauze	26/11/1990	47,59	303,00	153,00	161,00	169,00	0,95	0,91
Sauze	07/03/1991	49,58	450,00	832,00	897,00	840,00	0,93	0,99
Sauze	25/05/1992	46,55	237,00	28,60	28,70	35,30	1,00	0,81
Sauze	25/05/1992	46,51	237,00	27,40	27,40	33,00	1,00	0,83
Sauze	23/09/1992	48,28	390,00	337,00	374,00	357,00	0,90	0,94
Sauze	27/04/1993	49,06	453,00	644,00	664,00	721,00	0,97	0,89
Sauze	27/04/1993	49,10	455,00	651,00	670,00	719,00	0,97	0,91
Sauze	18/05/1993	46,90	300,00	63,00	66,00	65,00	0,95	0,97
Sauze	23/09/1993	48,48	413,00	415,00	423,00	487,00	0,98	0,85
Sauze	24/09/1993	49,65	492,00	861,00	925,00	920,00	0,93	0,94
Sauze	22/10/1994	48,95	432,00	587,00	618,00	648,00	0,95	0,91
Sauze	22/10/1994	48,90	427,00	577,00	582,00	634,00	0,99	0,91
Sauze	23/02/1995	46,83	280,00	52,00	53,00	58,00	0,98	0,90
Sauze	02/04/1996	47,03	315,00	73,60	74,70	90,70	0,99	0,81
Sauze	02/04/1996	47,04	315,00	75,70	73,60	96,40	1,03	0,79
Sauze	22/04/1996	46,66	285,00	35,10	37,12	41,10	0,95	0,85
Sauze	21/11/1996	47,68	341,00	188,00	203,00	201,00	0,93	0,94
Sauze	18/02/1998	46,60	269,00	36,00	36,00	45,00	1,00	0,80
Sauze	21/04/1998	46,97	277,00	71,00	75,00	76,00	0,95	0,93
Sauze	11/03/1999	46,57	264,00	40,00	41,00	44,00	0,98	0,91

Site	Date	Niveau (m)	Section (m ²)	Q (m ³ /s)	Q ₆ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	C ₆	C ₂
Sauze	21/10/1999	50,78	588,00	1578,00	1695,00	1818,00	0,93	0,87
Sauze	23/10/2001	47,62	275,00	197,00	197,00	223,00	1,00	0,88
Sauze	23/10/2001	47,60	275,00	193,00	199,00	214,00	0,97	0,90
Sauze	27/03/2002	46,43	202,00	29,20	30,10	33,10	0,97	0,88
Sauze	19/11/2003	47,56	280,00	180,00	192,00	202,00	0,94	0,89
Séran	26/03/1996	234,60	14,90	12,90	13,60	14,90	0,95	0,87
Séran	26/03/1996	234,58	15,60	15,57	14,20	15,60	1,10	1,00
Séran	12/12/1997	235,22	28,38	38,40	42,00	40,80	0,91	0,94
Séran	12/12/1997	235,20	28,31	38,30	41,40	41,50	0,93	0,92
Séran	27/10/1998	234,77	19,00	20,00	23,50	22,00	0,85	0,91
Séran	22/02/1999	236,05	48,20	81,30	91,50	80,60	0,89	1,01
Séran	22/02/1999	236,01	47,00	78,00	89,00	76,20	0,88	1,02
Séran	16/02/2000	234,86	19,50	25,10	27,70	26,70	0,91	0,94
Séran	16/02/2000	234,86	19,40	25,20	28,11	26,30	0,90	0,96
Séran	21/03/2002	234,46	13,03	7,70	8,77	8,08	0,88	0,95
Séran	21/03/2002	234,47	12,85	7,92	9,02	8,38	0,88	0,95
Usses	07/04/1993	282,35	17,30	30,40	30,20	35,20	1,01	0,86
Usses	07/04/1993	282,37	0,00	31,00	31,40	35,70	0,99	0,87
Usses	10/09/1993	282,55	22,10	38,90	40,30	45,40	0,97	0,86
Usses	03/01/1994	282,48	18,20	28,60	29,60	32,40	0,97	0,88
Usses	22/01/1996	281,97	2,47	2,21	2,32	2,45	0,95	0,90
Usses	22/01/1996	281,97	7,07	2,35	2,52	2,62	0,93	0,90
Usses	08/04/1998	282,25	14,60	12,20	12,80	14,60	0,95	0,84
Usses	26/08/1998	281,86	6,30	0,45	0,43	0,58	1,05	0,78
Vallon	24/10/1990	79,53	153,00	169,00	177,00	198,00	0,95	0,85
Vallon	24/10/1990	79,52	153,00	158,00	169,00	189,00	0,93	0,84
Vallon	25/05/1992	78,52	92,00	26,00	27,00	30,00	0,96	0,87
Vallon	25/05/1992	78,49	92,00	24,00	26,00	24,00	0,92	1,00
Vallon	02/03/1995	78,38	59,00	32,00	33,00	38,00	0,97	0,84
Vallon	02/03/1995	78,40	60,00	38,00	44,00	40,00	0,86	0,95
Vallon	02/03/1995	78,33	59,00	31,00	32,00	37,00	0,97	0,84
Vallon	19/11/1998	78,15	38,20	13,60	13,70	16,20	0,99	0,84
Vallon	19/11/1998	78,14	40,40	14,00	14,50	16,80	0,97	0,83
Vallon	*08/11/1994	81,10	312,00	524,00	530,00	631,00	0,99	0,83
MOYENNE							0,968	0,855
Ecart-type							0,041	0,062

NOTE Les notations * et ** (dans la colonne "date") correspondent à des informations complémentaires sur le déroulement exact du jaugeage. Elles indiquent que le jaugeage n'a pas été fait sur le lieu usuel de jaugeage mais à proximité. Ceci est sans incidence sur le coefficient C₂ (ou C₆) moyen sur l'ensemble des sites mais il faudra y porter une attention particulière si on utilise le coefficient moyen d'un site.

ANNEXE 5 Données brutes C₂ et C₆ - Rhône

Site	Date	Niveau (m)	Section (m ²)	Q (m ³ /s)	Q ₆ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	C ₆	C ₂
Arlès	04/08/1992	0,72	1529,00	828,00	853,00	942,00	0,97	0,88
Arlès	04/11/1992	2,39	1914,00	2611,00	2735,00	2986,00	0,95	0,87
Arlès	05/11/1992	1,93	1813,00	2152,00	2241,00	2514,00	0,96	0,86
Arlès	24/11/1992	4,24	2393,00	4656,00	4860,00	5073,00	0,96	0,92
Beaucaire	06/08/1992	1,39	1055,00	928,00	976,00	1035,00	0,95	0,90
Beaucaire	05/11/1992	3,73	1688,00	2437,00	2499,00	2862,00	0,98	0,85
Beaucaire	18/11/1992	6,40	2413,00	4657,00	4814,00	5359,00	0,97	0,87
Beaucaire	24/11/1992	7,20	2590,00	5407,00	5546,00	6366,00	0,97	0,85
Beaucaire	24/09/1993	6,85	2529,00	5502,00	5570,00	6269,00	0,99	0,88
Beaucaire	24/09/1993	7,40	2680,00	5930,00	6142,00	6811,00	0,97	0,87
Beaucaire	06/10/1993	7,85	2763,00	6148,00	6281,00	6863,00	0,98	0,90
Beaucaire	09/10/1993	9,64	3485,00	8552,00	8884,00	9846,00	0,96	0,87
Beaucaire	09/10/1993	9,72	3519,00	8805,00	9064,00	10080,00	0,97	0,87
Beaucaire	10/10/1993	9,89	3592,00	8839,00	9098,00	10255,00	0,97	0,86
Beaucaire	23/03/1994	3,25	1615,00	1974,00	2068,00	2320,00	0,95	0,85
Beaucaire	23/03/1994	3,29	1625,00	2128,00	2232,00	2413,00	0,95	0,88
Beaucaire	24/02/1995	5,01	2110,00	3570,00	3660,00	4033,00	0,98	0,89
Beaucaire	24/02/1995	5,00	2110,00	3532,00	3611,00	3995,00	0,98	0,88
Bognes	03/06/1992	263,36	317,00	733,00	755,00	849,00	0,97	0,86
Bognes	03/06/1992	263,37	319,00	739,00	758,00	889,00	0,97	0,83
Bognes	03/06/1992	263,57	333,00	792,00	825,00	932,00	0,96	0,85
Bognes	27/10/1992	263,05	294,00	625,00	639,00	760,00	0,98	0,82
Bognes	27/10/1992	263,05	290,00	614,00	617,00	730,00	1,00	0,84
Bognes	10/10/1994	262,70	261,00	534,00	559,00	657,00	0,96	0,81
Bognes	10/10/1994	262,72	263,00	542,00	568,00	658,00	0,95	0,82
Bognes	18/10/1995	261,36	156,00	230,00	244,00	281,00	0,94	0,82
Bognes	18/10/1995	261,38	155,00	225,00	221,00	282,00	1,02	0,80
Bognes	22/01/1996	262,32	236,00	445,00	459,00	543,00	0,97	0,82
Bognes	22/01/1996	262,33	237,00	439,00	451,00	529,00	0,97	0,83
Bognes	09/09/1996	261,41	165,00	247,00	255,00	303,00	0,97	0,82
Bognes	07/10/1996	260,76	109,00	143,00	127,00	155,00	1,13	0,92
Bognes	14/10/1996	260,67	111,00	130,00	134,00	156,00	0,97	0,83
Bognes	14/10/1996	260,68	110,00	128,00	132,00	158,00	0,97	0,81
Bognes	27/05/1997	262,60	264,00	525,00	563,00	619,00	0,93	0,85
Bognes	27/05/1997	262,49	254,00	505,00	521,00	611,00	0,97	0,83
Bognes	19/01/1998	262,69	274,00	544,00	565,00	651,00	0,96	0,84
Bognes	26/05/1999	263,47	317,00	765,00	785,00	892,00	0,97	0,86
Bognes	26/07/1999	262,66	265,00	540,00	541,00	637,00	1,00	0,85
Bognes	01/12/1999	261,31	155,00	217,00	218,00	272,00	1,00	0,80
Bognes	07/02/2001	262,70	272,00	560,00	576,00	689,00	0,97	0,81
Bognes	22/02/2001	261,88	208,00	352,00	356,00	421,00	0,99	0,84
Bognes	21/06/2001	263,25	310,00	724,00	758,00	859,00	0,96	0,84
Bognes	03/04/2002	262,30	227,00	435,00	454,00	523,00	0,96	0,83
Bognes	03/04/2002	262,30	224,00	430,00	447,00	511,00	0,96	0,84
Brens	31/03/1992	217,53	341,00	382,00	407,00	419,00	0,94	0,91
Brens	24/09/1992	217,17	334,00	269,00	287,00	306,00	0,94	0,88
Brens	24/09/1992	217,16	332,00	260,00	269,00	307,00	0,97	0,85

Site	Date	Niveau (m)	Section (m ²)	Q (m ³ /s)	Q ₆ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	C ₆	C ₂
Brens	24/09/1992	217,16	332,00	267,00	281,00	304,00	0,95	0,88
Brens	24/09/1992	217,16	332,00	265,00	278,00	300,00	0,95	0,88
Brens	26/10/1992	219,08	490,00	1088,00	1158,00	1202,00	0,94	0,91
Brens	07/06/1994	218,12	421,00	643,00	674,00	724,00	0,95	0,89
Brens	07/06/1994	218,16	428,00	648,00	677,00	720,00	0,96	0,90
Brens	07/06/1994	218,03	414,00	615,00	652,00	695,00	0,94	0,88
Brens	07/06/1994	218,03	414,00	599,00	630,00	673,00	0,95	0,89
Corbonod	15/02/1990	254,25	567,00	1468,00	1484,00	1681,00	0,99	0,87
Corbonod	07/12/1992	253,31	462,00	1008,00	1041,00	1185,00	0,97	0,85
Corbonod	20/12/1993	253,45	487,00	1075,00	1103,00	1278,00	0,97	0,84
Corbonod	19/03/1996	251,95	287,00	173,00	176,00	212,00	0,98	0,82
Corbonod	19/03/1996	252,00	289,00	195,00	198,00	239,00	0,98	0,82
Corbonod	19/03/1996	251,99	291,00	195,00	200,00	232,00	0,98	0,84
Corbonod	18/06/1999	252,67	374,00	706,00	729,00	835,00	0,97	0,85
Corbonod	18/06/1999	252,67	367,00	689,00	711,00	832,00	0,97	0,83
Corbonod	27/07/1999	252,28	319,00	463,00	470,00	558,00	0,99	0,83
Corbonod	15/02/2001	252,10	296,00	380,00	383,00	452,00	0,99	0,84
Corbonod	17/04/2002	252,13	305,00	325,00	335,00	386,00	0,97	0,84
Pt Delattre	03/09/1992	162,40	915,00	671,00	682,00	796,00	0,98	0,84
Pt Delattre	03/09/1992	162,38	916,00	642,00	641,00	748,00	1,00	0,86
Pt Delattre	17/11/1992	164,27	1287,00	2093,00	2164,00	2312,00	0,97	0,91
Pt Delattre	20/11/1992	164,62	1344,00	2330,00	2415,00	2589,00	0,96	0,90
Pt Delattre	30/09/1993	163,06	1032,00	1226,00	1280,00	1336,00	0,96	0,92
Pt Delattre	30/09/1993	162,88	1018,00	1134,00	1231,00	1260,00	0,92	0,90
Pt Delattre	07/10/1993	164,98	1390,00	2539,00	2662,00	2842,00	0,95	0,89
Pt Delattre	04/01/1994	163,70	1125,00	1614,00	1693,00	1727,00	0,95	0,93
Pt Delattre	04/01/1994	163,67	1121,00	1589,00	1661,00	1753,00	0,96	0,91
Pt Delattre	10/09/1996	162,09	890,00	328,00	328,00	418,00	1,00	0,78
Pt Delattre	10/09/1996	162,10	891,00	327,00	365,00	392,00	0,90	0,83
Pt Delattre	02/03/2000	163,73	1090,00	1595,00	1719,00	1804,00	0,93	0,88
Pouigny	14/09/1993	334,62	276,00	674,00	687,00	805,00	0,98	0,84
Pouigny	14/09/1993	334,60	277,00	675,00	693,00	806,00	0,97	0,84
Pouigny	25/09/1993	333,02	136,00	222,00	232,00	264,00	0,96	0,84
Pouigny	25/09/1993	333,02	128,00	218,00	232,00	256,00	0,94	0,85
Pouigny	01/10/1995	332,61	132,00	131,00	135,00	159,00	0,97	0,82
Pouigny	01/10/1995	332,74	134,00	144,00	149,00	177,00	0,97	0,81
Restitution SB	04/06/1992	194,32	725,00	940,00	1003,00	999,00	0,94	0,94
Restitution SB	04/06/1992	194,26	726,00	941,00	993,00	1038,00	0,95	0,91
Restitution SB	04/06/1992	194,08	691,00	881,00	936,00	904,00	0,94	0,97
Restitution SB	30/10/1992	195,12	826,00	1225,00	1335,00	1272,00	0,92	0,96
Restitution SB	22/11/1992	196,32	972,00	1735,00	1799,00	1880,00	0,96	0,92
Restitution SB	31/03/1993	192,47	510,00	298,00	357,00	298,00	0,83	1,00
Restitution SB	31/03/1993	192,47	513,00	304,00	330,00	359,00	0,92	0,85
Restitution SB	30/04/1993	192,23	476,00	239,00	248,00	269,00	0,96	0,89
Restitution SB	10/09/1993	195,30	827,00	1241,00	1343,00	1356,00	0,92	0,92
Restitution SB	19/05/1994	194,63	760,00	1059,00	1140,00	1113,00	0,93	0,95
Restitution SB	14/09/1994	194,70	794,00	1100,00	1170,00	1137,00	0,94	0,97
Restitution SB	14/09/1994	194,59	791,00	1031,00	1074,00	1130,00	0,96	0,91
Restitution SB	08/12/1994	192,71	506,00	388,00	402,00	448,00	0,97	0,87
Restitution SB	12/01/1995	194,14	712,00	930,00	1007,00	972,00	0,92	0,96

Site	Date	Niveau (m)	Section (m ²)	Q (m ³ /s)	Q ₆ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	C ₆	C ₂
Restitution SB	30/01/1997	192,80	568,00	448,00	479,00	487,00	0,94	0,92
Restitution SB	30/01/1997	192,80	568,00	441,00	464,00	495,00	0,95	0,89
Restitution SB	25/08/1997	192,46	507,00	329,00	346,00	383,00	0,95	0,86
Restitution SB	05/08/1999	192,96	579,00	484,00	516,00	526,00	0,94	0,92
Restitution SB	23/10/2002	194,51	757,71	1050,03	1082,70	1110,73	0,97	0,95
Restitution SB	23/10/2002	194,50	765,54	1033,70	1055,63	1096,34	0,98	0,94
Ternay	04/08/1992	150,54	981,00	531,00	540,00	645,00	0,98	0,82
Ternay	17/11/1992	154,36	1610,00	3425,00	3511,00	3890,00	0,98	0,88
Ternay	21/11/1992	154,61	1642,00	3567,00	3804,00	3970,00	0,94	0,90
Ternay	21/11/1992	154,60	1640,00	3611,00	3740,00	4081,00	0,97	0,88
Ternay	23/11/1992	155,60	1912,00	4300,00	4365,00	4865,00	0,99	0,88
Ternay	04/10/1993	153,42	1444,00	2688,00	2797,00	3062,00	0,96	0,88
Ternay	04/10/1993	153,43	1452,00	2762,00	2920,00	3049,00	0,95	0,91
Ternay	08/10/1993	155,65	1848,00	4270,00	4512,00	4852,00	0,95	0,88
Ternay	08/10/1993	155,46	1883,00	4170,00	4217,00	4627,00	0,99	0,90
Ternay	11/01/1996	151,36	1147,00	1233,00	1269,00	1380,00	0,97	0,89
Ternay	11/01/1996	151,36	1154,00	1254,00	1313,00	1507,00	0,96	0,83
Ternay	04/11/1996	150,51	1022,00	483,00	497,00	559,00	0,97	0,86
Ternay	28/01/1997	151,34	1156,00	1238,00	1221,00	1513,00	1,01	0,82
Ternay	11/03/1997	150,75	1064,00	831,00	821,00	990,00	1,01	0,84
Ternay	23/01/1998	152,68	1362,00	2268,00	2340,00	2555,00	0,97	0,89
Ternay	23/01/1998	152,71	1366,00	2300,00	2455,00	2632,00	0,94	0,87
Ternay	19/03/1998	150,65	1032,00	714,00	729,00	868,00	0,98	0,82
Ternay	19/03/1998	150,65	1032,00	693,00	729,00	815,00	0,95	0,85
Ternay	19/03/1998	150,65	1026,00	689,00	690,00	849,00	1,00	0,81
Ternay	12/05/1998	150,44	1013,00	659,00	667,00	723,00	0,99	0,91
Ternay	12/05/1998	150,32	982,00	641,00	695,00	723,00	0,92	0,89
Ternay	20/05/1999	152,50	1335,00	2165,00	2472,00	2233,00	0,88	0,97
Ternay	27/09/1999	151,42	1159,00	1284,00	1331,00	1420,00	0,96	0,90
Ternay	12/01/2000	151,32	1142,00	1243,00	1349,00	1419,00	0,92	0,88
Ternay	02/05/2002	150,59	1054,00	652,00	667,00	761,00	0,98	0,86
Ternay	02/05/2002	150,56	1054,00	612,00	611,00	757,00	1,00	0,81
Valence	21/09/1992	104,45	1404,00	856,00	912,00	940,00	0,94	0,91
Valence	04/11/1992	104,70	1463,00	1798,00	1894,00	2041,00	0,95	0,88
Valence	17/11/1992	105,86	1708,00	4251,00	4480,00	4614,00	0,95	0,92
Valence	24/11/1992	106,25	1826,00	4877,00	5062,00	6352,00	0,96	0,77
Valence	04/10/1993	105,55	1632,00	3574,00	3697,00	4013,00	0,97	0,89
Valence	05/01/1994	105,70	1645,00	4325,00	4435,00	4779,00	0,98	0,91
Viviers	25/09/1992	59,12	1357,00	1284,00	1476,00	1309,00	0,87	0,98
Viviers	02/11/1992	59,97	1500,00	2766,00	2775,00	3325,00	1,00	0,83
Viviers	18/11/1992	61,25	1885,00	4577,00	4718,00	5420,00	0,97	0,84
Viviers	25/11/1992	61,19	1833,00	4489,00	4651,00	5257,00	0,97	0,85
Viviers	05/10/1993	60,59	1696,00	3564,00	3753,00	4089,00	0,95	0,87
Viviers	11/10/1993	61,38	1880,00	5147,00	5267,00	5895,00	0,98	0,87
Viviers	04/01/1994	60,92	1790,00	4429,00	4534,00	5129,00	0,98	0,86
Viviers	22/03/1994	59,06	1231,00	1621,00	1680,00	1939,00	0,96	0,84
Viviers	22/03/1994	59,06	1216,00	1642,00	1728,00	1954,00	0,95	0,84
Viviers	09/06/1994	59,51	1337,00	1818,00	1876,00	2170,00	0,97	0,84
MOYENNE							0,962	0,870
Ecart-type							0,029	0,043

ANNEXE 6 Données brutes C₂ et C₆ – Rhône court-circuité

Site	Date	Niveau (m)	Section (m ²)	Q (m ³ /s)	Q ₆ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	C ₆	C ₂
Aval Barrage Motz	04/06/1996	242,32	62,84	21,84	21,66	26,52	1,01	0,82
Aval Barrage Motz	04/06/1997	242,25	52,00	10,60	10,80	14,20	0,98	0,75
Aval Barrage Motz	04/06/1997	242,32	52,80	17,00	17,60	21,00	0,97	0,81
Aval Barrage Motz	30/10/1997	242,34	145,00	21,20	19,10	26,00	1,11	0,82
Aval Barrage Motz	30/10/1997	242,34	147,00	23,30	23,10	27,80	1,01	0,84
Aval Barrage Motz	25/03/1998	242,17	57,00	12,00	12,00	14,00	1,00	0,86
Aval Barrage Motz	01/04/1998	242,99	135,00	98,00	101,00	126,00	0,97	0,78
Aval Barrage Motz	01/04/1998	243,00	134,00	98,00	98,00	127,00	1,00	0,77
Aval Barrage Motz	07/02/2001	242,15	49,80	10,70	10,90	12,90	0,98	0,83
Pierre Bénite	21/11/1991	153,33	313,00	117,00	120,00	139,00	0,98	0,84
Pierre Bénite	21/11/1991	153,33	263,00	111,00	117,00	128,00	0,95	0,87
Pierre Bénite	22/11/1991	152,95	272,00	66,70	69,20	77,00	0,96	0,87
Pierre Bénite	22/11/1991	152,95	235,00	68,60	73,00	81,00	0,94	0,85
Pierre Bénite	03/12/1991	152,22	79,00	15,00	14,00	18,00	1,07	0,83
Pierre Bénite	22/10/1993	157,58	706,00	1557,00	1678,00	1751,00	0,93	0,89
Pierre Bénite	28/11/1994	151,95	56,40	13,05	13,60	15,40	0,96	0,85
Pierre Bénite	23/09/1996	151,92	70,50	12,30	12,60	14,80	0,98	0,83
Pierre Bénite	23/09/1996	151,92	70,30	12,00	12,10	14,00	0,99	0,86
Pierre Bénite	23/09/1996	151,92	81,00	12,90	13,10	16,40	0,98	0,79
Pierre Bénite	23/09/1996	151,92	80,60	12,30	12,30	14,50	1,00	0,85
Pont Saint Esprit	05/10/1993	39,74	803,00	1794,00	1882,00	2091,00	0,95	0,86
Pont Saint Esprit	05/10/1993	39,68	788,00	1738,00	1785,00	2017,00	0,97	0,86
Pont Saint Esprit	06/10/1993	42,78	1546,00	4350,00	4602,00	4889,00	0,95	0,89
Pont Saint Esprit	08/09/1995	36,81	255,00	76,00	76,00	93,00	1,00	0,82
Pont Saint Esprit	11/10/1995	37,46	274,00	181,00	188,00	215,00	0,96	0,84
Pont Saint Esprit	11/10/1995	37,45	278,00	180,00	186,00	214,00	0,97	0,84
Pt cordon	06/06/1996	207,67	191,00	174,00	185,00	200,00	0,94	0,87
Pt cordon	06/06/1996	207,68	192,00	178,00	188,00	197,00	0,95	0,90
Pt cordon	04/09/1996	207,37	167,00	116,00	131,00	126,00	0,89	0,92
Pt cordon	04/09/1996	207,36	167,00	113,00	118,00	128,00	0,96	0,88
Thil	01/12/1998	171,15	37,00	31,00	31,50	37,60	0,98	0,82
Thil	01/12/1998	171,24	40,00	35,00	36,00	43,00	0,97	0,81
Thil	02/12/1998	171,10	33,50	24,40	25,70	29,60	0,95	0,82
Thil	02/12/1998	171,31	47,00	46,40	49,00	56,00	0,95	0,83
MOYENNE							0,975	0,039
Ecart-type							0,840	0,037

ANNEXE 7 Coefficient C_6 - Définitions et calculs

Cette annexe est complémentaire du paragraphe 2.5 page 29.

- **Définitions**

- Détermination du coefficient C_6

Le débit total $Q_{\text{mesuré}}$ est déterminé par un jaugeage au moulinet en six points selon la méthode CNR. Pour chaque verticale, la valeur de vitesse mesurée à 0,6 h sous la surface (60 % de la hauteur sous la surface) est multipliée par la section de la verticale associée. En sommant ces valeurs, on obtient le débit noté Q_6 . Le coefficient de surface C_6 est déterminé à partir de $Q_{\text{mesuré}}$ et Q_6 :

$$C_6 = \frac{Q_{\text{mesuré}}}{Q_6} \quad (33.)$$

- Cas d'un jaugeage à 0,6 h

Dans le cas d'un jaugeage de surface, on calcule Q_6 à partir des vitesses mesurées à 0,6 h sous la surface. On utilise le coefficient C_6 pour estimer le débit total :

$$Q_{\text{calculé}} = C_6 \cdot Q_6 \quad (34.)$$

Le tableau suivant indique les valeurs de C_6 :

Tableau 7 - Coefficient C_6

Valeurs expérimentales CNR (ensemble de l'échantillon)		Valeurs usuelles de la littérature	
Valeur moyenne	Écart-type	Valeur moyenne	Écart-type
0,965	0,038	1	Non cité

- **Application de la loi de propagation des incertitudes dans le cas d'un jaugeage à 0,6 h :**

Le débit Q est calculé par :

$$Q_{\text{calculé}} = C_6 \cdot Q_6$$

L'application de la loi de propagation des incertitudes à la relation précédente conduit à estimer l'incertitude élargie $U(Q)$ par la relation suivante :

$$\frac{U(Q_{\text{calculé}})}{Q_{\text{calculé}}} = k \cdot \frac{u(Q_{\text{calculé}})}{Q_{\text{calculé}}} = k \cdot \sqrt{\left(\frac{u(Q_6)}{Q_6}\right)^2 + \left(\frac{u(C_6)}{C_6}\right)^2} \quad (35.)$$

Avec :

- $u(Q_6)$: incertitude-type associée au débit Q_6
- $u(C_6)$: incertitude-type associée au coefficient C_6
- k : facteur d'élargissement, pris égal à 2 pour un niveau de confiance de 95%

- Coefficient C_6 et incertitude associée

Les développements réalisés pour le coefficient de surface C_2 peuvent être conduits pour le coefficient C_6 , de manière analogue. Pour le coefficient C_6 , on distingue deux cas seulement :

- Cas D : $C_6 = 0,967$, avec $u(C_6) = 0,038$ soit $\frac{u(C_6)}{C_6} = 3,9\%$
- Cas E : $C_6 = 1$, avec $u(C_6) = 0,038 + \frac{|1-0,967|}{2} \approx 0,055$ d'où $\frac{u(C_6)}{C_6} \approx 5,5\%$

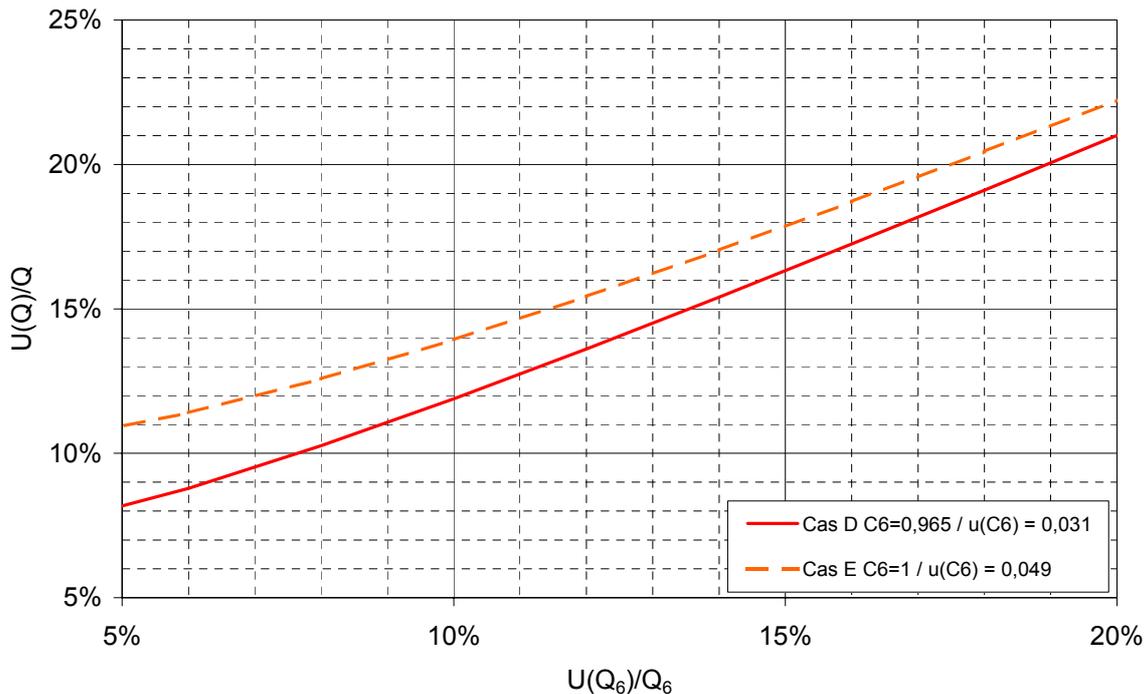


Figure 13 – Incertitude sur le débit Q calculé à partir de C_6 – Cas général

L'axe des abscisses commence à la valeur d'incertitude de $\pm 5\%$, qui est la valeur minimale de l'incertitude déterminée au paragraphe 2.7.2.

LECTURE DU GRAPHIQUE :

- en abscisse, on porte l'incertitude $U(Q_6)/Q_6$ associée au débit Q_6 déterminée lors du jaugeage à 0,6 h. En aucun cas, cette incertitude ne peut être inférieure à $\pm 5\%$, d'où la zone grisée à gauche du graphique ;
- en fonction du cas D ou E dans lequel on se situe, on reporte sur l'axe des ordonnées pour obtenir l'incertitude $U(Q)/Q$ associée au débit total calculé avec la relation $Q = C_6 \cdot Q_6$.

Par exemple : dans le cas E, avec $U(Q_6)/Q_6 = \pm 7\%$, $U(Q)/Q$ est de l'ordre de $\pm 12\%$.

Conclusions :

- le cas D, représenté en rouge sur la figure, est le plus favorable : c'est en effet le cas où l'on a la plus faible incertitude-type associée au coefficient C_6 .
- dans le meilleur des cas, si l'on suppose que l'incertitude du jaugeage à 0,6 h est de l'ordre de $\pm 5\%$, alors l'incertitude associée au débit Q calculé par la relation $Q = C_6 \cdot Q_6$ est au minimum supérieure à $\pm 8\%$.

• **Comparaison des incertitudes des débits calculés avec C_2 et C_6**

Le graphique ci-dessous présente la comparaison de l'utilisation des deux coefficients, dans les différents cas évoqués aux paragraphes précédents. En toute rigueur, pour un jaugeage donné effectué au moulinet avec un point par verticale, l'incertitude que l'on aura déterminée sur les débits Q_6 et de Q_2 (portée en abscisse) ne sera pas identique. Cependant, en comparant la position respective des courbes de la figure 14, on peut conclure que l'incertitude $U(Q)/Q$ est plus faible en utilisant le coefficient C_6 que le coefficient C_2 .

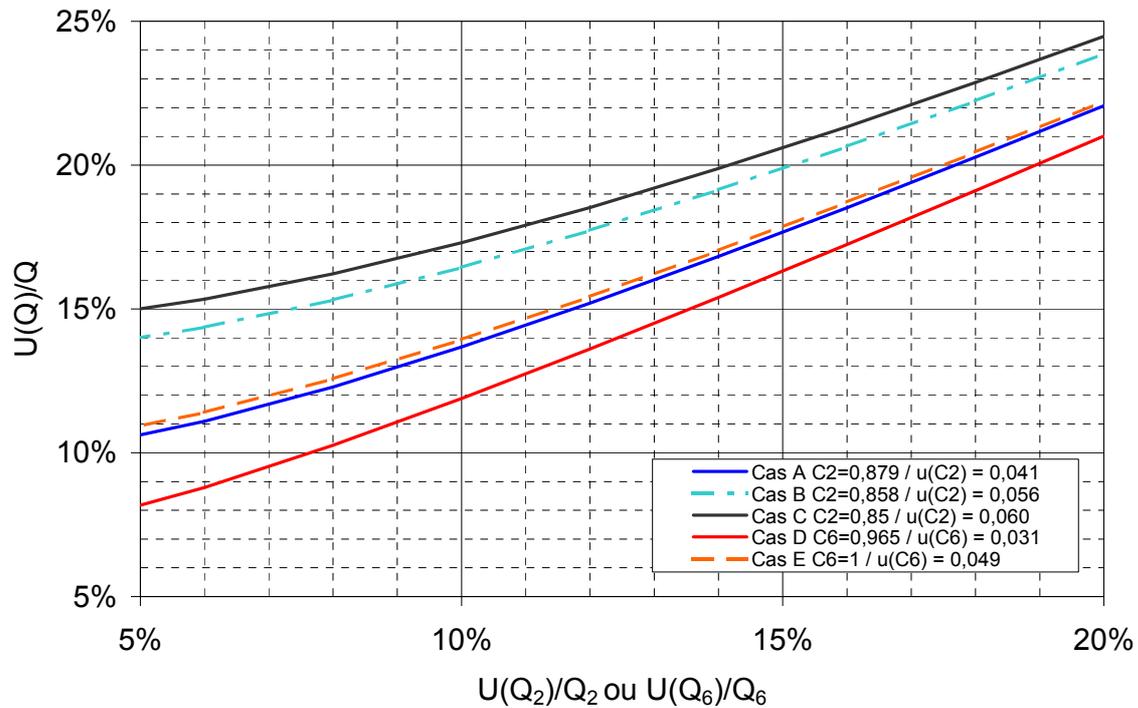


Figure 14 - Comparaison des coefficients C_2 et C_6 – Cas général

L'axe des abscisses commence à la valeur d'incertitude de $\pm 5\%$, qui est la valeur minimale de l'incertitude déterminée au paragraphe 2.7.2.

En pratique, les moyens à mettre en œuvre pour réaliser un jaugeage en un point à 0,6 h sont très proches des moyens utilisés pour un jaugeage complet (en termes de moyens de mesure et de durée du jaugeage), avec une perte sensible sur l'incertitude. Ainsi, le jaugeage en un point à 0,6 h est le moins bon des compromis.

ANNEXE 8 Coefficient $C_6 = \frac{Q_{mesuré}}{Q_6}$

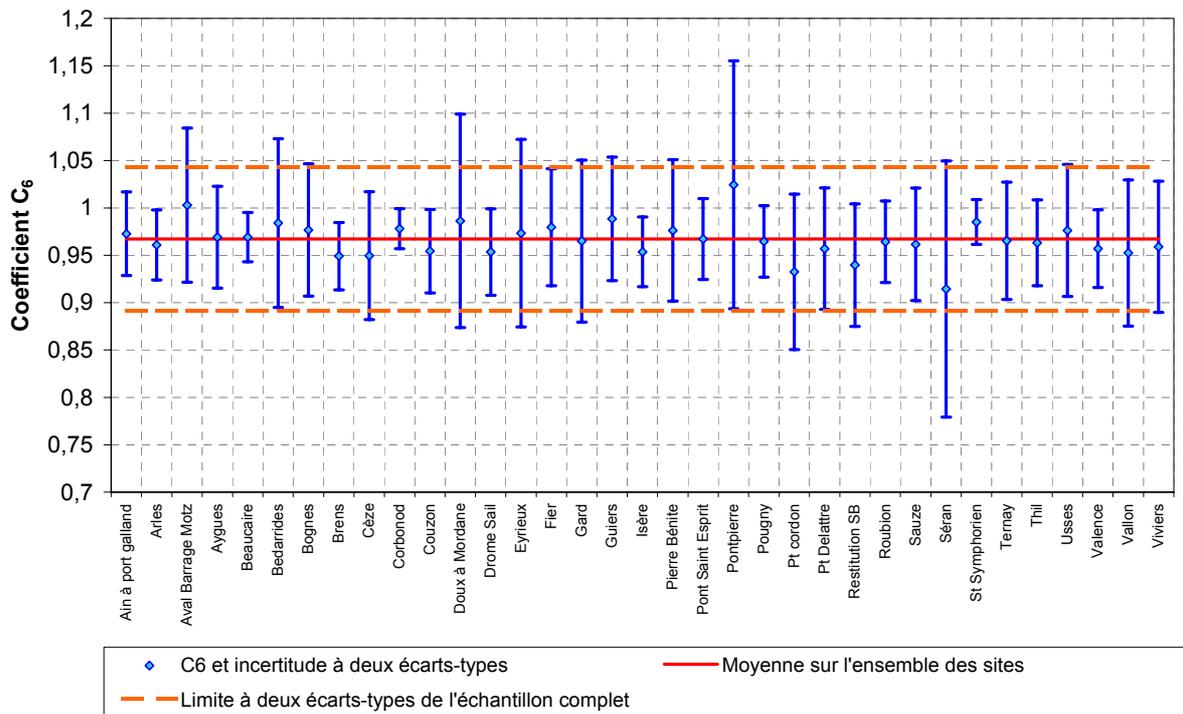


Figure 15 - Coefficient C_6 par site

ANNEXE 9 Coefficient $C_2 = \frac{Q_{mesuré}}{Q_2}$

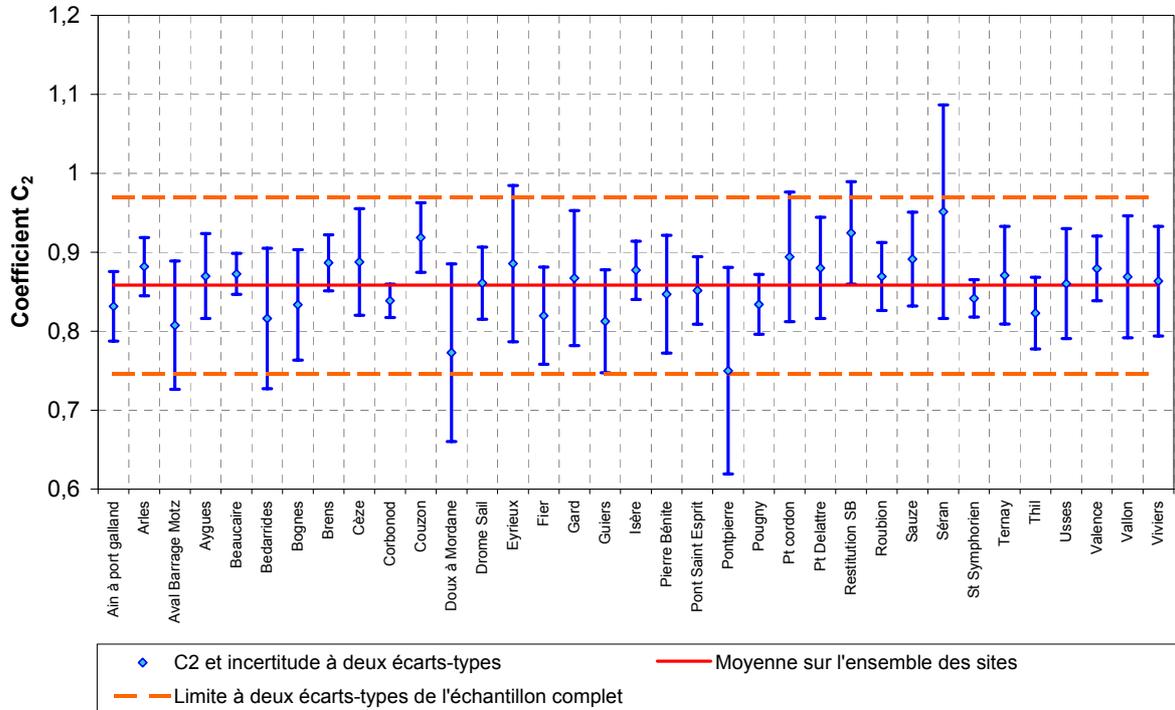


Figure 16 - Coefficient C_2 par site -

ANNEXE 10 Coefficient $C_6 = \frac{Q_{mesuré}}{Q_6}$ en fonction du débit

Il y a quelques valeurs très éloignées du nuage de point ; elles sont peut-être aberrantes mais peu nombreuses donc sans influence sur le résultat final.

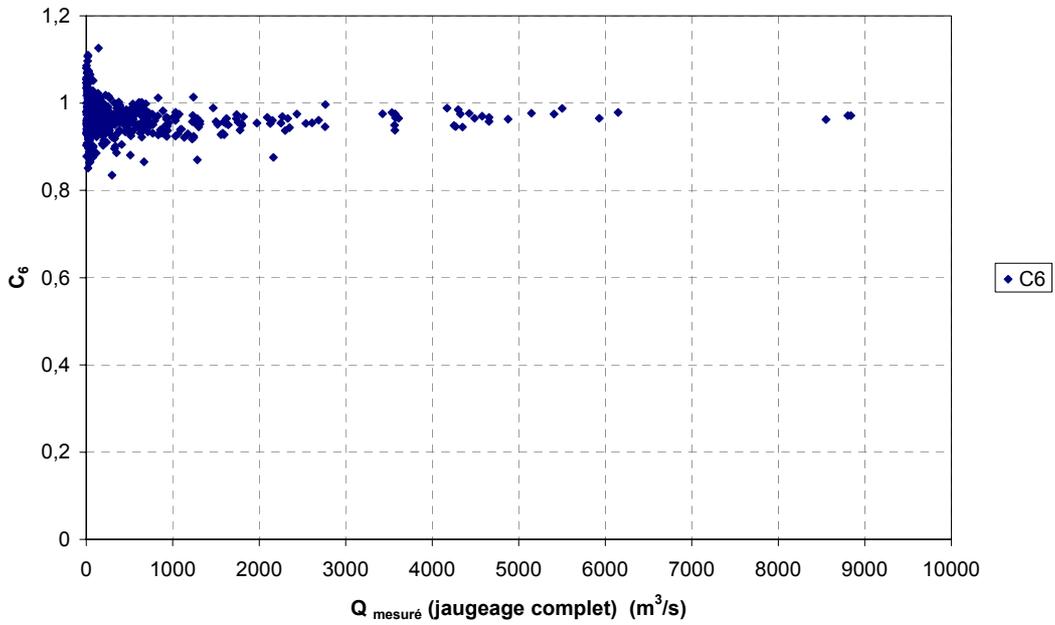


Figure 17 - Coefficient C6 en fonction du débit

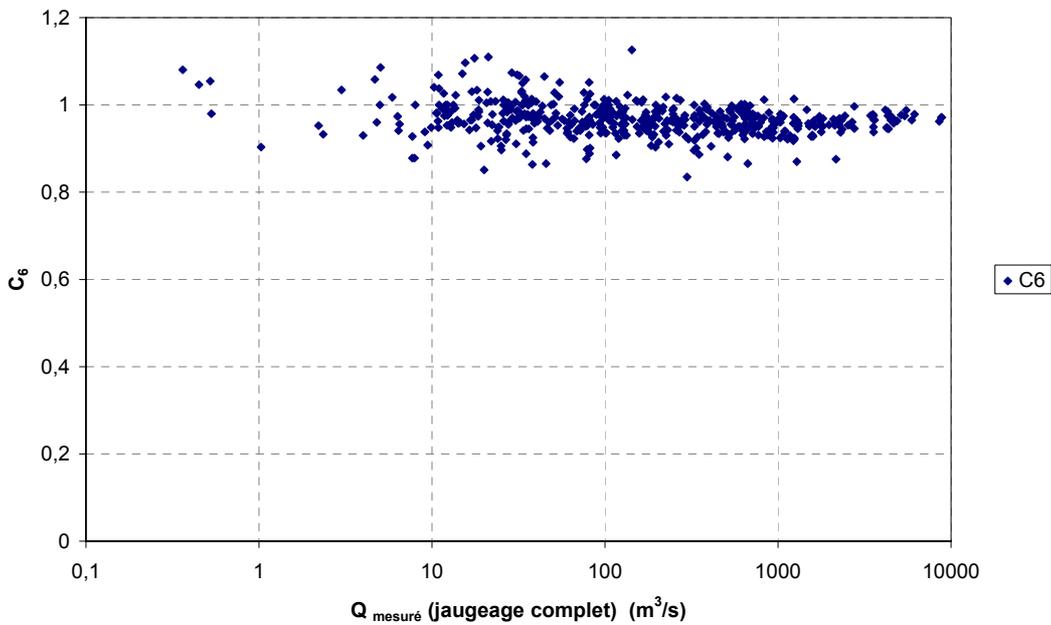


Figure 18 - Coefficient C₆ en fonction du débit – Échelle logarithmique

ANNEXE 11 Coefficient $C_2 = \frac{Q_{mesuré}}{Q_2}$ en fonction du débit

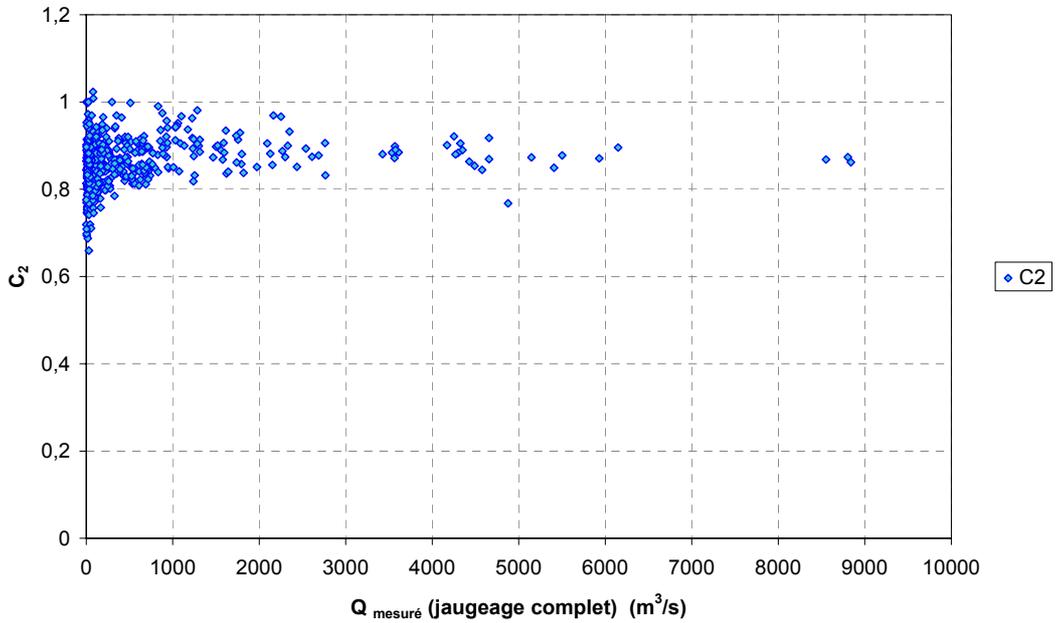


Figure 19 - Coefficient C_2 en fonction du débit

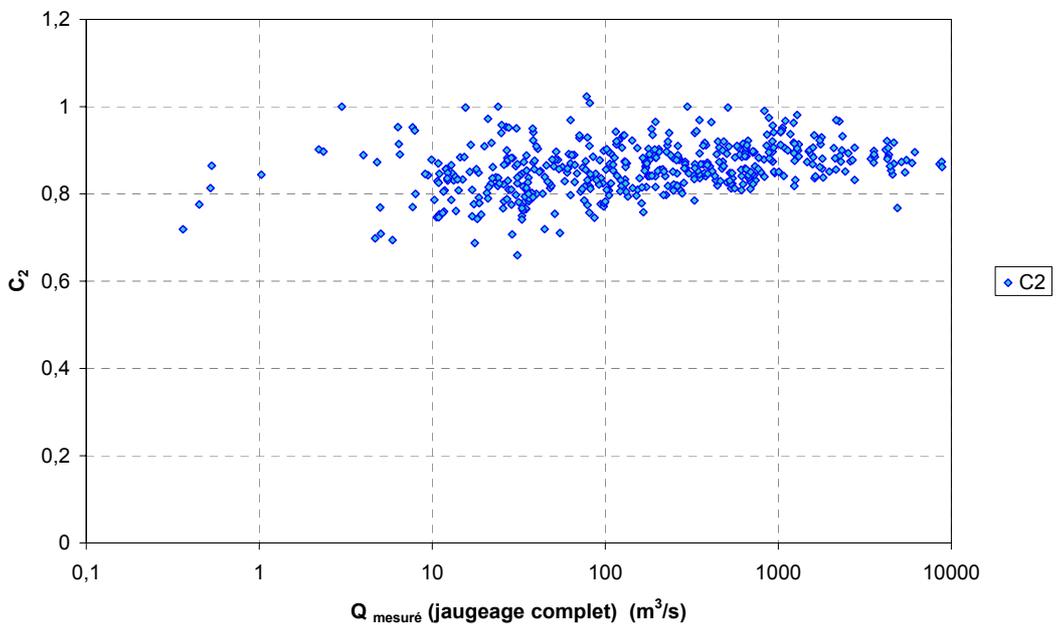


Figure 20 - Coefficient C_2 en fonction du débit – Échelle logarithmique

ANNEXE 12 Coefficient $C_6 = \frac{Q_{mesuré}}{Q_6}$ en fonction de la vitesse

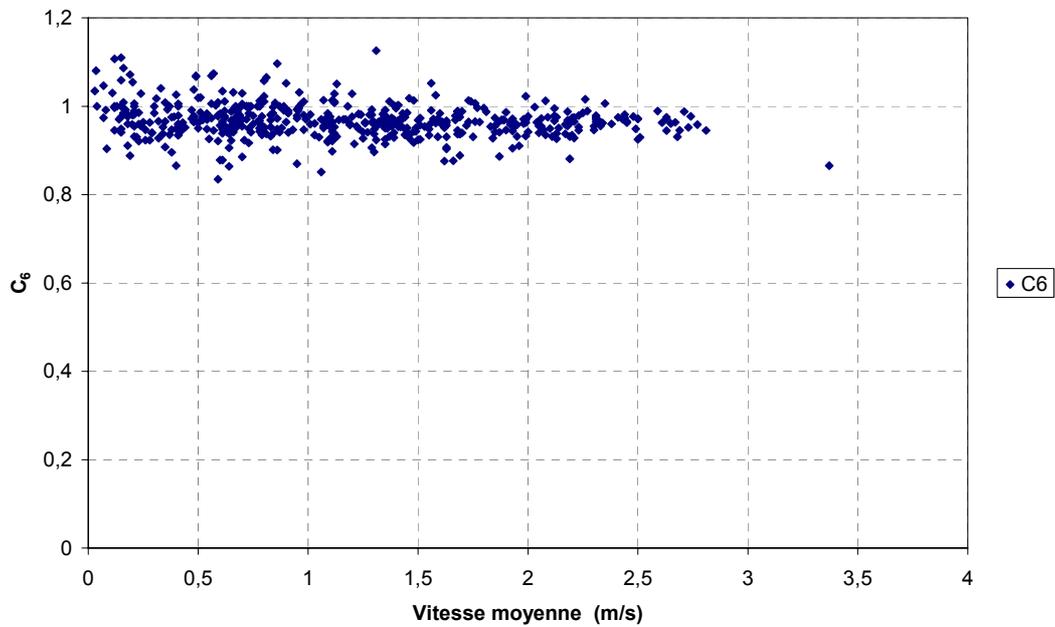


Figure 21 - Coefficient C_6 en fonction de la vitesse

ANNEXE 13 Coefficient $C_2 = \frac{Q_{mesuré}}{Q_2}$ en fonction de la vitesse

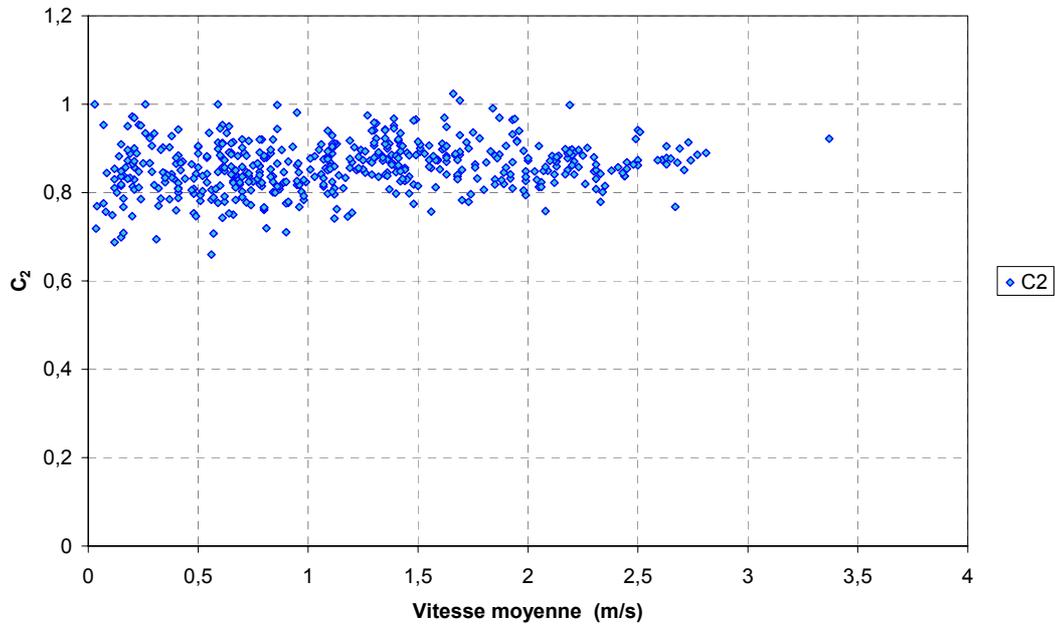


Figure 22 - Coefficient C_2 en fonction de la vitesse

ANNEXE 14 Comparaison ADCP - Moulinet

Site	Date	Heure	Q _{ADCP} (m ³ /s)	Q _{moulinet} (m ³ /s)	(Q _{ADCP} - Q _{moulinet}) / Q _{moulinet}	V _{moyenne} (m/s) (moulinet)	Commentaires
Beaucaire	24/02/1995	9h45 à 11h30	3 532	3 551	-0,5%	1,68	moulinet standard et au moins 6 traversées ADCP
Corbonod	27/11/2003	9h à 10h54	324	317	2,2%	1,09	jaugeage de surface pour le moulinet
Fourques	23/05/1995	10h55 à 11h50	324	323	0,3%	0,67	4 traversées pour l'ADCP
Fourques	23/05/1995	14h30 à 15h15	266	278	-4,3%	0,61	moulinet standard et au moins 6 traversées ADCP
Le Gard	19/03/1997		11	12	-7,0%	0,08	moulinet standard et au moins 6 traversées ADCP
Isère	27/02/2002	9h50 à 11h55	337	330	2,1%	2,30	moulinet standard et au moins 6 traversées ADCP
Le Fier	01/02/1995	15h15 à 16h45	105	111	-5,4%	1,23	4 traversées pour l'ADCP
Sault Brénaz	04/04/1995		679	663	2,4%	1,40	moulinet standard et au moins 6 traversées ADCP
Sault Brénaz	18/03/2003		500	503	-0,6%	0,90	moulinet standard et au moins 6 traversées ADCP
Sault Brénaz	23/10/2002	14h20 à 17h15	1 049	1 034	1,5%	1,35	moulinet standard et au moins 6 traversées ADCP
Sault Brénaz	23/10/2002	14h20 à 17h15	1 067	1 050	1,6%	1,39	moulinet standard et au moins 6 traversées ADCP
Sauze	27/03/2002	15h50 à 17h10	29	29	-2,0%	0,14	moulinet standard et au moins 6 traversées ADCP
Ternay	11/03/1997	11h à 13h	853	831	2,6%	0,78	la valeur ADCP est la moyenne de 2 valeurs : 877 (issue de 5 traversées) et 828 (issue de 6 traversées)
Ternay	25/05/2004	14h50 à 17h15	501	481	4,2%	0,47	moulinet standard et au moins 6 traversées ADCP
Ternay	25/05/2004	11h à 13h05	474	451	5,0%	0,44	moulinet standard et au moins 6 traversées ADCP
Ternay	10/06/2004	8h35 à 11h36	735	720	2,0%	0,68	moulinet standard et au moins 6 traversées ADCP + forte variation de niveau pendant le jaugeage
Ternay	10/06/2004	14h45 à 17h30	764	711	7,5%	0,67	4 traversées ADCP et moulinet non standard
Thil	02/12/1998	9h52 à 10h40	25	24	2,5%	0,73	moulinet standard et au moins 6 traversées ADCP
Viviers	17/10/2003	16h30 à 17h50	677	703	-3,7%	0,55	la valeur ADCP est la moyenne de 2 valeurs : 683 (issue de 4 traversées) et 671 (issue de 6 traversées) et le moulinet est un jaugeage de surface

moyenne	0,5%	
écart-type	3,7%	
incertitude composée élargie	7,9%	

Les valeurs du tableau sont représentées en fonction du débit et de la vitesse sur les deux figures suivantes.

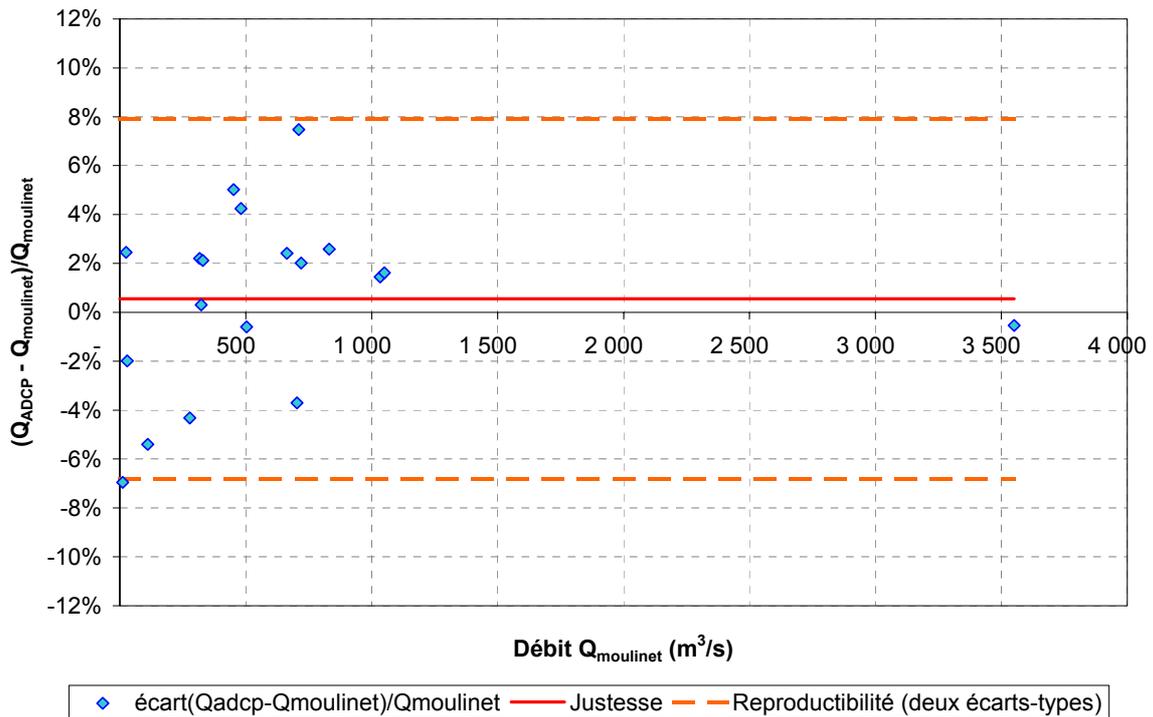


Figure 23 - Comparaison ADCP – Moulinet en fonction du débit

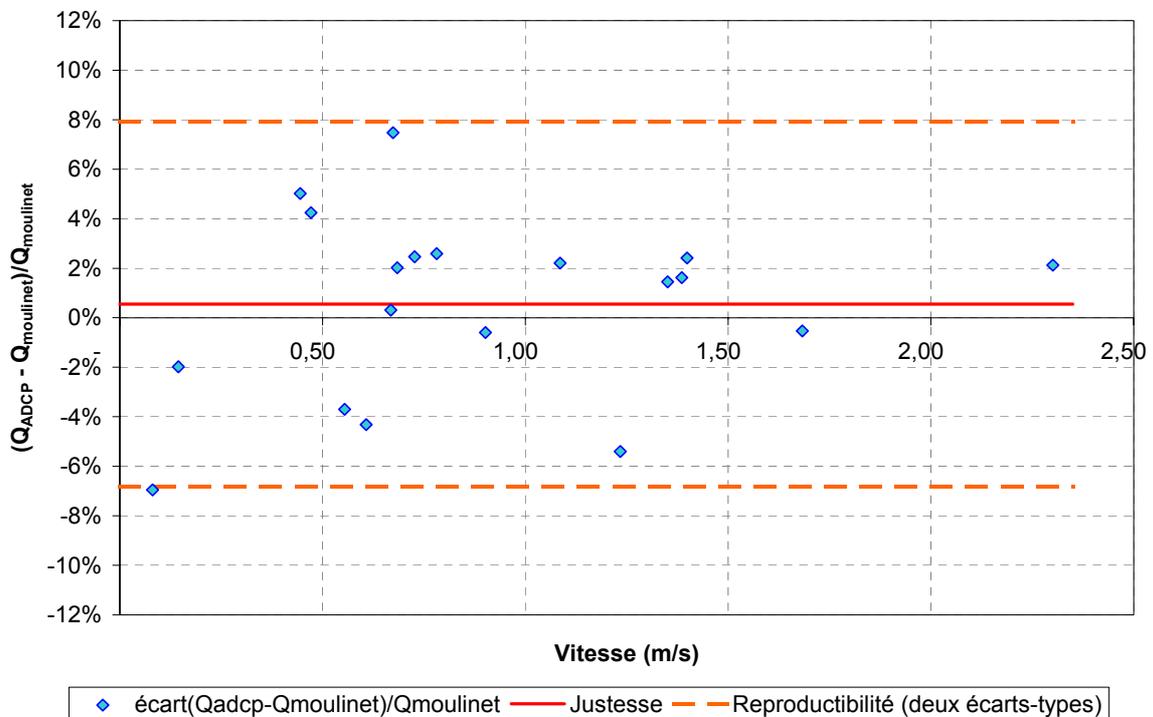


Figure 24 - Comparaison ADCP – Moulinet en fonction de la vitesse

ANNEXE 15 Mode d'emploi de « modèle incertitude.xlt »

Le modèle de calcul de l'incertitude est constitué de trois onglets :

- « résultats » : feuille de calcul comprenant la zone de saisie des paramètres du jaugeage et l'affichage des résultats
- « calculs » : feuille de calcul comprenant l'ensemble des calculs
- « graphique » : feuille graphique comprenant le graphique des débits représentés avec leurs incertitudes associées

Utilisation du modèle :

- ouvrir le modèle depuis l'explorateur de document
- ouvrir le fichier Excel exporté du logiciel de jaugeage de la CNR (voir figure ci-dessous)
- copier la zone comprenant les valeurs du jaugeage (zone en grisé sur la Figure 25 - Export du logiciel de jaugeage de la CNR : zone à copier)
- sur l'onglet « calculs » du fichier « modèle incertitude1.xls », coller la sélection sur la zone blanche
- sur l'onglet « résultats », saisir les paramètres du jaugeage

DELATTRE
 JAUGEAGE Standard le 02/03/2000 14:15:00

Jaugeage à la traîlle du pont Delattre en barque Neptune de 13h25 à 15h00.
 Croix-Luzet: 167.17 Villeurbanne: 165.59 St clair: 164.32
 Pt Delattre: 163.73 Pt Morand: 163.48 Pt Gallieni: RD 162.05 RG 162.04
 PK 1.250 : 161.91 PK 3 : 161.35 La Saône (1100m3/s).

Zéro échelle : 161.6 NGF ORTHOMETRIQUE Plan d'eau : 163.73 NGF ORTHOMETRIQUE
 Côte aval : 161.35 NGF ORTHOMETRIQUE
 Hélice : 0994-103995-50KG-03/99 Moulinet : 0999-C31-MOULINET OTT
 Débit total Q : 1 594.84 m3/s Débit O2 : 1 803.46 m3/s Débit O6 : 1 718.93 m3/s

Valeurs grisées à copier

Abscisse	Profondeur	0.9 h	0.8 h	0.6 h	0.4 h	0.2 h	20 cm
5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14.00	1.85	0.47	0.57	0.83	1.01	1.08	1.02
20.00	3.40	0.66	0.87	1.25	1.14	1.11	1.21
30.00	4.70	1.16	1.44	1.47	1.58	1.46	1.75
40.00	4.50	1.53	1.72	1.60	1.61	1.99	1.94
50.00	4.95	0.94	1.44	1.89	1.94	1.99	2.12
60.00	6.10	1.27	1.60	1.54	1.79	1.79	1.66
70.00	7.05	1.42	1.13	1.84	1.61	1.84	1.75
80.00	7.70	1.08	1.40	1.39	1.53	1.46	1.42
90.00	9.05	0.94	0.97	1.44	1.08	1.32	1.21
100.00	8.25	1.08	1.28	1.30	1.27	1.32	1.23
110.00	7.60	1.47	1.73	1.82	1.54	1.54	1.84
120.00	7.40	1.53	1.56	1.79	1.87	1.98	1.99
130.00	7.65	1.73	1.47	1.80	1.75	1.99	1.84
140.00	7.35	1.27	1.80	1.89	1.66	2.01	1.98
150.00	7.15	1.32	1.30	1.80	1.65	1.72	1.89
160.00	6.65	1.28	1.34	1.46	1.47	1.68	1.86
170.00	4.80	1.30	1.21	1.39	1.56	1.47	1.46
179.00	3.60	0.99	0.73	0.85	0.82	1.06	1.06
183.00	4.35	0.56	0.71	0.80	0.83	0.87	0.76
189.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

1 CNR 08/04/2004

Figure 25 - Export du logiciel de jaugeage de la CNR : zone à copier

La partie droite de l'onglet est la zone de résultats, qui ne doit pas être modifiée :

- Zones oranges : zones de calcul – ne pas modifier les formules

L'onglet "Graphique" donne une représentation graphique du débit estimé et des incertitudes associées.

Ce modèle de calcul de l'incertitude a été utilisé pour plusieurs jaugeages, dont un exemple d'application est donné page suivante.

- **Exemple d'application à un cas particulier** : la figure ci-dessous présente l'application du modèle "incertitude.xlt" au cas du jaugeage du 2 mars 2000 au Pont Delattre; en prenant les coefficients C_2 et C_6 du site (tableau en ANNEXE 3).

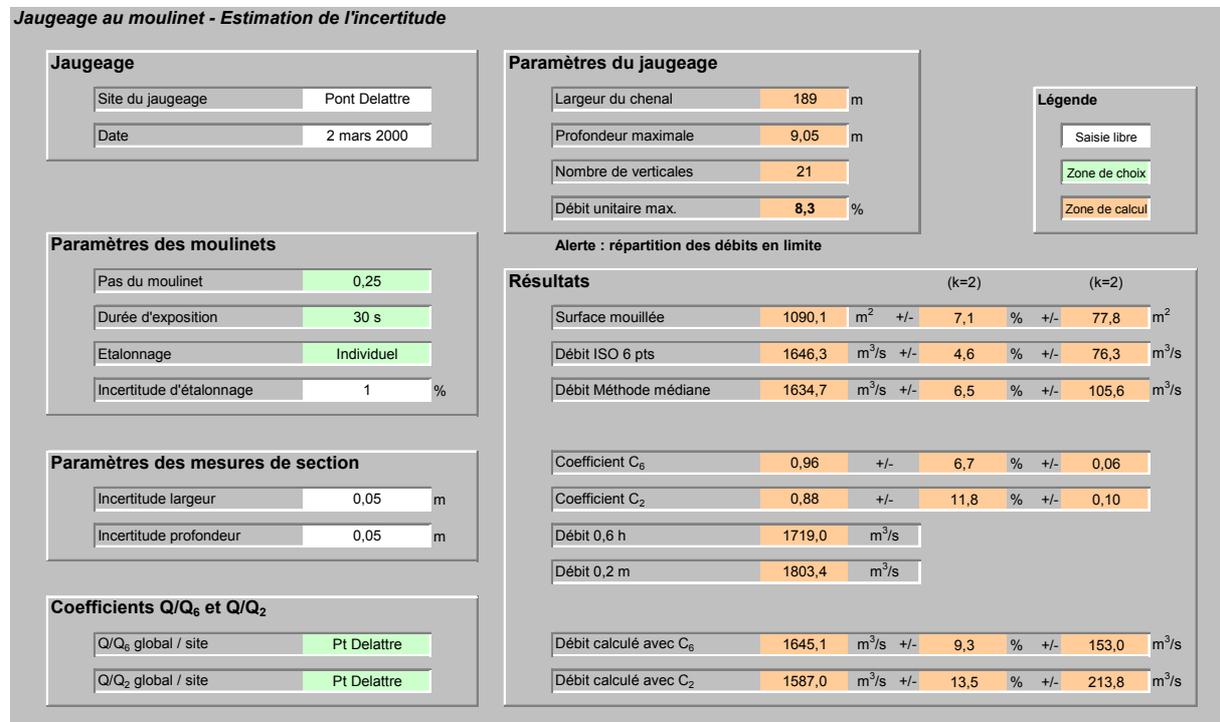


Figure 28 - Exemple d'application au cas Pont Delattre – Onglet Résultats

Comparaison des débits estimés et de leurs incertitudes associées

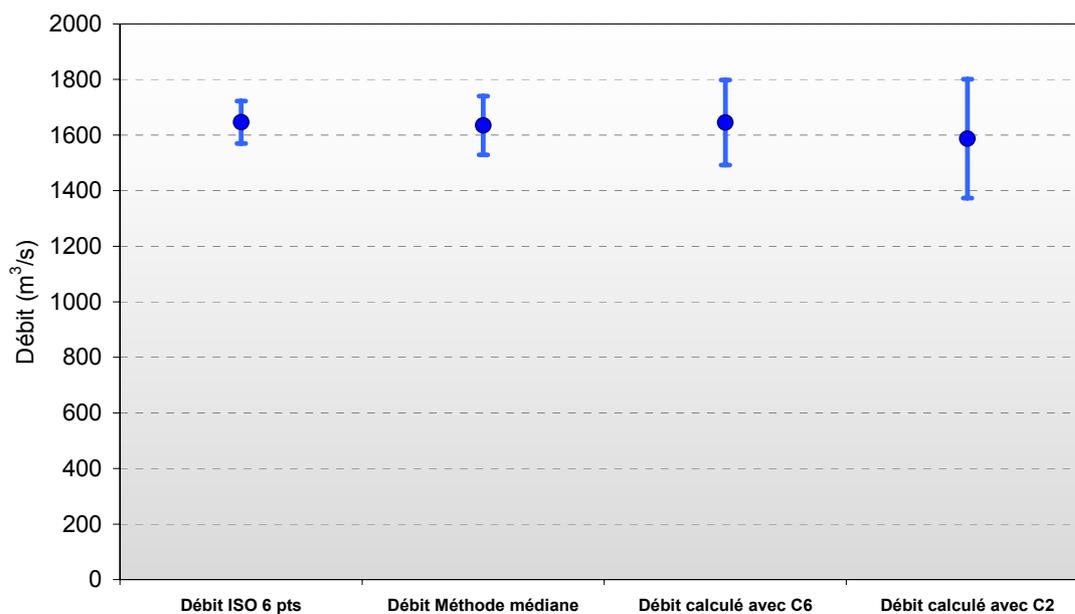


Figure 29 - Exemple d'application au cas Pont Delattre - Onglet graphique

ANNEXE 16 Illustration de l'influence du nombre de verticales

Des essais ont été effectués sur plusieurs cas, pour observer l'influence du nombre de verticales sur le résultat et sur son incertitude associée. Ces résultats sont présentés ci-dessous, pour deux méthodes de calcul du débit : méthode de la médiane (6 points par verticale) et méthode CNR (6 points par verticale).

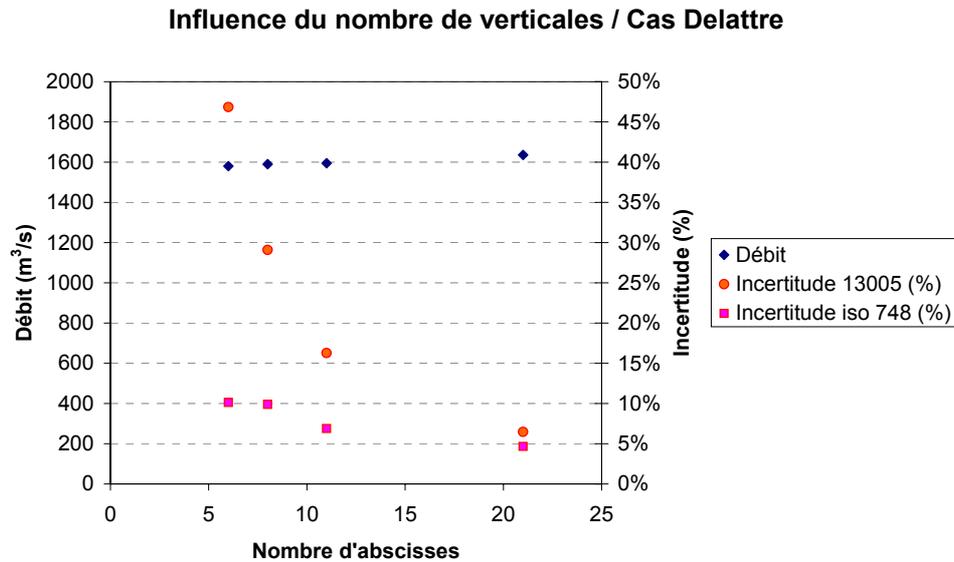


Figure 30 - Influence du nombre de verticales sur l'incertitude de mesure du débit / Méthode médiane

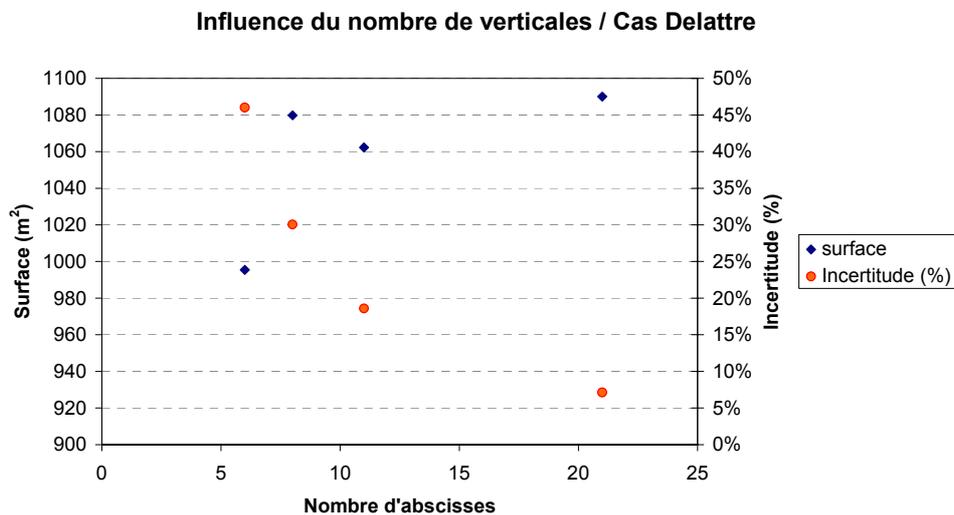


Figure 31 - Influence du nombre de verticales sur l'incertitude de mesure de la surface / Méthode médiane

Influence du nombre de verticales / Cas Delattre

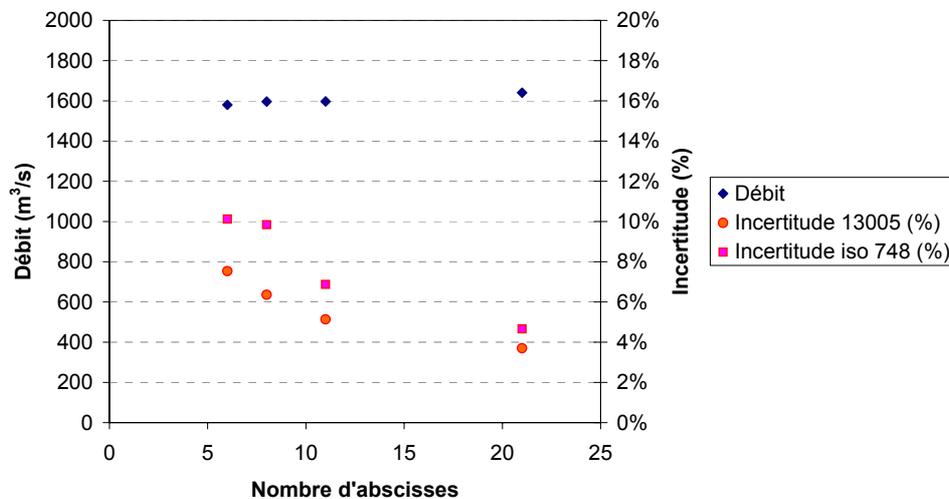


Figure 32 - Influence du nombre de verticales sur l'incertitude de mesure du débit / Méthode CNR

Influence du nombre de verticales / Cas Delattre

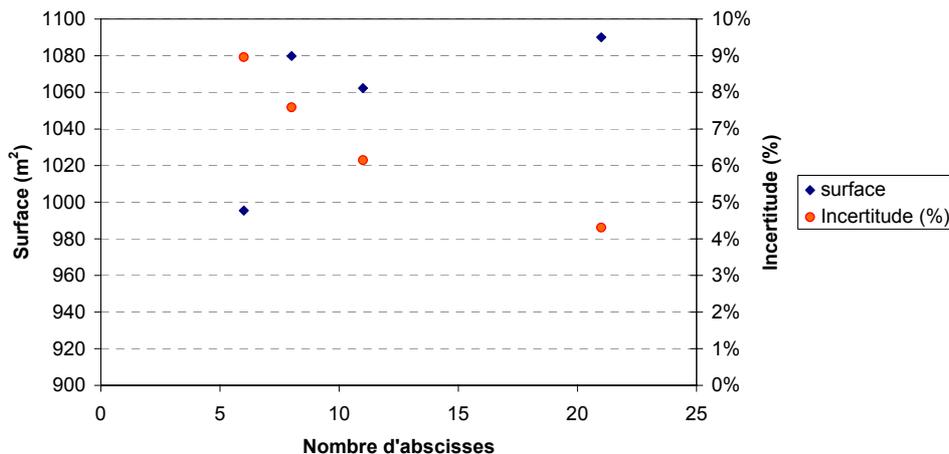


Figure 33 - Influence du nombre de verticales sur l'incertitude de mesure de la surface / Méthode CNR

CONCLUSION

Sur ce cas particulier, on observe les points suivants :

- Quelle que soit la méthode de calcul (médiane ou CNR), l'incertitude de mesure estimée par la méthode de la norme NF ENV 13005 diminue de manière régulière lorsque le nombre de verticales augmente ; l'incertitude de mesure estimée par la méthode de la norme NF EN ISO 748 diminue lorsque le nombre de verticales augmente, avec des ruptures de pente liées aux valeurs par défaut des composantes d'incertitudes
- Les deux méthodes (médiane et CNR) conduisent à des résultats d'autant plus proches que le nombre de verticales est grand.

L'analyse des composantes d'incertitude pour le cas complet montre que la composante prépondérante est liée à la mesure de la section (surface mouillée), due essentiellement à la méconnaissance du profil du fond. C'est cependant cette composante qui est la plus délicate à évaluer.