



Quantification des incertitudes sur les jaugeages par exploration du champ des vitesses : la méthode Q+ et son intégration dans BAREME

Journées de l'Hydrométrie

Toulouse, 6-7 février 2012

Pour mieux
affirmer
ses missions,
le Cemagref
devient Irstea



www.irstea.fr

**Jérôme Le Coz¹, Pierre-Marie Bechon²,
Benoît Camenen¹, Guillaume Dramais¹**

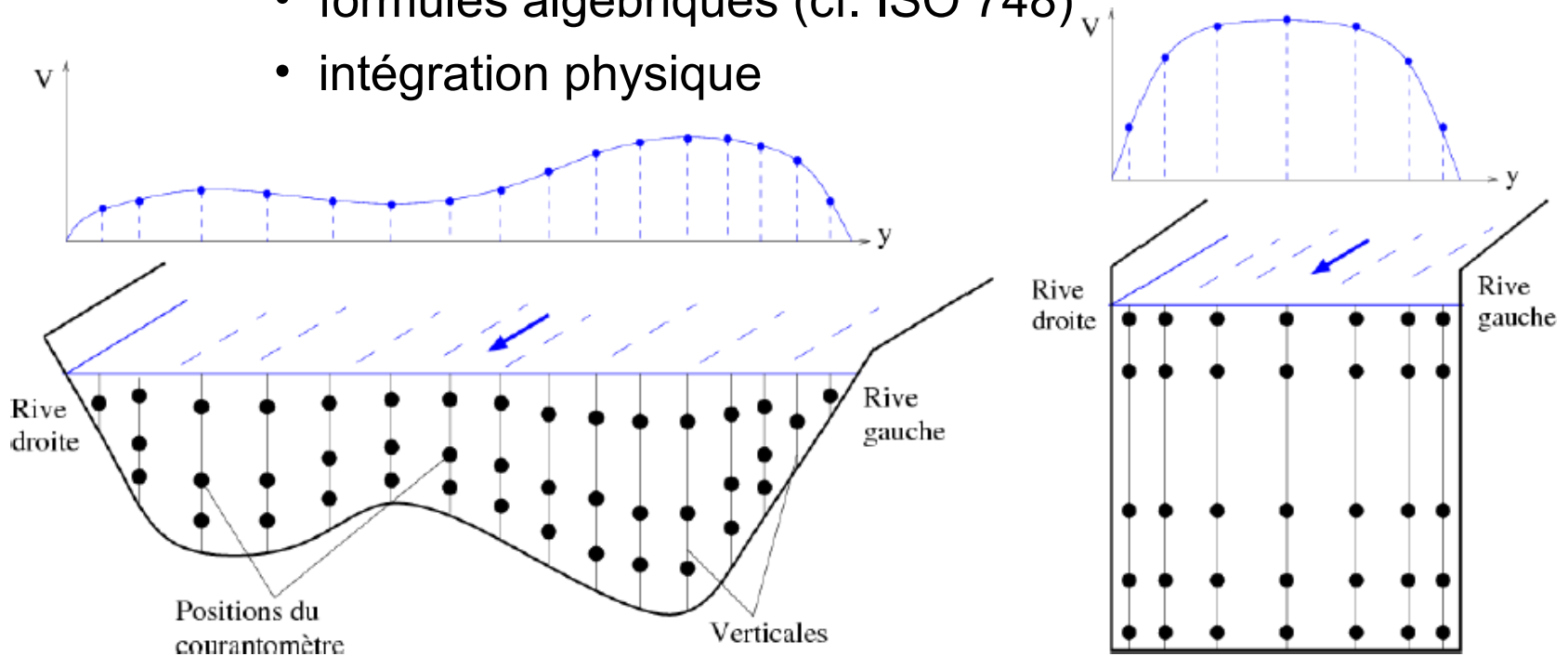
¹ Irstea (Cemagref), Hydrologie-Hydraulique, Lyon, France

² DREAL Rhône-Alpes, Lyon, France

Mesures de débit par exploration des vitesses

Stratégie d'échantillonnage pour intégration du flux

- m verticales de mesure
- p points de vitesse :
 - intégration numérique (manuel, trapèzes, splines...)
 - formules algébriques (cf. ISO 748)
 - intégration physique





Position du problème

- Jaugeage : 2 définitions distinctes
 - mesure directe de h et Q réels pendant une durée réduite, dans des conditions hydrauliques données
 - estimation à h donné du débit Q de la courbe de tarage (régime hydraulique de référence)
- Sources d'erreur :
 1. mesures : instruments / conditions de mesure
 2. méthode de calcul du débit
 3. débit variable pendant le jaugeage
 4. écart au régime de référence de la courbe de tarage
 - régime transitoire (hystérésis)
 - variation du contrôle hydraulique

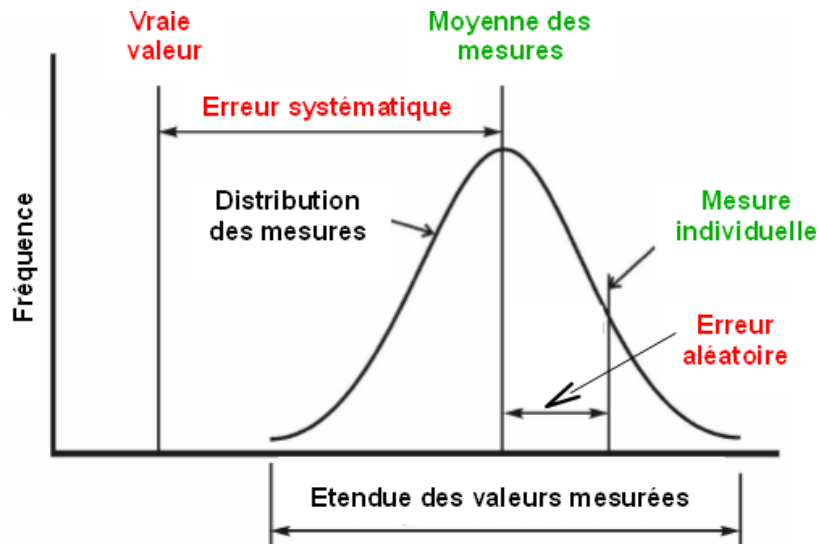
Concepts métrologiques

Erreurs et incertitudes

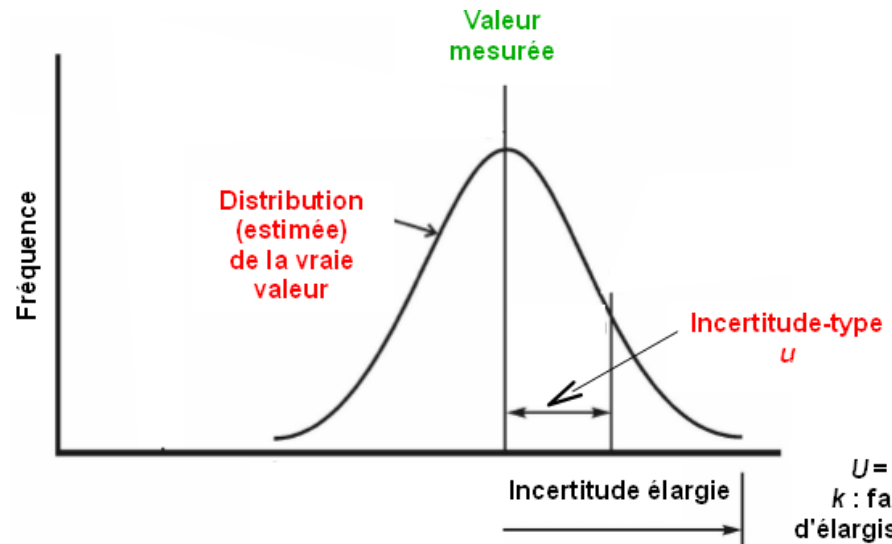
- Erreur aléatoire / systématique
- Incertitude absolue [m³/s] / relative [%]

Expression des incertitudes sur les mesures

- Guide ISO NF ENV 13005 (GUM), JCGM (2008)
- Incertitude élargie → niveau de confiance 95%



Notion d'erreur



Notion d'incertitude

$$U = k u$$

k : facteur d'élargissement

Méthode ISO748 incertitudes

Incertitude liée

- aux mesures élémentaires
- au calcul du débit

Méthodes de calcul type GUM
pour chaque technique de jaugeage

*cf. Guide Onema/Irstea
(2011)*

$$u_Q^2 = u_s^2 + u_m^2 + \frac{1}{m} \left[u_b^2 + u_h^2 + u_p^2 + \frac{1}{n} (u_c^2 + u_e^2) \right]$$

intégration verticale
des vitesses

intégration transversale
des vitesses et des profondeurs



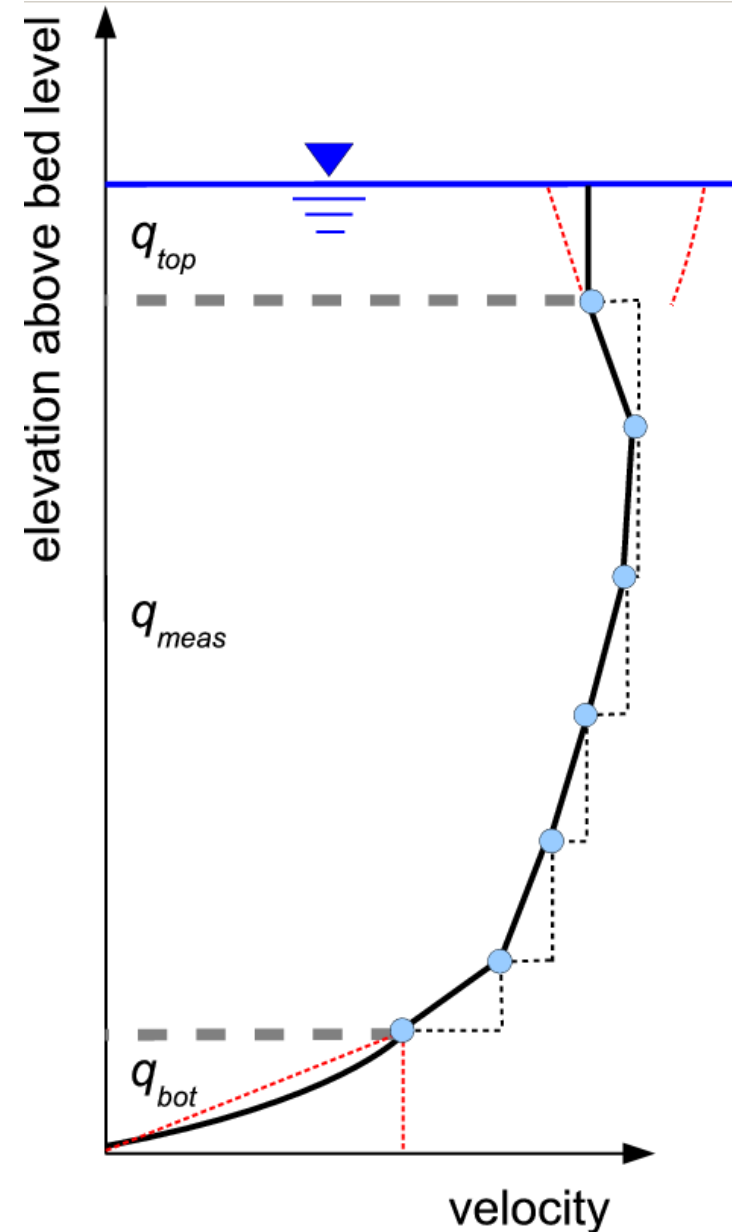
Limites de la méthode ISO748 incertitudes

- Les extrapolations de vitesse (haut / fond / bords) ne sont pas considérées explicitement
- Les valeurs indicatives données dans les tableaux de l'annexe E ne sont pas applicables à de nombreux cas « non canoniques »
- La composante u_m liée au nombre de verticales est très souvent prépondérante alors que :
 - sa valeur est tabulée empiriquement
 - elle ne dépend pas de la répartition des verticales
 - elle mêle intégration des vitesses et des profondeurs
 - elle ne tient pas compte du type de section et d'écoulement rencontrés

Méthode généralisée Q+

Incertitude liée à l'intégration verticale des vitesses (u_p)

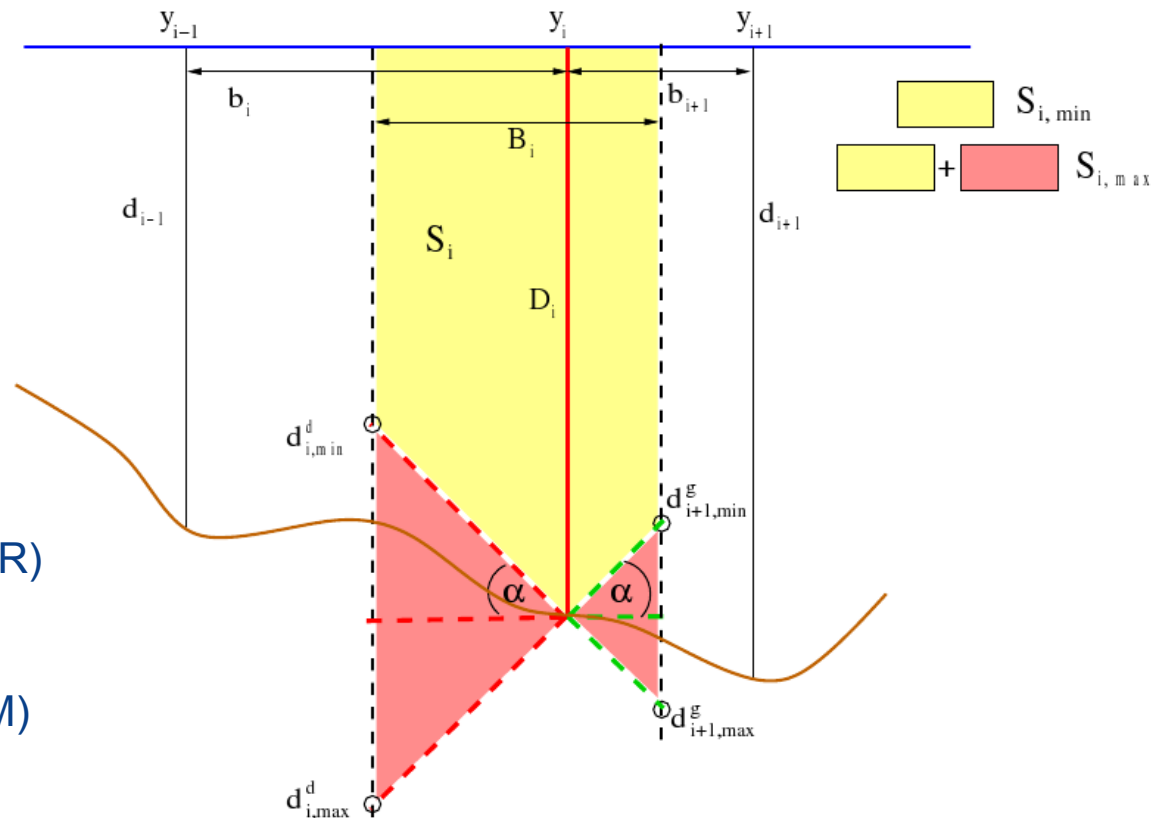
- Formules à n points :
 - valeurs ISO748 interpolées
- Point par point :
 - min/max et hypothèse de distribution rectangulaire (GUM)
 - q mesuré
 - q extrapolé haut/bas
- Méthode par intégration :
 - assimilée à une formule à 1 point



Méthode généralisée Q+

Incertitude liée à l'intégration latérale (u_m)

- Profondeurs : α = angle de variation maximale du fond
- Vitesses : hypothèse de variation en $d^{-1/2}$



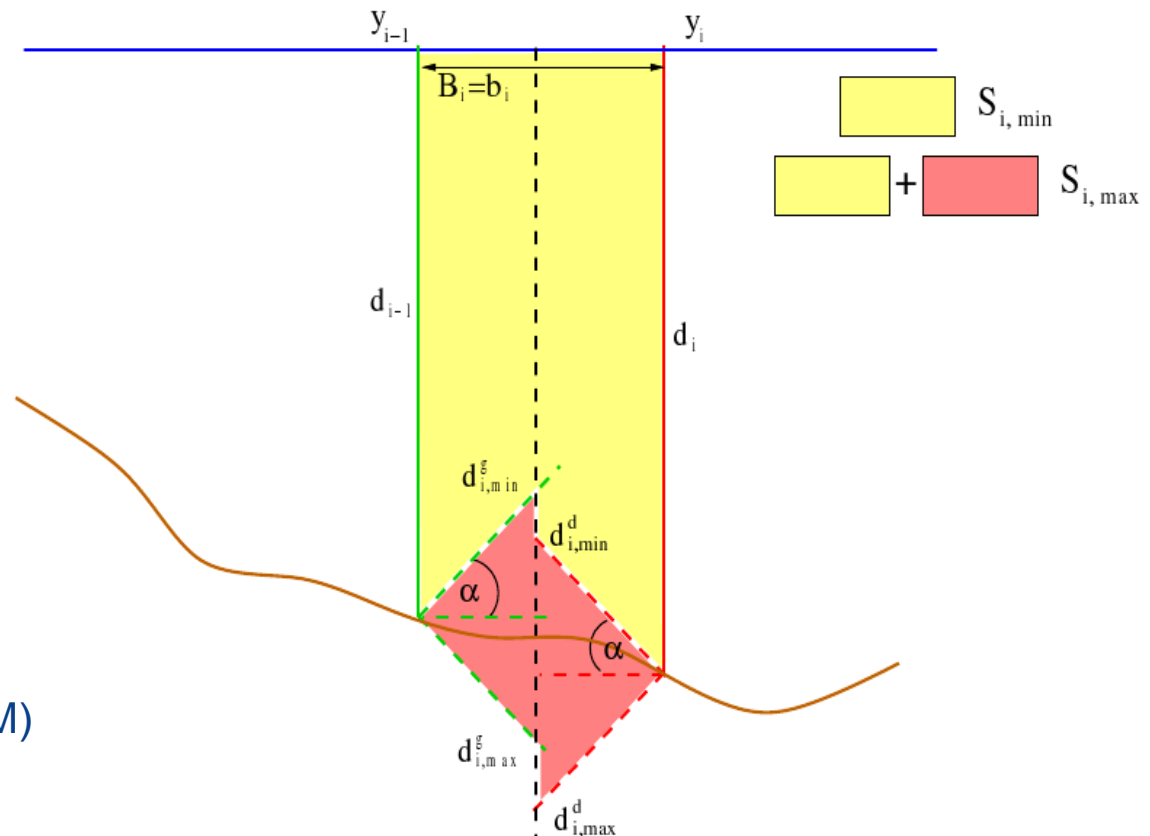
Méthode de dépouillement
Section **médiane** (Barème, CNR)

Section min/max
Distribution rectangulaire (GUM)

Méthode généralisée Q+

Incertitude liée à l'intégration latérale (u_m)

- Profondeurs : α = angle de variation maximale du fond
- Vitesses : hypothèse de variation en $d^{-1/2}$

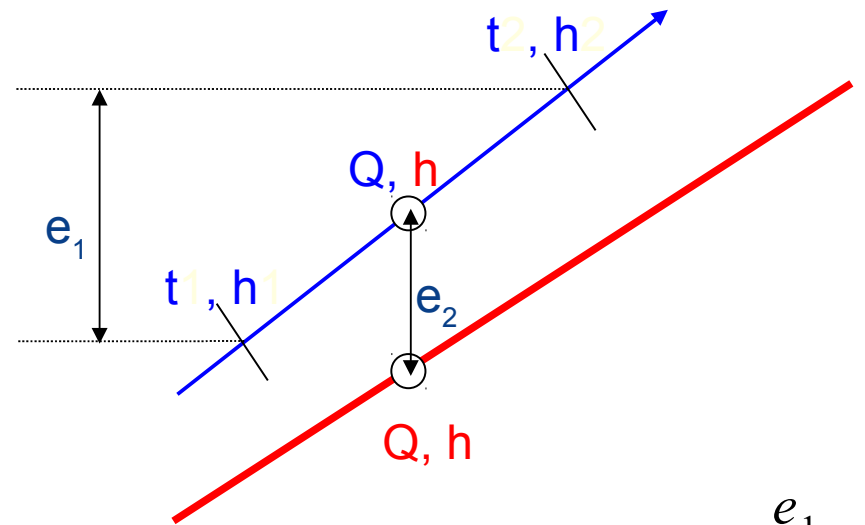
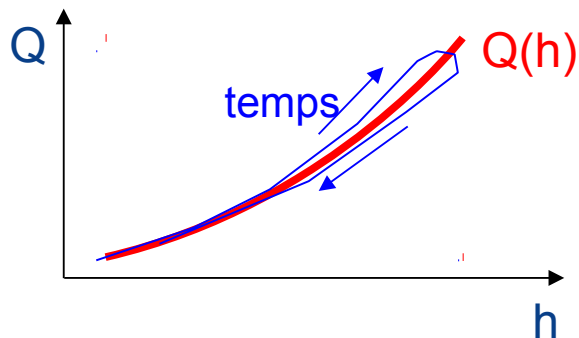
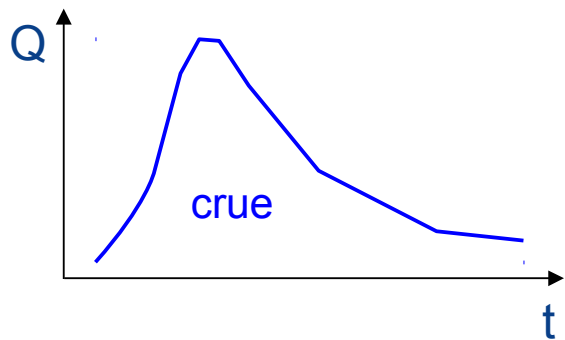


Méthode de dépouillement
Section **moyenne**

Section min/max
Distribution rectangulaire (GUM)

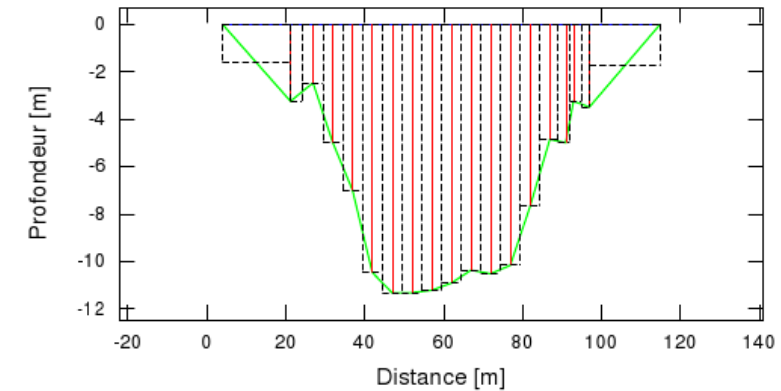
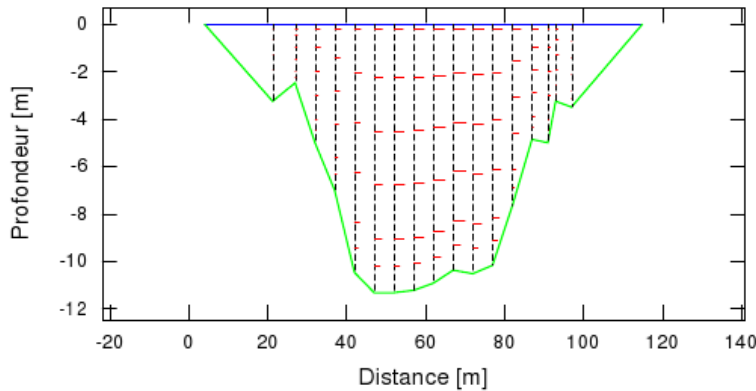
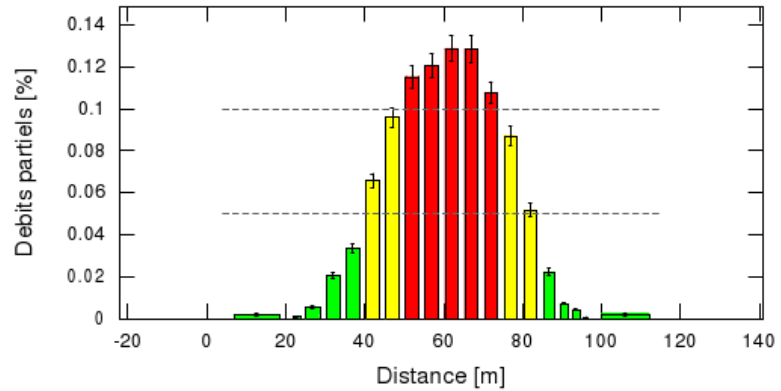
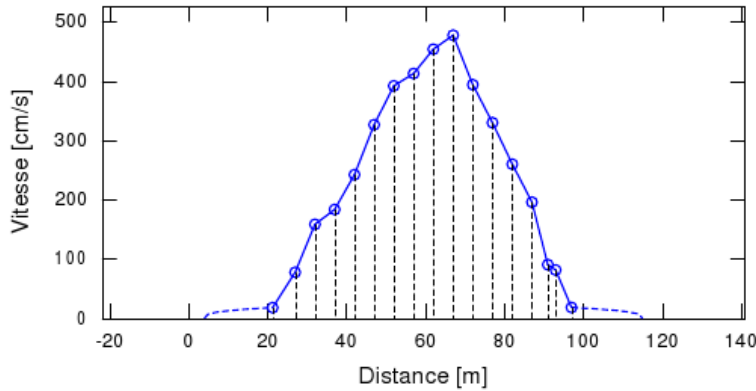
Débit variable et effet d'hystérésis

- Incertitude liée
 - au débit variable pendant le jaugeage $\rightarrow e_1$
 - à l'écart au régime de référence $\rightarrow e_2$



$$u_{var} = \frac{e_1}{2\sqrt{3}Q}$$

Exemple : formule algébrique à 6 points



Nom de fichier : std28102004.dat

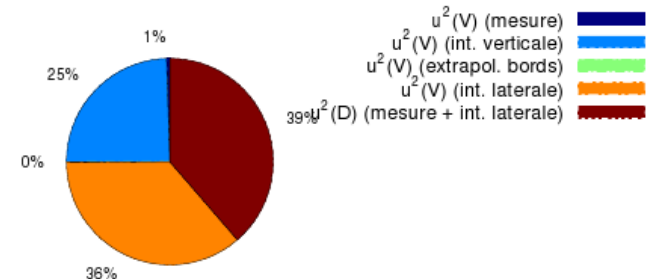
Courantomètre : Moulinet type norme ISO 748
 Intégration verticale : formule CNR (6 points)
 Intégration latérale : section médiane (rectangles)
 Coefficients de rugosité : $m_l = 6$, $m_g = 3$, $m_d = 3$

Debit total = 1925.4 m³/s
 Surface mouillée = 665.66 m²
 Vitesse moyenne = 2.8925 m/s

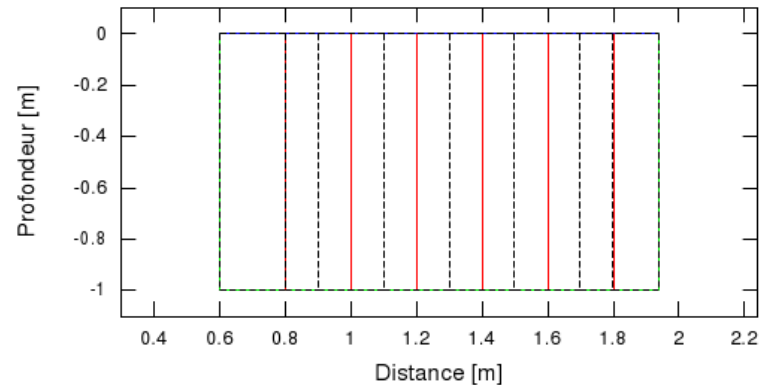
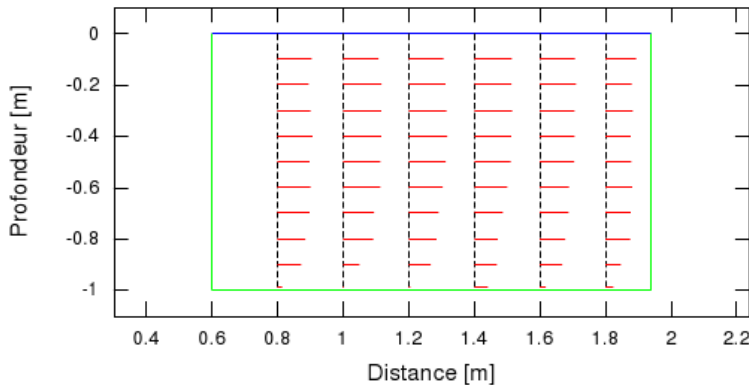
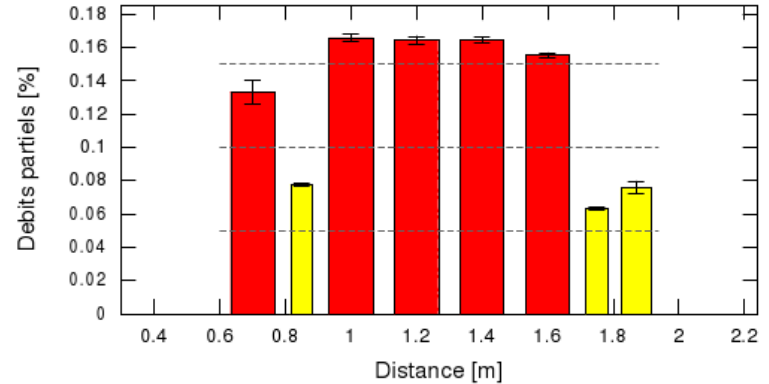
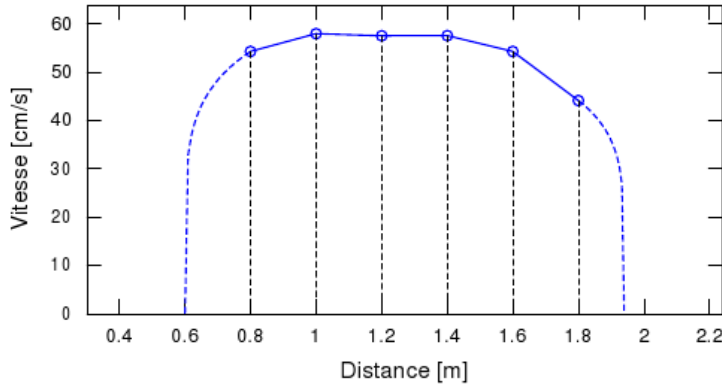
Incertitude Q+ = 3.116% (angle fond = 35 deg.)

Incertitude ISO748 = 5.713% (17 verticales, poids u_m : 85.712%)

Ardèche à Sauze (CNR)



Exemple : 10 points, 6 verticales en canal béton



Nom de fichier : gignac2.dat

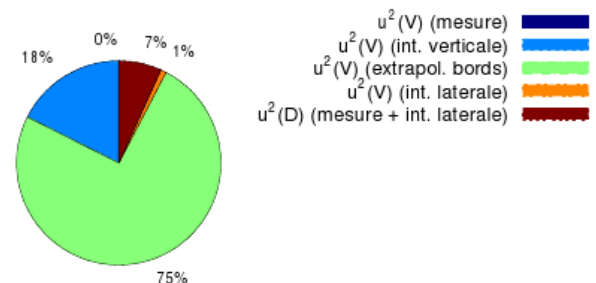
Courantomètre : Flowtracker
 Intégration verticale : algébrique (1-2-3 pts) + point par point
 Intégration latérale : section médiane (rectangles)
 Coefficients de rugosité : $m_i = 6$, $m_g = 6$, $m_d = 6$

Débit total = 0.69876 m³/s
 Surface mouillée = 1.34 m²
 Vitesse moyenne = 0.52146 m/s

Incertitude Q+ = 1.7912% (angle fond = 10 deg.)

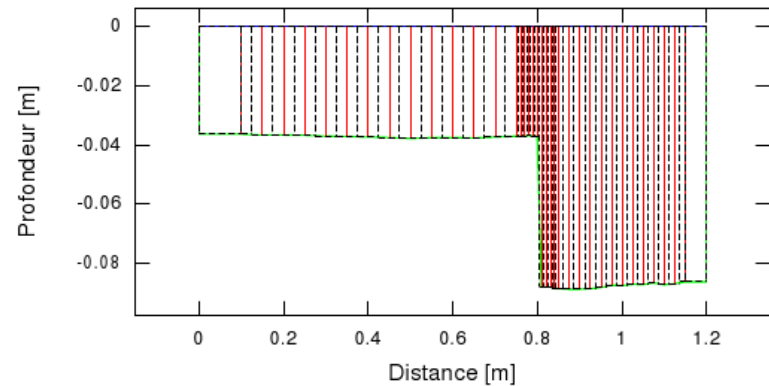
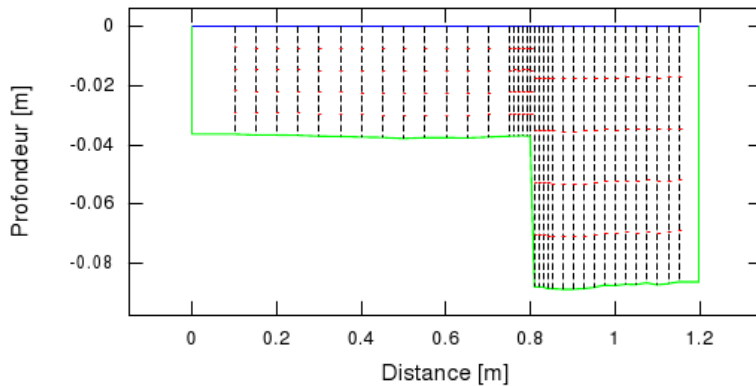
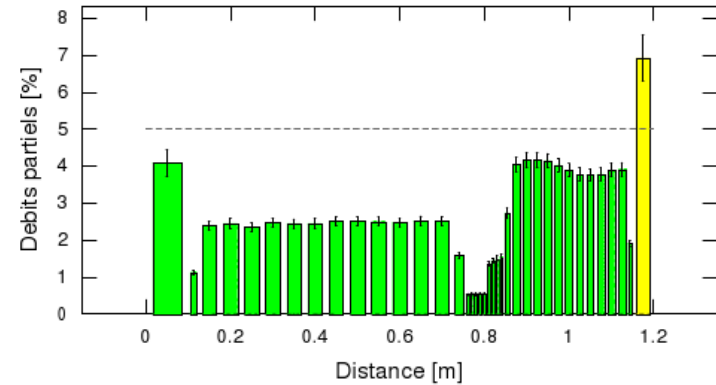
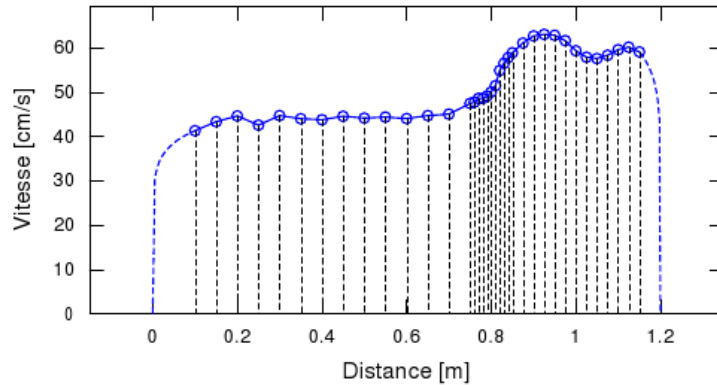
Incertitude ISO748 = 13.393% (6 verticales, poids u_m : 97.516%)

Canal de Gignac (Irstea Montpellier)



$u^2(V)$ (mesure) [blue]
 $u^2(V)$ (int. verticale) [red]
 $u^2(V)$ (extrapol. bords) [yellow]
 $u^2(V)$ (int. laterale) [green]
 $u^2(D)$ (mesure + int. laterale) [dark red]

Exemple : intégration sur 4 points, nombreuses verticales, débordement en lit majeur



Canal à lit composé (Irstea/INSA Lyon)

Nom de fichier : insa_500.dat

Courantomètre : Moulinet type norme ISO 748

Intégration verticale : algébrique (1-2-3 pts) + point par point

Intégration laterale : section médiane (rectangles)

Coefficients de rugosité : $m_i = 6$, $m_g = 10$, $m_d = 10$

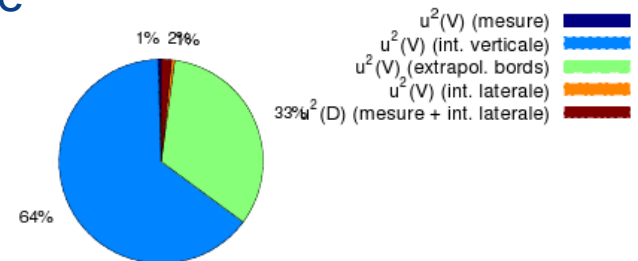
Débit total = 0.033524 m³/s

Surface mouillée = 0.064631 m²

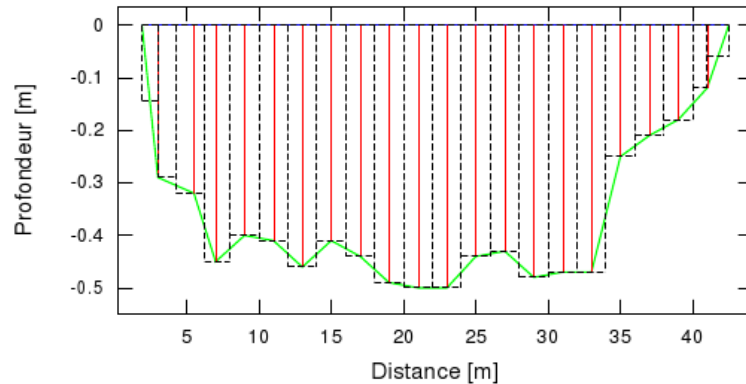
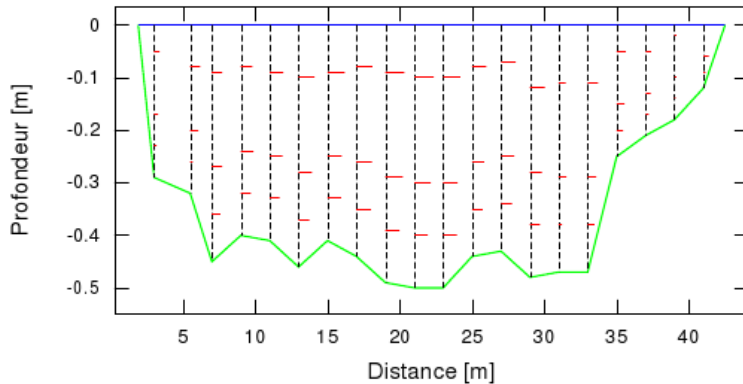
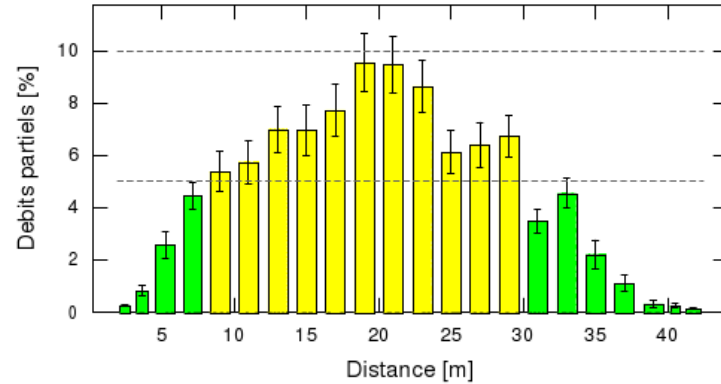
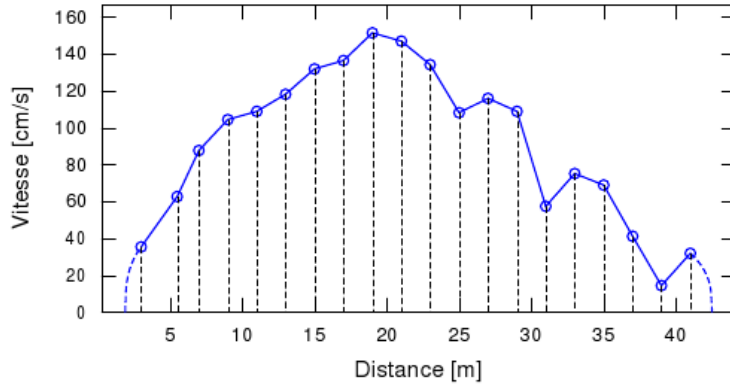
Vitesse moyenne = 0.51871 m/s

Incertitude Q+ = 2.1572% (angle fond = 5 deg.)

Incertitude ISO748 = 3.5243% (36 verticales, poids u_m : 60.135%)



Exemple : formules algébriques à 3 ou 1 points



Nom de fichier : Arc060404.dat

Courantomètre : Nautilus

Intégration verticale : algébrique (1-2-3 pts) + point par point

Intégration latérale : section médiane (rectangles)

Coefficients de rugosité : $m_f = 6$, $m_g = 3$, $m_d = 3$

Débit total = 15.537 m³/s

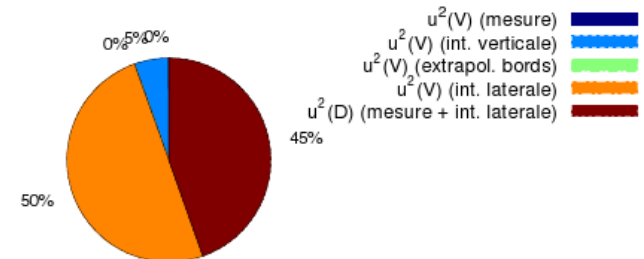
Surface mouillée = 15.239 m²

Vitesse moyenne = 1.0195 m/s

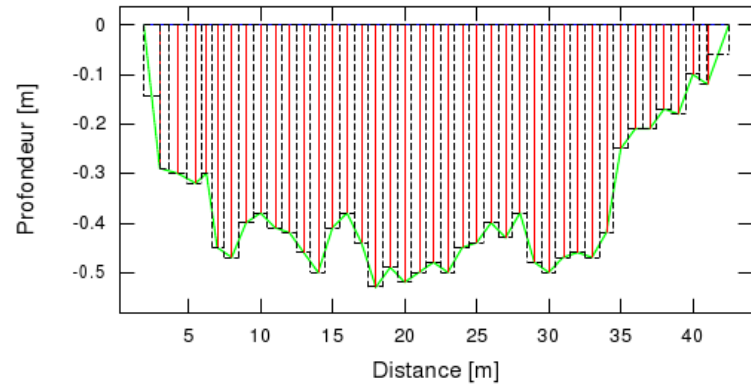
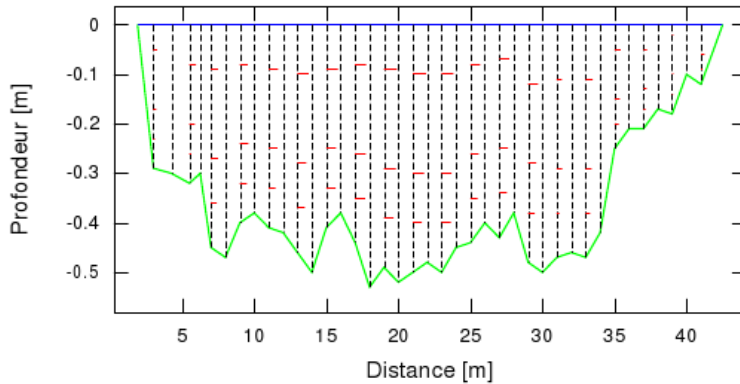
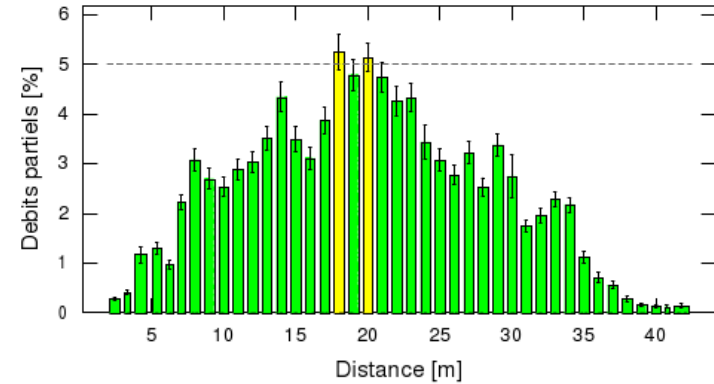
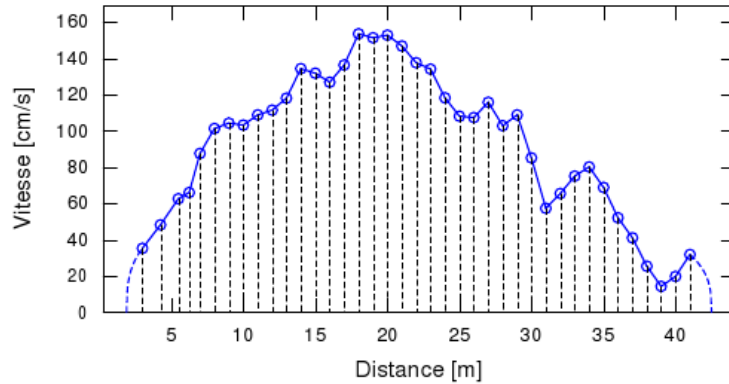
Incertitude Q+ = 6.6782% (angle fond = 15 deg.)

Incertitude ISO748 = 5.2096% (20 verticales, poids u_m : 77.434%)

Arc-en-Maurienne
à Saint-Avre
(Irstea Lyon)



Exemple : ajout de verticales bathymétriques



Nom de fichier : Arc060404.ap.dat

Courantomètre : Nautilus

Intégration verticale : algébrique (1-2-3 pts) + point par point

Intégration latérale : section médiane (rectangles)

Coefficients de rugosité : $m_f = 6$, $m_g = 3$, $m_d = 3$

Débit total = 15.49 m³/s

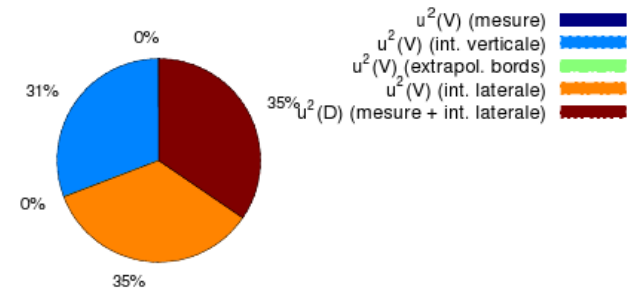
Surface mouillée = 15.114 m²

Vitesse moyenne = 1.0248 m/s

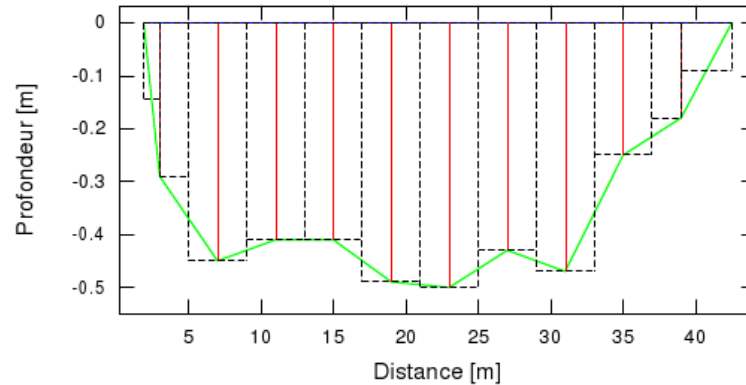
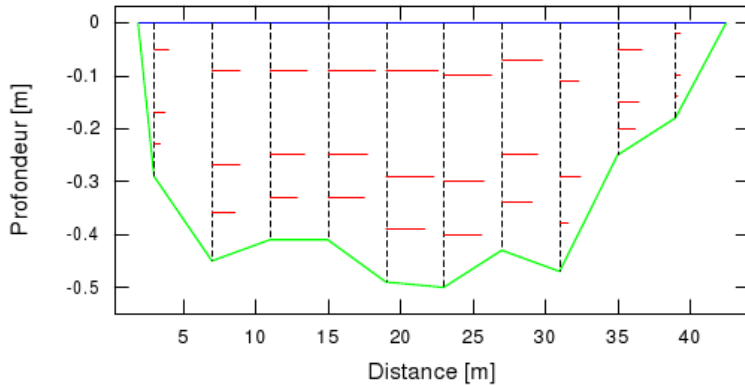
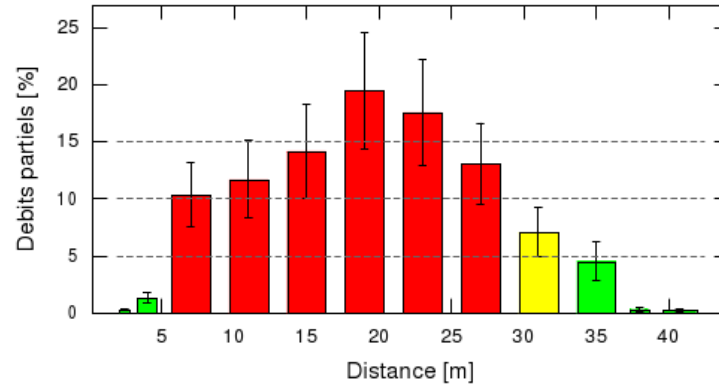
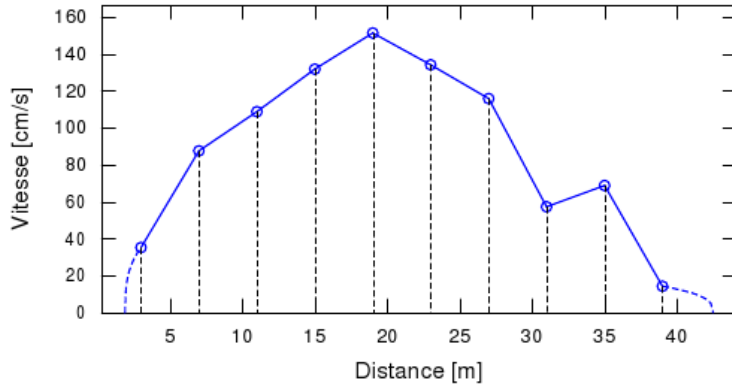
Incertitude Q+ = 2.714% (angle fond = 15 deg.)

Incertitude ISO748 = 3.4018% (39 verticales, poids u_m : 56.062%)

Arc-en-Maurienne
à Saint-Avre
(Irstea Lyon)



Exemple : 1 verticale sur deux



Nom de fichier : Arc060404_m2.dat

Courantomètre : Nautilus

Intégration verticale : algébrique (1-2-3 pts) + point par point

Intégration latérale : section médiane (rectangles)

Coefficients de rugosité : $m_f = 6$, $m_g = 3$, $m_d = 3$

Débit total = 15.287 m³/s

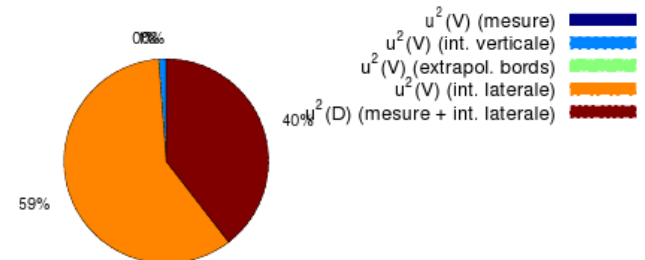
Surface mouillée = 15.055 m²

Vitesse moyenne = 1.0155 m/s

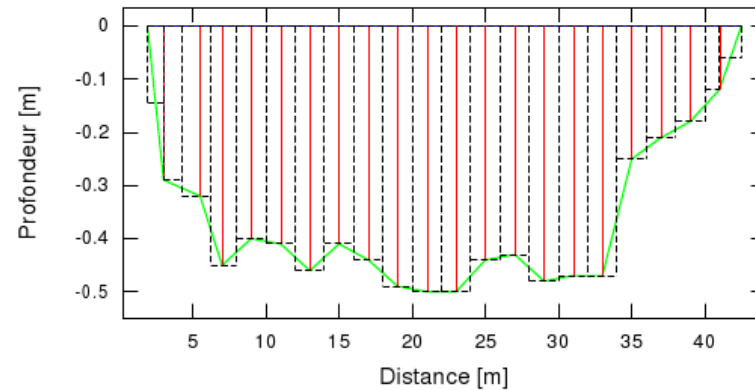
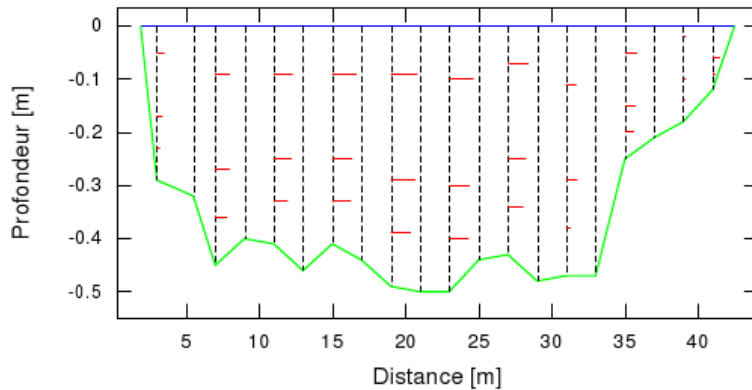
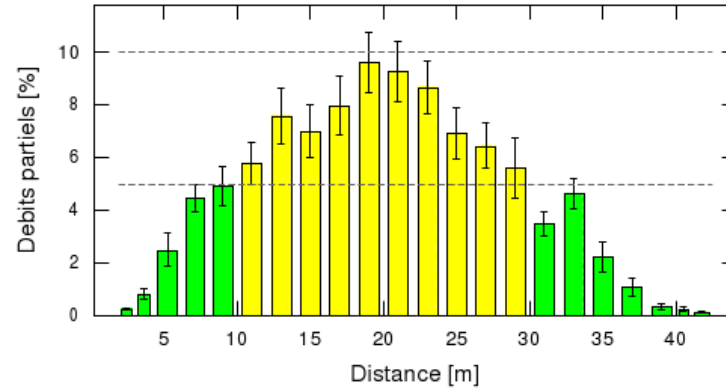
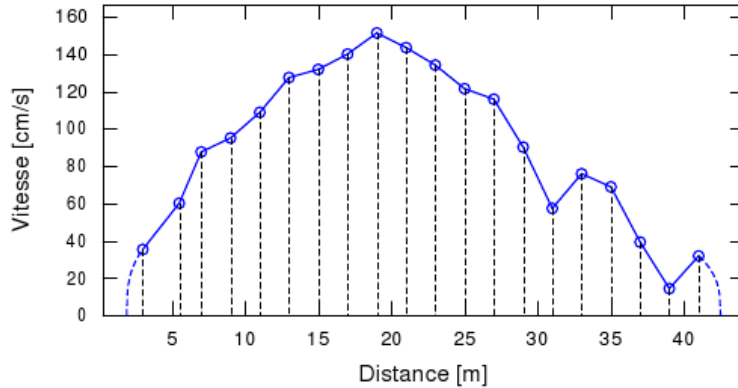
Incertitude Q+ = 20.421% (angle fond = 15 deg.)

Incertitude ISO748 = 8.9146% (10 verticales, poids u_m : 89.57%)

Arc-en-Maurienne
à Saint-Avre
(Irstea Lyon)



Exemple : 1 verticale sur deux + verticales bathy



Nom de fichier : Arc060404_m2b.dat

Courantomètre : Nautilus

Intégration verticale : algébrique (1-2-3 pts) + point par point

Intégration latérale : section médiane (rectangles)

Coefficients de rugosité : $m_f = 6$, $m_g = 3$, $m_d = 3$

Debit total = 15.47 m³/s

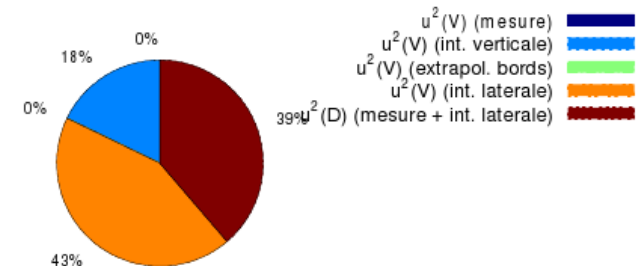
Surface mouillée = 15.239 m²

Vitesse moyenne = 1.0151 m/s

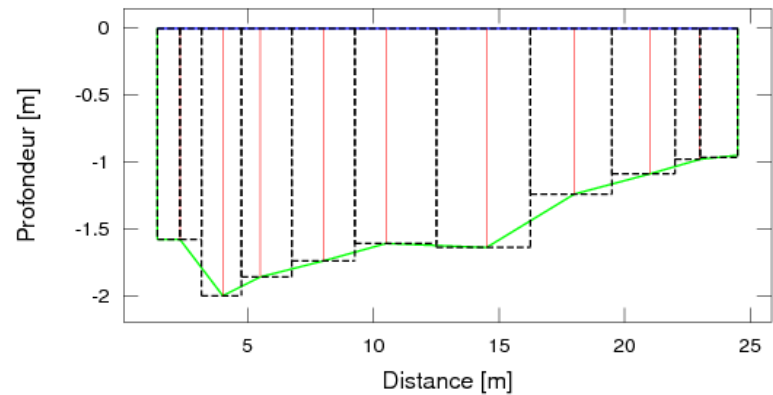
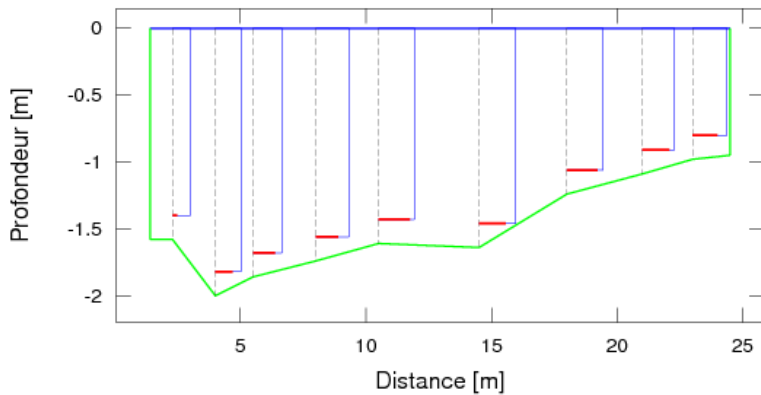
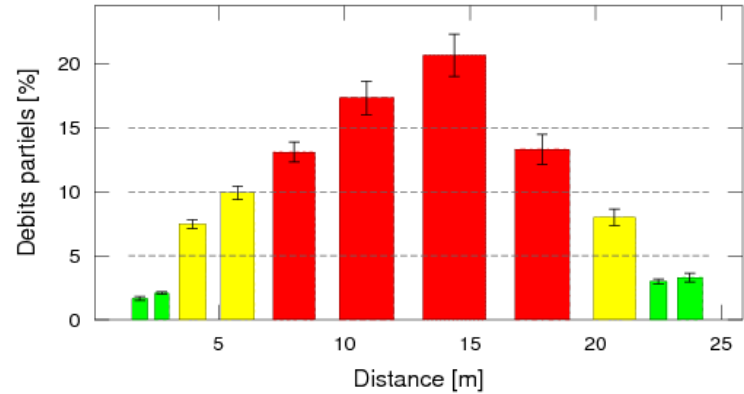
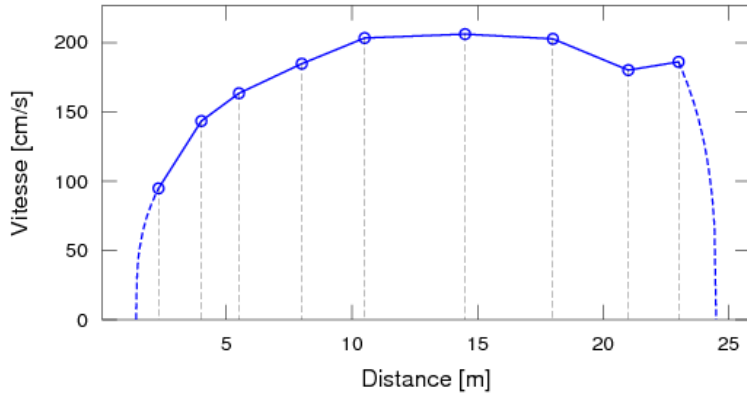
Incertitude Q+ = 7.1822% (angle fond = 15 deg.)

Incertitude ISO748 = 5.2096% (20 verticales, poids u_m : 77.434%)

Arc-en-Maurienne
à Saint-Avre
(Irstea Lyon)

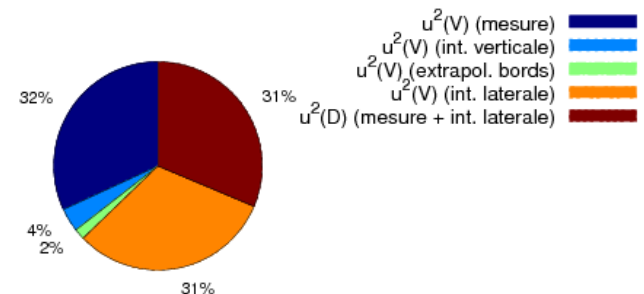


Exemple : méthode par intégration



Nom de fichier : burnhaupt18.dat
 Courantomètre : Moulinet type norme ISO 748
 Intégration verticale : méthode intégratrice
 Intégration latérale : section médiane (rectangles)
 Coefficients de rugosité : $m_r = 6$, $m_g = 3$, $m_d = 3$
 Débit total = 61.215 m³/s
 Surface mouillée = 34.600 m²
 Vitesse moyenne = 1.769 m/s
 Incertitude Q+ = 5.5% (angle fond = 15 deg.)
 Incertitude ISO748 = 9.8% (9 verticales, poids u_m : 89.7%)

Doller à Burnhaupt (DREAL Alsace)





Conclusions et perspectives

Méthode généralisée de calcul des incertitudes Q+

- résultats similaires à ISO 748 pour les jaugeages « canoniques » ($m > 15$)
- résultats plus conformes à l'expertise pour les cas moins classiques (canaux, peu de verticales...)
- choix de l'angle de variation du fond à tester et préciser

Stratégie de mesure et analyse des sources d'erreur

- méthode d'intégration verticale des vitesses
- nombre et distribution des verticales
- importance des extrapolations

Développements futurs de la méthode

- mesures de surface (flotteurs, image, radar, saumon)
- généralisation pour l'ADCP en déploiement mobile
- Intégration du calcul dans le logiciel BAREME

Développements du logiciel Barème

Module « dépouillement des jaugeages »

- Aide au paramétrage des coefficients de fond et de rives
→ saisie des valeurs par défaut

Valeurs couplées
 $K_f = m/(m+1)$

Dépouillement d'un jaugeage

Dépouillement Section Verticale Résultats Options_par_défaut Spécial

Options par défaut

Les verticales sont essentiellement traitées
 en point par point en intégration

Unité des abscisses/profondeurs/...
 Centimètres
 Mètres
 Abscisses en m / Profondeurs en cm

Pour les verticales 'point par point'
Le zéro est
 Au fond En surface
Sens des mesures
 Descente Montée
Temps de comptage (s)

Pour les verticales par intégration
Hauteur aveugle
Coefficient K tel que $V_{\text{prox fond}} = K \times V_{\text{moy}}$

	Kf	m	
Coefs de rives	<input type="text" value="0.67"/>	<input type="text" value="2"/>	$K_f = m/(m+1)$
Coefs de fond	<input type="text" value="0.67"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="?"/>

Moulinet utilisé
---Courantomètre---

Aide au choix des valeurs (ISO748), selon rugosité de l'écoulement :

- $m=6$ (défaut)
- $4 \leq m \leq 10$

Développements du logiciel Barème

Module « dépouillement des jaugeages »

- Aide au paramétrage des coefficients de fond et de rives
→ saisie des valeurs sur une verticale point par point

Dépouillement d'un jaugeage

Dépouillement Section Verticale Résultats Options_par_défaut Spécial

Verticale en point par point

Abscisse Hauteur totale

Mesures

	H	Trs
1	8	148
2	15	179
3	38	214
4	47	228
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Coefficient de fond Kf m ?

Angle de dérive

Moulinet

Temps de comptage (s)

Section numéro 1

Verticale numéro 5

PU = 0.437 m²/s

8% 8% 15% 12%

cm

m/s

0.20 0.40 0.60 0.80

V5

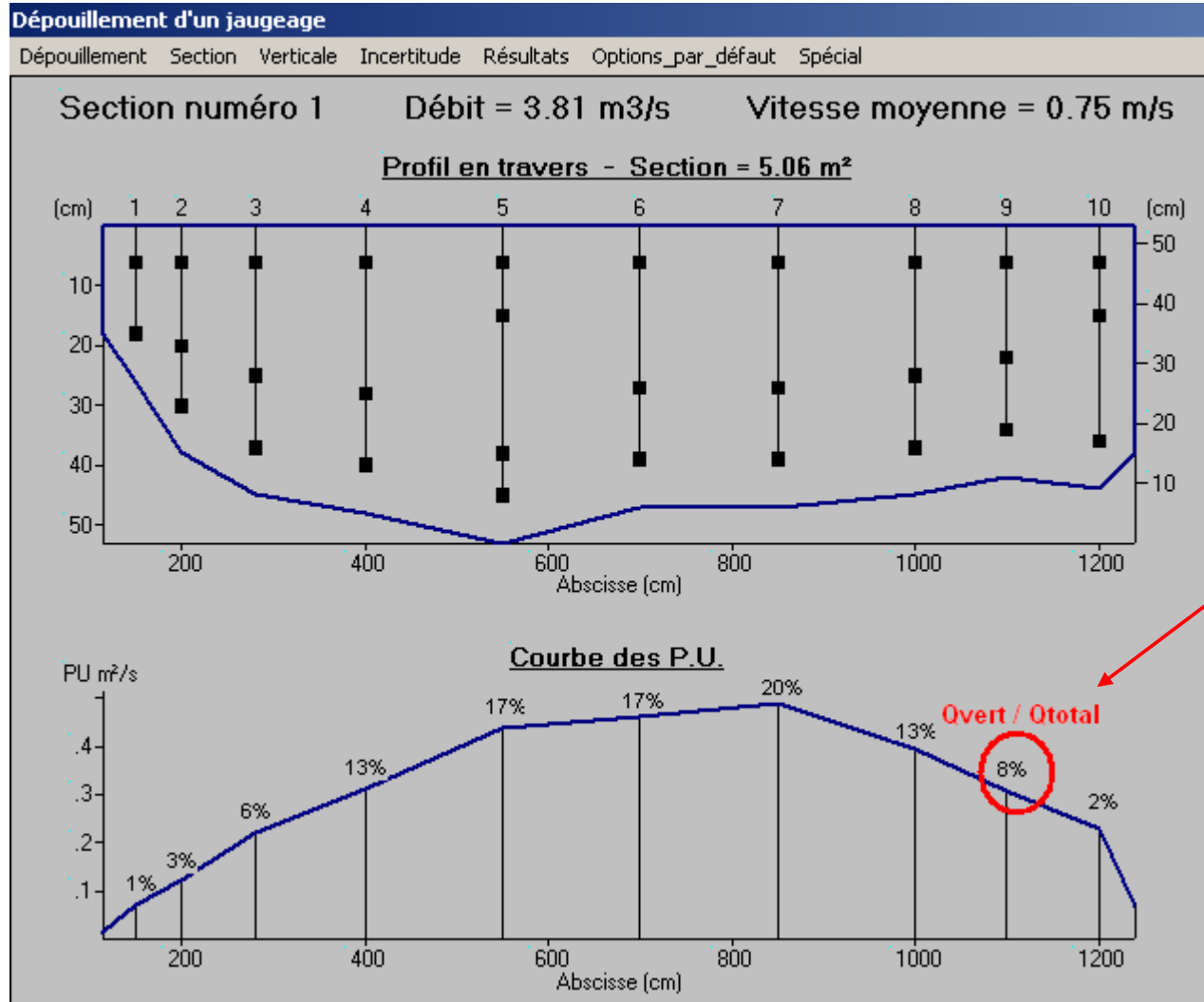
50 40 30 20 10

Ecarts de vitesse entre le point et ses voisins

Affichage du profil puissance correspondant au coefficient de fond choisi (ISO748)

Développements du logiciel Barème

Module « dépouillement des jaugeages »



Affichage du débit partiel par verticale

Préconisation ISO748 :
<5% si possible
<10%

Développements du logiciel Barème

Module « dépouillement des jaugeages »

- Calcul des incertitudes selon la méthode Q+
 - Algorithme à adapter au calcul de Barème (trapèzes sur les P.U.)
 - Implémentation du calcul : le principal chantier 2012

Dépouillement d'un jaugeage

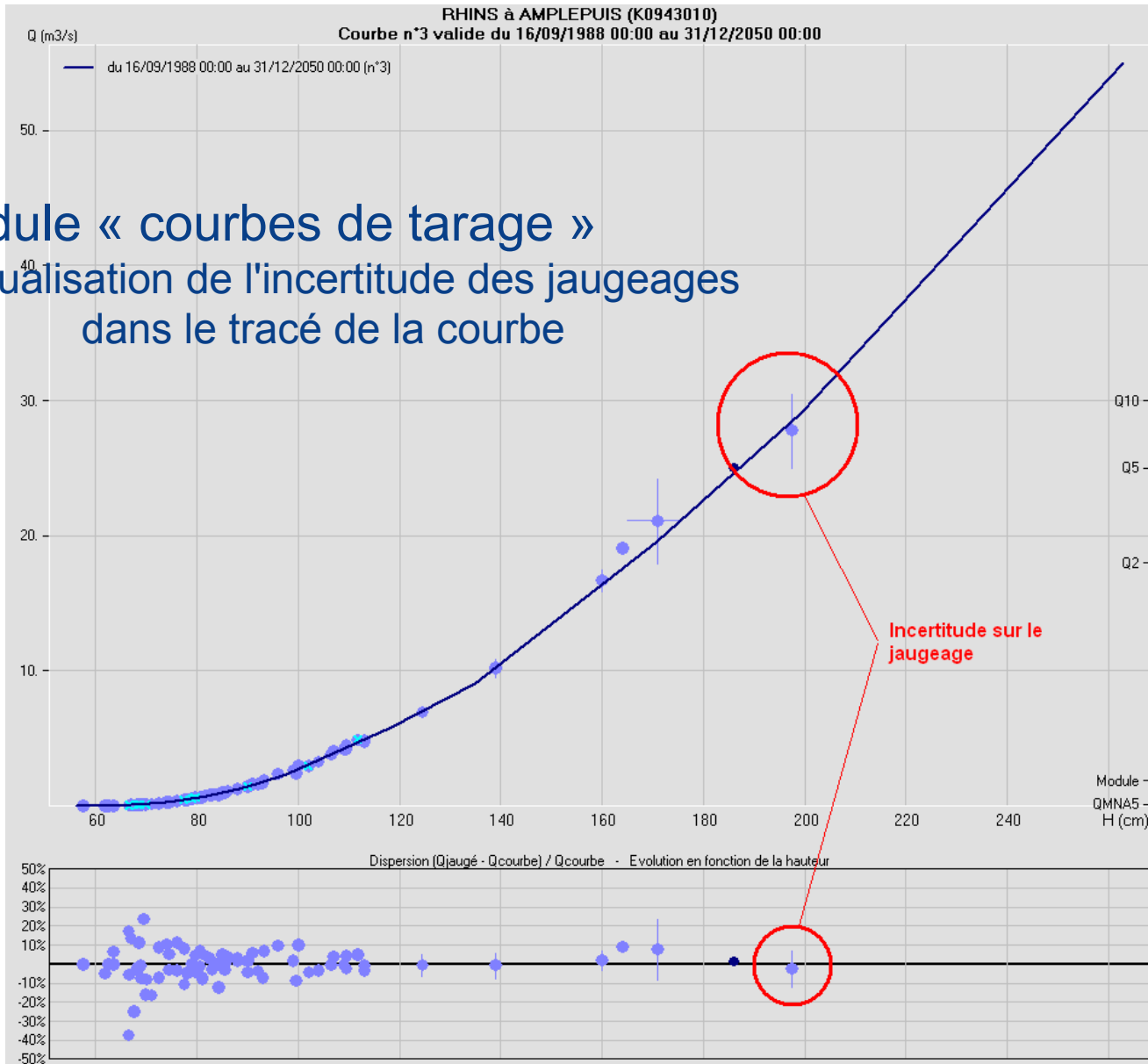
Dépouillement Section Verticale Incertitude Résultats Options_par_défaut Spécial

**Commande pour la saisie des composantes
d'incertitude**

Développements du logiciel Barème

Module « courbes de tarage »

- Visualisation de l'incertitude des jaugeages dans le tracé de la courbe

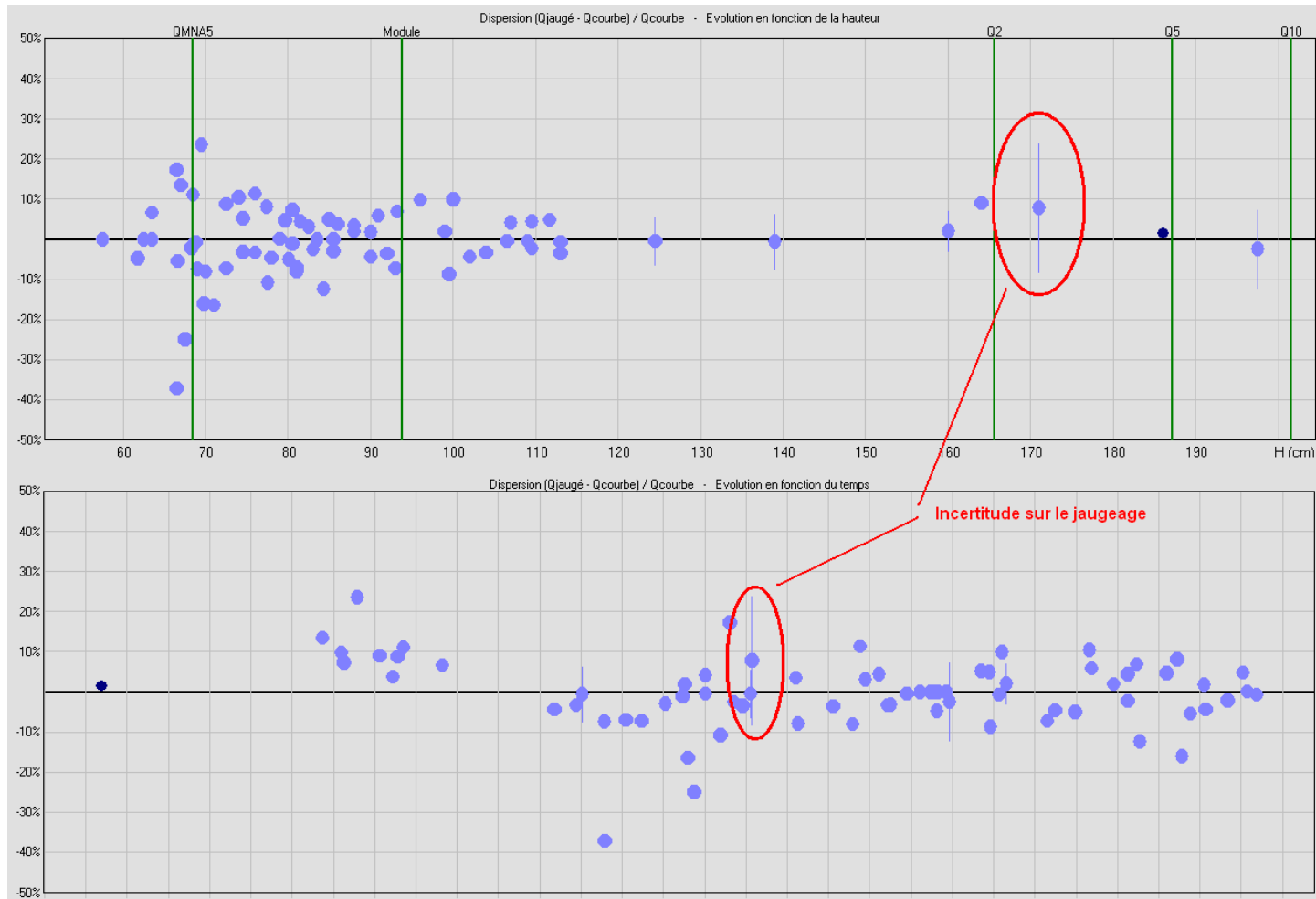


Développements du logiciel Barème

Module « courbes de tarage »

Fenêtre « dispersion des jaugeages »

- Visualisation de l'incertitude des jaugeages





Logiciel Barème : idées pour la suite

Nouvelles options de calcul du débit

- Formules algébriques ISO 748 à 1, 2, 3, 5, 6 points
- Légère modification du calcul du débit de rive
- Autres options d'extrapolation et d'intégration

Adaptations à d'autres protocoles de jaugeage

- Vitesses de surface avec bathymétrie sur des abscisses différentes
- Verticales bathymétriques intercalaires avec vitesse interpolée

Incertitudes par la méthode Q+

- Adaptations en fonction des tests et évolutions
- Affichages graphiques des scénarios min/max en bathy et vitesse



Pour aller plus loin...

Méthode généralisée pour le calcul de l'incertitude sur les jaugeages par exploration du champ des vitesses, J. Le Coz, X. Peyrard, B. Camenen, G. Dramais, Rapport technique sur la méthode Q+ (2011)

Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity-area method, J. Le Coz, B. Camenen, X. Peyrard, G. Dramais, soumis dans Flow Measurement and Instrumentation (2012)

Coefficient de fond des jaugeages par exploration du champ des vitesses, J. Le Coz (2011)

Note sur les développements du logiciel BAREME, J. Le Coz, P.-M. Bechon (2011)