

# 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](http://www.irstea.fr)

**Jérôme Le Coz<sup>1</sup>, Pierre-Marie Bechon<sup>2</sup>,  
Benoît Camenen<sup>1</sup>, Guillaume Dramais<sup>1</sup>**

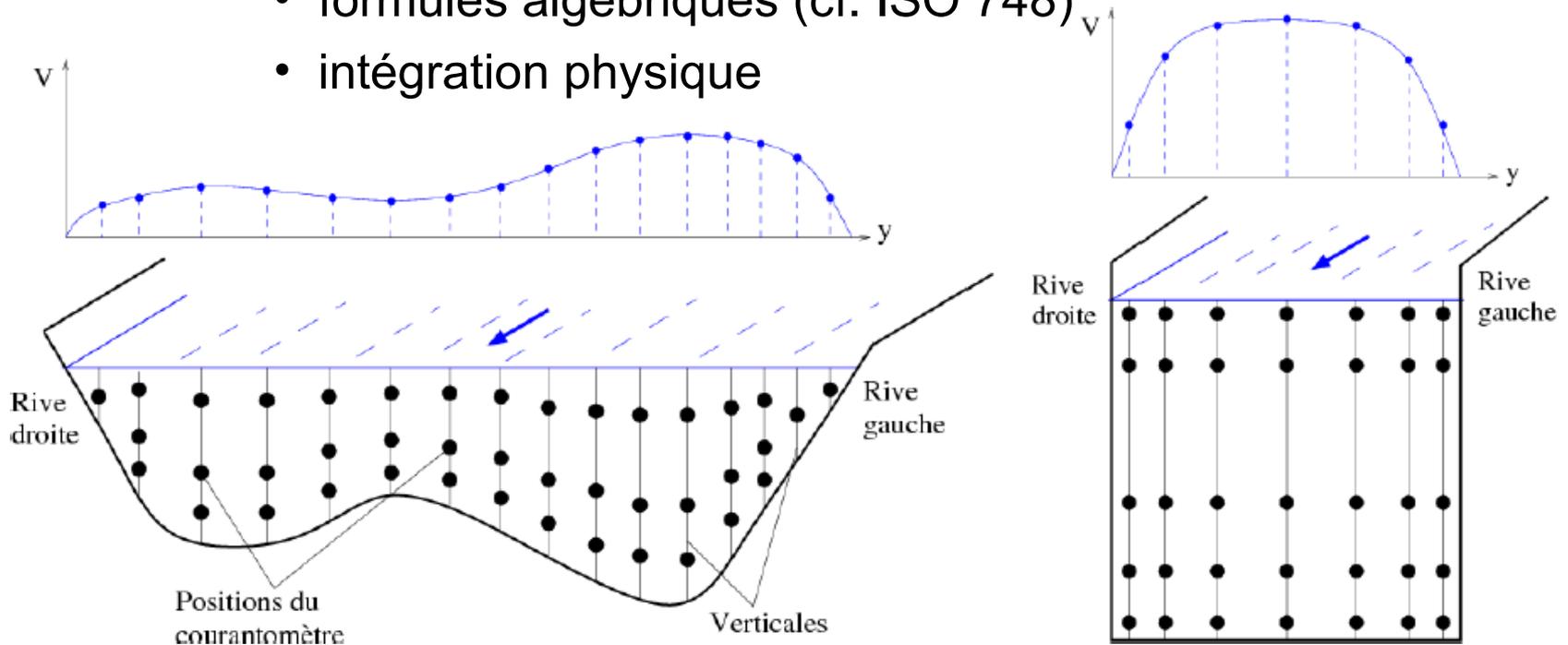
<sup>1</sup> Irstea (Cemagref), Hydrologie-Hydraulique, Lyon, France

<sup>2</sup> 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

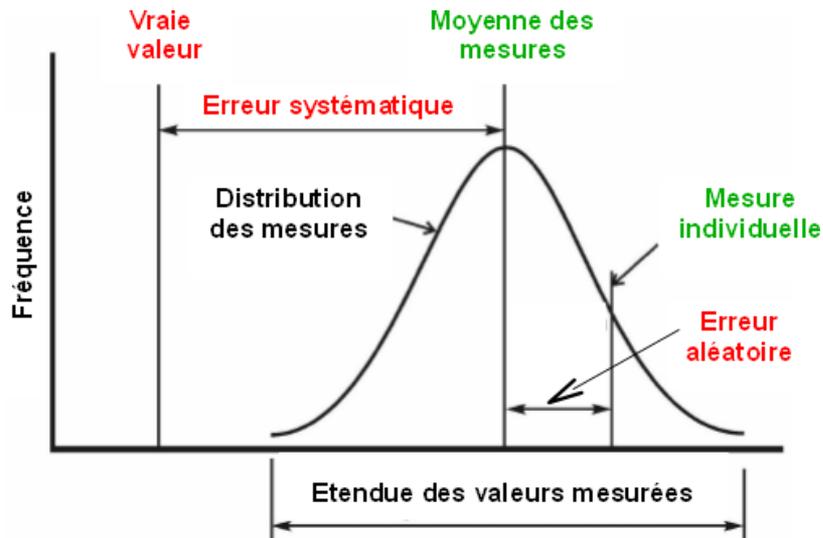
# Concepts métrologiques

## Erreurs et incertitudes

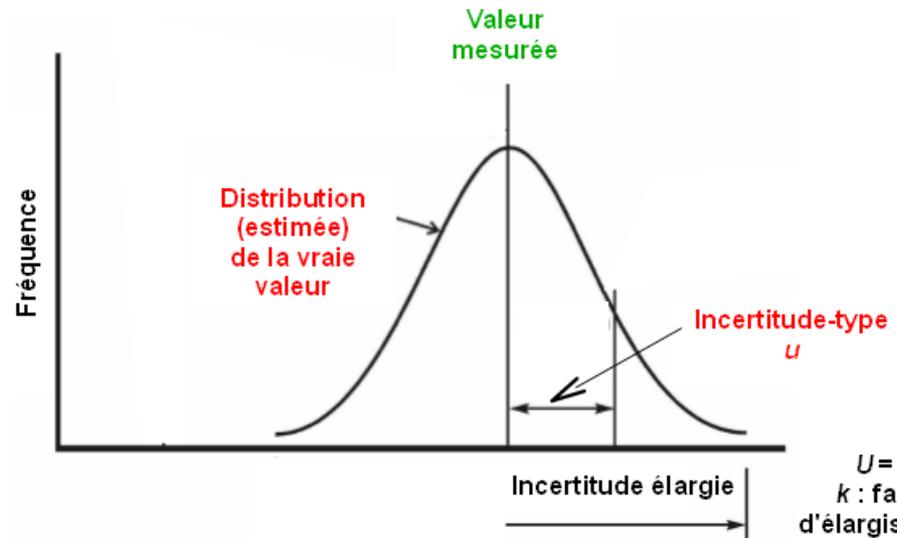
- Erreur aléatoire / systématique
- Incertitude absolue [m³/s] / relative [%]

## 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



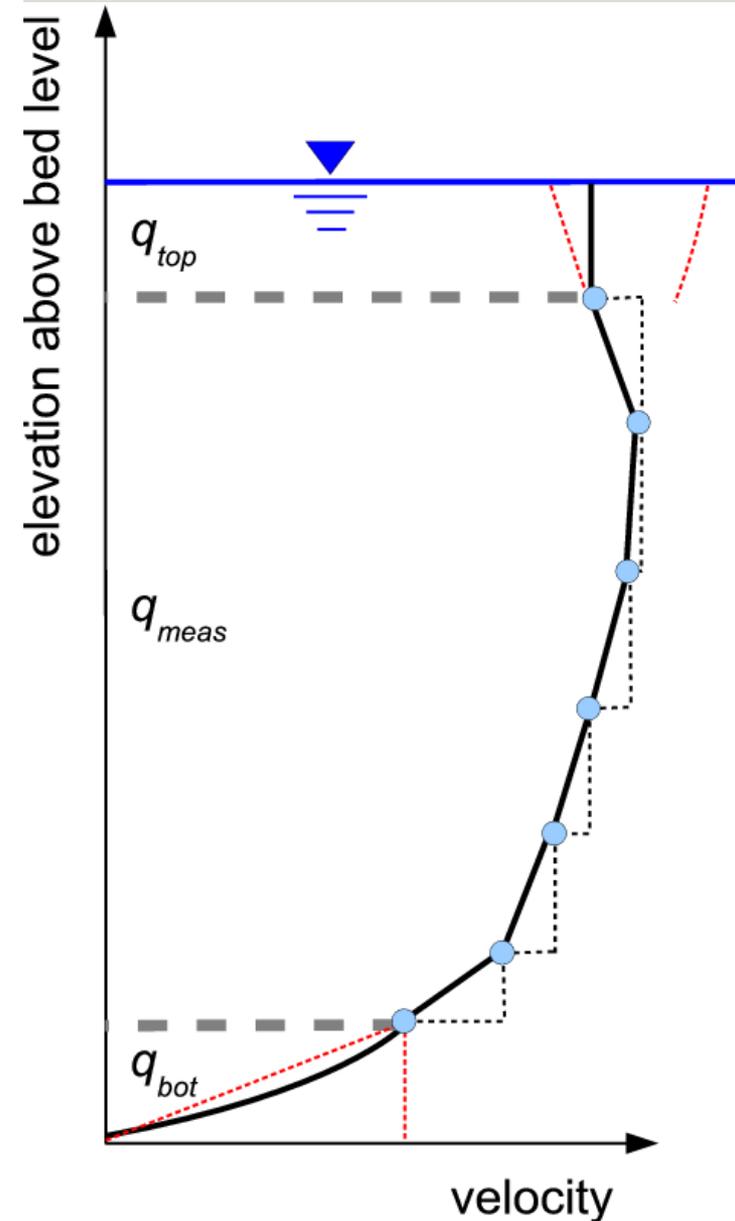
## Limites de la méthode ISO748 incertitudes

- 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 ( $u_p$ )

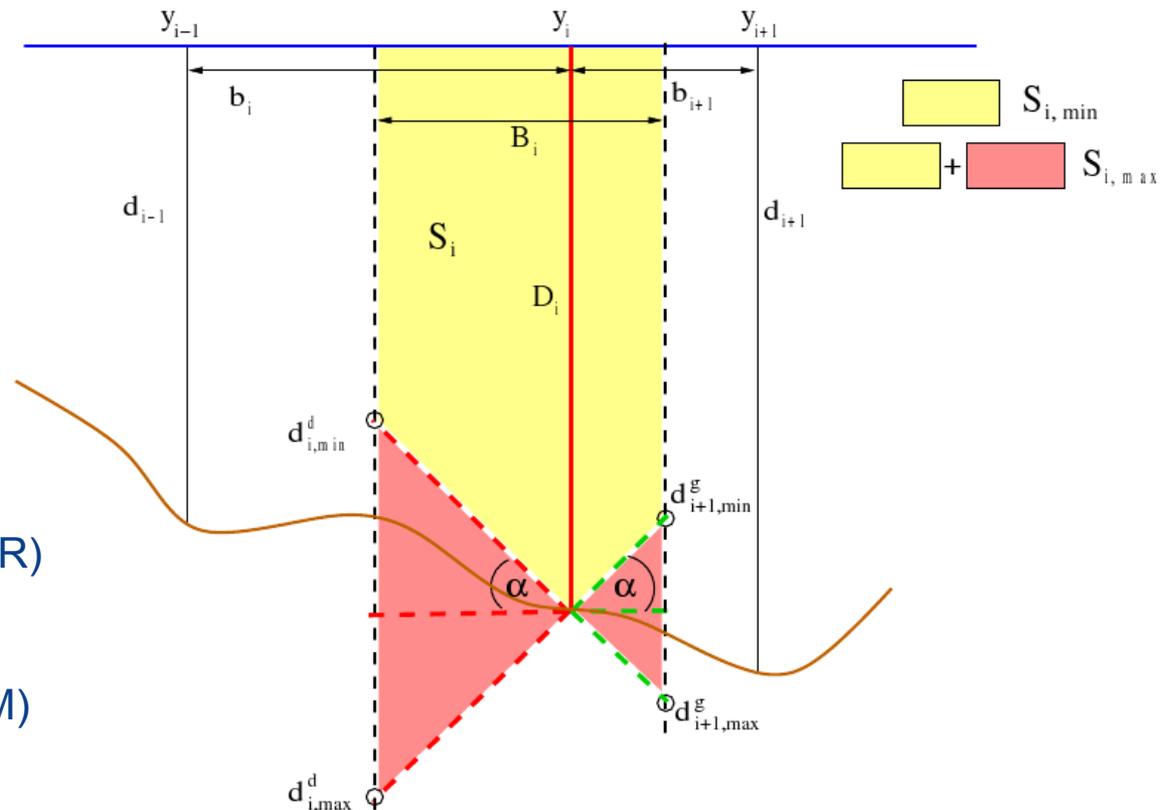
- Formules à n points :
  - valeurs ISO748 interpolées
- Point par point :
  - min/max et hypothèse de distribution rectangulaire (GUM)
  - q mesuré
  - q extrapolé haut/bas
- Méthode par intégration :
  - assimilée à une formule à 1 point



# Méthode généralisée Q+

## Incertitude liée à l'intégration latérale ( $u_m$ )

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



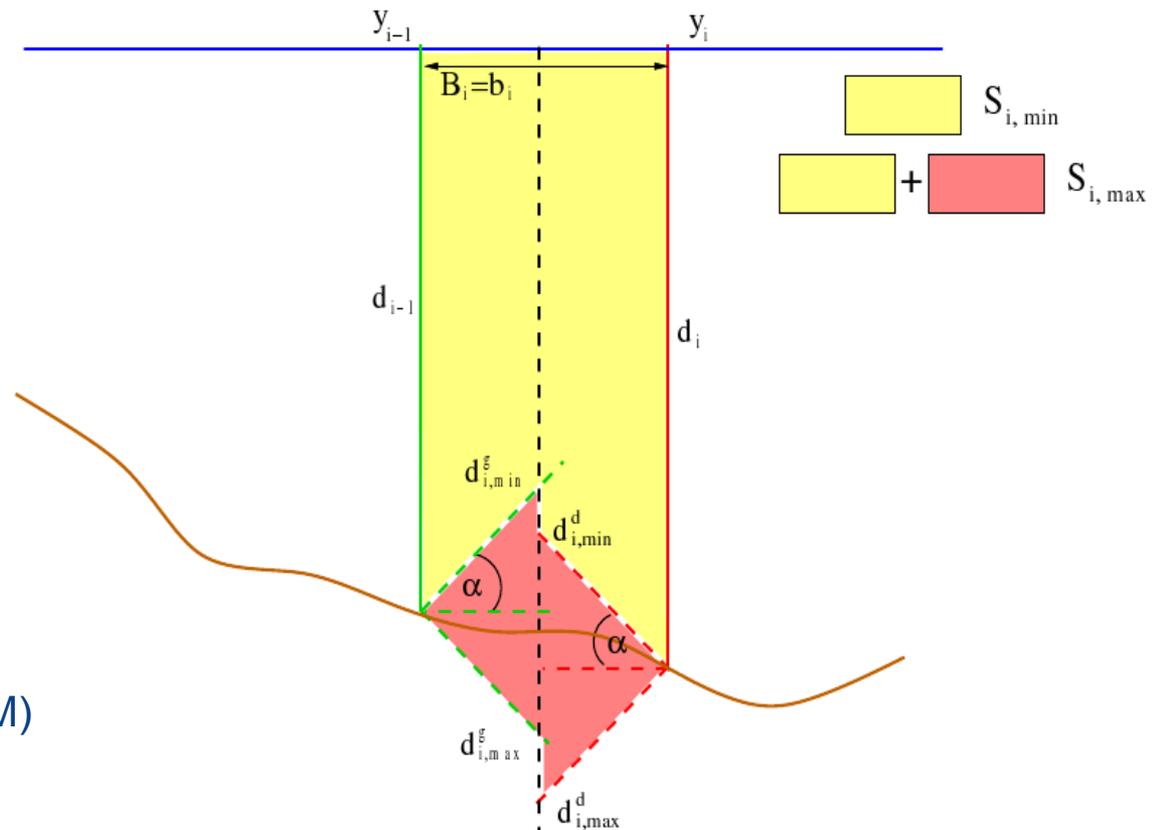
Méthode de dépouillement  
Section **médiane** (Barème, CNR)

Section min/max  
Distribution rectangulaire (GUM)

# Méthode généralisée Q+

## Incertitude liée à l'intégration latérale ( $u_m$ )

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

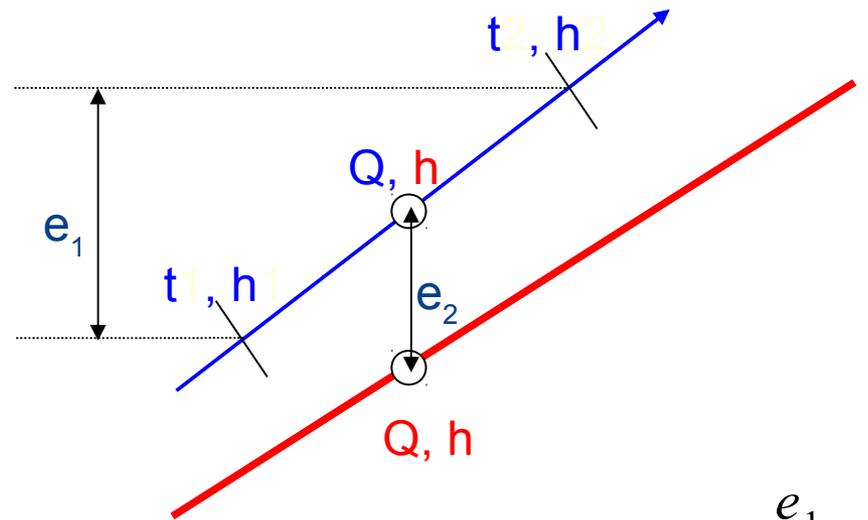
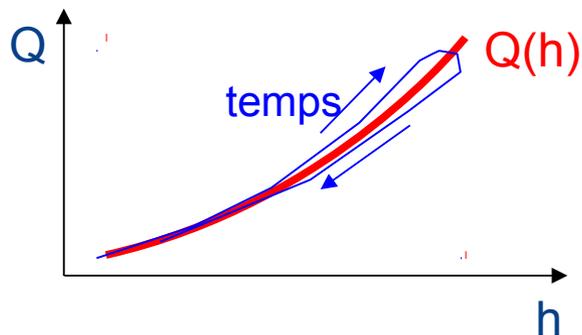
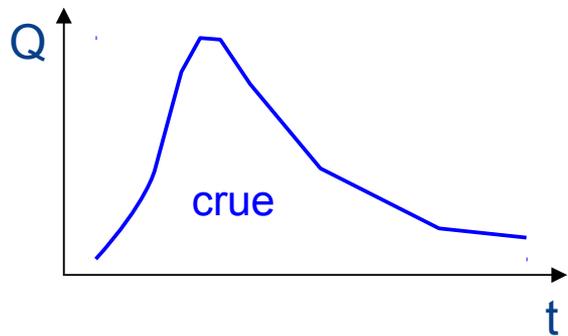


Méthode de dépouillement  
Section **moyenne**

Section min/max  
Distribution rectangulaire (GUM)

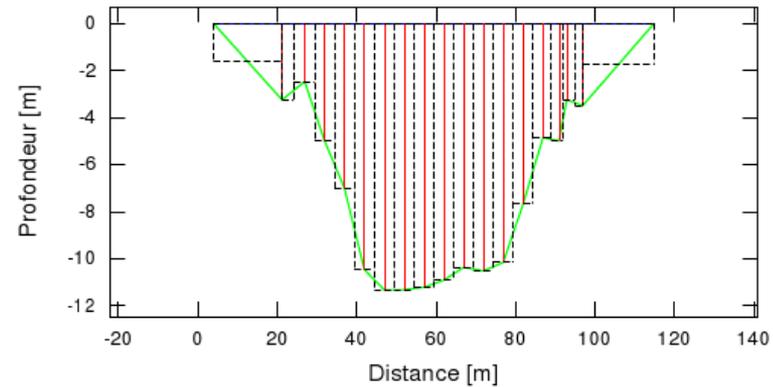
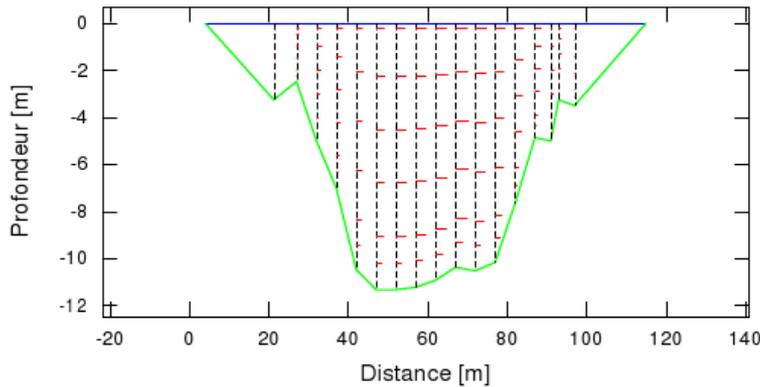
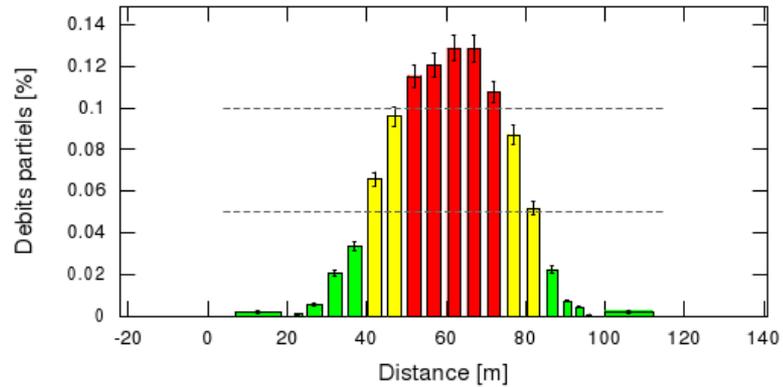
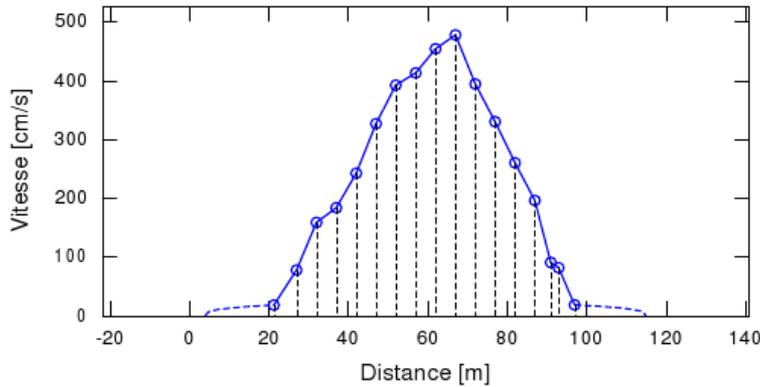
# Débit variable et effet d'hystérésis

- 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

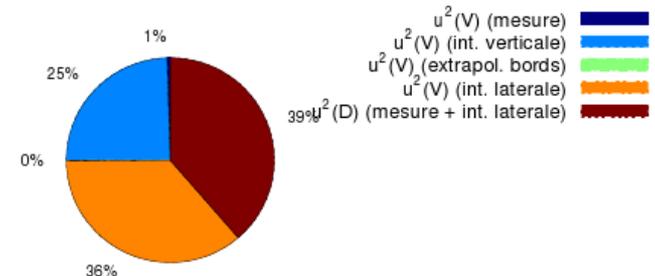
Courantomètre : Moulinet type norme ISO 748  
 Intégration verticale : formule CNR (6 points)  
 Intégration latérale : section médiane (rectangles)  
 Coefficients de rugosité :  $m_l = 6$ ,  $m_g = 3$ ,  $m_d = 3$

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

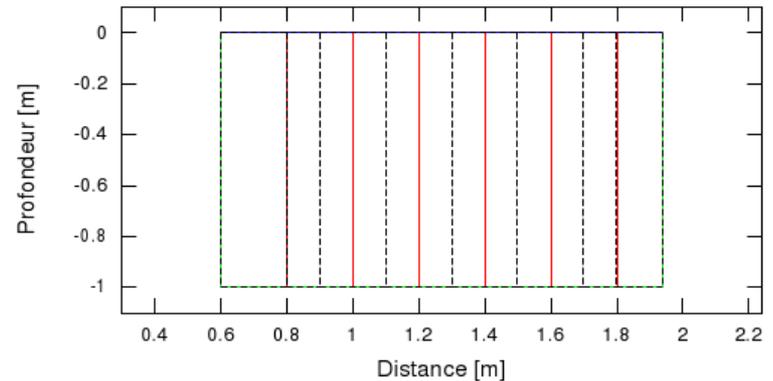
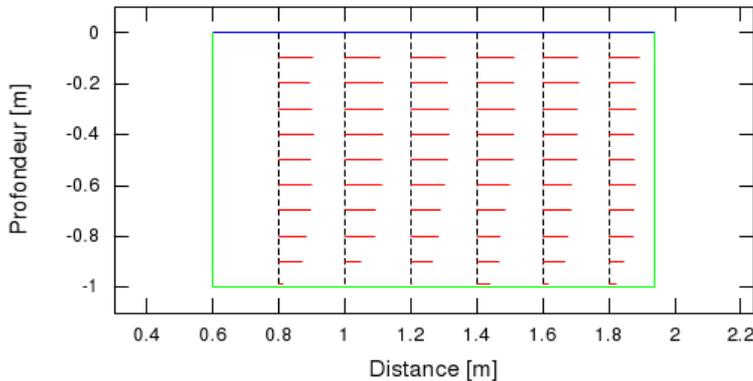
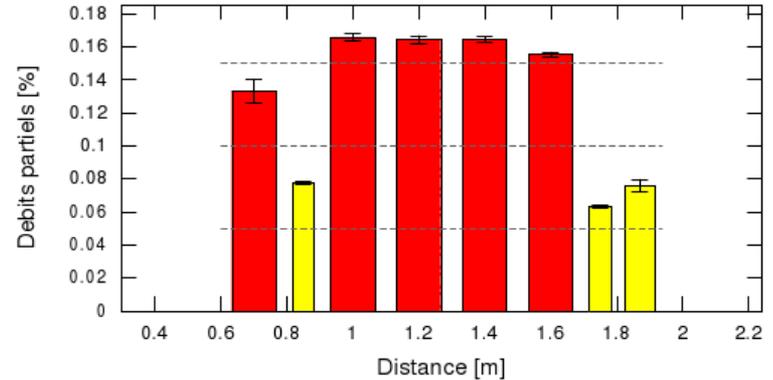
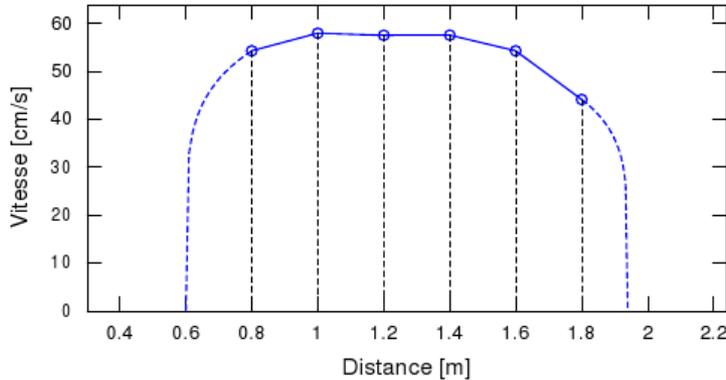
Incertitude Q+ = 3.116% (angle fond = 35 deg.)

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

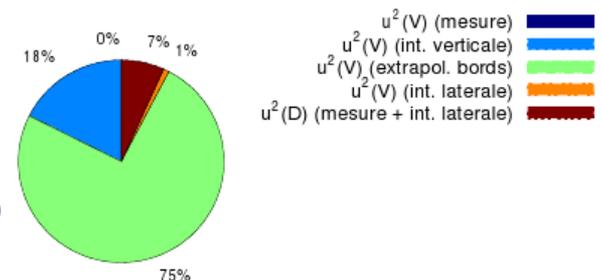
Courantomètre : Flowtracker  
 Intégration verticale : algébrique (1-2-3 pts) + point par point  
 Intégration latérale : section médiane (rectangles)  
 Coefficients de rugosité :  $m_i = 6$ ,  $m_g = 6$ ,  $m_d = 6$

Débit total = 0.69876 m<sup>3</sup>/s  
 Surface mouillée = 1.34 m<sup>2</sup>  
 Vitesse moyenne = 0.52146 m/s

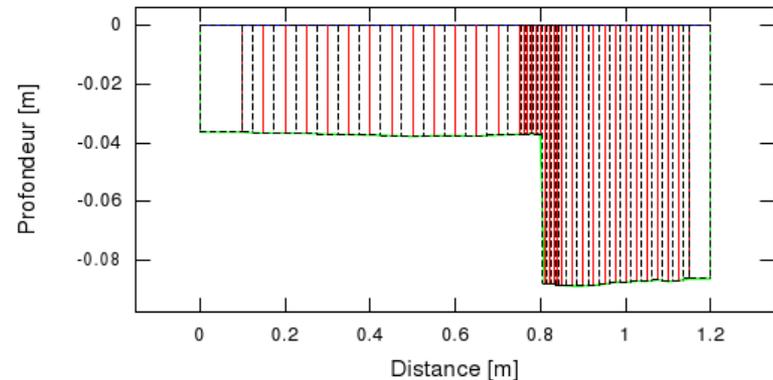
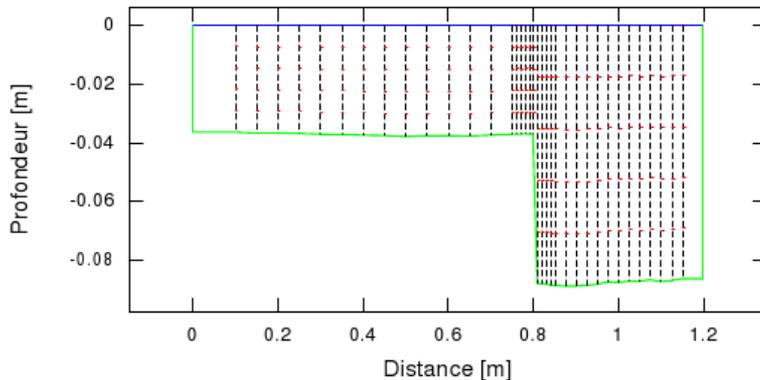
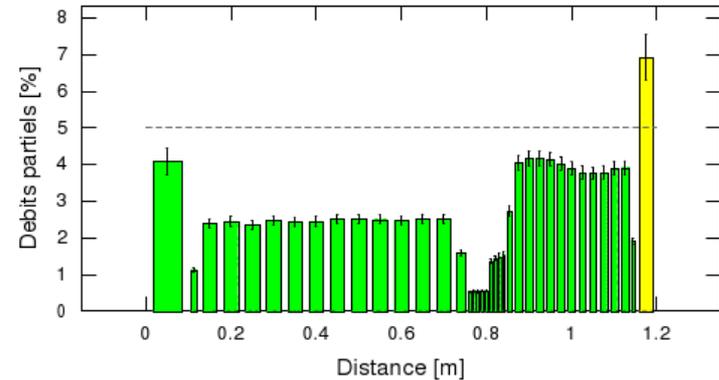
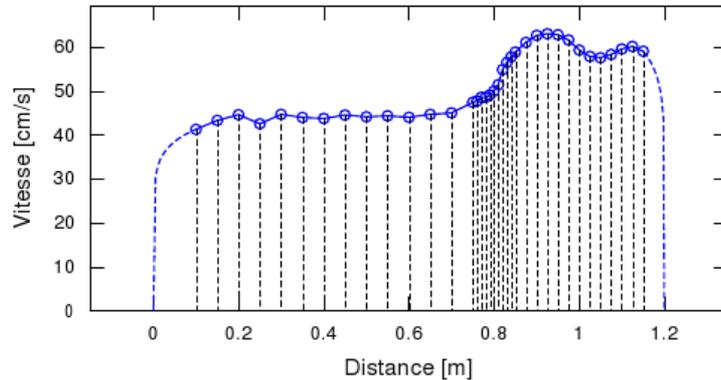
Incertitude Q+ = 1.7912% (angle fond = 10 deg.)

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

Canal de Gignac  
 (Irstea Montpellier)



# 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 :  $m_i = 6$ ,  $m_g = 10$ ,  $m_d = 10$

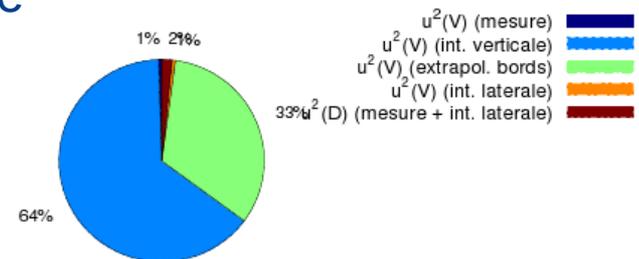
Débit total = 0.033524 m<sup>3</sup>/s

Surface mouillée = 0.064631 m<sup>2</sup>

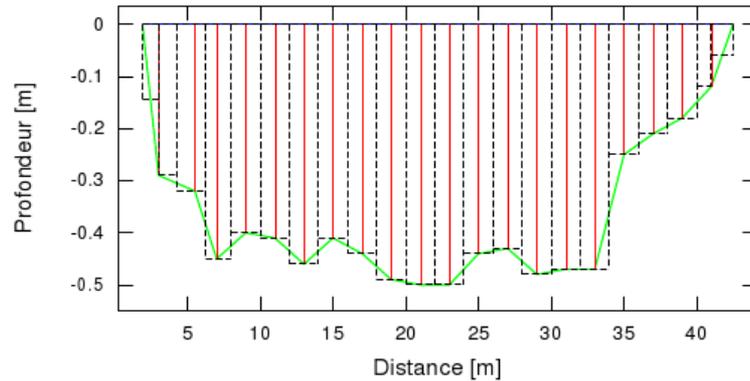
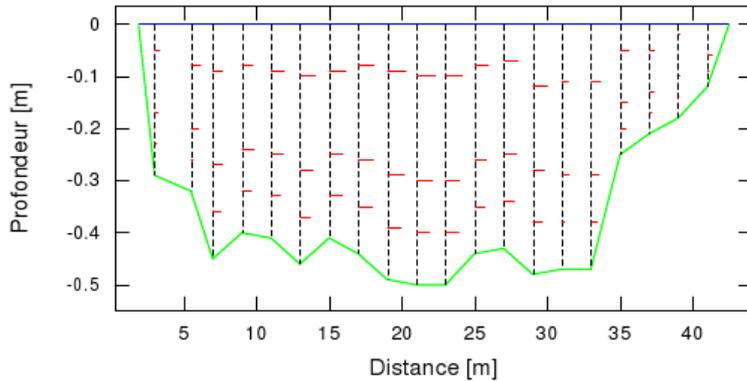
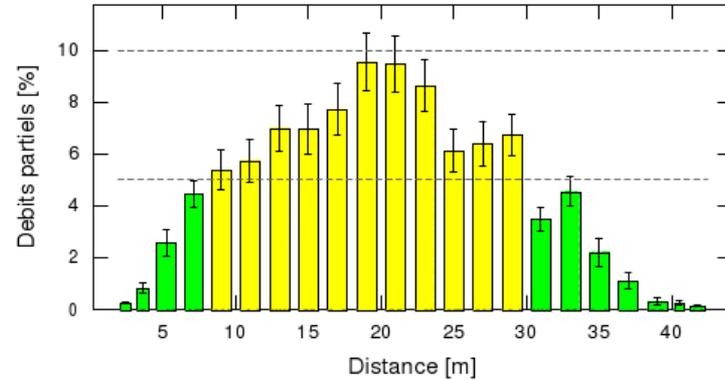
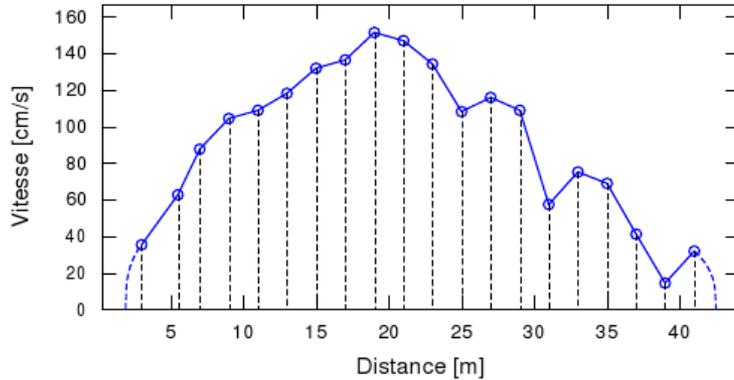
Vitesse moyenne = 0.51871 m/s

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 m<sup>3</sup>/s

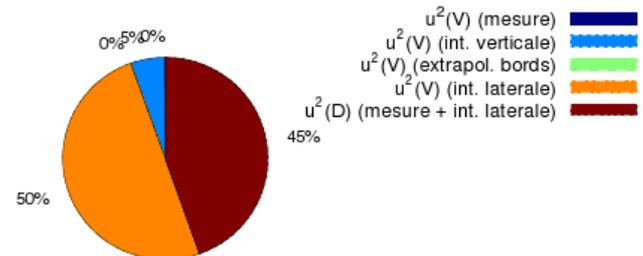
Surface mouillée = 15.239 m<sup>2</sup>

Vitesse moyenne = 1.0195 m/s

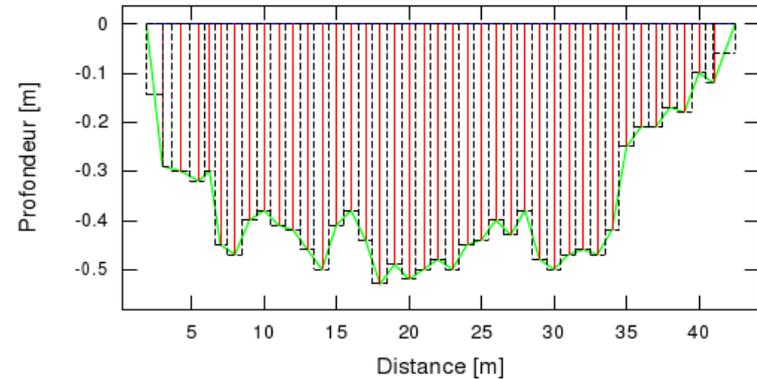
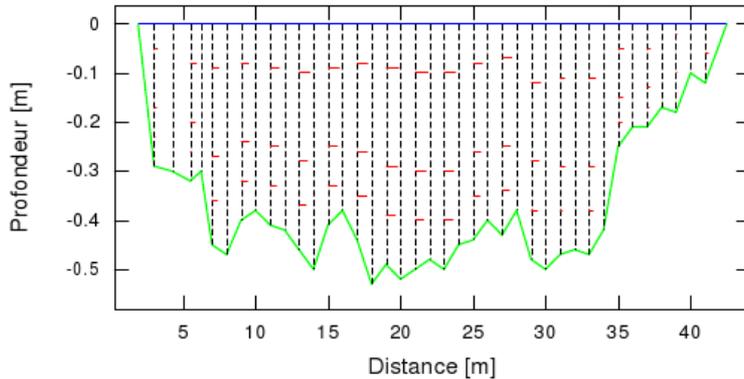
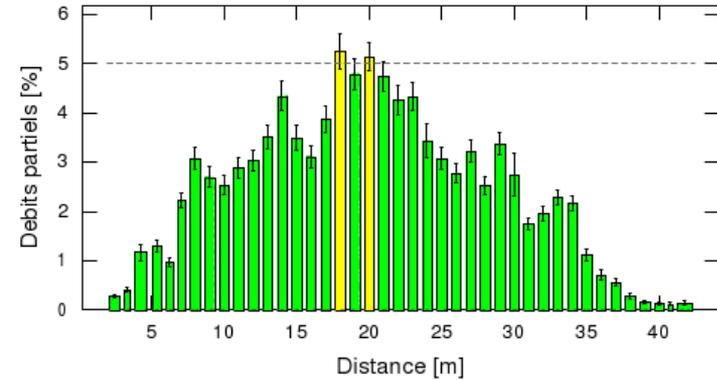
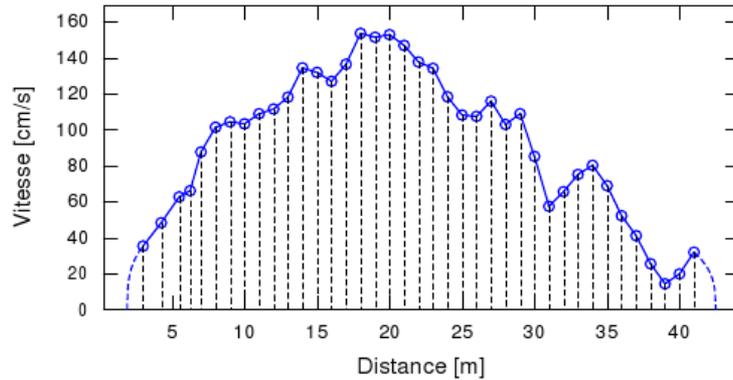
Incertitude Q+ = 6.6782% (angle fond = 15 deg.)

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 m<sup>3</sup>/s

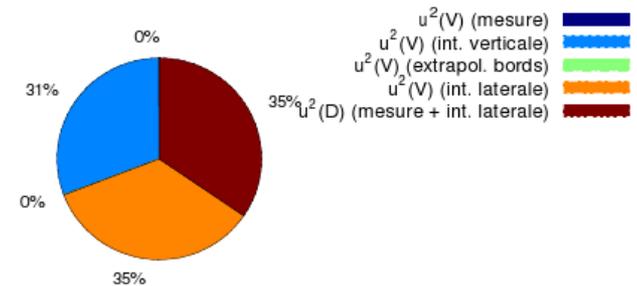
Surface mouillée = 15.114 m<sup>2</sup>

Vitesse moyenne = 1.0248 m/s

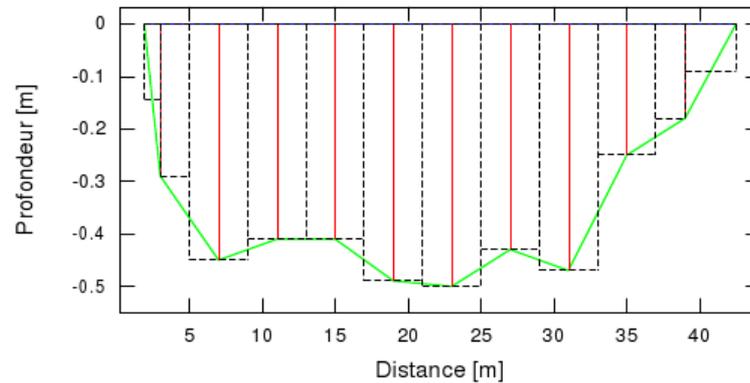
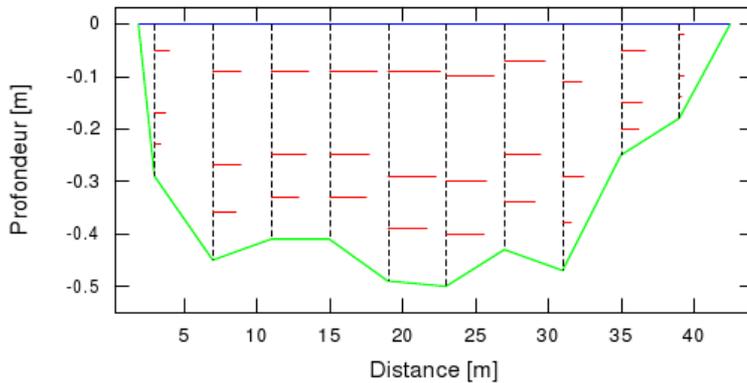
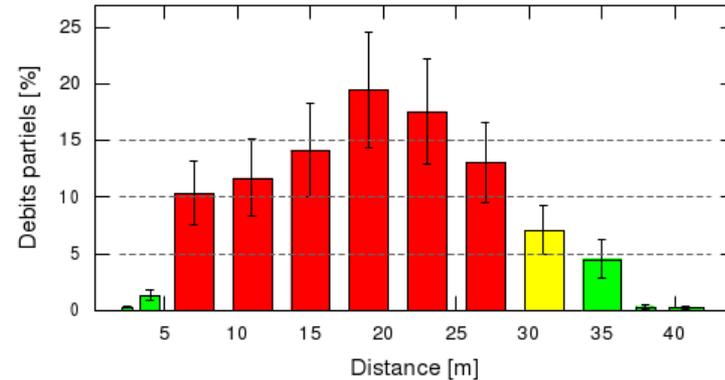
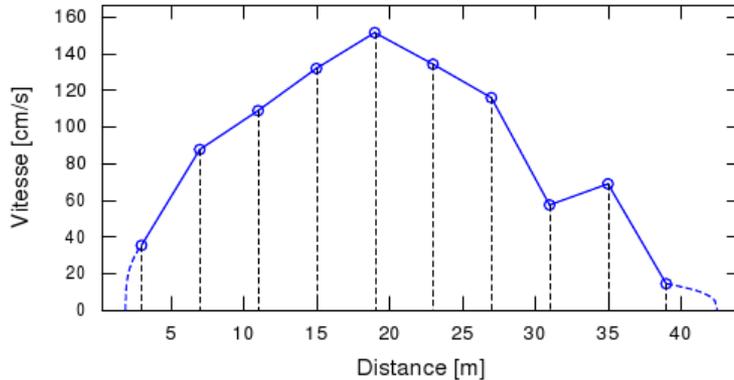
Incertitude Q+ = 2.714% (angle fond = 15 deg.)

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 m<sup>3</sup>/s

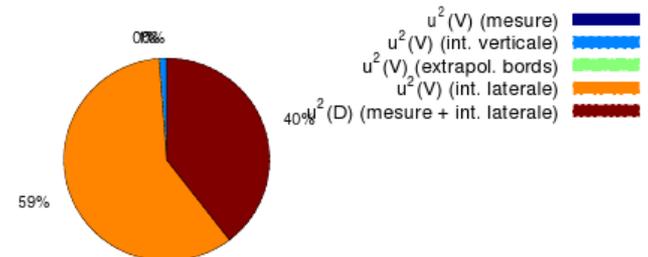
Surface mouillée = 15.055 m<sup>2</sup>

Vitesse moyenne = 1.0155 m/s

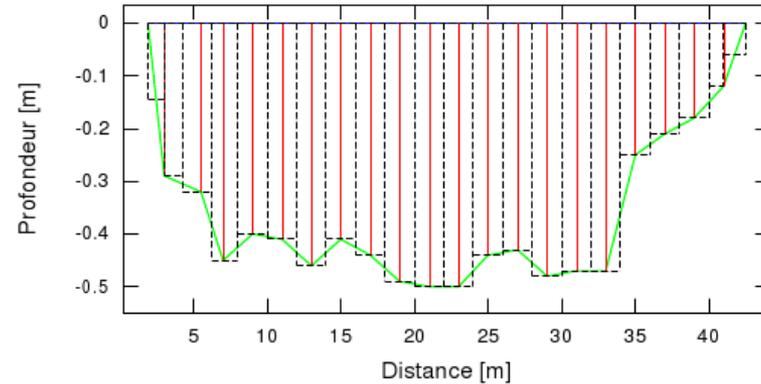
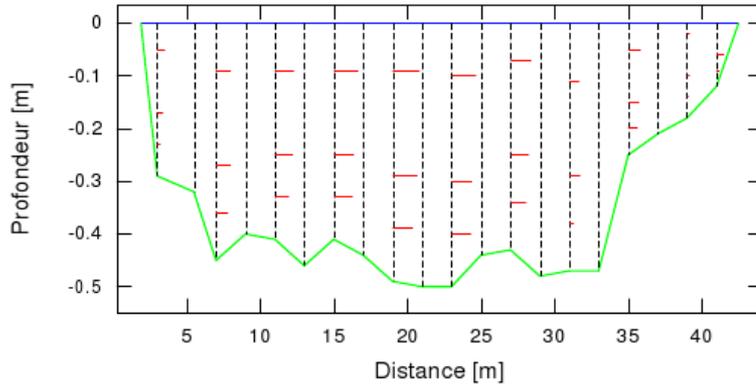
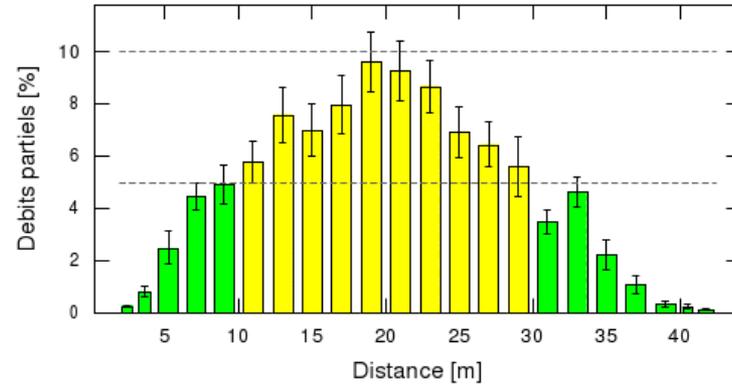
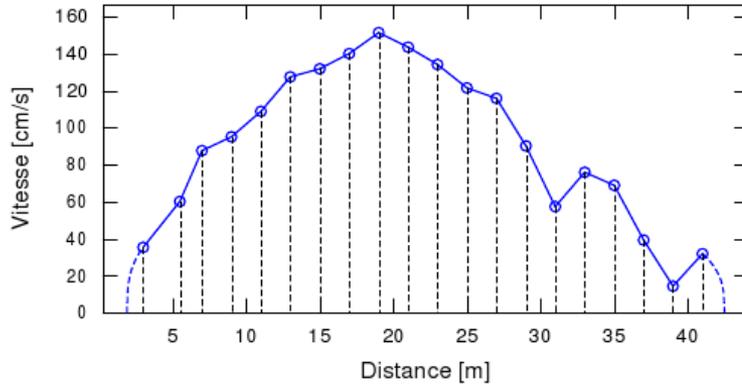
Incertitude Q+ = 20.421% (angle fond = 15 deg.)

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<sub>m</sub>2b.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 m<sup>3</sup>/s

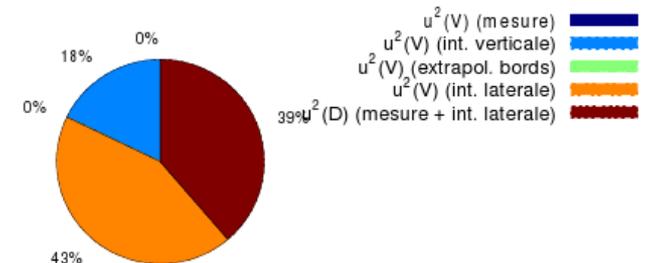
Surface mouillée = 15.239 m<sup>2</sup>

Vitesse moyenne = 1.0151 m/s

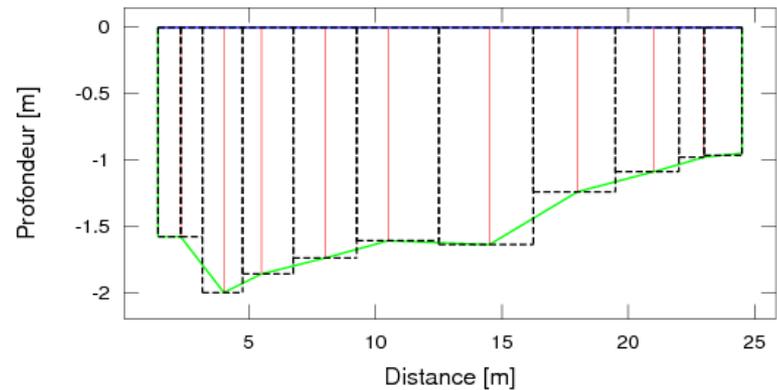
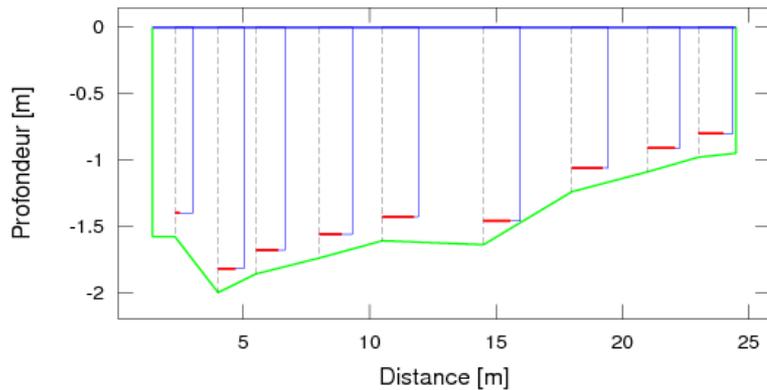
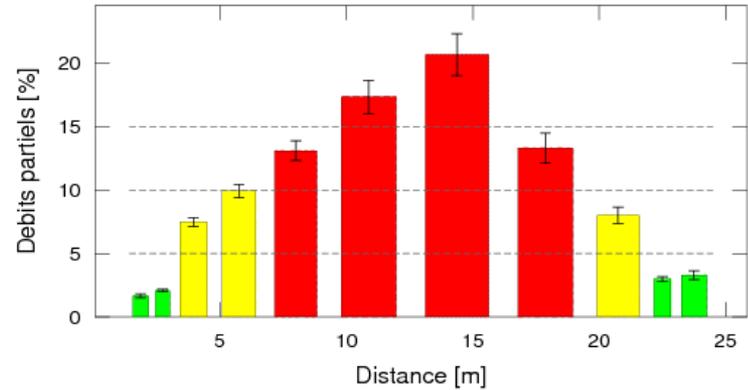
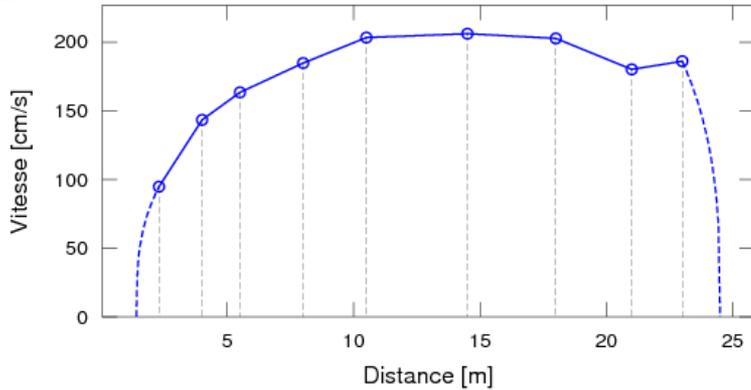
Incertitude Q+ = 7.1822% (angle fond = 15 deg.)

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

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

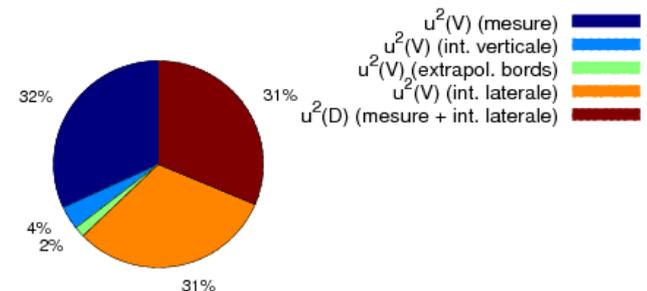


# Exemple : méthode par intégration



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 m<sup>3</sup>/s  
 Surface mouillée = 34.600 m<sup>2</sup>  
 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		

Section numéro 1

Verticale numéro 5

Coef. de fond Kf  m  ?

Angle de dérive

Moulinet

Temps de comptage (s)

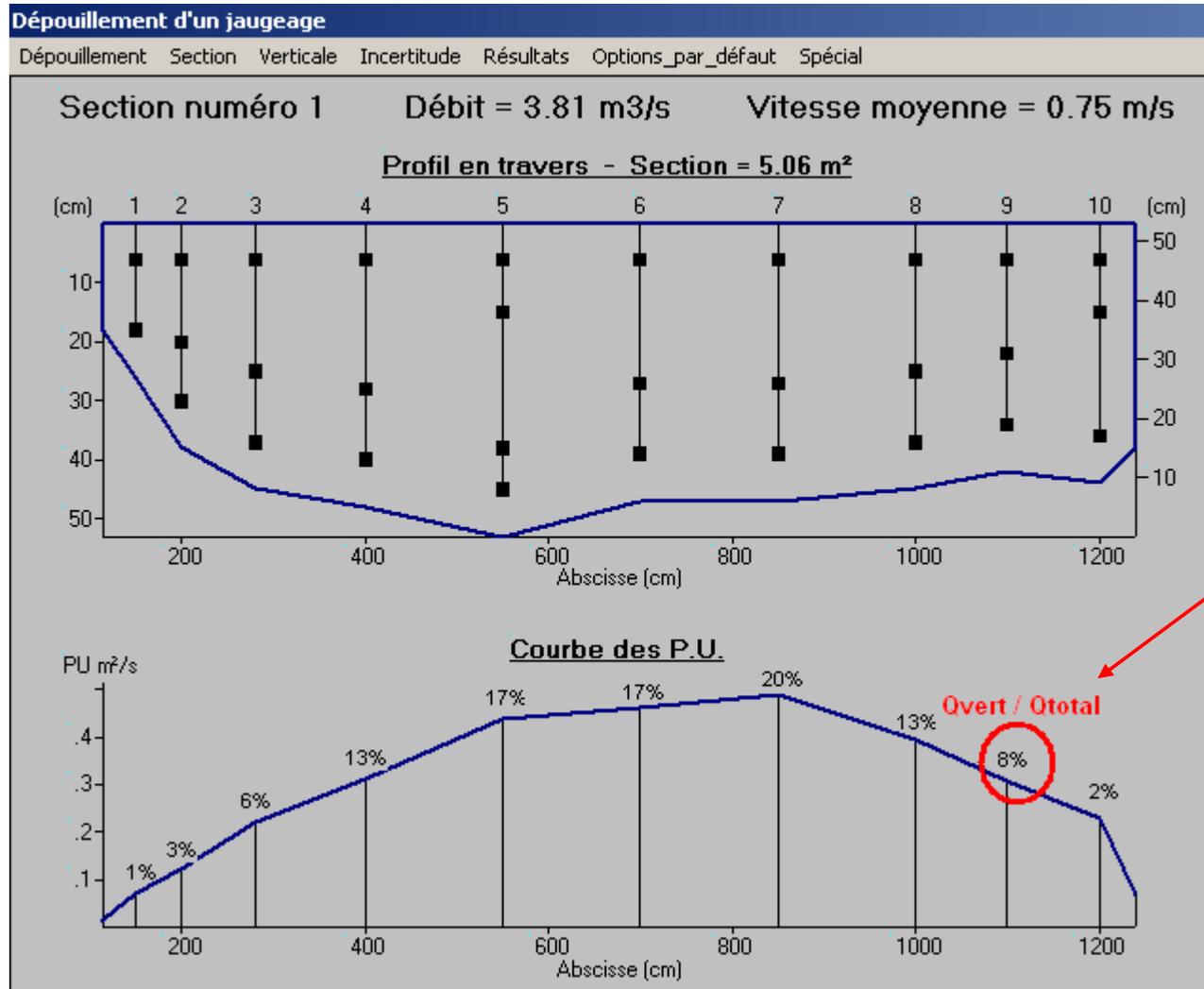
Même principe retenu pour une verticale par intégration et pour une rive

Ecart maxi 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

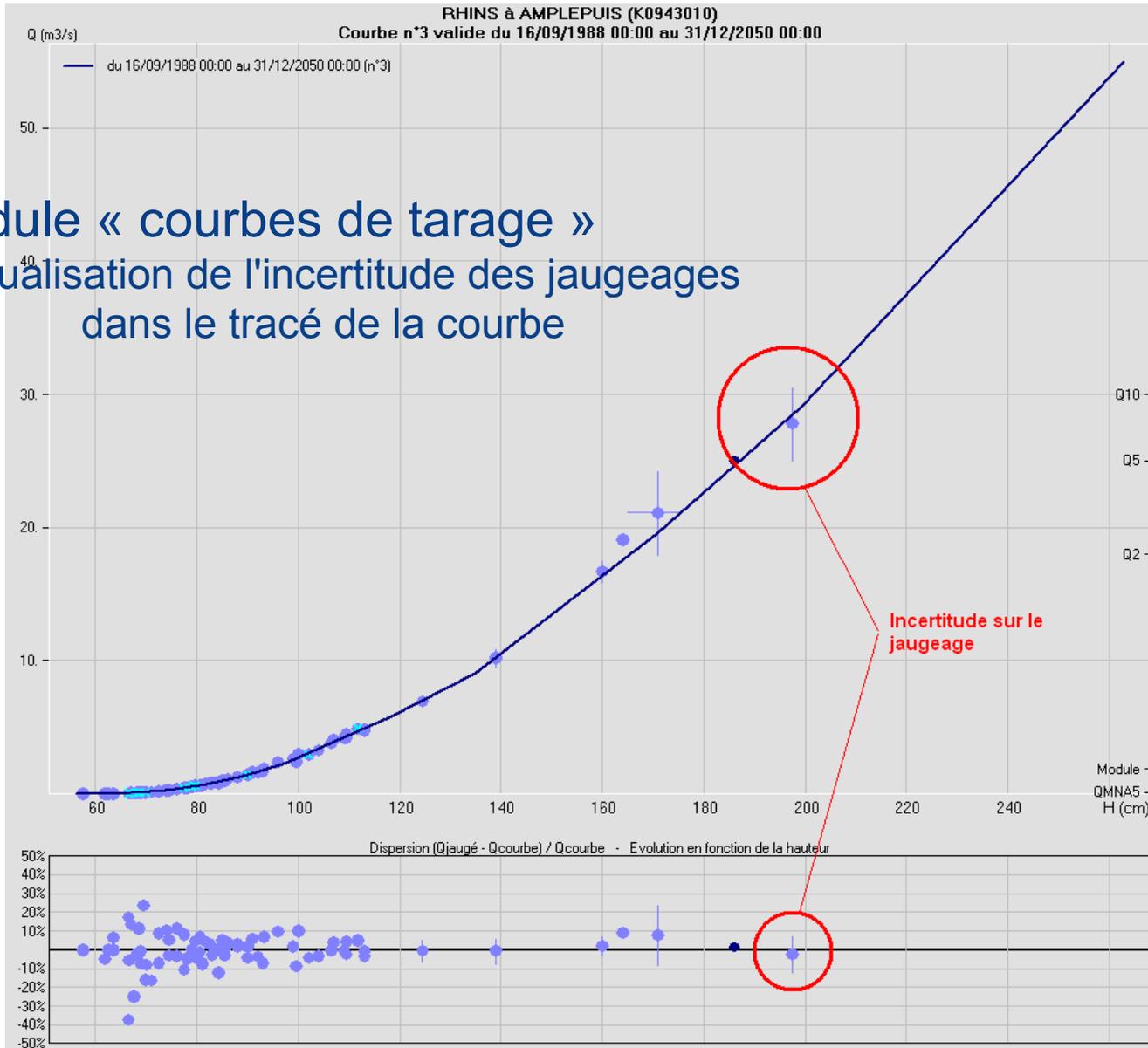
Dépouillement Section Verticale Incertitude Résultats Options\_par\_défaut Spécial

**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

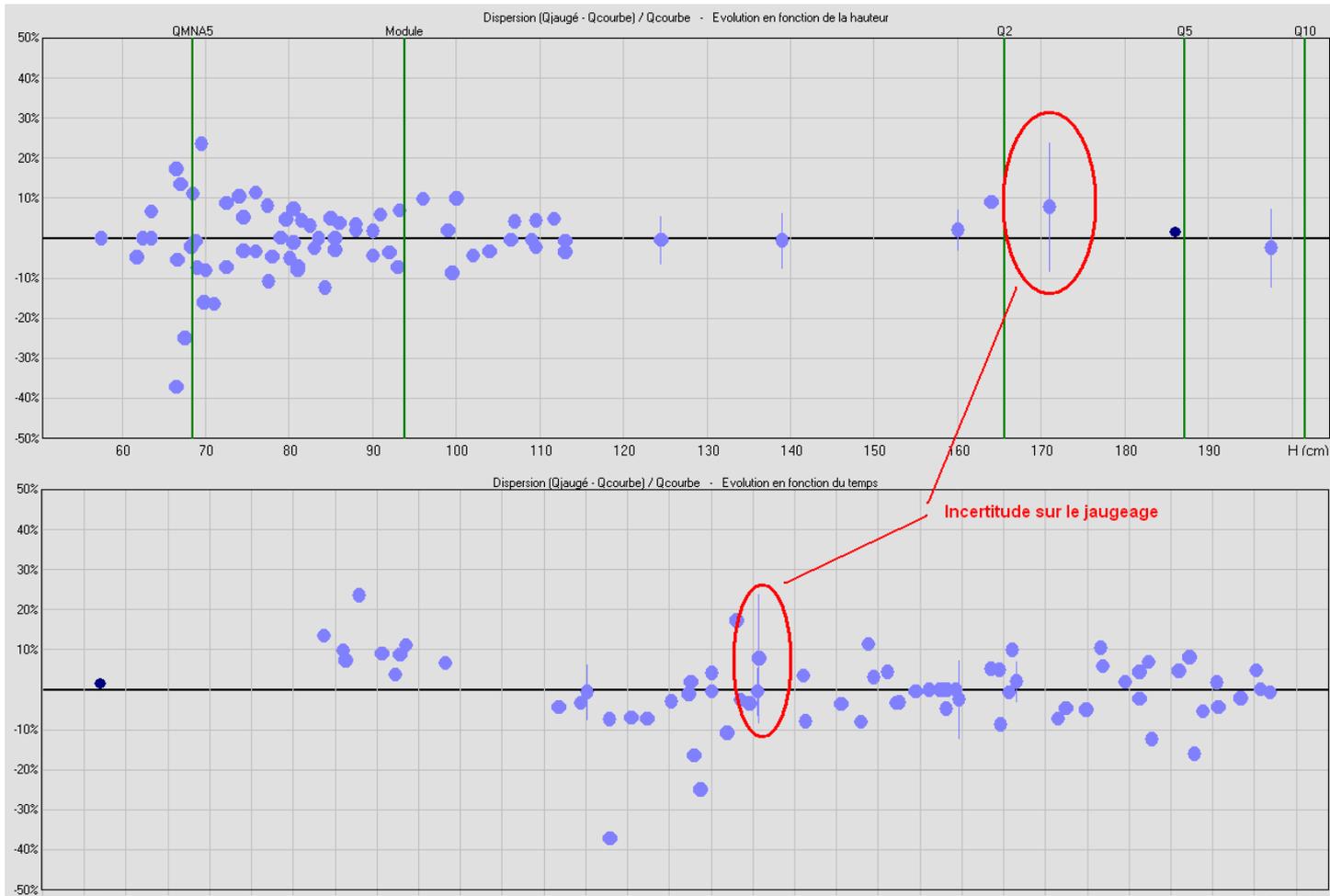


# Développements du logiciel Barème

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)*