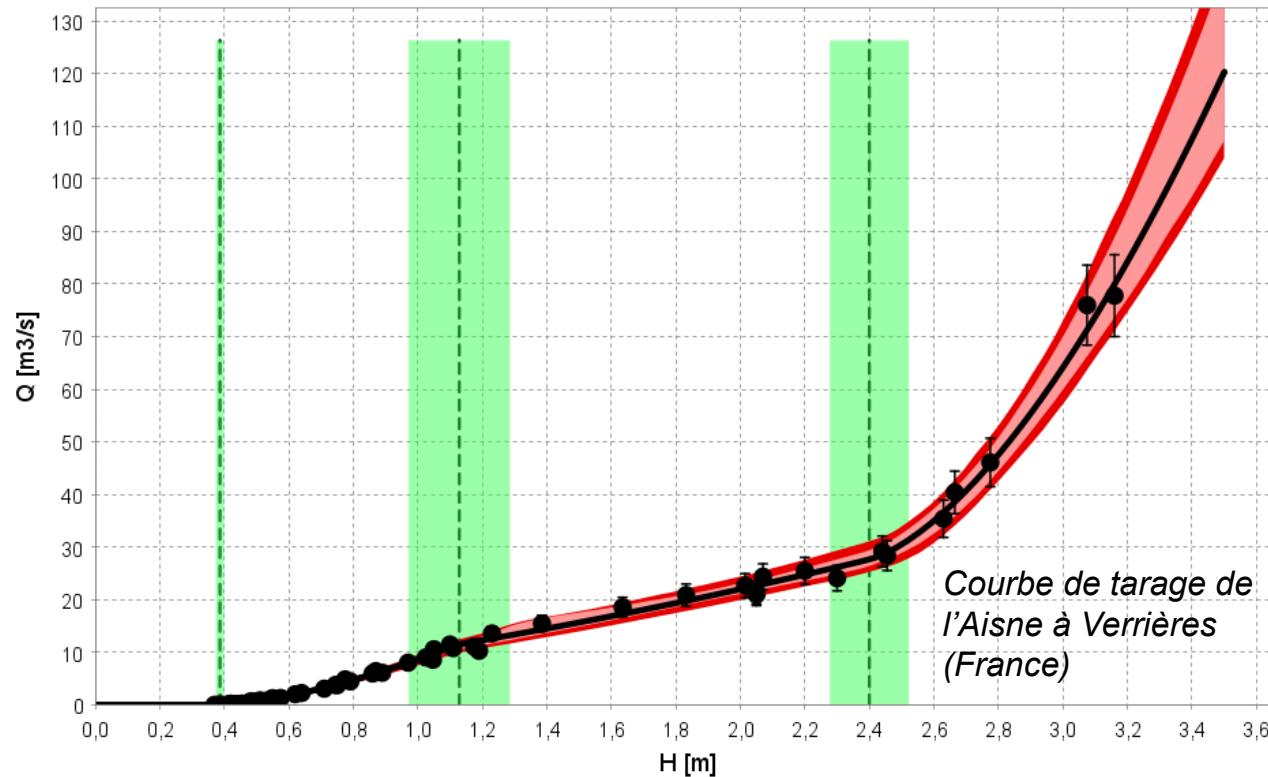


Développement d'outils pour la quantification des incertitudes des données hydrométriques

Prévision des crues et des inondations – Avancées, valorisation et perspectives
Toulouse, 28-30 novembre 2023



INRAE

Jérôme LE COZ
Benjamin RENARD
Michel LANG
Blaise CALMEL
Felipe MENDEZ-RIOS



Alexandre HAUET



Aurélien DESPAX
Emeline PERRET



Laurent BONNIFAIT



HydrPortail

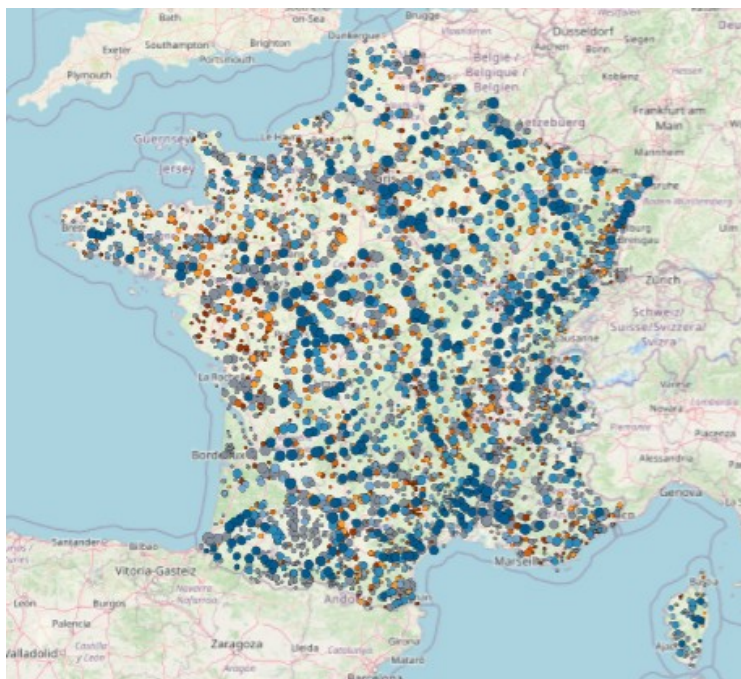


Le réseau hydrométrique national en France

Environ 2400 stations actives enregistrent le **débit des cours d'eau** en France :

- ~75% Etat : 25 unités d'hydrométrie, 19 services de prévision des crues, SCHAPI
- ~25% partenaires : EDF, CNR, VNF, OFB, EPTB, EPST...

Hydr  Portail















Territoire Vilaine-Côtière Bretons

Accéder au bulletin d'information local
publié le 18.10.2022 à 16h00 H.L.

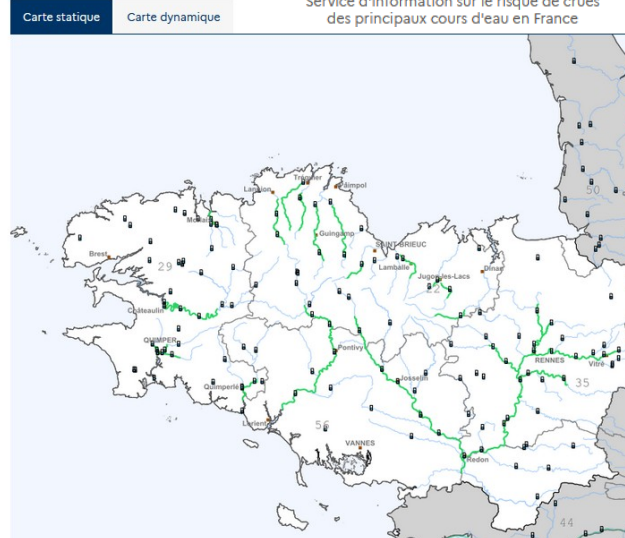
Production de l'information au moins deux fois par jour, à 10h et 16h.

Situation par tronçon de vigilance crues :

Voir sur la carte	Nom	Vigilance	RSS
	Gouessant - Arguenon - Rance	+	 Vert
	Trieux - Leff - Gouët	+	 Vert
	Leguer - Guindy - Jaudy	+	 Vert
	Morlaix	+	 Vert
	Aulne	+	 Vert
	Odet	+	 Vert

VIGICRUES

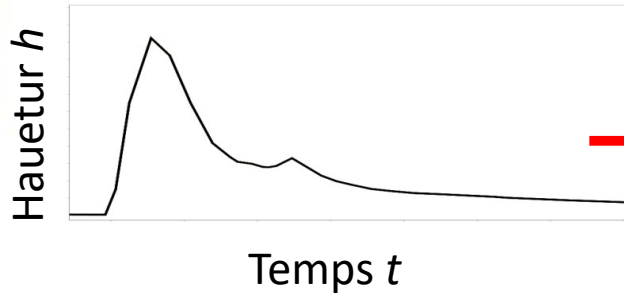
Service d'information sur le risque de crues
des principaux cours d'eau en France



Débits moyens mensuels de novembre 2021

*Bulletin de prévision des crues
(SPC Vilaine-Côtière Bretons)*

Produire des séries hydrométriques



Limnigramme

$h(t)$

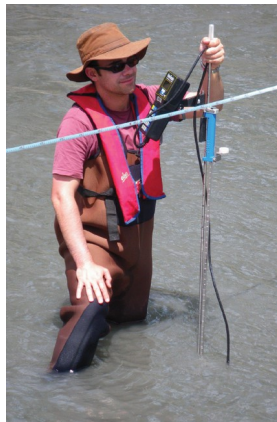


*photo réalisée avec un jaugeur réel

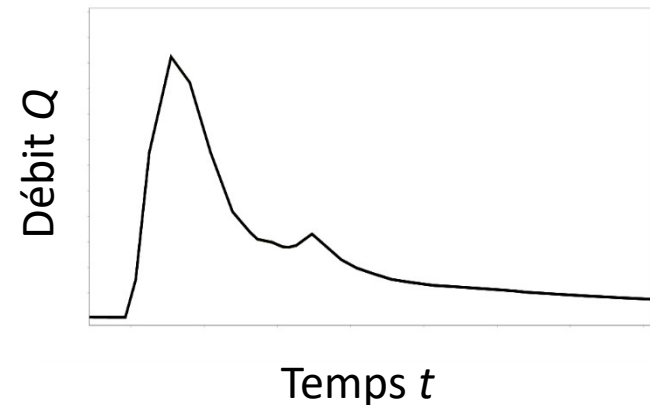
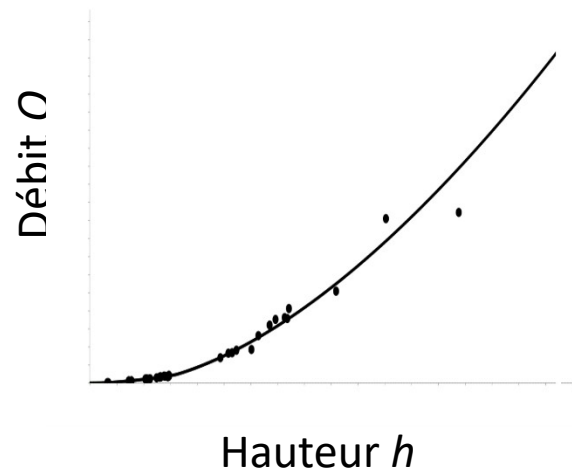
Jaugeages
(Q_i, h_i)

Courbe de tarage
 $Q(h)$

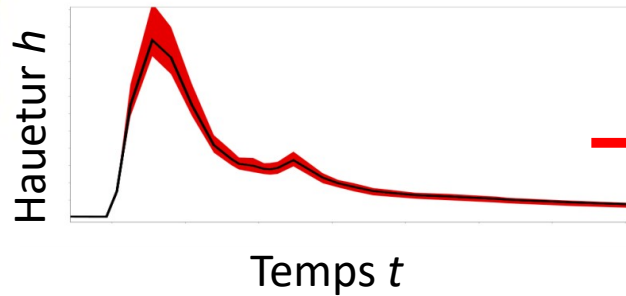
Hydrogramme
 $Q(t)$



*photo réalisée avec
un jaugeur virtuel



Produire des séries hydrométriques *probabilistes*



Limnigramme

$h(t)$

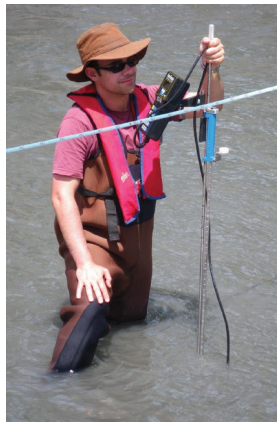


*photo réalisée avec un jaugeur réel

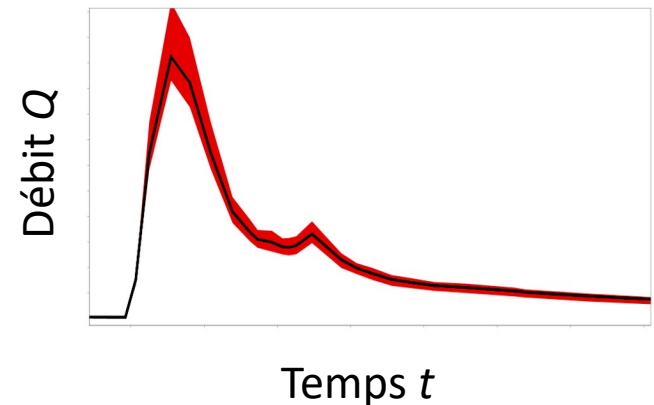
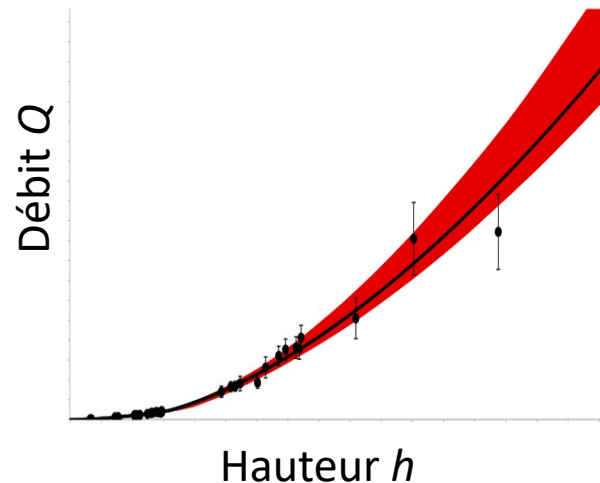
Jaugeages
(Q_i, h_i)

Courbe de tarage
 $Q(h)$

Hydrogramme
 $Q(t)$

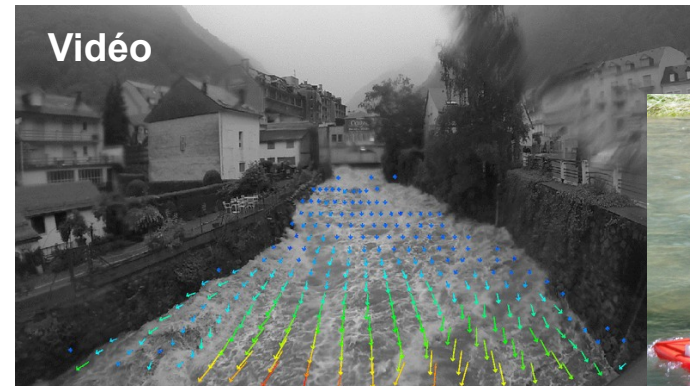


*photo réalisée avec un jaugeur virtuel



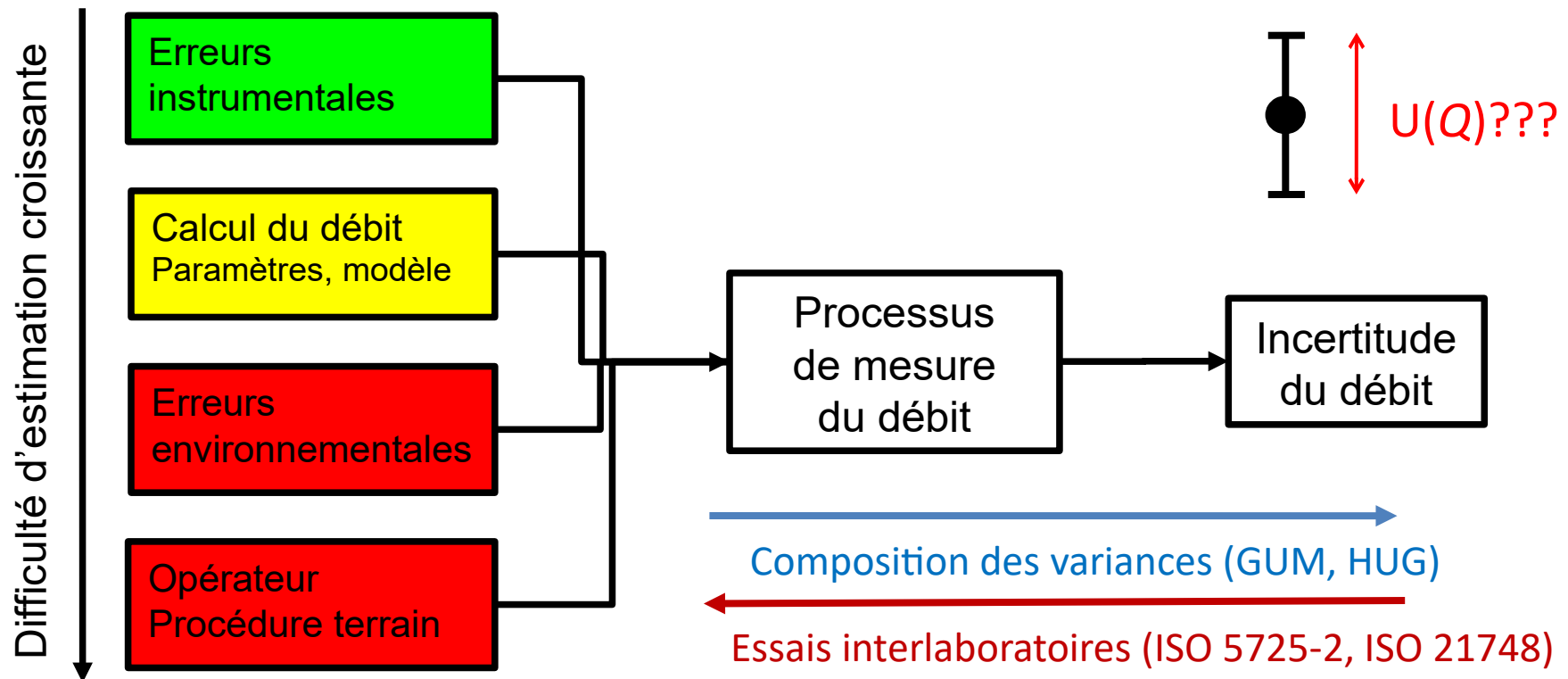
Les jaugeages

Les mesures de débit nécessitent des opérateurs qualifiés, une variété de techniques, des procédures solides, sûres et stables.



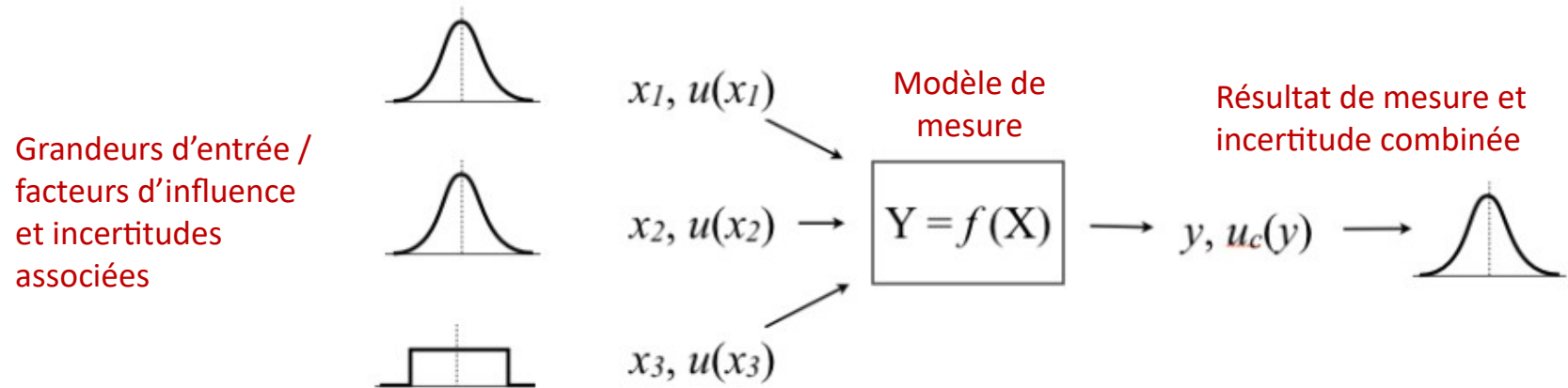
Comment estimer l'incertitude des jaugeages ?

- Pas d'étalons de débit (références) traçables
- Le processus de mesure peut être complexe et difficile à modéliser
- Les mesures élémentaires ne sont pas toujours étalonnées
- L'estimation des termes de covariance entre erreurs est problématique
- Des composantes d'incertitude importantes sont difficiles à estimer...



Comment estimer l'incertitude des jaugeages ?

- Méthodes de composition des variances (ou de propagation, GUM, HUG)



- Propagation analytique, basée sur une approximation de la fonction f :

$$u_c^2(y) \approx \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) u(x_j) \rho_{ij}$$

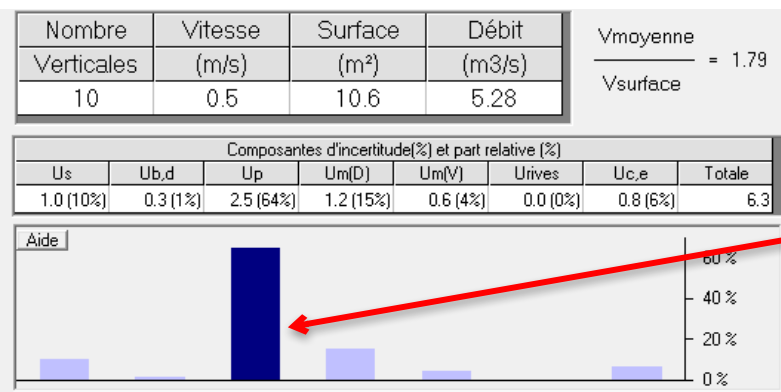
Coefficient de sensibilité

Si les erreurs sont indépendantes

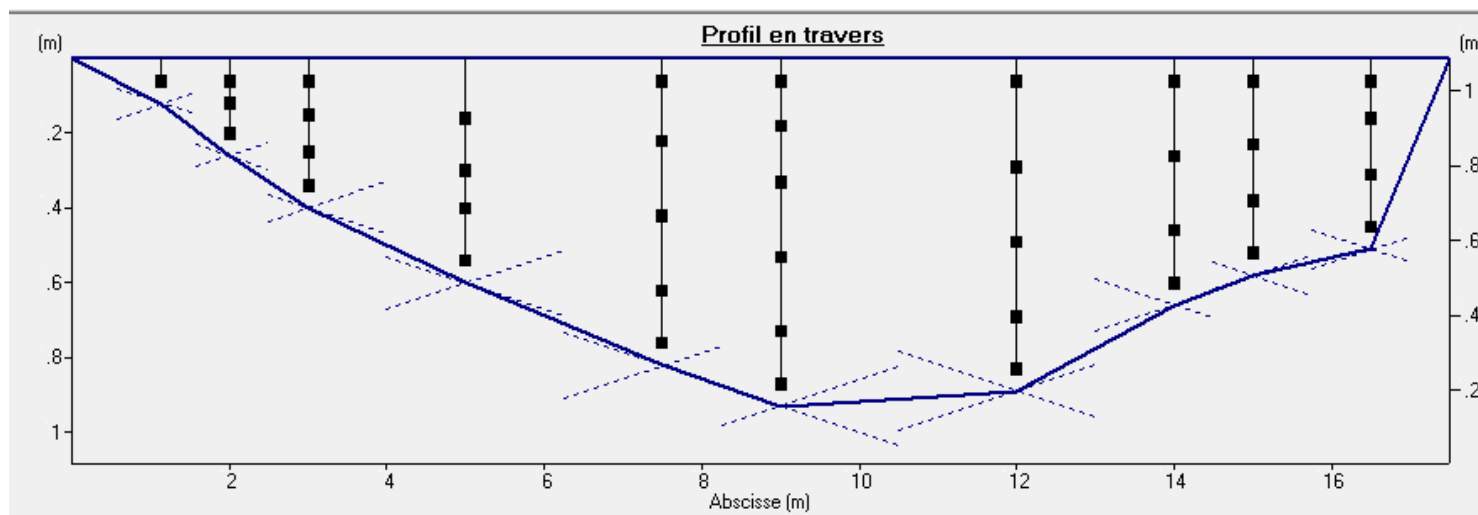
- Propagation Monte Carlo, basée sur un grand nombre de simulations

Incertitude des jaugeages par exploration du champ des vitesses

- Implémentation opérationnelle dans Barème/Jacinthe (Q+), Jasmine (Flaure), QRevIntMS (ISO/IVE/Q+/Flaure), perches transparentes (ISO/Q+/Flaure)



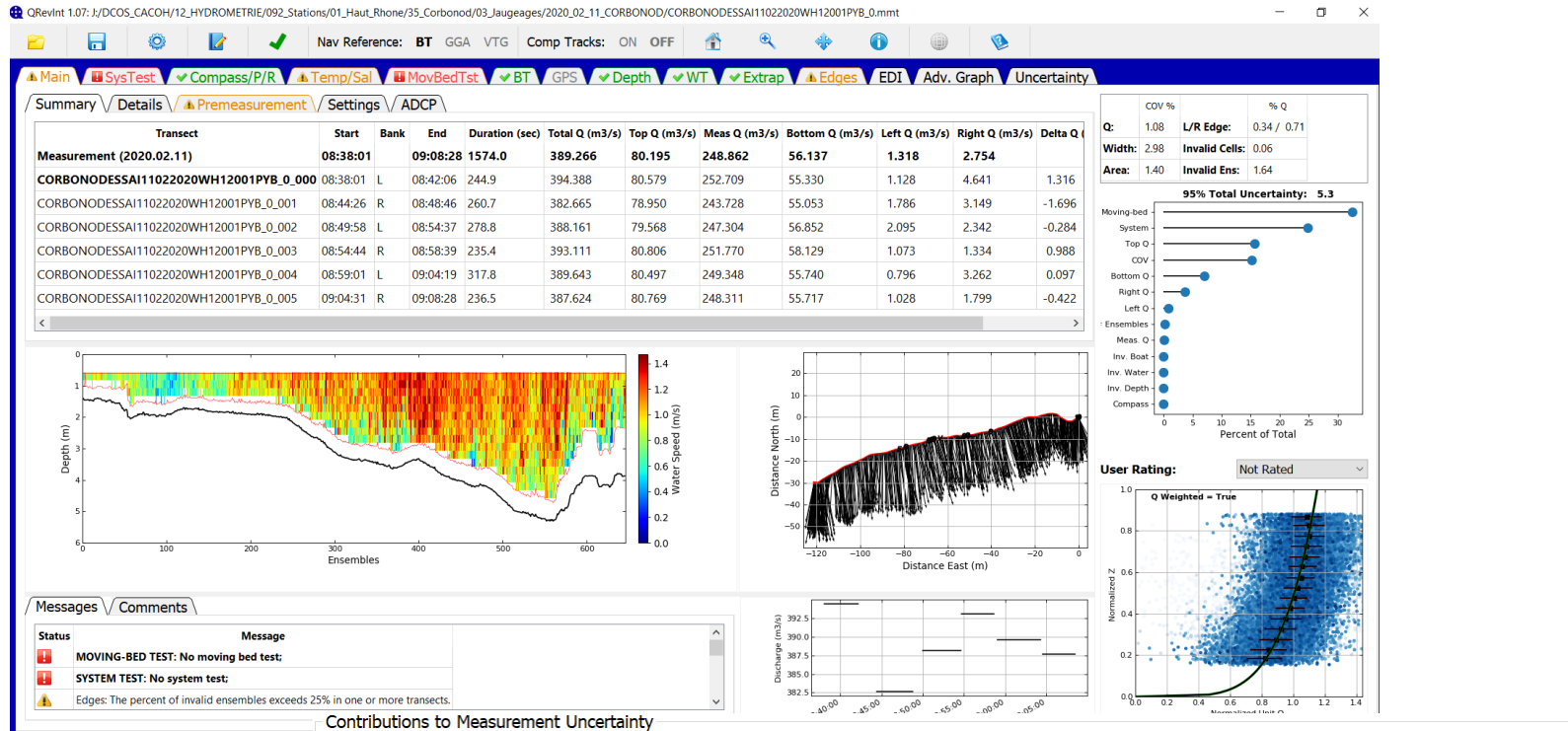
Incertitude liée au nombre de points sur les verticales



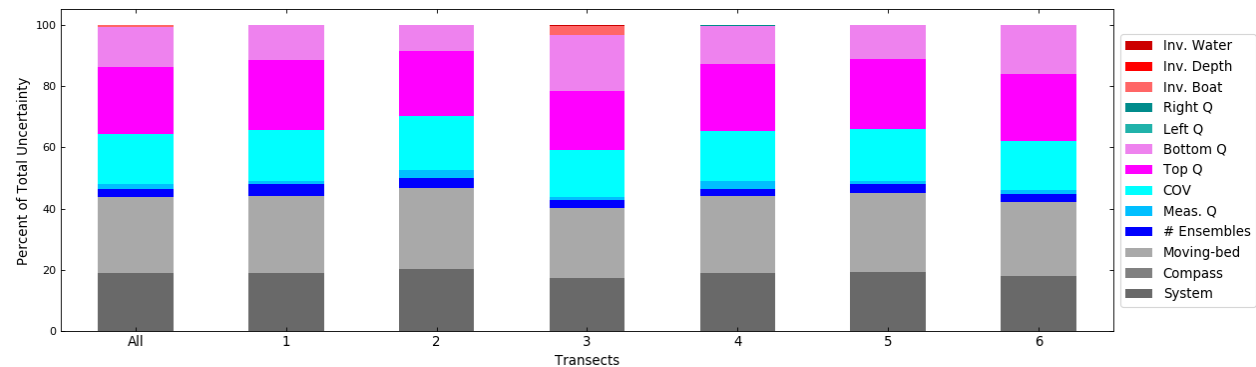
Dépouillement d'un jaugeage au moulinet dans Barème

Incertitude des jaugeages par ADCP mobile (OURSIN)

- Implémentation opérationnelle dans QRevInt (méthode OURSIN)

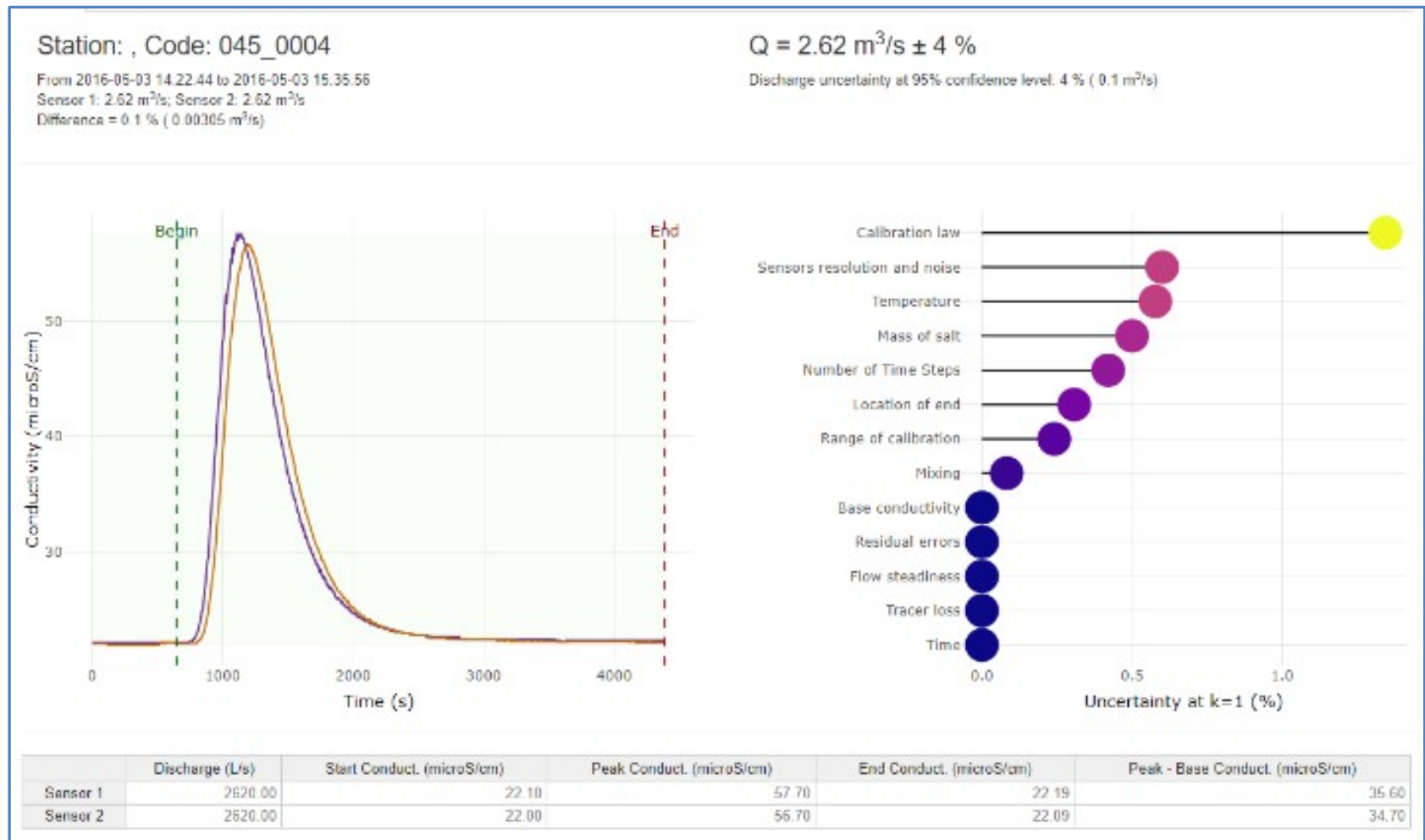


Contributions to Measurement Uncertainty



Incertitude des jaugeages par dilution (SUNY/FUNY)

- Implémentation opérationnelle par NVE et EDF (Hauet, 2020)



Méthode des essais interlaboratoires

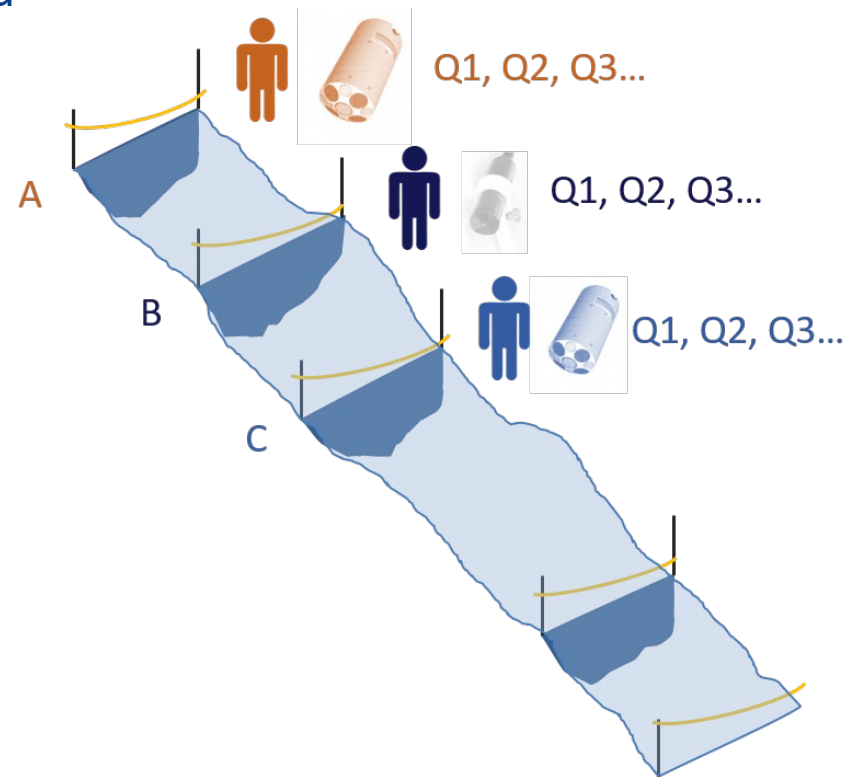
Chaque « laboratoire » répète des mesures du même débit (constant) simultanément.

Analyse de variance (ANOVA) :

- : estimateur de l'écart-type de répétabilité
- : estimateur de l'écart-type interlaboratoire

Prédiction de l'incertitude élargie du débit moyen de P « laboratoires » répétant N mesures chacun (Le Coz et al., 2016):

L'ANOVA peut être étendue à 2 facteurs, par exemple pour isoler l'effet de section de mesure (Despax et al., 2019) : plan d'expérience à adapter



Intercomparaisons de jaugeages

- ADCP et autres techniques de jaugeage, des essais locaux à internationaux



Vézère 2009 (ADCP)



Chauvan 2016 (ADCP)



*Génissiat 2012
(radars SVR)*



*Toulourenc 2011
(jaugeage à pied)*



*Sorgue 2022
(ADCP)*



Iguerande (camions jaugeurs)

Intercomparaisons de jaugeages

- Implémentation opérationnelle dans QRame (basé sur QRevInt)

QRame 0.1 : C:\Users\lcalme\Documents\20_Data\2023_intercomparaison_dataset\Recap\Pickle\2022_Intercomp_Vranov.pickle

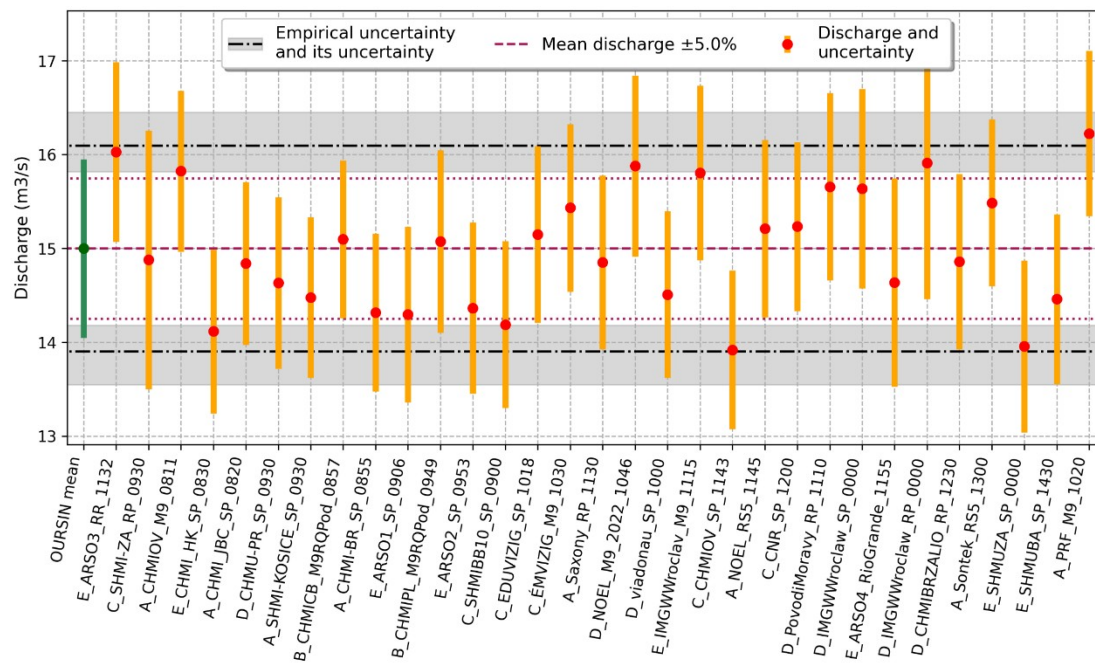
	Value	Name	Manufacturer	Model	Nav. Ref.	Discharge	Deviation to ref.	Score	U Total
Median Q	14.9 m ³ /s	E_ARSO3_RR_...	TRDI	RiverRay	BT	14.8 m ³ /s	-0.74 %	9.85	5.97 %
Mean UIQ [Oursin]	6.34 %	C_SHMI_...	TRDI	RiverPro	BT	14.9 m ³ /s	0.0 %	9.86	9.26 %
Empirical: N = 8		A_CHMIOV_M_...	SonTek	M9	BT	15.8 m ³ /s	6.28 %	9.87	5.43 %
UIQ	7.3 %	E_CHMI_HK_S...	TRDI	StreamPro	BT	14.1 m ³ /s	-5.12 %	9.87	6.18 %
UIQ min	5.46 %	A_CHMI_JBC_S...	TRDI	StreamPro	BT	14.8 m ³ /s	-0.244 %	9.146	5.85 %
UIQ max	9.69 %	D_CHMI_...	TRDI	StreamPro	BT	14.6 m ³ /s	-1.64 %	9.986	6.24 %
Repeatability sr	1.98 %	A_SHMI_...	TRDI	StreamPro	BT	14.3 m ³ /s	-2.89 %	9.62	5.92 %
Interlaboratory sL	3.66 %	B_CHMICB_M_...	SonTek	M9	BT	15.1 m ³ /s	1.48 %	9.888	5.56 %
Reproducibility sR	4.16 %	A_CHMI_...	TRDI	StreamPro	BT	14.3 m ³ /s	-3.78 %	9.227	5.87 %
Ar	0.094 %	E_ARSO1_SP_0...	TRDI	StreamPro	BT	14.3 m ³ /s	-3.9 %	9.234	6.55 %
AR	0.204 %	B_CHMIPL_M9...	SonTek	M9	BT	15.1 m ³ /s	1.33 %	9.796	6.46 %
		E_ARSO2_SP_0...	TRDI	StreamPro	BT	14.4 m ³ /s	-3.45 %	9.07	6.35 %
		C_SHMIBB10_...	TRDI	StreamPro	BT	14.2 m ³ /s	-4.63 %	9.78	6.27 %
		C_EDUVIZIG_S...	TRDI	StreamPro	BT	15.1 m ³ /s	3.83 %	9.1	6.22 %



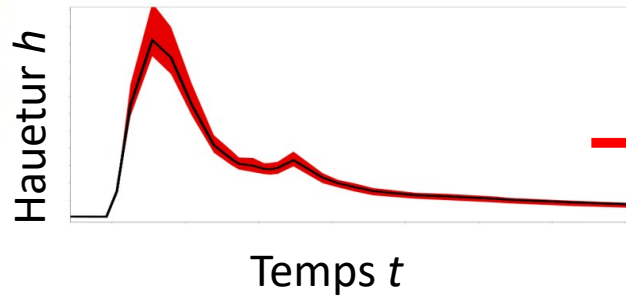
QRame permet aussi le rejeu en masse de jaugeages ADCP pour post-traitement QRevInt et calcul d'incertitude OURSIN.



Vranov 2022 (Rép. tchèque)



Produire des séries hydrométriques *probabilistes*



Limnigramme

$h(t)$

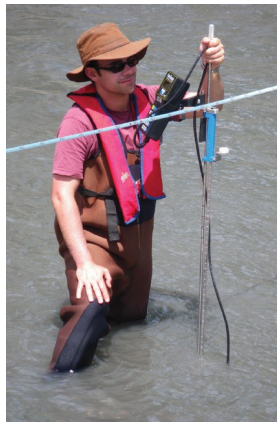


*photo réalisée avec un jaugeur réel

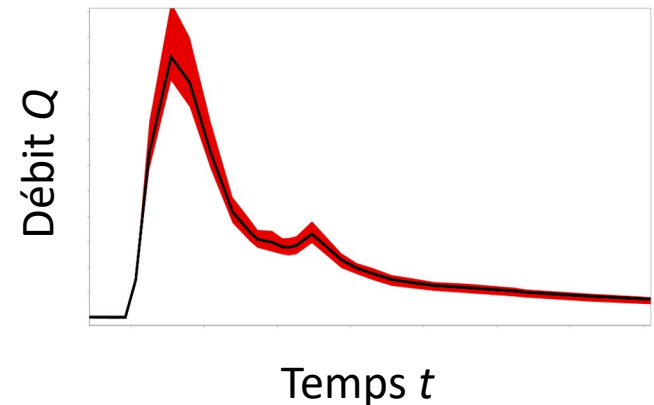
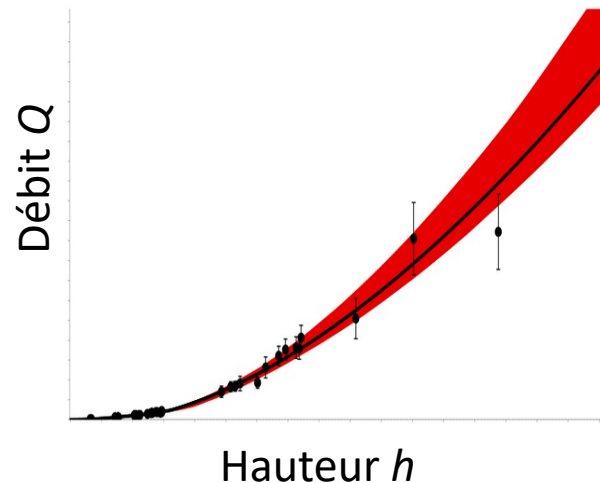
Jaugeages
(Q_i, h_i)

Courbe de tarage
 $Q(h)$

Hydrogramme
 $Q(t)$



*photo réalisée avec un jaugeur virtuel



L'approche bayésienne BaRatin

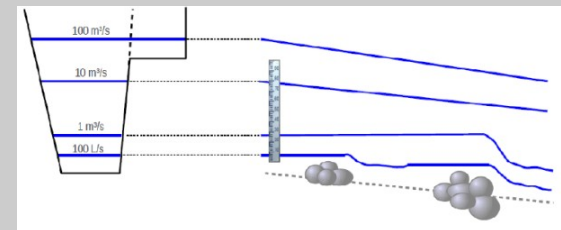
Une technique de calage des courbes de tarage pour :

- Combiner jaugages et connaissance des contrôles hydrauliques
- Rendre l'expertise et les hypothèses plus faciles à défendre et réviser
- Tenir compte des incertitudes en entrée et fournir celles en sortie (débits)

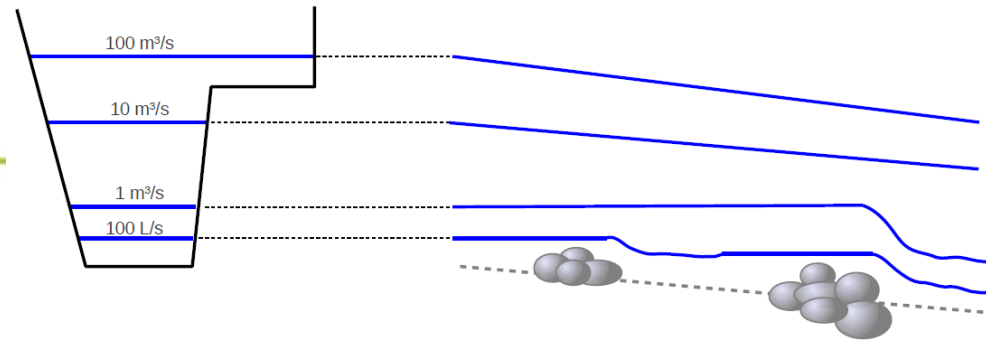
**DONNEES
MESURES / OBSERVATIONS
STATISTIQUE**



**MODELE
CONTROLES / GEOMETRIE
HYDRAULIQUE**



Contrôles hydrauliques



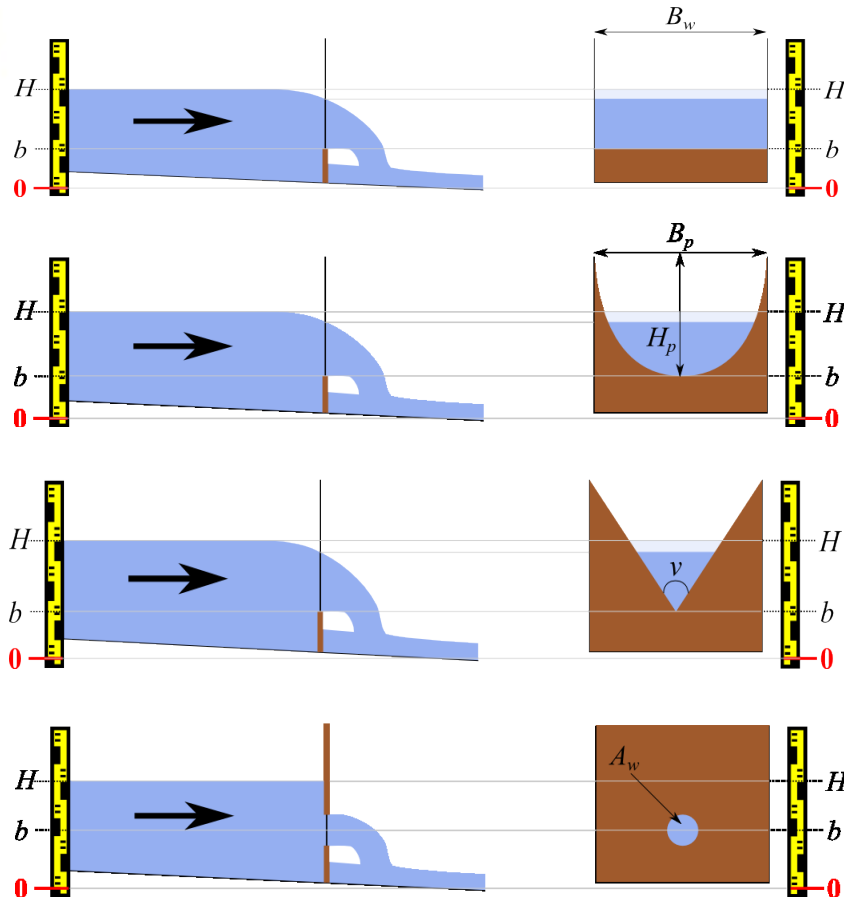
Les contrôles se succèdent, en s'effaçant ou en s'ajoutant les uns aux autres

	Radier amont ↓ Contrôle 1	Radier aval ↓ Contrôle 2	Lit mineur ↓ Contrôle 3	Lit majeur ↓ Contrôle 4
Segment 1	<input checked="" type="checkbox"/>			
Segment 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Segment 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Segment 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

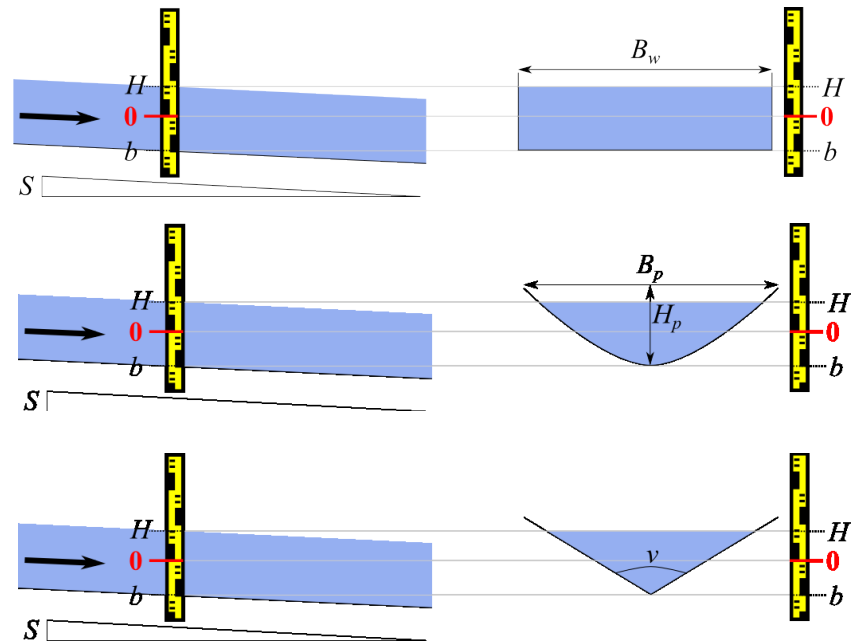
Matrice des contrôles, ou « Matrice de Bonnifait »

Contrôles hydrauliques types dans BaRatin

Contrôles section

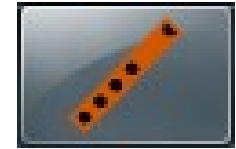


Contrôles chenal

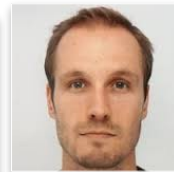
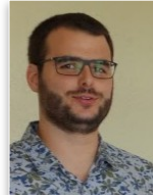
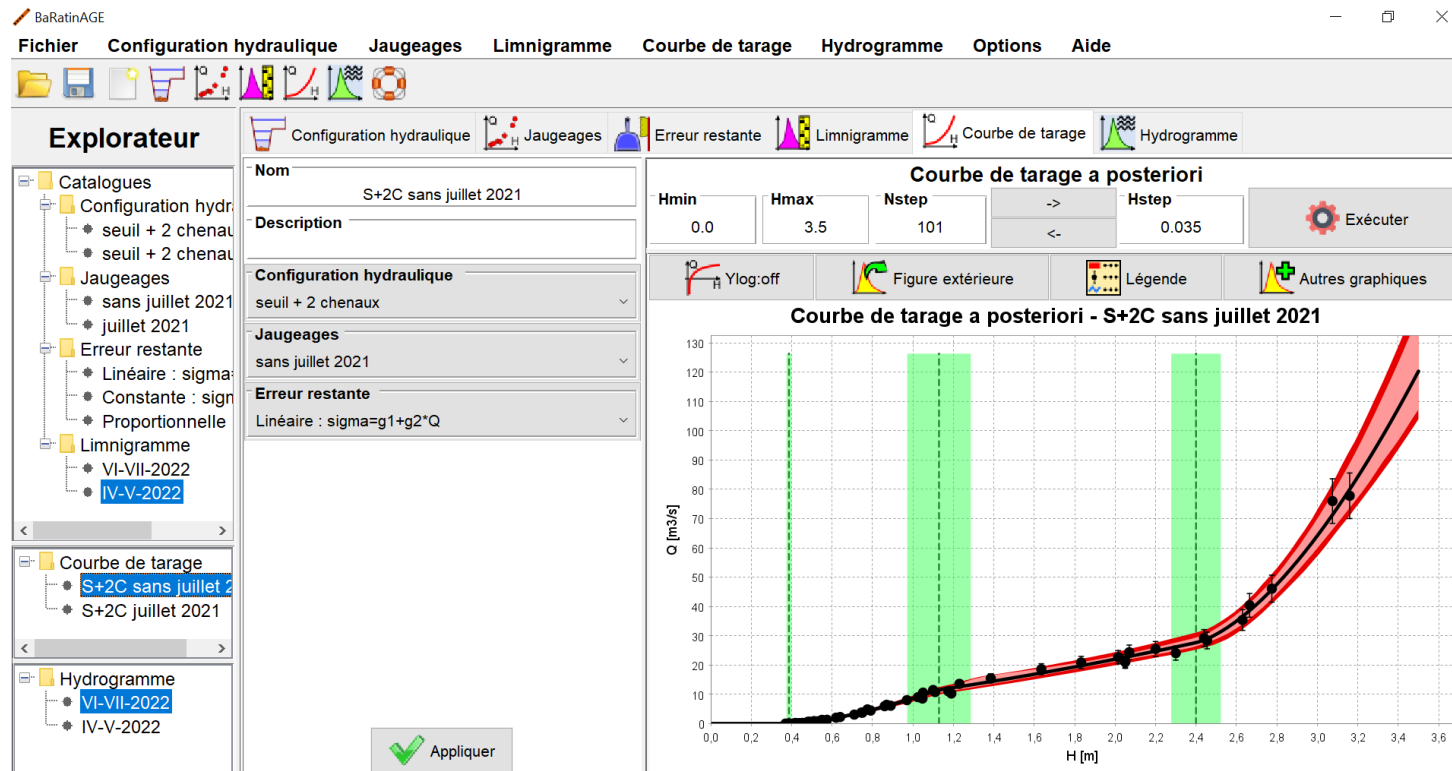


Contrôles « libres »

Logiciel BaRatinAGE v2.2 (2022)



- Interface graphique (java, 27 langues) et guide utilisateur (fr, en)
- Interface et solveur (fortran) open-source (licence GPL3)



Bilan et perspectives

- Des méthodes reconnues et opérationnelles pour estimer l'incertitude des jaugeages, courbes de tarage et hydrogrammes
 - Reprises dans des normes, publications, guides
- Des logiciels open-source, documentés et partagés
 - Jacinthe, QRevInt, QRame, BaRatinAGE

*Publications
externes utilisant
la méthode
BaRatin*



Journal of Hydrology 597 (2021) 126168
Contents lists available at ScienceDirect
Journal of Hydrology
journal homepage: www.elsevier.com/locate/jhydrol

Research papers
Combining a segmentation procedure and the BaRatin stationary estimate nonstationary rating curves and the associated uncertain



Water Resources Research

RESEARCH ARTICLE
10.1002/2017WR020473

High-Elevation Evapotranspiration Using Streamflow and NASA Airborne Lidar-based SWE Observations to Close the Upper Balance

Key Points:
• Distributed streamflow and lidar-based SWE observations are used to close alpine basins' water

Earth Syst. Sci. Data, 10, 1069
<https://doi.org/10.5194/essd-10-1069-2018>
© Author(s) 2018. This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Water and sediment fluxes in Mediterranean mountainous regions: comprehensive dataset for hydro-sedimentological analyses and modelling in a mesoscale catchment (River Isábena, NE Spain)




Aforos de ríos y arroyos en la Cuenca Matanza-Riachuelo

Informe 05

Elaboración de relaciones altura - caudal (curvas HQ)



Advances in Water Resources
Contents lists available at ScienceDirect
journal homepage: www.elsevier.com/locate/advwatres

Original Article
Calibrating a hydrological model in stage space to account for rating curve uncertainties: general framework and key challenges



Rating curve uncertainty: A comparison of estimation methods

R.R. Mason, Jr., J.E. Kiang & T.A. Cohn
U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, USA



Bayesian Rating Curve Modeling: Alternative Error Model to Improve Low-Flow Uncertainty Estimation

Rodrigo García¹, Veber Costa², Ph.D.², and Francisco Silva³, Ph.D.³



resources Research

ARTICLE
120225

The role of rating curve uncertainty in real-time flood forecasting

David Ocío¹, Nataliya Le Vine¹, Ida Westerberg², Florian Pappenberger^{2,4}, and Wouter Buytaert¹

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, London, UK, ²Swedish Environmental Research Institute, Stockholm, Sweden, ³European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, UK, ⁴School of Geography, Queen's University, Belfast, UK



Artificial Neural Network Rainfall-Discharge Model Assessment Under Rating Curve Uncertainty and Monthly Discharge Volume Predictions

Ayoub Zeroual^{1,2}, Mohamed Meddi¹, Ali A. Assani²



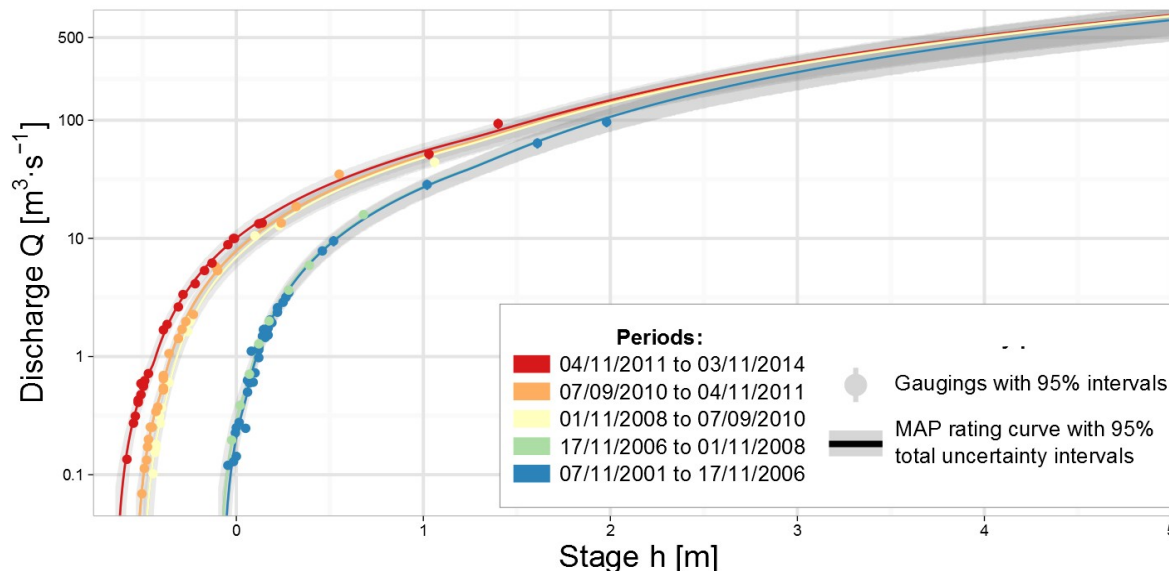
Water Resources Research

TECHNICAL REPORTS: DATA
10.1002/2019WR026004

Yosemite Hydroclimate Network: Distributed stream and atmospheric data for the Tuolumne River watershed and

Bilan et perspectives

- Restant à développer / améliorer / valider :
 - Méthodes de propagation pour les jaugeages (toutes techniques)
 - Essais interlaboratoire avec correction des variations de débit
 - Base de données de résultats d'intercomparaisons partagée
 - Courbes de tarage dynamiques (végétation, etc.), détarages...
 - Incertitude des limnigrammes (critique-validation dans Octave)
 - Communication et propagation des incertitudes des séries de débit



Méthodes pour la
détection et l'estimation
des détarages
(Mansanarez et al. 2019,
Darioenzo et al. 2021)



Participants de l'intercomparaison ADCP Sault-Brénaz 2023

Fichiers Composants Options



Explorateur des composants

Configuration hydraulique



CH

Jeu de jaugeages

Modèle d'erreur structurelle



ES

Courbe de tarage

Limnigramme

Hydrogramme

Configuration hydraulique CH

Desa

Matrice des contrôles

Ajouter un contrôle (Contrôle n°4)

Supprimer le dernier contrôle (Contrôle n°3)

	Contrôle #1	Contrôle #2	Contrôle #3
Segment #3 (haut)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Segment #2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Segment #1 (bas)	<input checked="" type="checkbox"/>		

☐ Inverser l'ordre des segments

Courbe de tarage a priori

Grille de hauteurs d'eau

Min
-0,5

Max
4

Nombre
100

Intervalle
0,045

Calculer la courbe de tarage a priori

Merci pour votre attention !

Version beta du logiciel BaRatinAGE v3 (2023)

