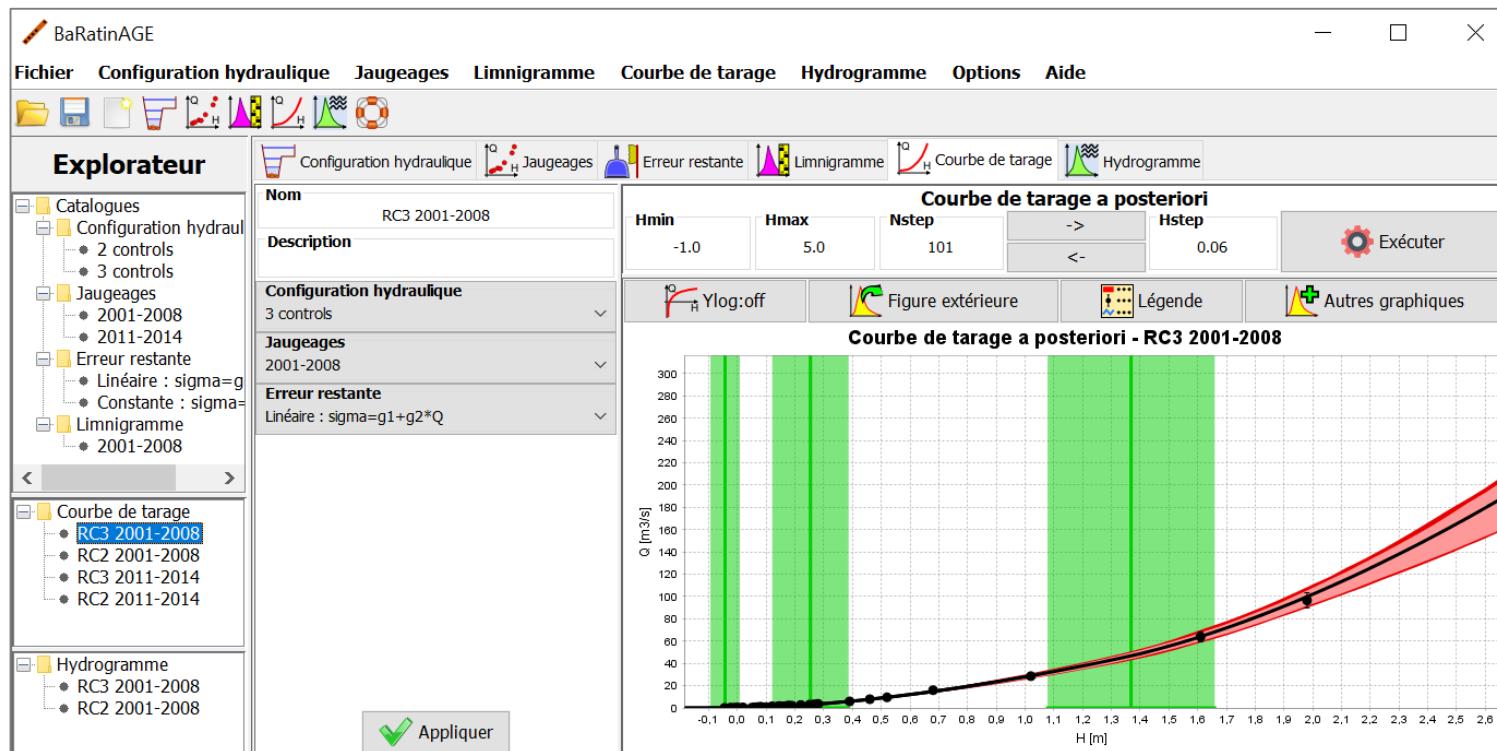
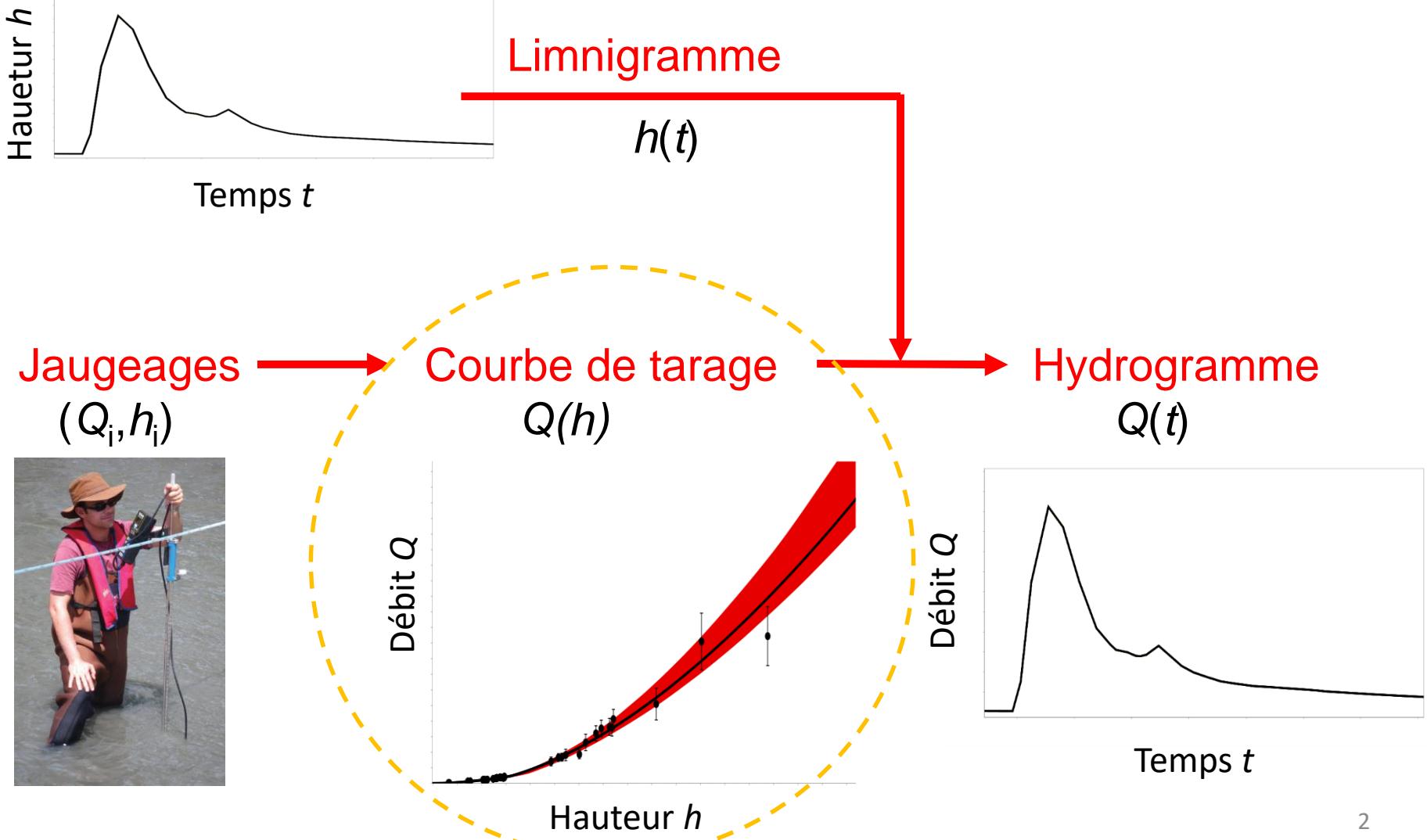


novembre 2021



Etablir une courbe de tarage et un hydrogramme avec incertitudes : travaux pratiques avec le logiciel BaRatin

Produire des séries hydrométriques *probabilistes*



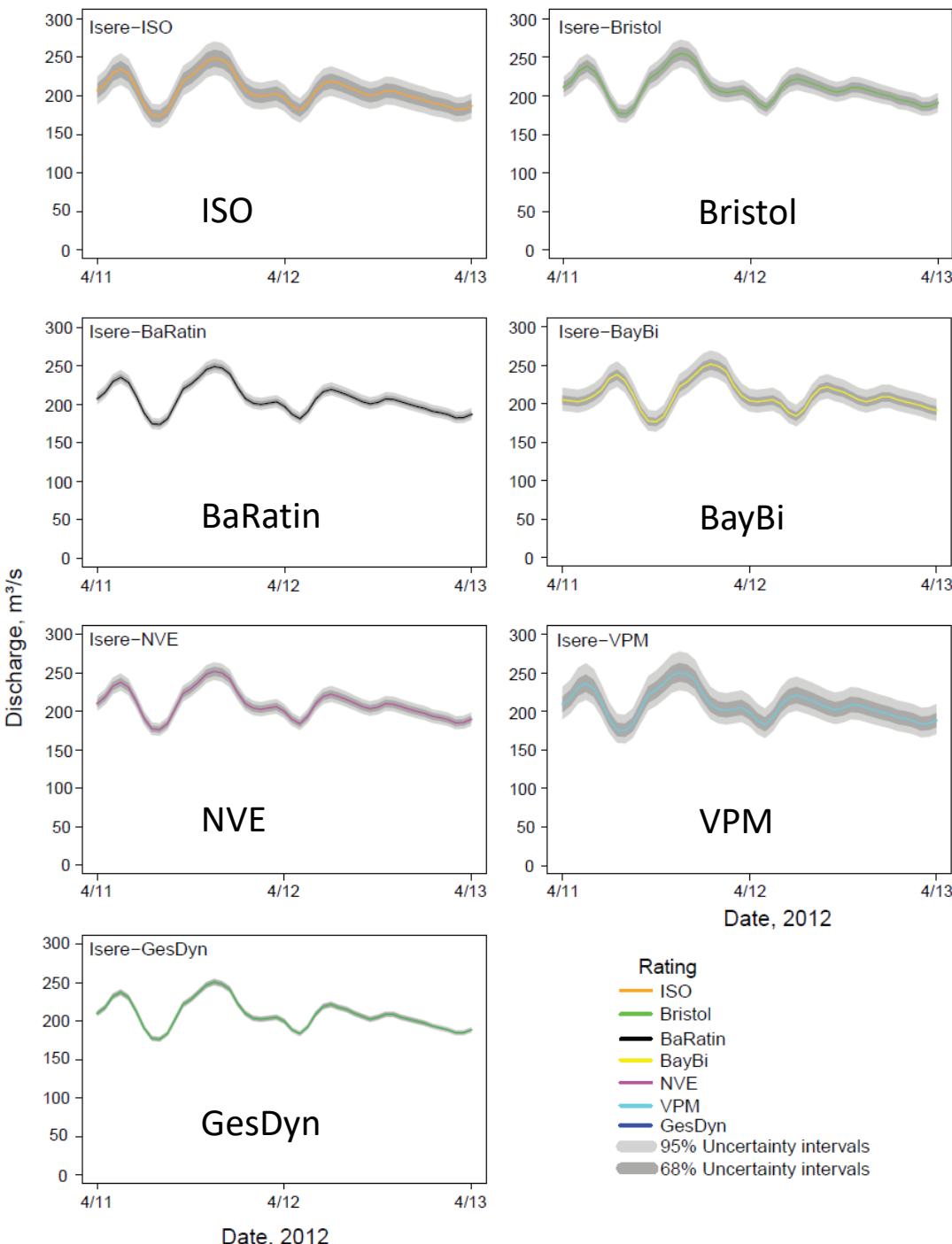
Intercomparaison de 7 méthodes

Difficile de comparer et d'homogénéiser les méthodes

La signification des résultats depend des hypothèses de chaque méthode

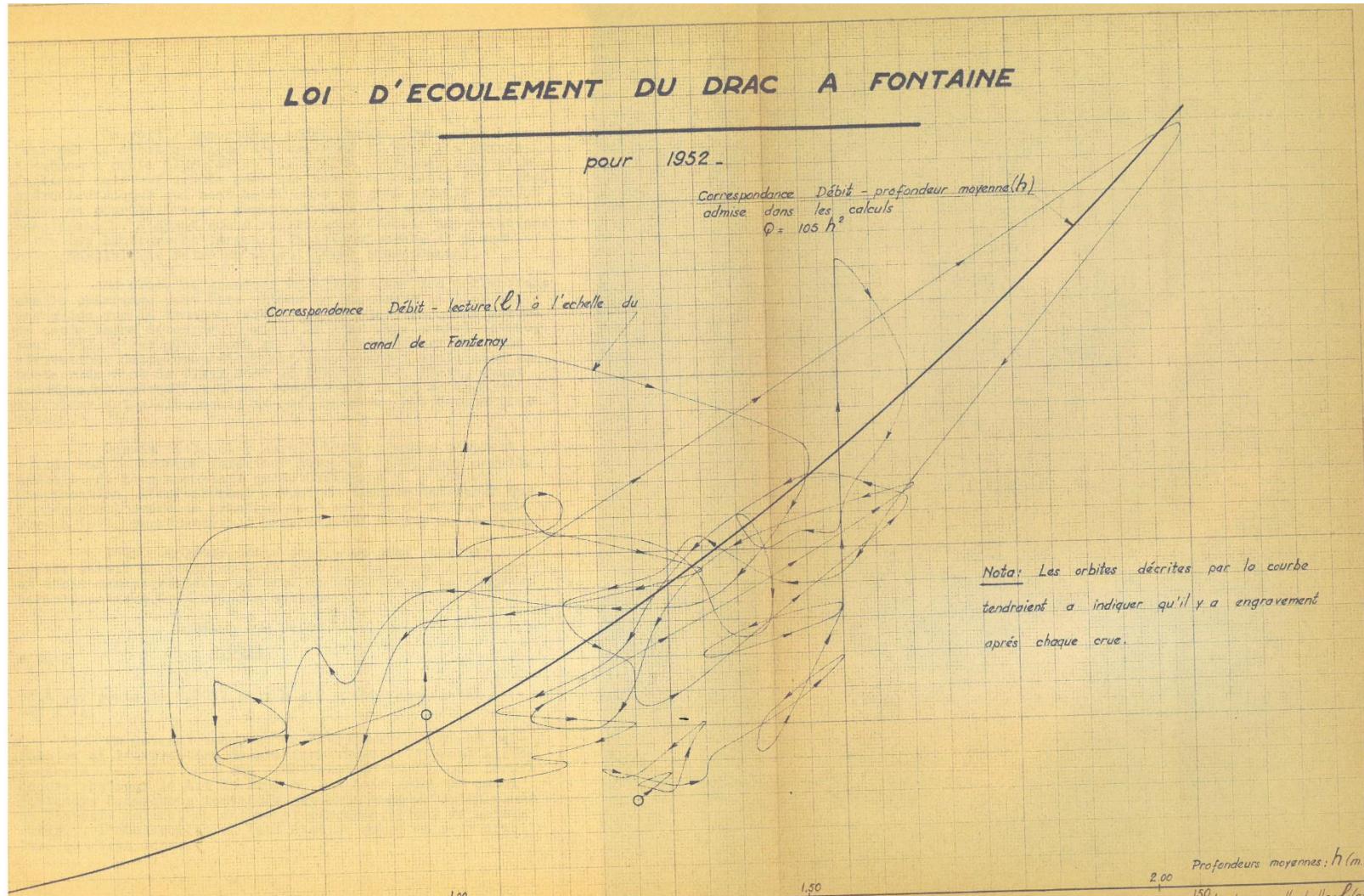
Intervalles d'incertitude à 95% des hydrogrammes de l'Isère à Grenoble

Kiang et al., WRR (2018)



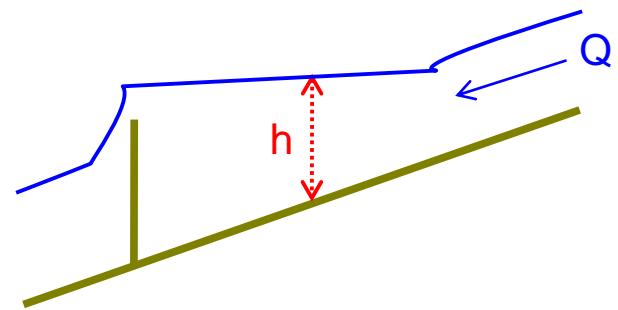
Contrôles hydrauliques

Pourquoi a-t-on besoin d'une base physique pour les courbes de tarage ?



Contrôles hydrauliques

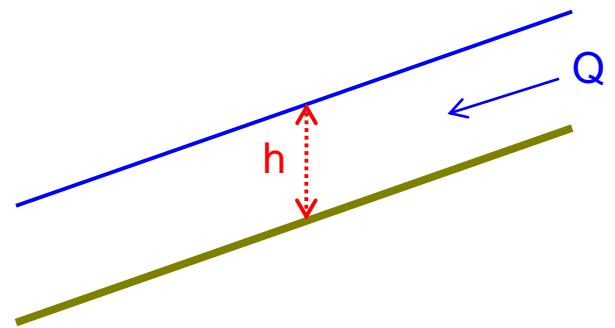
- Propriétés physiques d'un chenal qui déterminent la relation entre la hauteur et le débit en un point de ce dernier (OMM, 2012)



contrôle hydraulique
par une section

Contrôles hydrauliques

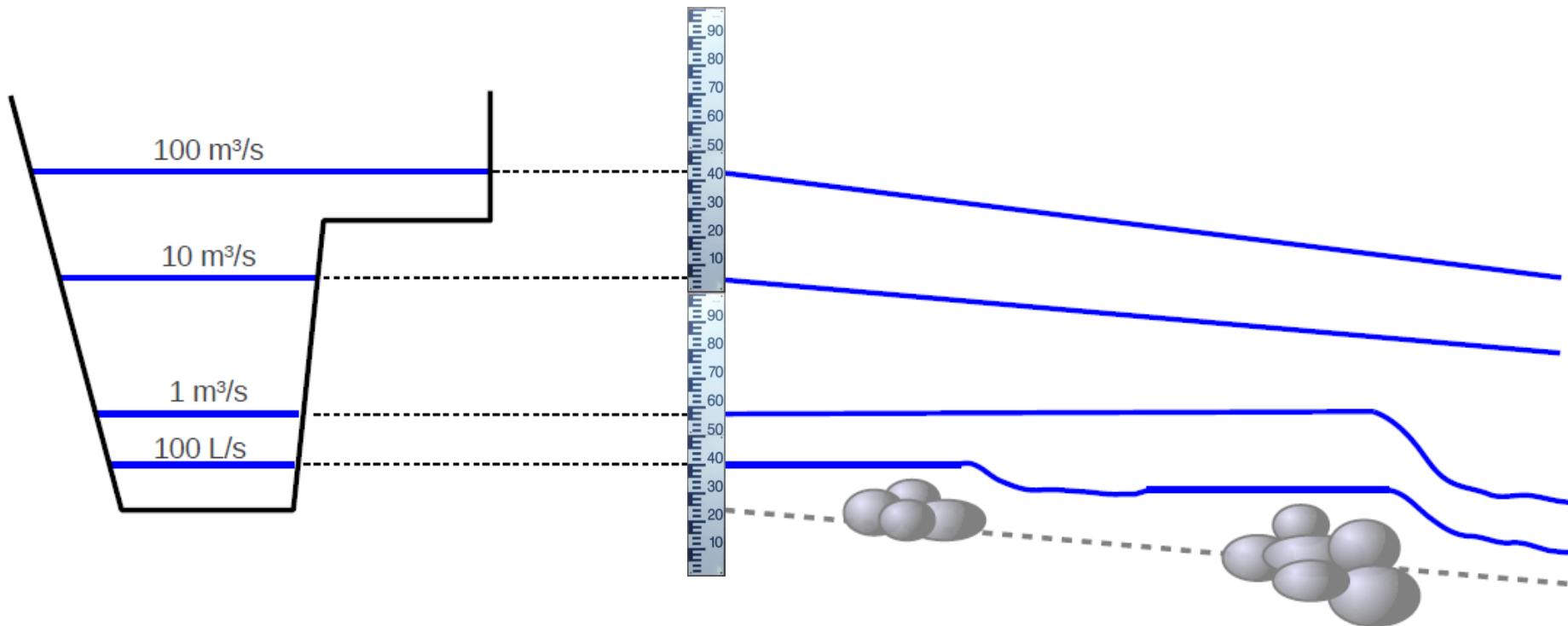
- Propriétés physiques d'un chenal qui déterminent la relation entre la hauteur et le débit en un point de ce dernier (OMM, 2012)



contrôle hydraulique
par le chenal

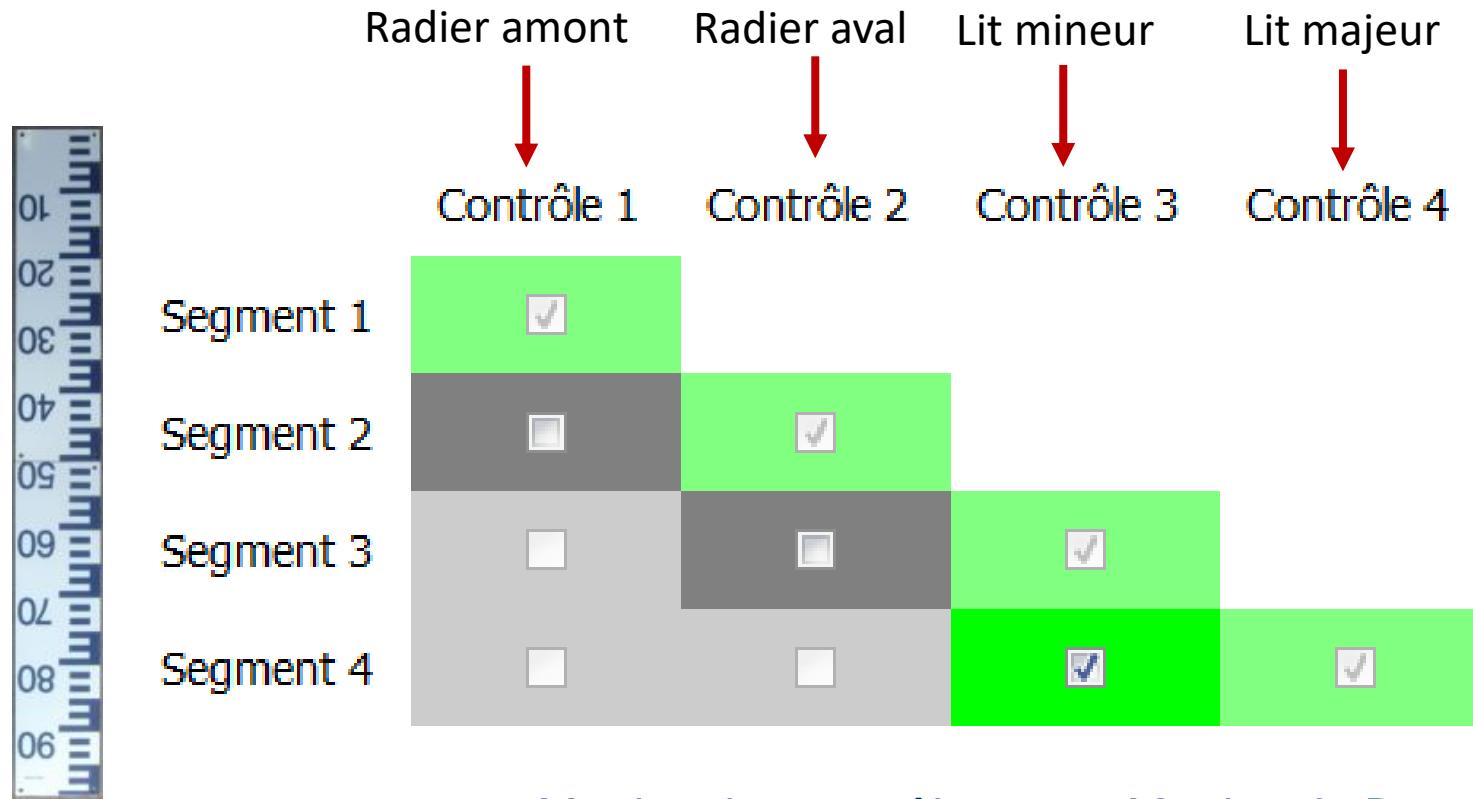
Contrôles hydrauliques

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



Contrôles hydrauliques

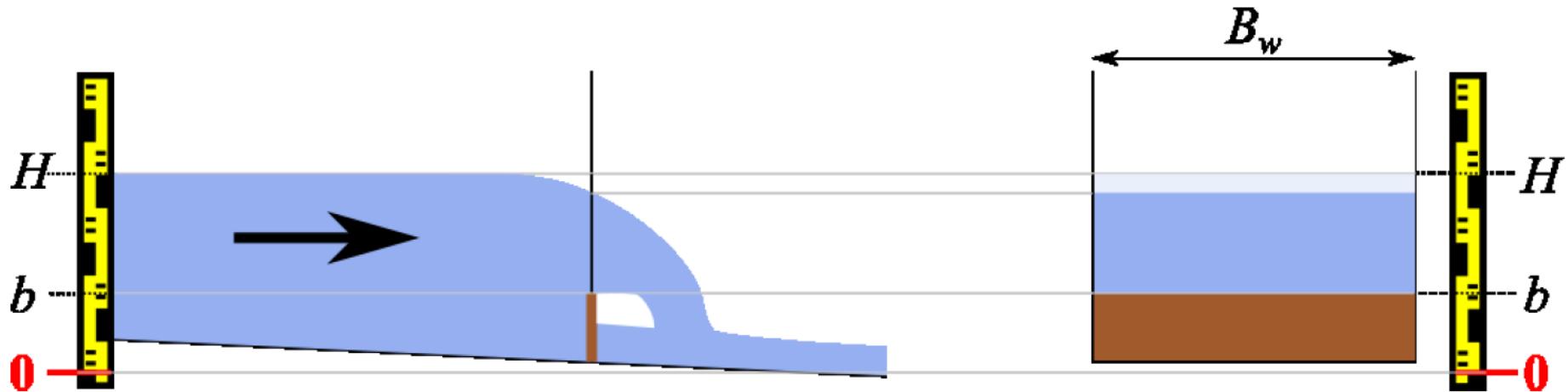
Les contrôles se succèdent, en s'effaçant ou en s'ajoutant les uns aux autres



Matrice des contrôles, ou « Matrice de Bonnifait »

Contrôles hydrauliques types dans BaRatin

- Déversoir rectangulaire / seuil naturel

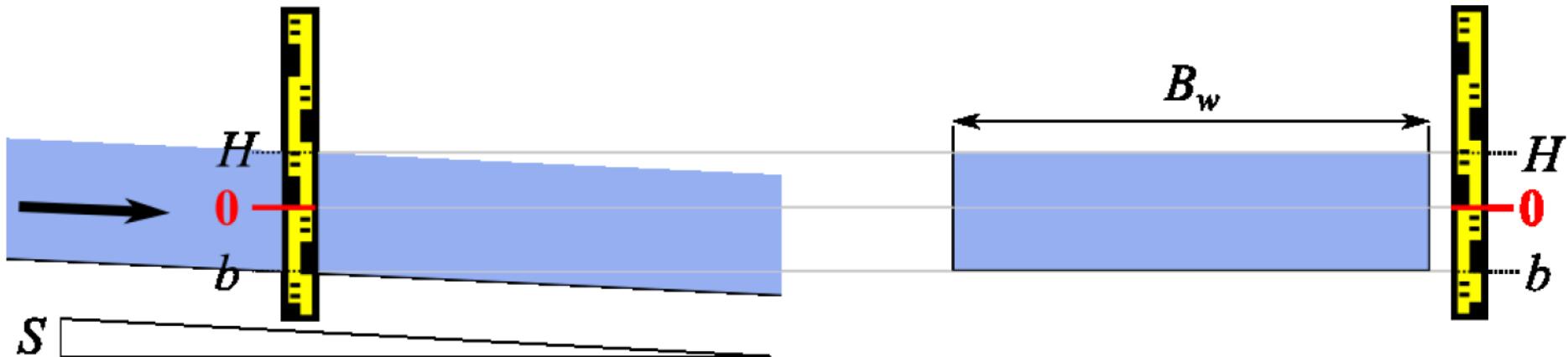


$$Q(H) = C_r \sqrt{2g} B_w (H - b)^c$$

avec C_r = coefficient de débit, g = gravité et exposant $c = 1.5$

Contrôles hydrauliques types dans BaRatin

- Chenal rectangulaire (régime uniforme, chenal large)

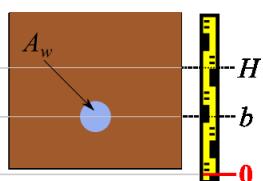
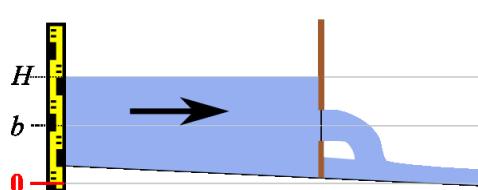
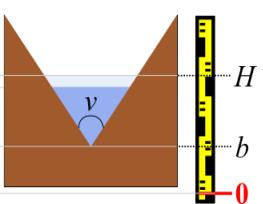
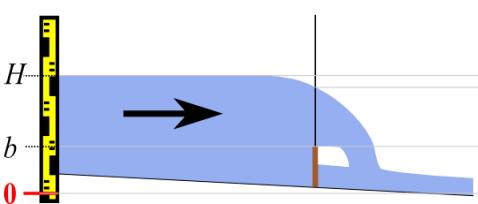
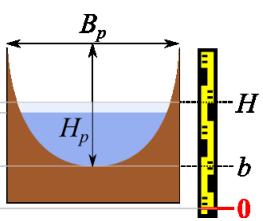
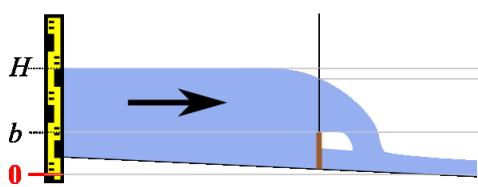
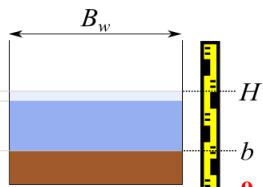
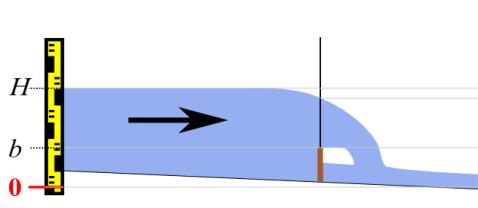


$$Q(H) = K_S \sqrt{S} B_w (H - b)^c$$

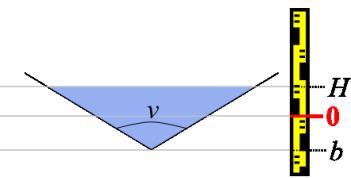
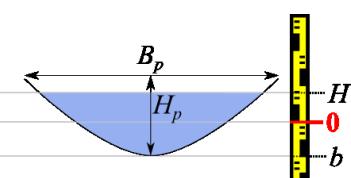
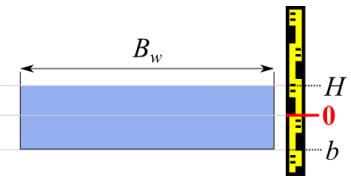
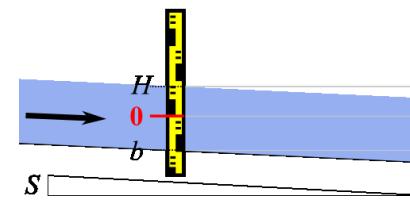
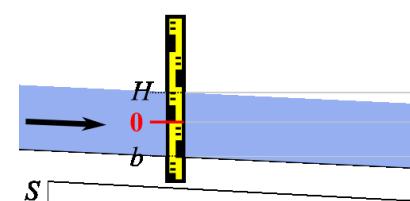
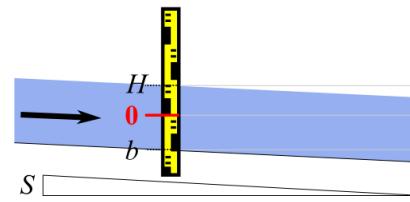
Avec K_S = coefficient de Strickler et exposant $c = 1.67$

Contrôles hydrauliques types dans BaRatin

Contrôles section



Contrôles chenal



Contrôles « libres »

$$Q = a(h - b)^c$$

Approximation des contrôles naturels

Un contrôle chenal est modélisé par un canal uniforme équivalent

- *Attention! La géométrie d'un contrôle de chenal est une moyenne sur le tronçon qui s'étend en aval et en amont de la station*



River Derwent, UK

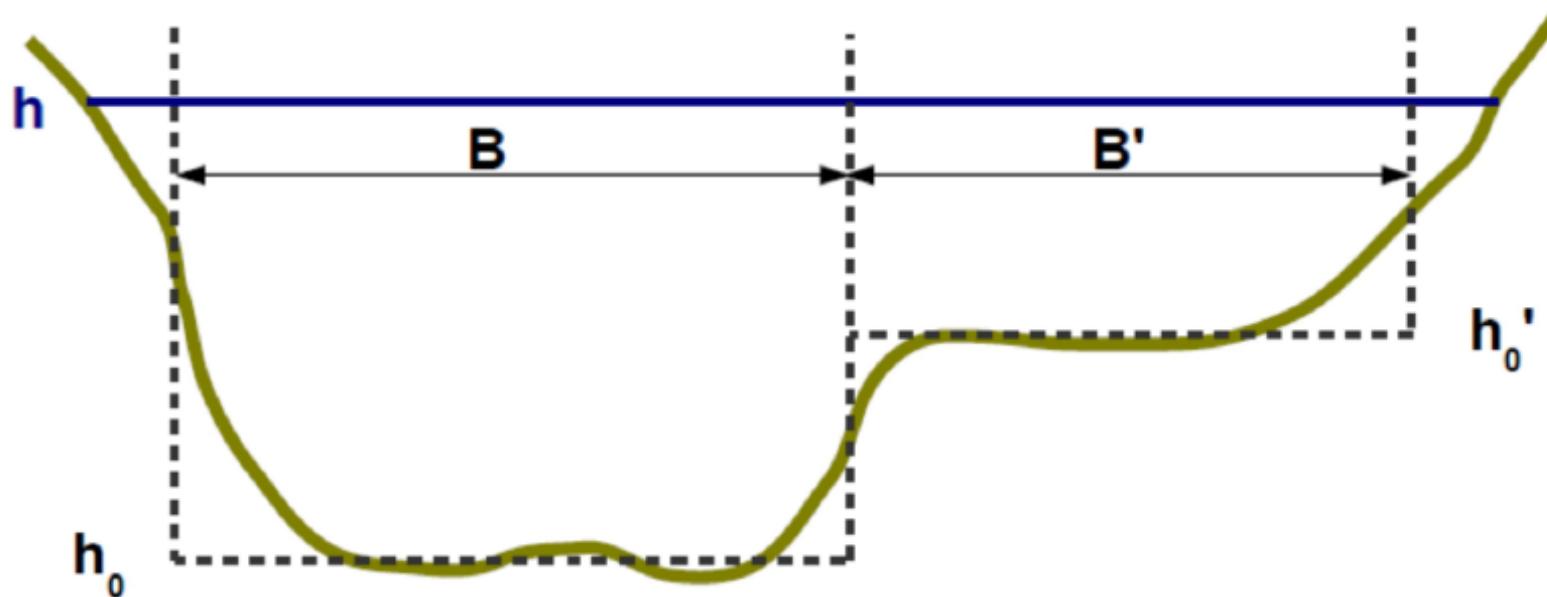
Upper Truckee River, USA

Waimakariri, New Zealand

Approximation des contrôles naturels

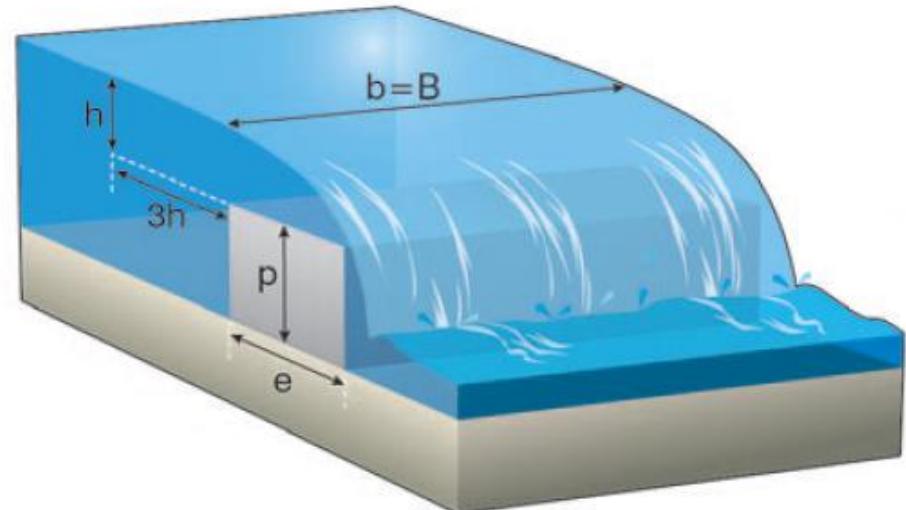
Approximation d'un lit composé par deux chenaux rectangulaires

- *Attention! La géométrie d'un contrôle chenal est une moyenne du tronçon qui s'étend en aval **et en amont** du point de mesure*



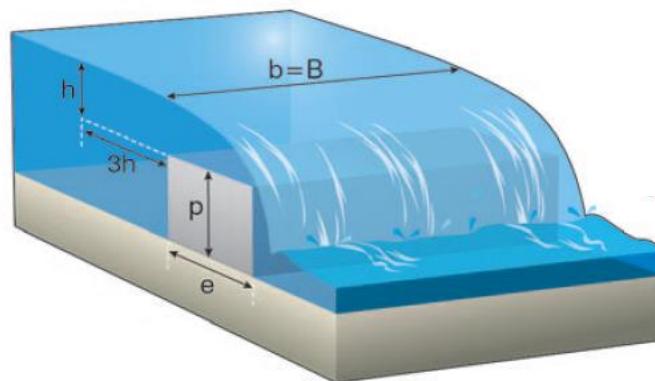
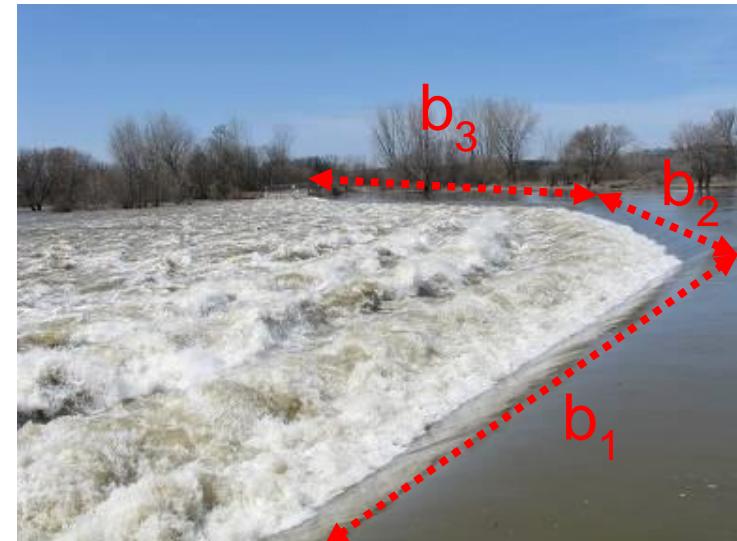
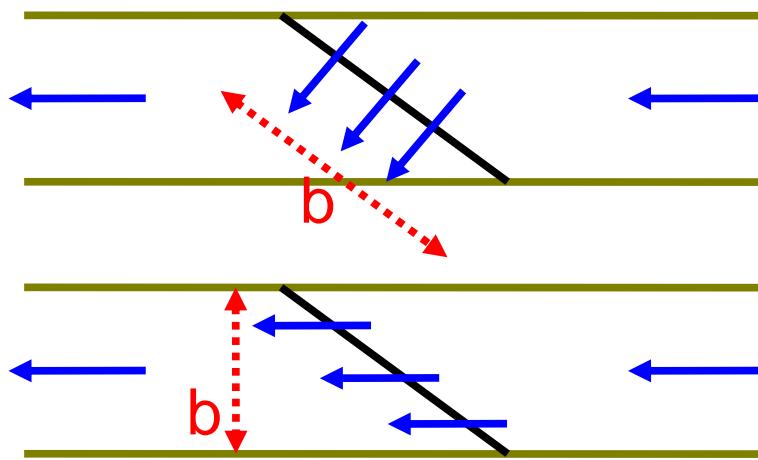
Approximation des contrôles naturels

Un contrôle section est modélisé par un déversoir (épais ou mince) régulier équivalent



Approximation des contrôles naturels

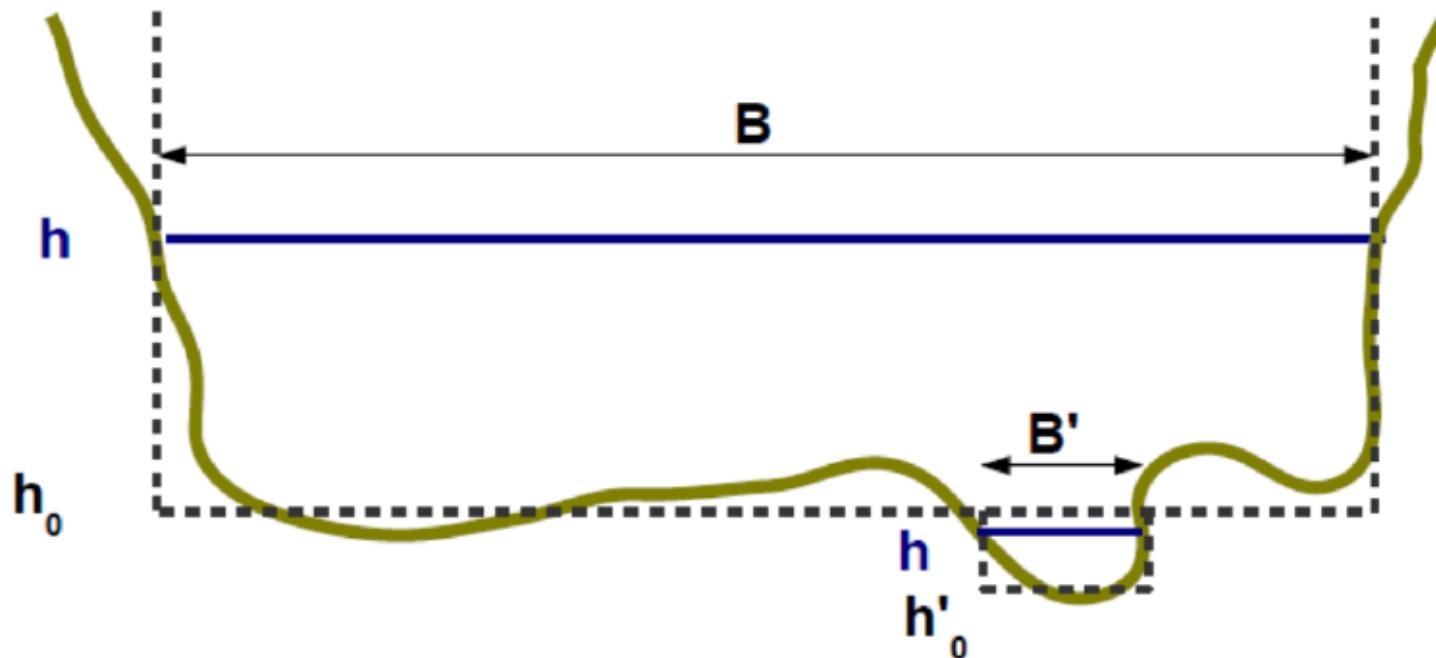
- Attention! La largeur du déversoir est mesurée perpendiculairement à la direction de l'écoulement.



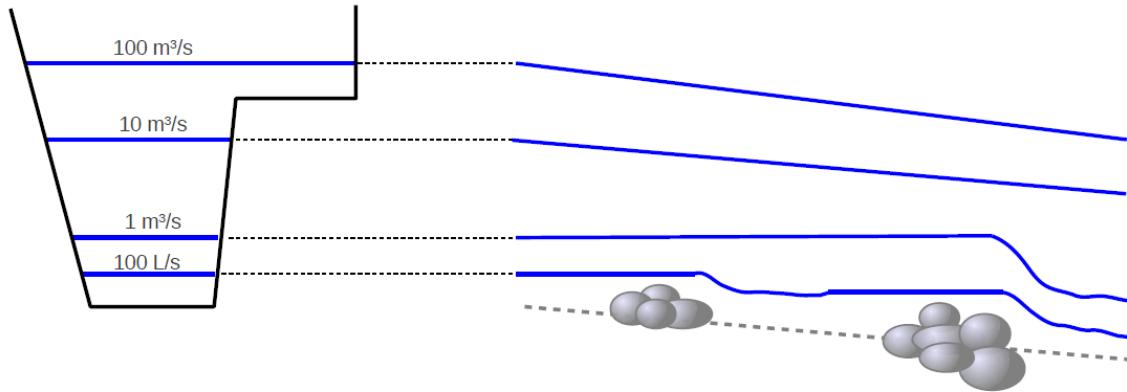
$$b = b_1 + b_2 + b_3$$

Approximation des contrôles naturels

- Approximation d'une section critique complexe (radier naturel) par deux déversoirs rectangulaires emboîtés



Et maintenant, que vais-je faire?...



$$Q(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h < k_1 \\ a_1(h - b_1)^{c_1} & \text{si } k_1 \leq h < k_2 \\ a_2(h - b_2)^{c_2} & \text{si } k_2 \leq h < k_3 \\ a_3(h - b_3)^{c_3} & \text{si } k_3 \leq h < k_4 \\ a_3(h - b_3)^{c_3} + a_4(h - b_4)^{c_4} & \text{si } k_4 \leq h \end{cases}$$

À estimer :
3 paramètres
par contrôle

Maintenant on a l'équation de la courbe de tarage...

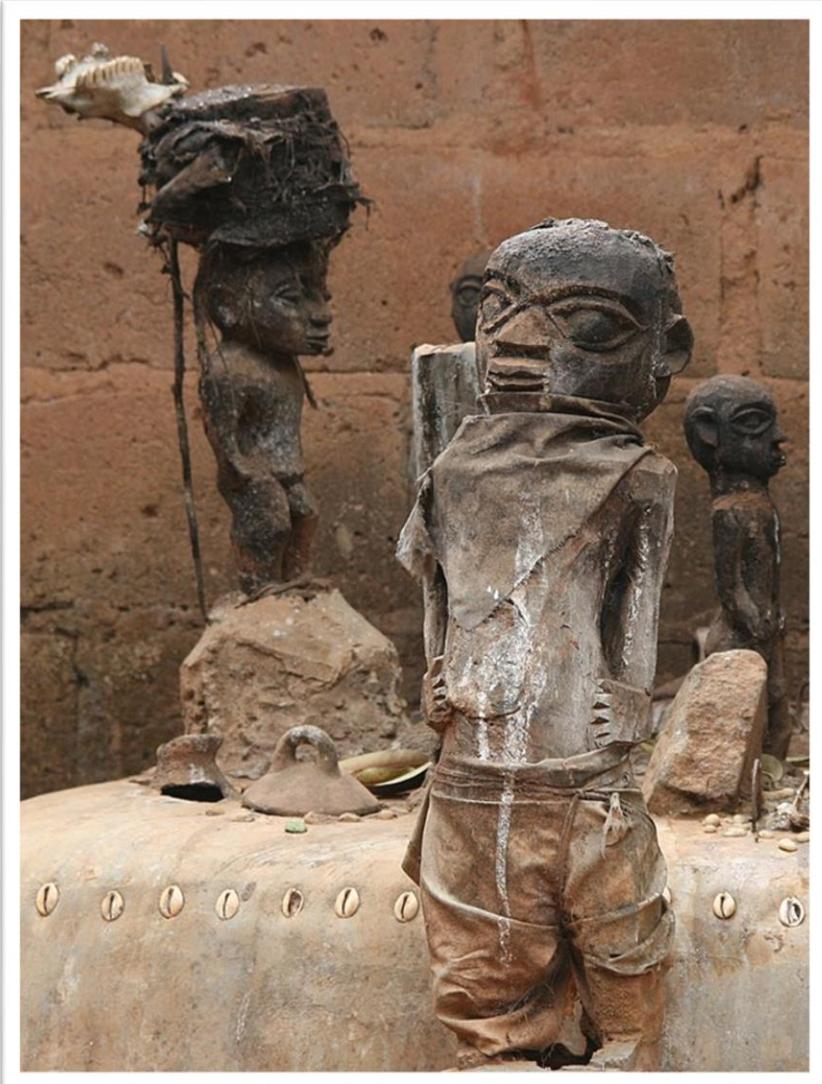
... il faut estimer les paramètres k_i, a_i, c_i (les b_i sont déduits par continuité)

La magie de l'inférence bayésienne

*Nous devons maintenant
invoquer l'esprit du Révérend
Thomas Bayes (1702-1761)*



*Plus tout autre
puissance spirituelle à
disposition...*



Autel vaudou et fétiches à Abomey au Bénin (2008)

La magie de l'inférence bayésienne



Le théorème de Bayes permet de calculer la distribution “a posteriori” des paramètres de la courbe de tarage

$$p(\theta|y) = \frac{p(y|\theta)p(\theta)}{p(y)}$$

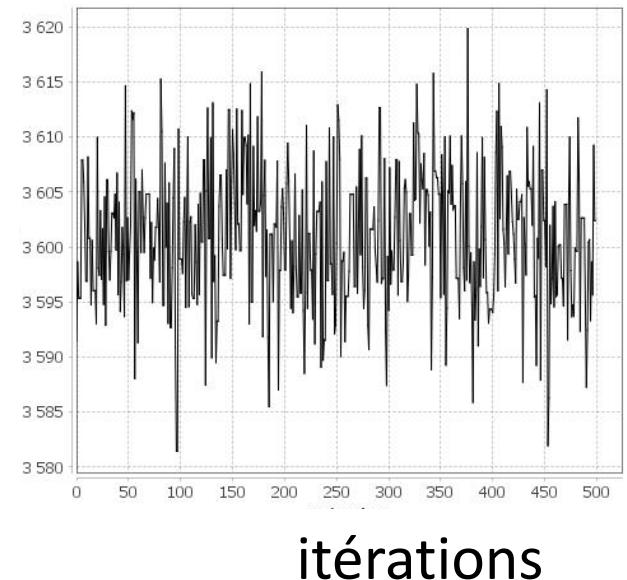
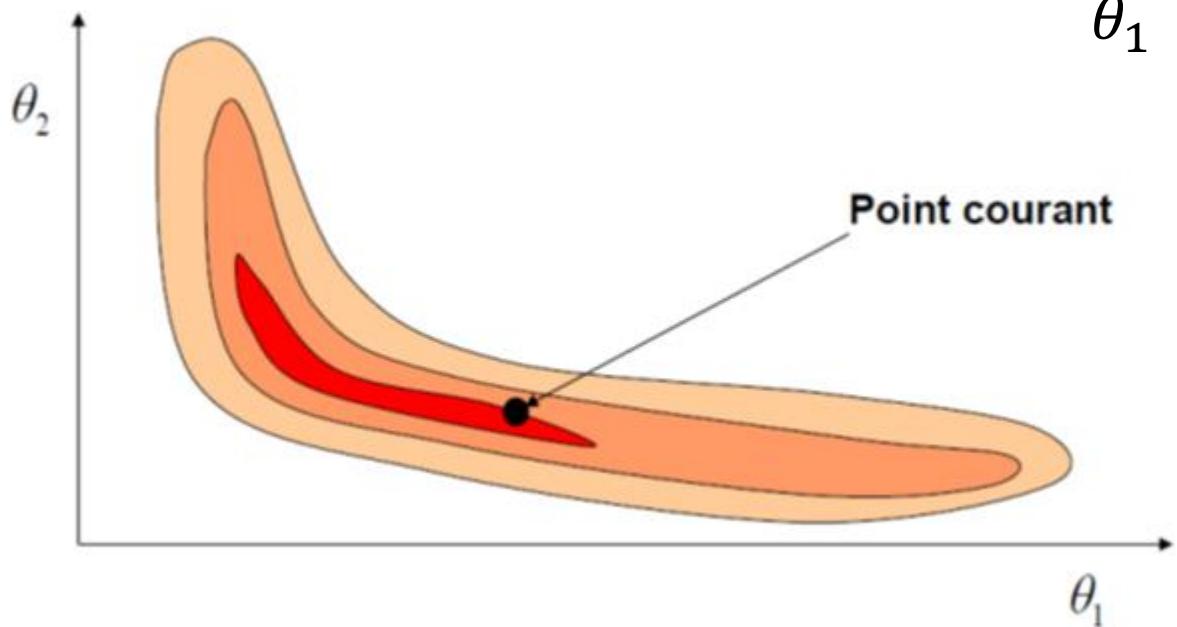
The diagram illustrates the components of the Bayes theorem formula:

- a posteriori (yellow speech bubble)
- vraisemblance (yellow speech bubble)
- a priori (yellow speech bubble)
- Constante de normalisation (yellow speech bubble)
- y : observations (couples hauteur-débit) (black text)
- θ : paramètres de la courbe de tarage (black text)

La magie de l'inférence bayésienne



La distribution a posteriori est échantillonnée par simulations MonteCarlo à Chaînes de Markov (MCMC, algorithme de Metropolis)



La magie de l'inférence bayésienne

Exemple d'un seuil :

$$Q(h) = a(h - b)^c$$

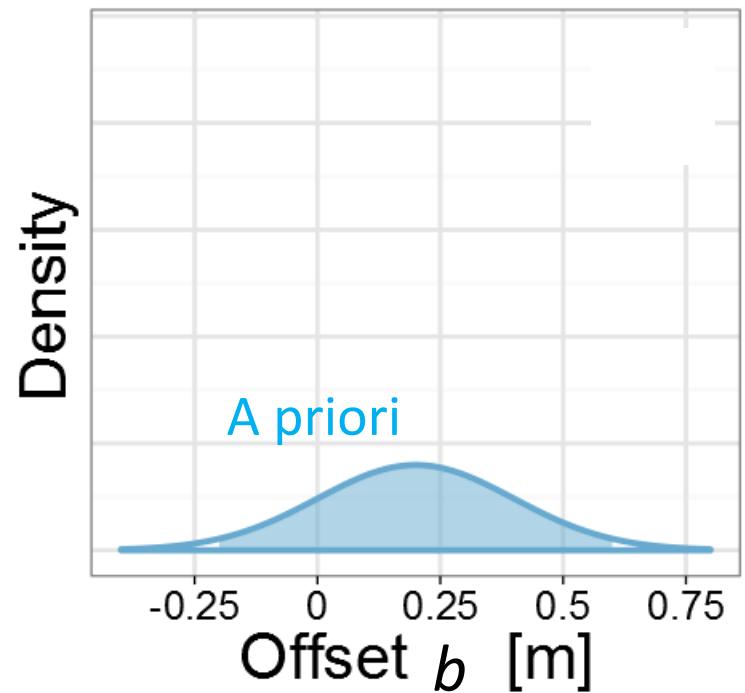


L'Altier à La Goulette, France (EDF-DTG)

La magie de l'inférence bayésienne

Connaissance a priori :

$$b = 0.2 \text{ m} \pm 0.4 \text{ m}$$



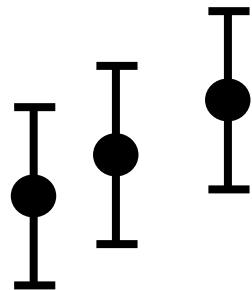
La magie de l'inférence bayésienne

Connaissance a priori :

A posteriori :

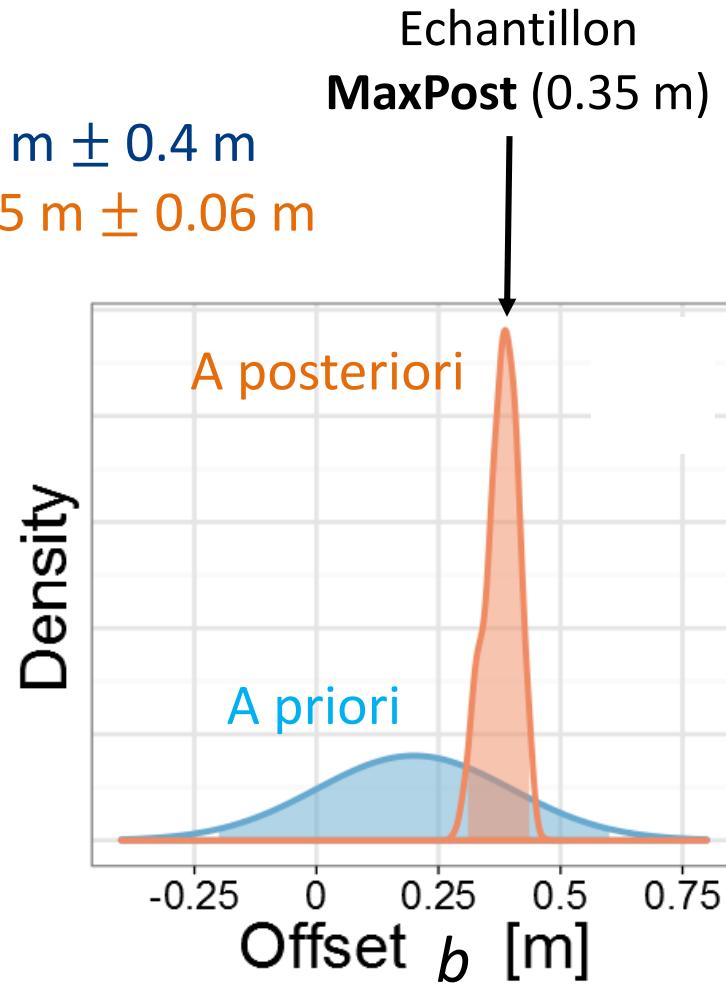


Observations (jaugeages) :



$$b = 0.2 \text{ m} \pm 0.4 \text{ m}$$

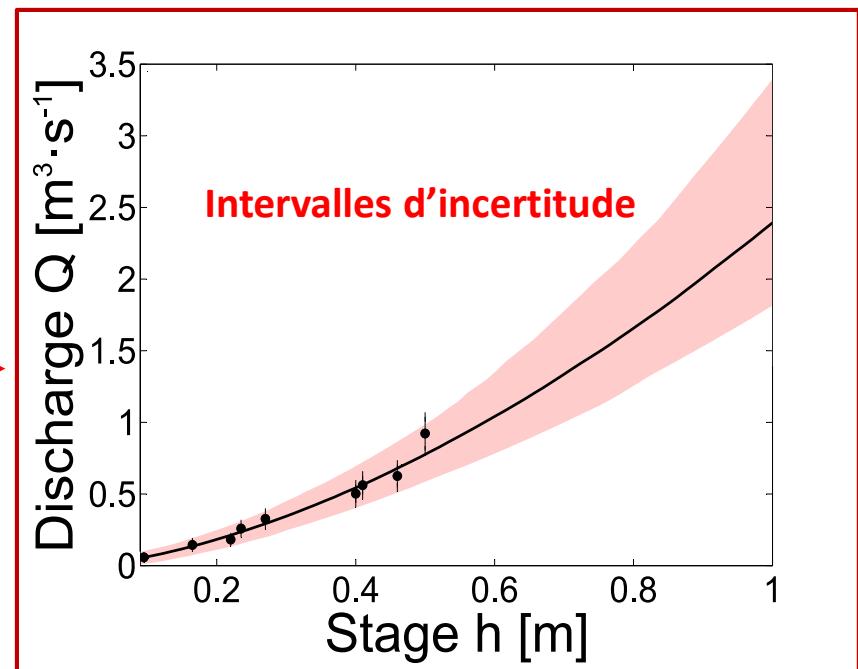
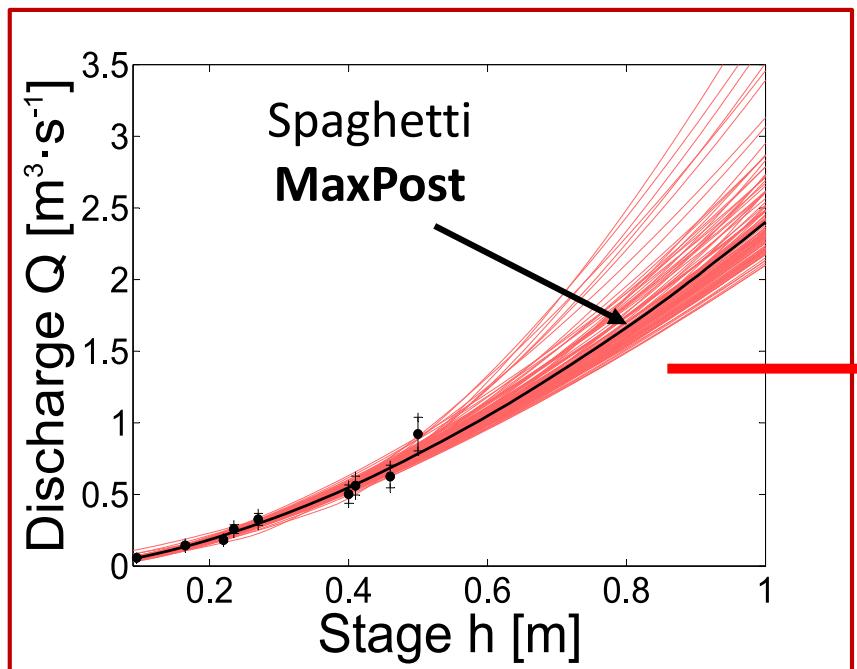
$$b = 0.35 \text{ m} \pm 0.06 \text{ m}$$



L'approche « spaghetti »

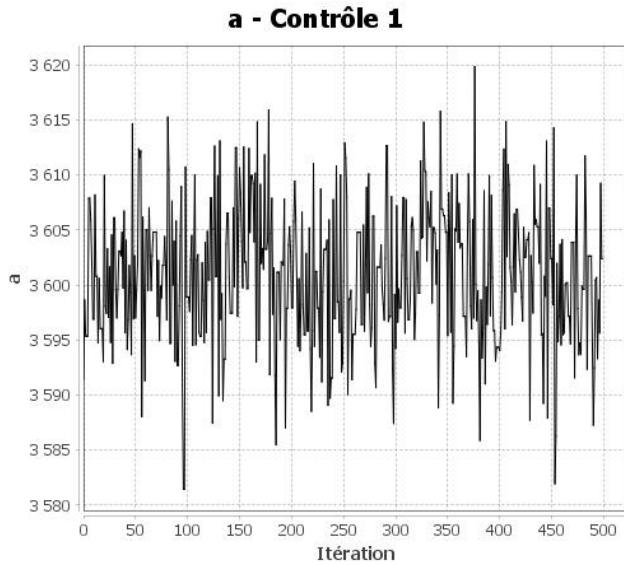


La distribution a posteriori est échantillonnée par techniques MCMC

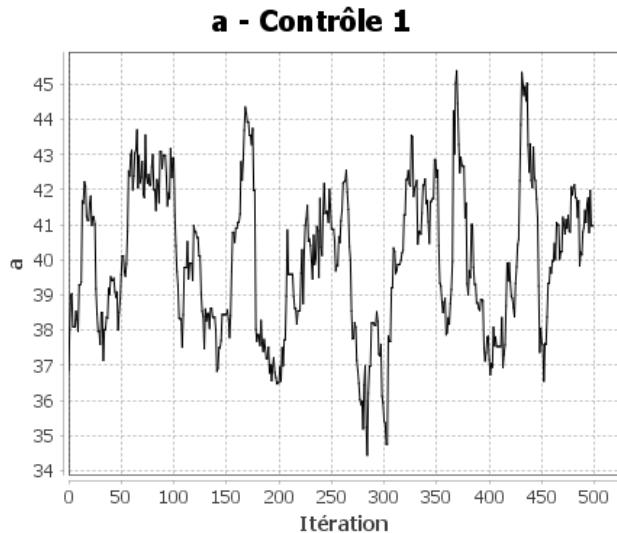


Pour plus de détails : cf. l'aide du logiciel et le poly de cours.

A retenir en pratique : vérifier les traces MCMC



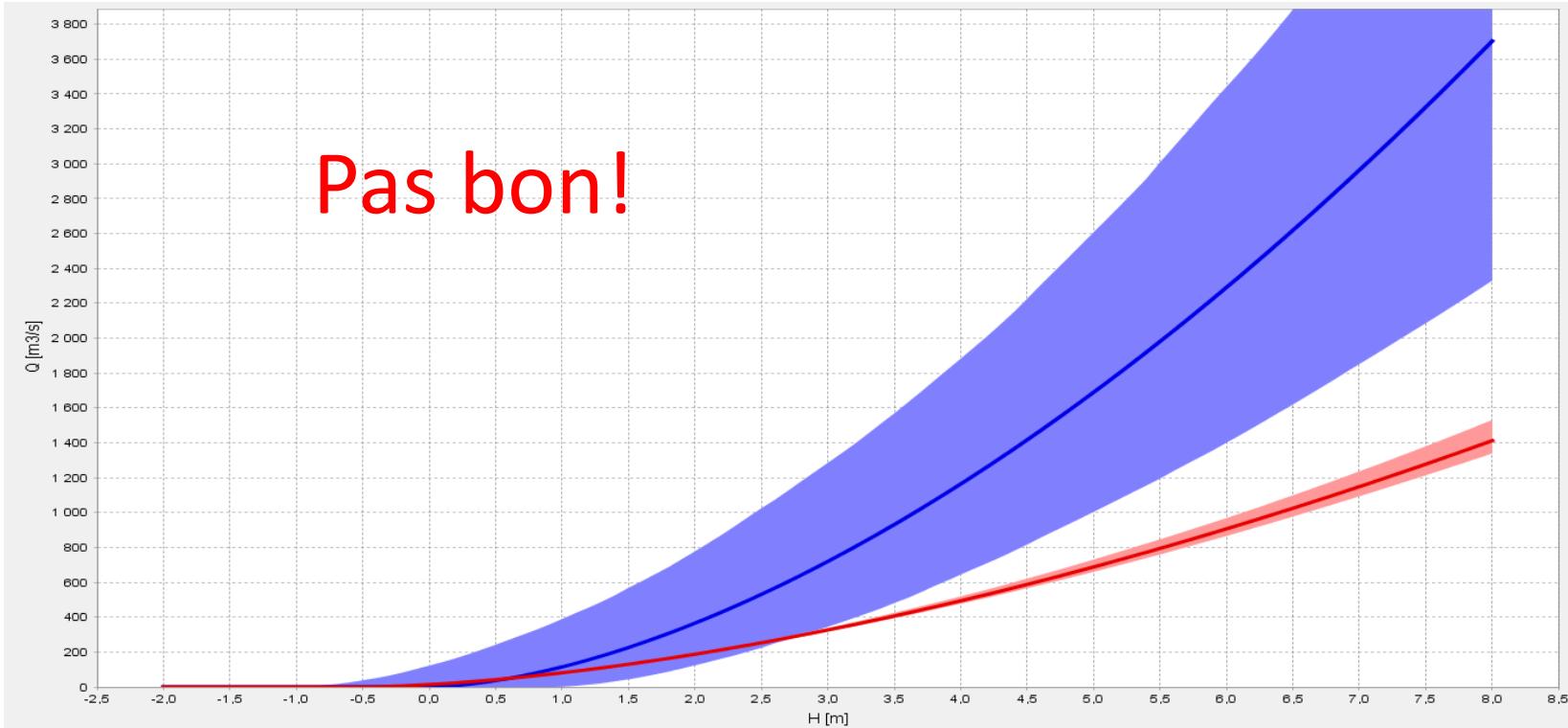
Bon!
(gribouillis stationnaire)



Pas très bon!
(des tendances se voient)

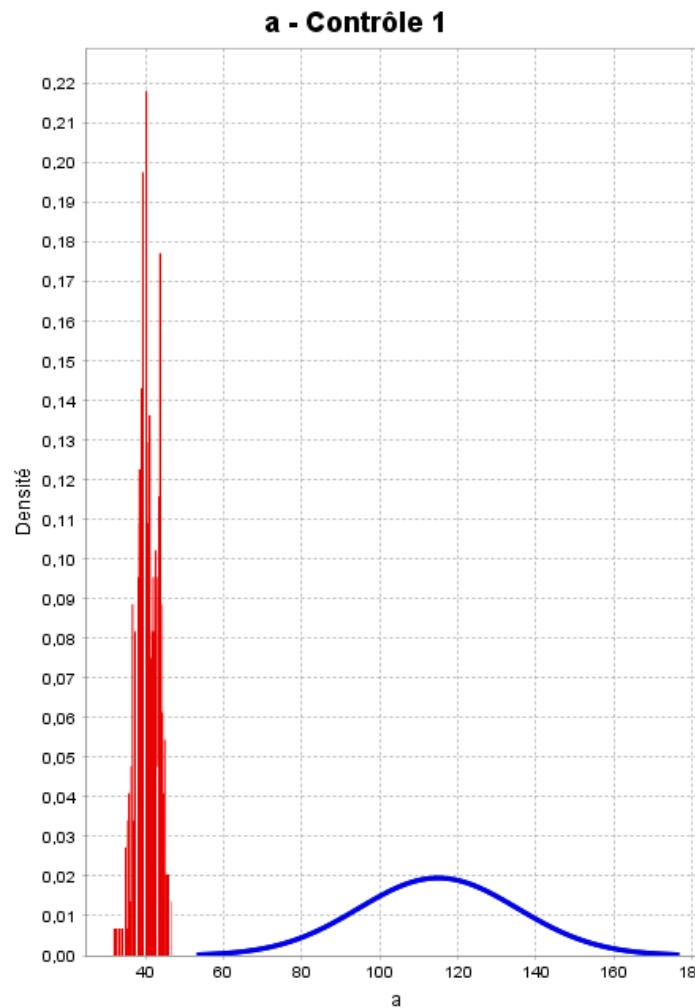
A retenir en pratique :

Vérifier l'absence de conflit entre *a priori* et *a posteriori*



A retenir en pratique :

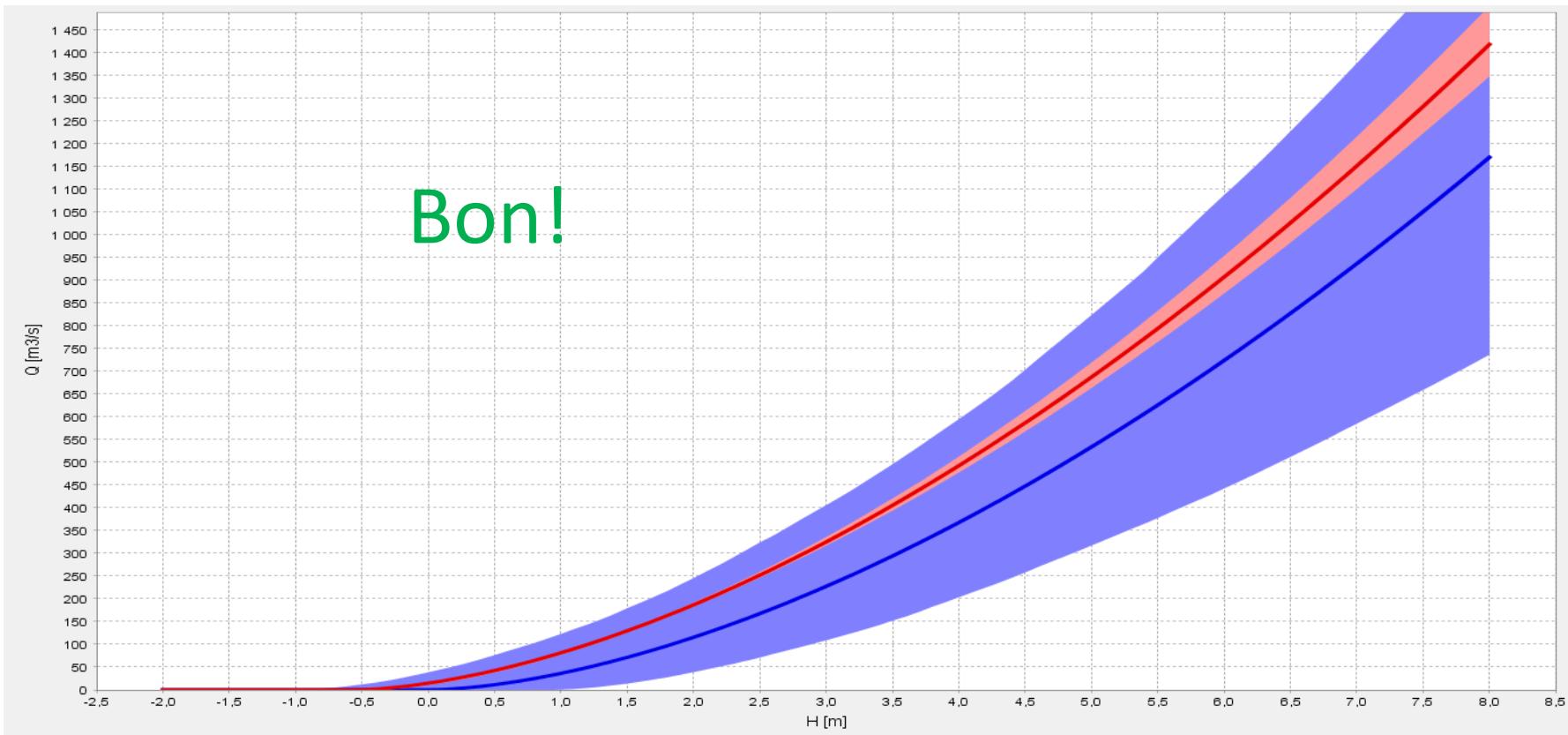
Vérifier l'absence de conflit entre *a priori* et *a posteriori*



Pas bon!

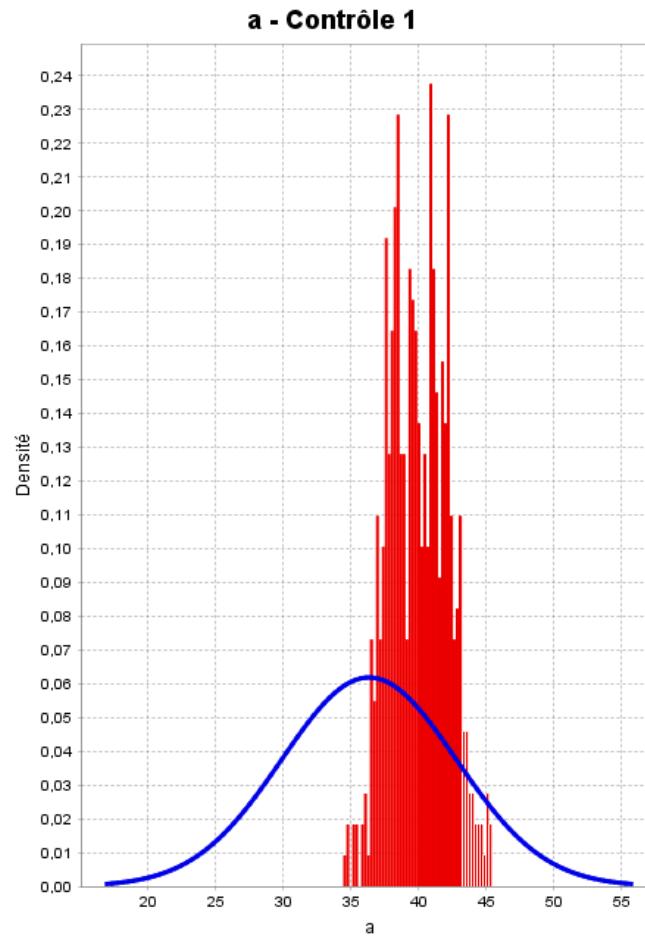
A retenir en pratique :

Vérifier l'absence de conflit entre *a priori* et *a posteriori*



A retenir en pratique :

Vérifier l'absence de conflit entre *a priori* et *a posteriori*



Bon!

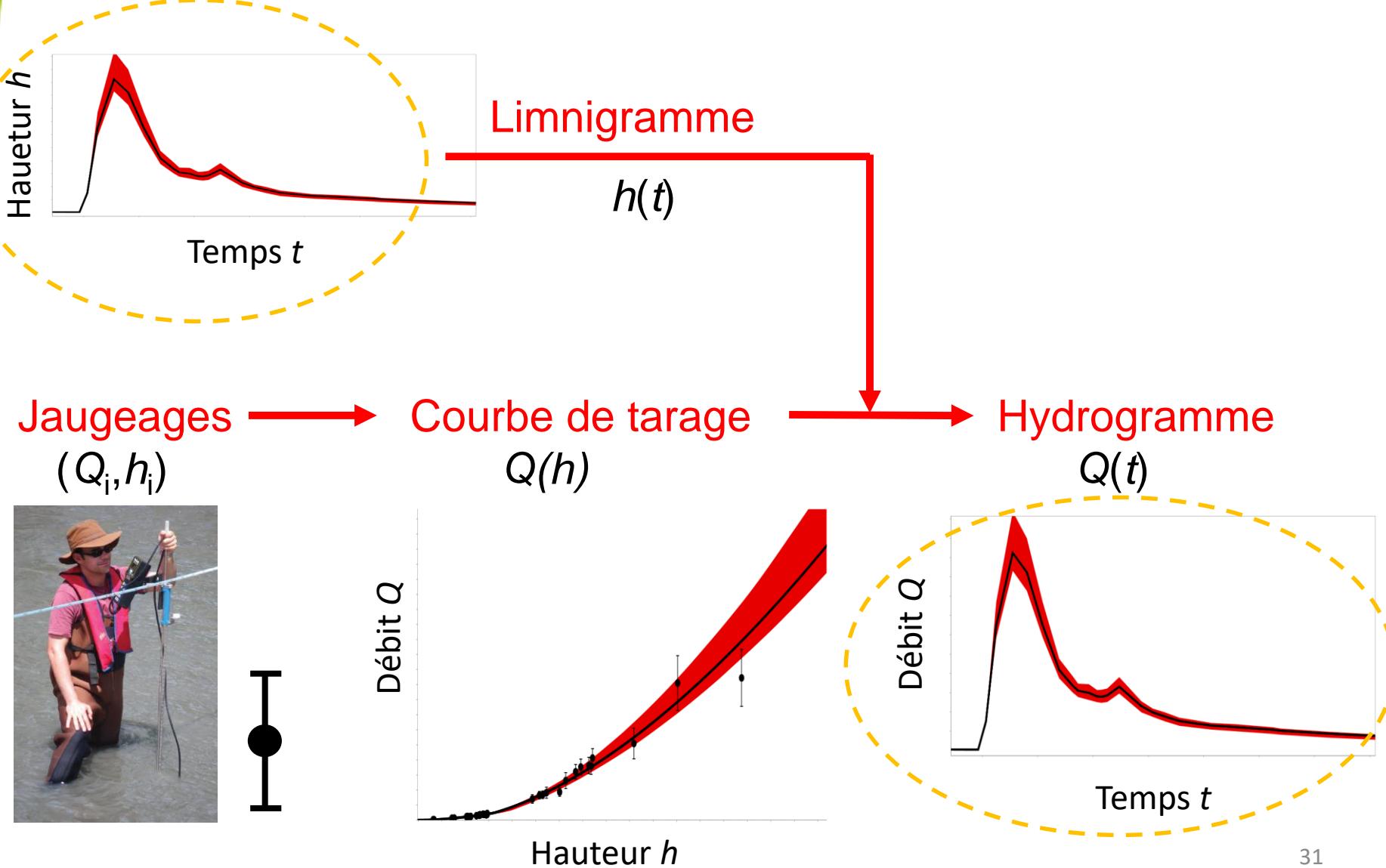
A retenir en pratique :

Vérifier l'absence de conflit entre a priori et a posteriori

En cas de conflit :

- ✓ Vérifier que les calculs se sont bien passés (convergence des itérations MCMC)
- ✓ Vérifier les valeurs des a priori (ne pas les caler à l'aide des résultats ou des jaugeages utilisés!)
- ✓ Revoir les hypothèses sur les contrôles hydrauliques, tester d'autres configurations hydrauliques
- ✓ Vérifier les jaugeages et leurs incertitudes (attention : les erreurs des différents jaugeages sont supposées indépendantes)

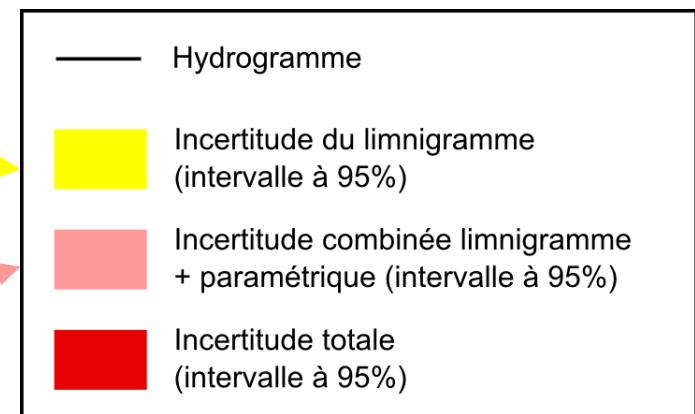
Produire des séries hydrométriques *probabilistes*



Bilans d'incertitude

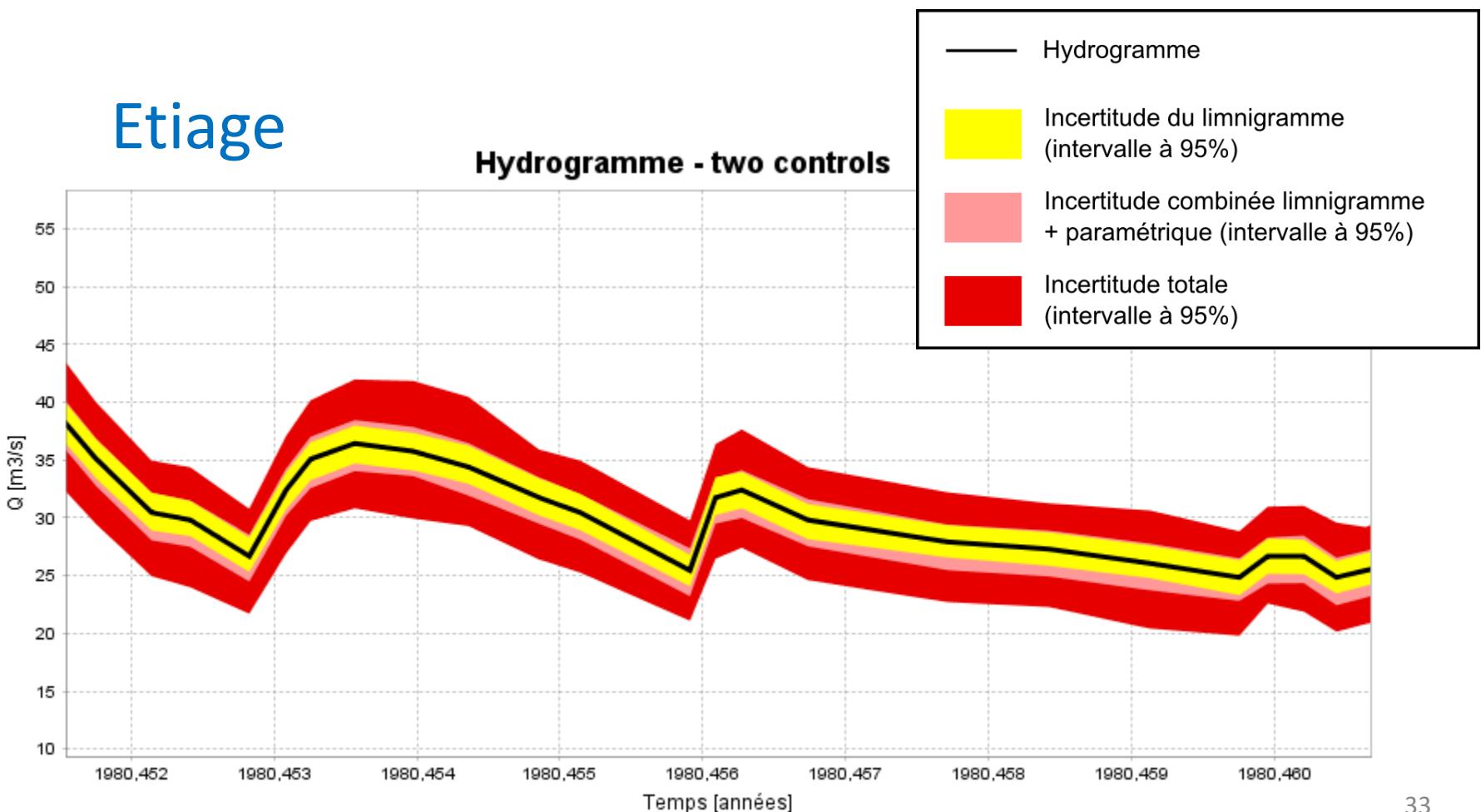
Les bilans d'incertitude permettent de hiérarchiser les sources d'erreur et d'améliorer le processus de mesure

- ✓ Réduire l'incertitude du limnimètre
- ✓ Jauger plus, avec moins d'incertitude
- ✓ Aprioris plus précis sur les paramètres
- ✓ Utiliser un modèle de courbe de tarage mieux adapté (contrôles, détarages, hystérésis, influence aval...)



Bilans d'incertitude

Les bilans d'incertitude permettent de hiérarchiser les sources d'erreur et d'améliorer le processus de mesure

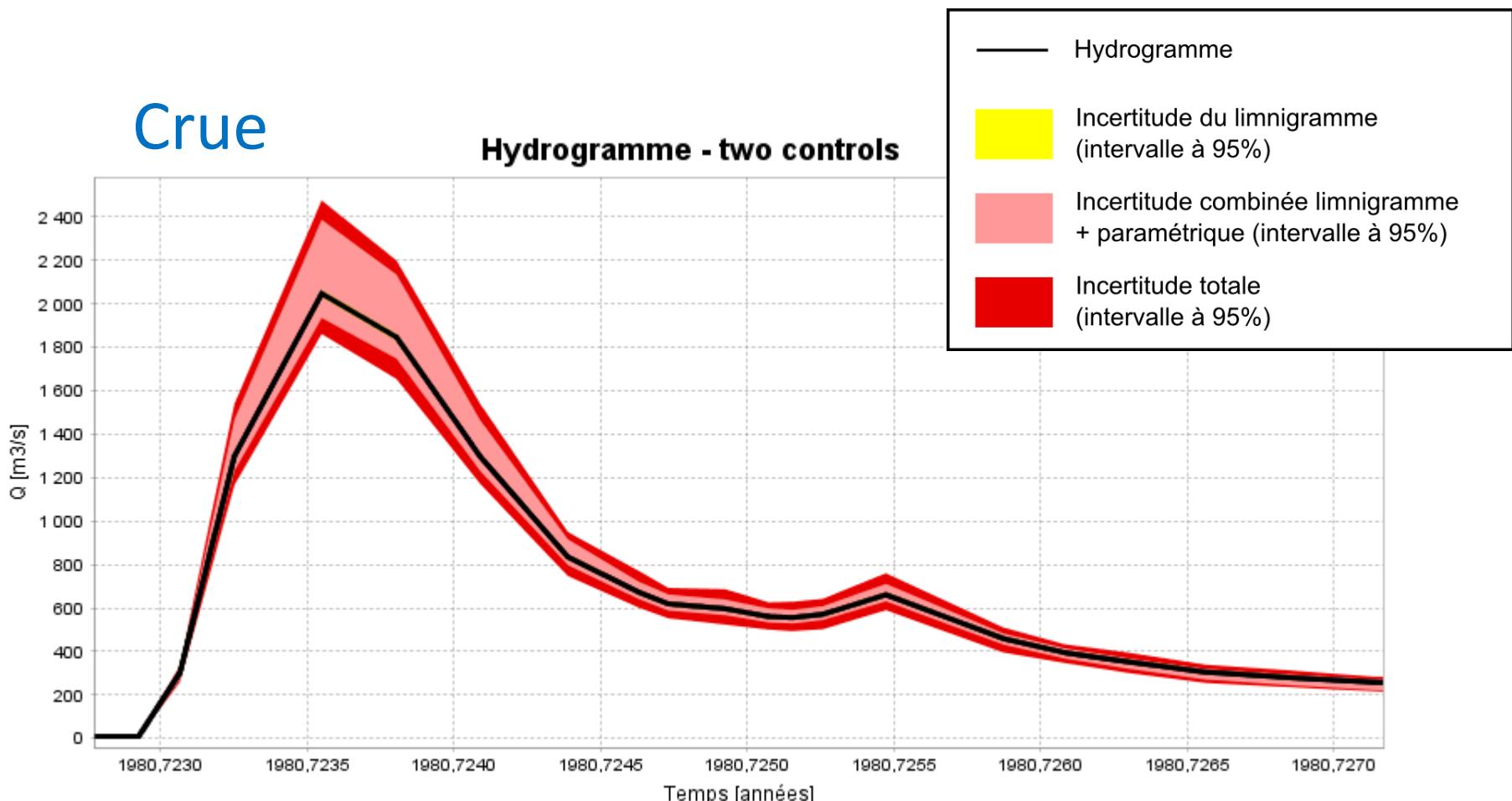


Bilans d'incertitude

Les bilans d'incertitude permettent de hiérarchiser les sources d'erreur et d'améliorer le processus de mesure

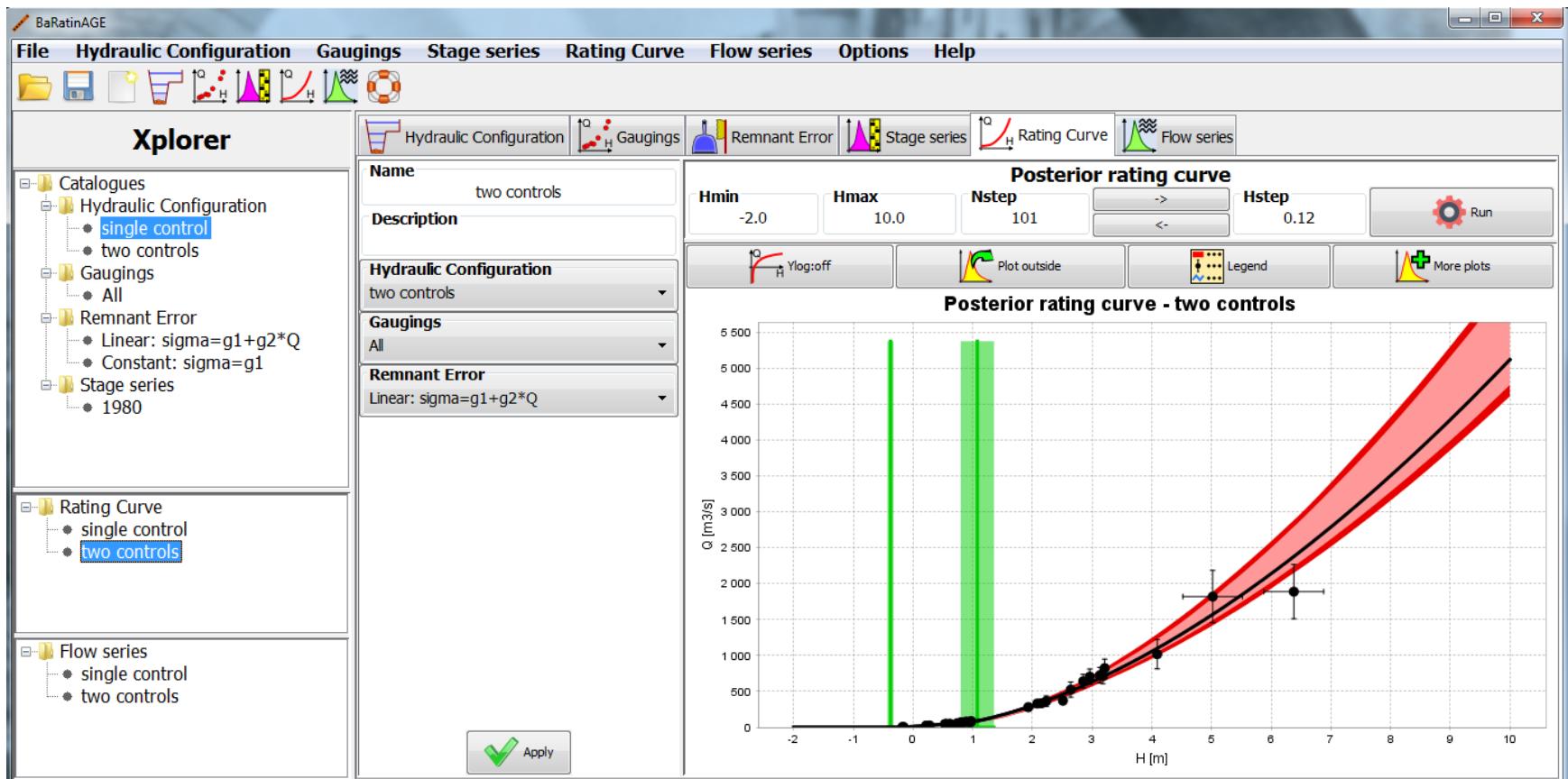
Crue

Hydrogramme - two controls



Logiciel BaRatinAGE

- Interface graphique (java) et guide utilisateur
- Versions française et anglaise



Logiciel BaRatinAGE

- Licence individuelle gratuite, écrire à baratin.dev@lists.irstea.fr
- Liste utilisateurs (~190 abonnés licenciés)
- Utilisation opérationnelle (services de l'Etat en France, CNR, NEON-USA)
- Utilisation par des chercheurs :

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 model to estimate nonstationary rating curves and the associated uncertainties

Check for updates
Rodrigo Gómez, ...
Abstract: The estimation of hydrological rating curves is a key step in hydrological inference framework, which is often based on the assumption of a linear relationship between stage and discharge. In building inference models, it is common to neglect the potentially high scatter around the rating curve. To address this issue, in this paper we propose a Bayesian rating curve model that includes the lower portions of the rating curve, which are often associated with channel bed stability conditions, measured large flows and even

Check for updates
AGU PUBLICATIONS Water Resources Research RESEARCH ARTICLE 10.1002/2016WR020225
The role of rating curve uncertainty in real-time flood forecasting
David Ocio¹, Natalya Le Vine¹, Ida Westerberg², Florian Pappenberger^{3,4}, and Wouter Buytaert¹
¹Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, London, UK, ²WL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm, Sweden, ³European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, UK, ⁴School of Geographical Sciences, Bristol University, Bristol, UK
Abstract: Rating curves are widely used in hydrology to predict streamflow in making real-time flood forecasts. Recent advances in rating curve modeling have shown that including uncertainty in rating curves can improve the performance of real-time flood forecasting. This study presents a new rating curve model that includes uncertainty in rating curves and compares its performance with a traditional rating curve model in terms of forecast skill and uncertainty in real-time flood forecasting.

Check for updates
AGU PUBLICATIONS Water Resources Research RESEARCH ARTICLE 10.1002/2017WR020473
High-Elevation Evapotranspiration Estimation Using Streamflow and NASA Airborne Sensors: Observations to Close the Upper Tuolumne Water Balance
Key Points:
• Distributed streamflow and evapotranspiration
• NASA airborne sensors
• High-elevation evapotranspiration
• Water balance
Earth Syst. Sci. Data, 10, 1063, https://doi.org/10.5194/essd-10-1063-2018, © Author(s) 2018. This work is licensed under the Creative Commons Attribution License
Bruce M. Wieland¹, ...
Institute of Water Resources, US Army Corps of Engineers, Sacramento, CA, USA, ²University of California, Berkeley, California Education, Berkeley, CA, USA
Original Article
Advances in Water Resources 105 (2017) 51–66
Contents lists available at ScienceDirect
Advances in Water Resources journal homepage: www.elsevier.com/locate/advwatres
Calibrating a hydrological model in stage space to account for rating curve uncertainties: general framework and key challenges

Check for updates
USGS science for a changing world A R T I C L E R Hanes (Eds) 1-138-02913-2
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
ABSTRACT: The USGS is engaged in both internal development and collaborative efforts to evaluate existing methods for characterizing the uncertainty of streamflow measurements (e.g., discharge relations, ratings), and, ultimately, the streamflow records derived from them. This paper provides a brief overview of two candidate methods that may be used to characterize the uncertainty of rating curves, and illustrates the results of their application to the ratings of two USGS streamflow gauges.

Check for updates
AGU PUBLICATIONS Water Resources Research TECHNICAL REPORTS: DATA 10.1002/2016WR019261
Yosemite Hydroclimate Network: Distributed stream and atmospheric data for the Tuolumne River watershed and surroundings
Jessica D. Lundquist¹, James W. Rocca², Harrison Forrester², Courtney Moore³, Eric Keenan⁴, Gwyneth Perry⁵, Nicoleta Cristea⁶, Brian Henn¹, Karl Lapo¹, Bruce McGurk⁴, Daniel R. Cayan^{3,4}, and Michael D. Dettinger⁴
¹Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington, Seattle, Washington, USA, ²Northwest Hydraulic Consultants, Seattle, Washington, USA, ³McGurk Hydrologic

Check for updates
Water and sediment fluxes in Mediterranean m World Environmental and Water Resources Congress 2016
Till Franke¹, ...
¹University of ...
²GFZ German ...
³Mediterranean ...
⁴RIUS, Fluvia ...
A. L. N. A. Osorio¹ and D. S. Reis Jr., PhD²
M.Sc. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Brasília, Brazil, ²Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Brasília, Brazil
Darcy Ribeiro, Brasilia 70.910-900. E-mail: osorio.analusa@gmail.com
Darcy Ribeiro, Brasilia 70.910-900. E-mail: dirceureis@unb.br
A Bayesian Approach for the Evaluation of Rating Curve Uncertainties in Flood Frequency Analyses
A. L. N. A. Osorio¹ and D. S. Reis Jr., PhD²
The U.S. Geological Survey (USGS) collects stream discharge records at more than 8,100 streamgages across the United States primarily derived from state discharge stations. Despite its importance,

1 INTRODUCTION

The U.S. Geological Survey (USGS) collects stream discharge records at more than 8,100 streamgages across the United States primarily derived from state discharge stations. Despite its importance,

surface exhibits no break in slope, stream reach, channel geometry, or temperature for 2002–2015 in 6 subbasins, Tuolumne River, CA.

Daily inflow of the Tuolumne River to the Hatch Hatch Reservoir for 2002–2015

Metropolitan and snow data are

Conclusions sur la méthode BaRatin



- ✓ *BaRatin / BaRatinAGE* pour les courbes de tarage simples
 - Le bilan d'incertitude aide à améliorer le processus de mesure
 - Consignez le maximum d'informations, de photos et d'explications sur vos baratinages
 - Consultez la documentation et les fiches pratiques
 - Pour toute question, écrire à : baratin.dev@lists.irstea.fr

- ✓ *BaM!* pour les courbes de tarage simples et complexes
 - Interface graphique en développement
 - Détarages, hystérésis (boucles en crue), végétation aquatique, double échelle, influence de la marée...
 - Application temps réel : détection des détarages

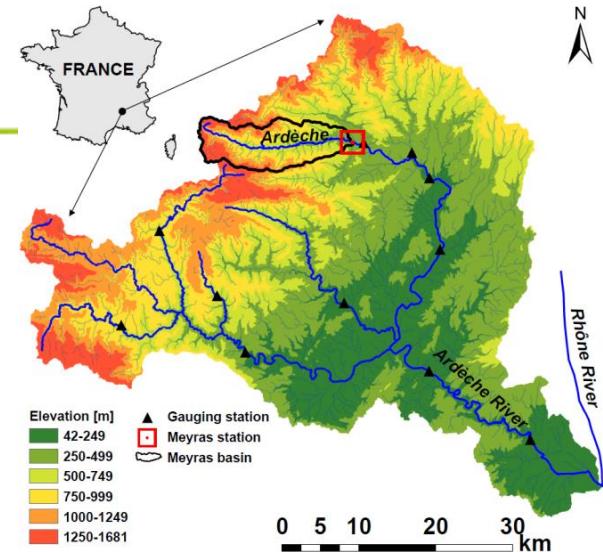


TP2 – L'Ardèche à Meyras

Station du réseau
hydrométrique français
(V5004030, SPC Grand-
Delta)

Bassin-versant : 98 km²

Débit moyen : 3.69 m³/s



PÉRIODE DE RETOUR DE CRUE (en m³/s)

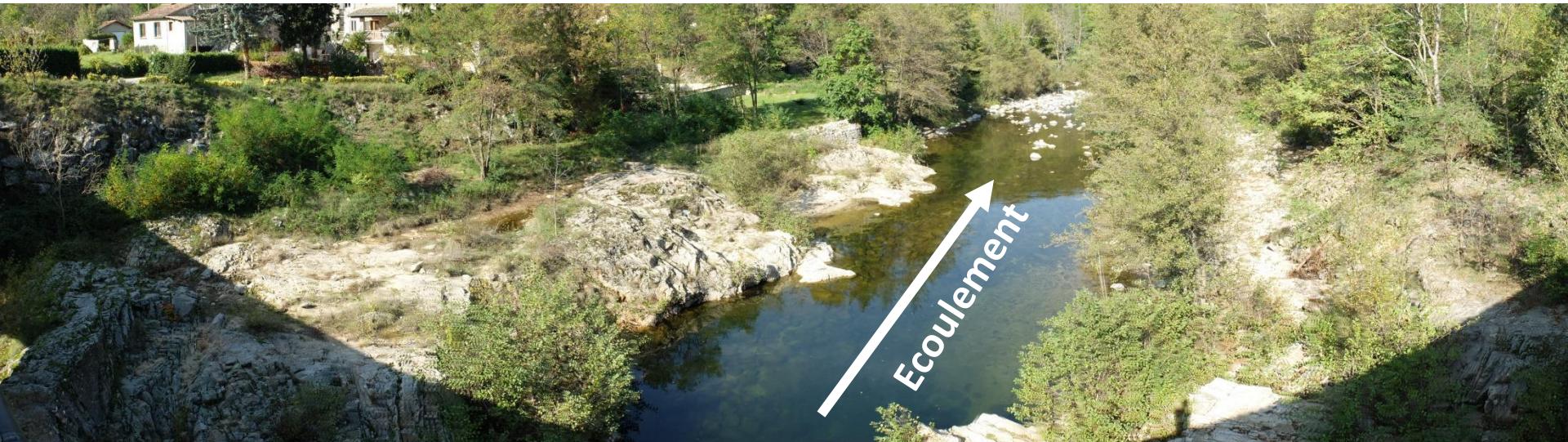
Période de retour de crue	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans
Débit instantané calculé	150	240	290	350	420



TP2 – L’Ardèche à Meyras

Identification des contrôles (section/chenal) :

- en basses eaux ?
- en moyennes eaux ?
- en hautes eaux ?



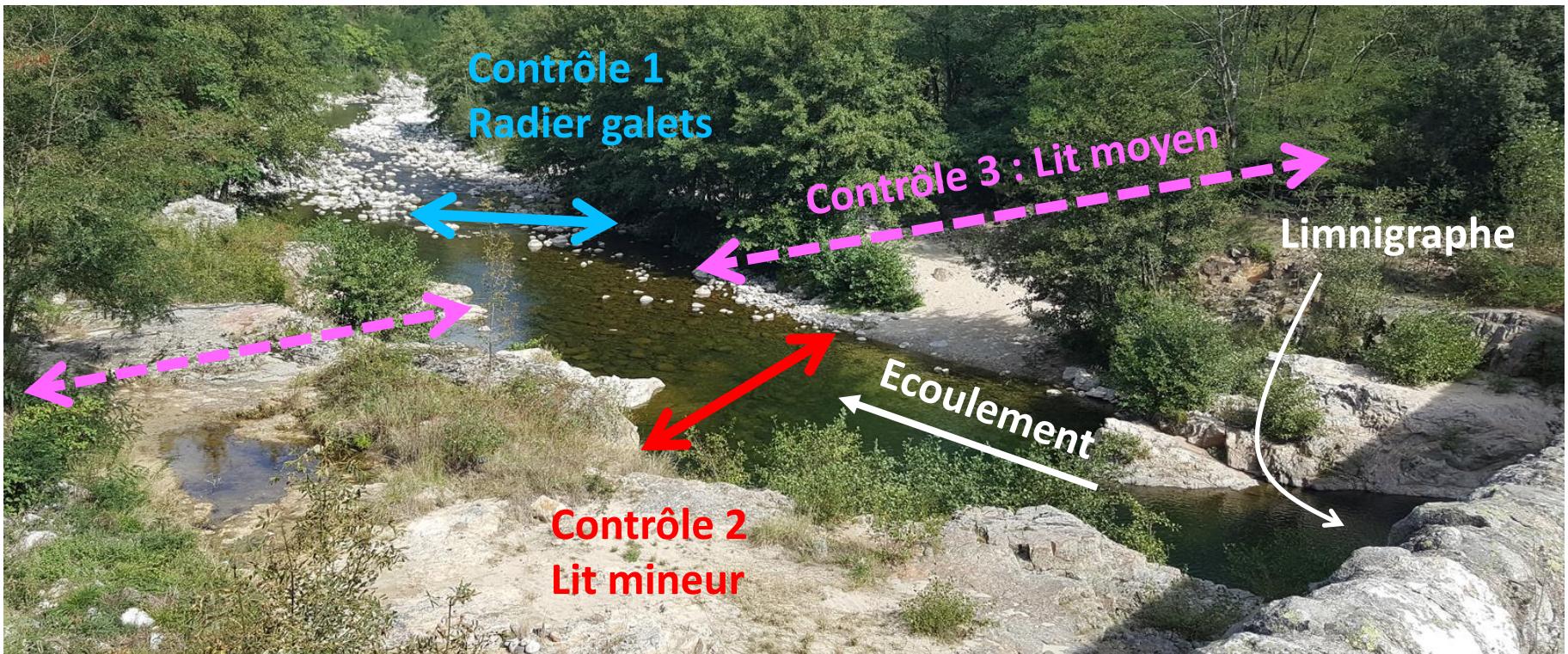
TP2 – L'Ardèche à Meyras

Identification des contrôles (section/chenal) :



TP2 – L'Ardèche à Meyras

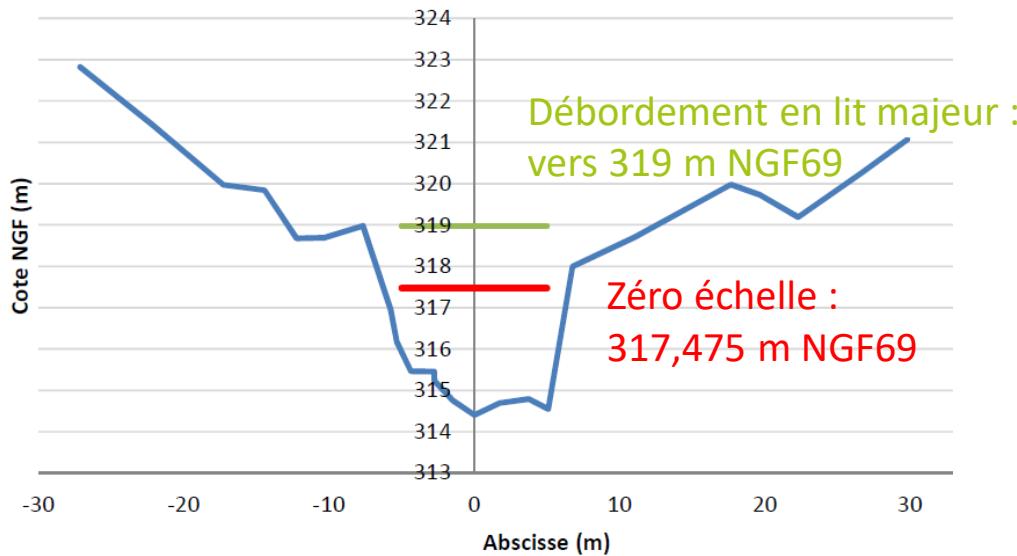
Identification des contrôles (section/chenal) :



TP2 – L'Ardèche à Meyras

Informations utiles pour définir les a priori sur les contrôles hydrauliques

Profil en travers environ 14 m à l'aval de la station



La pente de la ligne d'eau est grossièrement estimée à 5 m/km

Lit mineur moyennement rugueux, lit majeur végétalisé

Largeur et cote du seuil basses eaux :

B1 = ?

k1 = ?

Largeur, pente, rugosité et cote d'activation du lit **mineur** :

B2 = ?

S2 = ?

K2 = ?

k2 = ?

Largeur, pente, rugosité et cote d'activation du lit **majeur** :

B3 = ?

S3 = ?

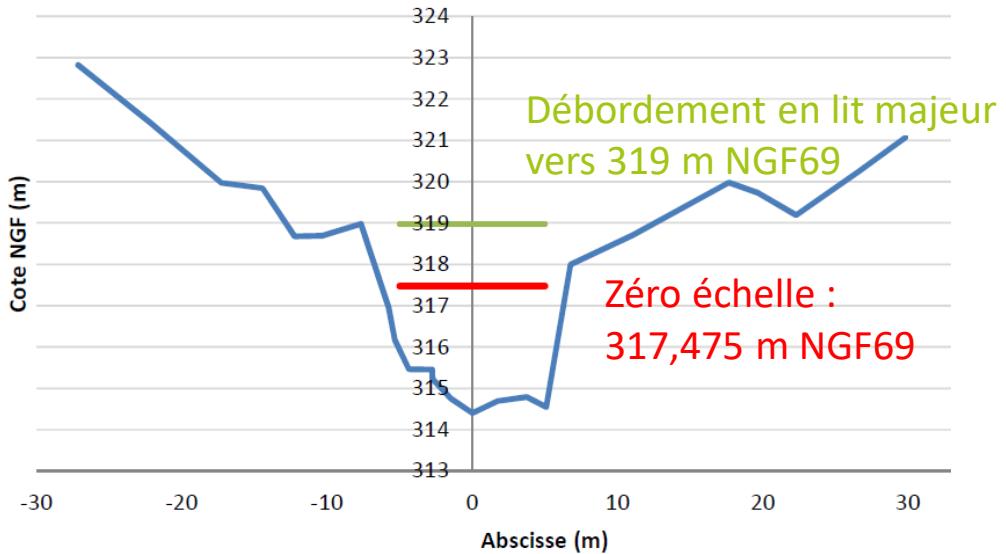
K3 = ?

k3 = ?

TP2 – L'Ardèche à Meyras

Informations utiles pour définir les a priori sur les contrôles hydrauliques

Profil en travers environ 14 m à l'aval de la station



La pente de la ligne d'eau est grossièrement estimée à 5 m/km

Lit mineur moyennement rugueux, lit majeur végétalisé

Largeur et cote du seuil basses eaux :

$$B_1 = 8 \pm 4 \text{ m}$$

$$k_1 = 0 \pm 1 \text{ m}$$

Largeur, pente, rugosité et cote d'activation du lit **mineur** :

$$B_2 = 15 \pm 5 \text{ m}$$

$$S_2 = 5 \pm 5 \text{ m/km}$$

$$K_2 = 25 \pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$k_2 = 0 \pm 1 \text{ m}$$

Largeur, pente, rugosité et cote d'activation du lit **majeur** :

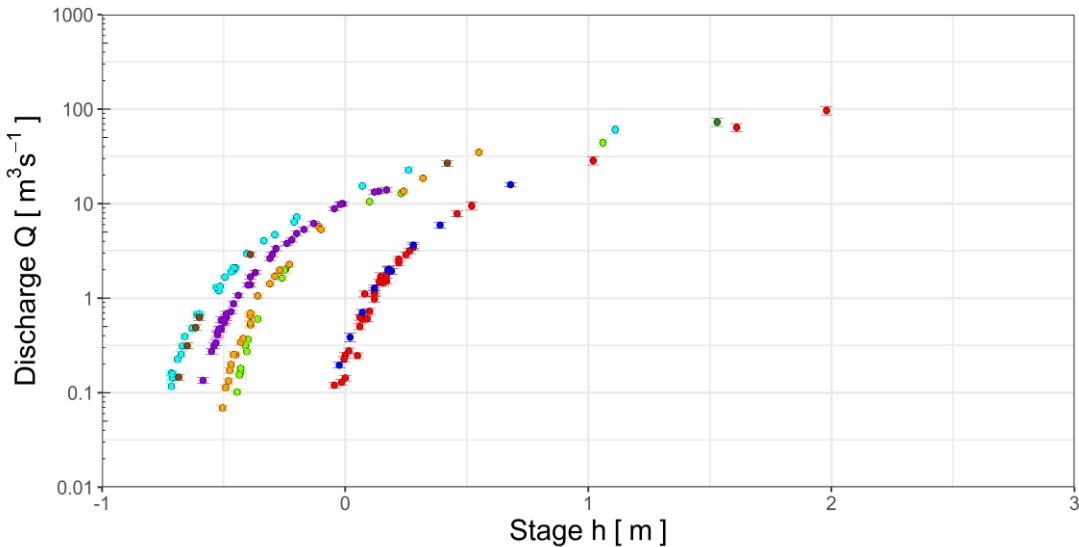
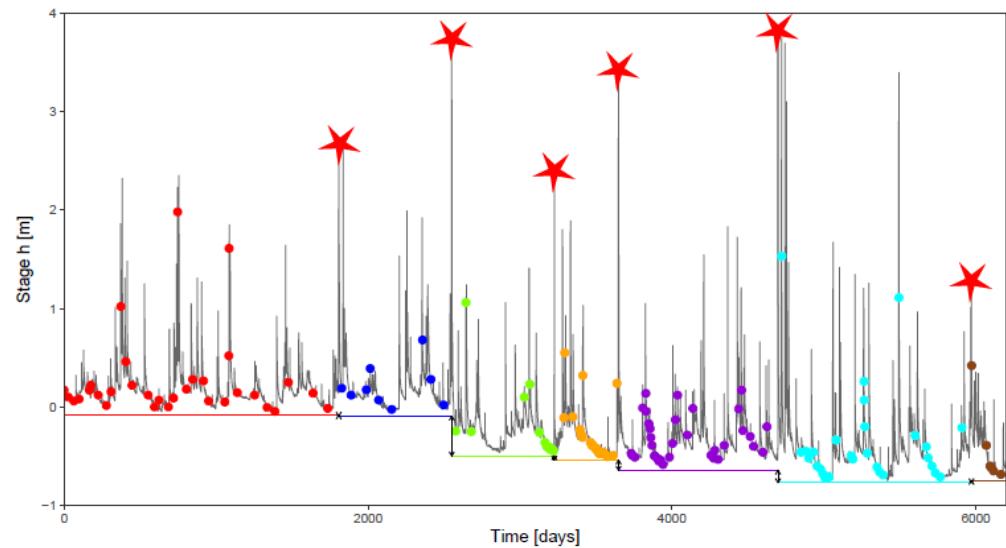
$$B_3 = 30 \pm 10 \text{ m}$$

$$S_3 = 5 \pm 5 \text{ m/km}$$

$$K_3 = 15 \pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$k_3 = 1.2 \pm 0.5 \text{ m}$$

TP2 – L’Ardèche à Meyras



Détarages nets provoqués par l’enfoncement du lit mineur pendant les crues :

- Visibles dans le limnigramme (hauteur-temps)
- Visibles dans les jaugeages (hauteur-débit)

Quel(s) paramètre(s) de la courbe de tarage sont affectés?

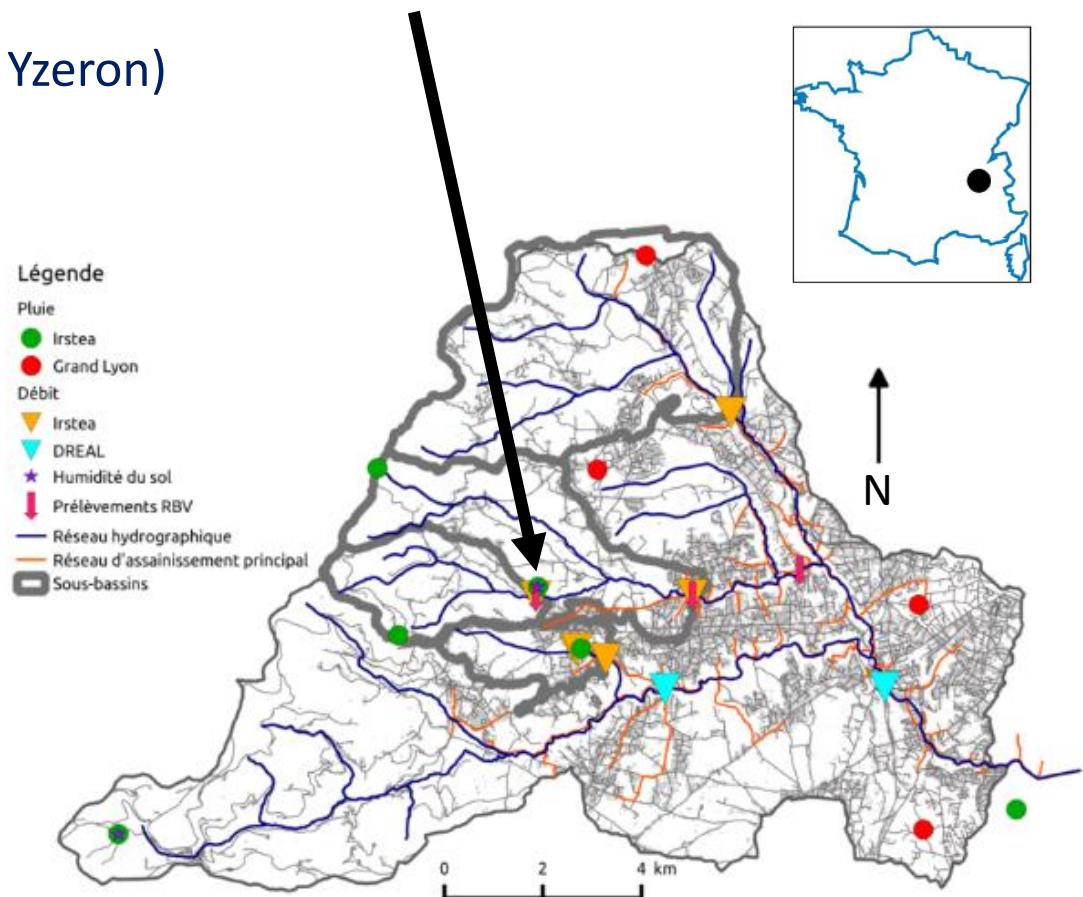
Que faire pour gérer ça?

L’Ardèche à Meyras (France),
période 2001-2018

Données SPC Grand Delta

TP6 – Le Mercier

- Station « Mercier au pont D610 » (V3015810)
- Suivi hydrométrique sur le bassin-versant de l'Yzeron (ouest de Lyon, France) depuis 1997
- Station INRAE
(Observatoire OTHU – site BV Yzeron)
<https://bdoh.irstea.fr/YZERON/>



TP6 – Le Mercier

- Station « Mercier au pont D610 » (V3015810)
- Suivi hydrométrique sur le bassin-versant de l'Yzeron (ouest de Lyon) depuis 1997, Station INRAE (Observatoire OTHU – site BV Yzeron)



Identifiez et décrivez les contrôles

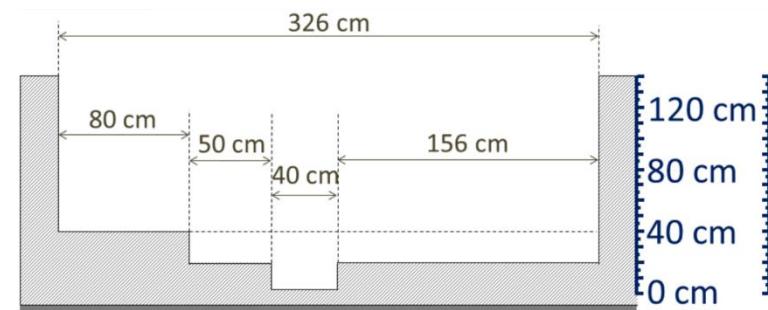
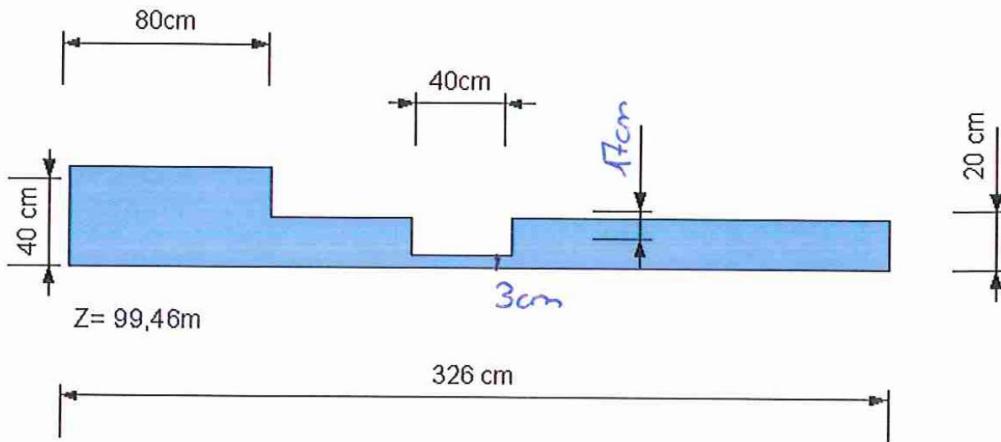
Résumez le modèle de courbe de tarage à estimer

TP6 – Le Mercier

Informations utiles pour définir les a priori sur les contrôles hydrauliques :

- Déterminez les largeurs et cotes des déversoirs

Plan de conception de l'ouvrage (2014)



Le zéro de l'échelle limnimétrique est calé au bas du massif du seuil en béton.

TP6 – Le Mercier

- Etablissez la configuration hydraulique
- Quelles sont les incertitudes des jaugeages?
- Calculez la courbe de tarage 2014-2018
- Vérifiez que les simulations MCMC sont ok ainsi que l'accord entre a priori et a posteriori
- Quelle est l'incertitude supposée pour le limnigramme?
- Calculez l'hydrogramme 2014
- Quelle composante d'incertitude domine en crue? et en étiage?

Contrôles	Hauteurs d'activation (k) <u>en m</u>	Largeurs déversantes (B) <u>en m</u>	Exposants (c)
Déversoir rectangulaire (Contrôle 1)	?? ± ??	?? ± ??	?? ± ??
Déversoir rectangulaire (Contrôle 2)	?? ± ??	?? ± ??	?? ± ??
Déversoir rectangulaire (Contrôle 3)	?? ± ??	?? ± ??	?? ± ??

TP6 – Le Mercier

- Etablissez la configuration hydraulique
- Quelles sont les incertitudes des jaugeages?
- Calculez la courbe de tarage 2014-2018
- Vérifiez que les simulations MCMC sont ok ainsi que l'accord entre a priori et a posteriori
- Quelle est l'incertitude supposée pour le limnigramme?
- Calculez l'hydrogramme 2014
- Quelle composante d'incertitude domine en crue? et en étiage?

Contrôles	Hauteurs d'activation (k) <u>en m</u>	Largeurs déversantes (B) <u>en m</u>	Exposants (c)
Déversoir rectangulaire (Contrôle 1)	0.03 ± 0.02	0.40 ± 0.02	1.5 ± 0.05
Déversoir rectangulaire (Contrôle 2)	0.20 ± 0.02	2.06 ± 0.10	1.5 ± 0.05
Déversoir rectangulaire (Contrôle 3)	0.40 ± 0.02	0.8 ± 0.05	1.5 ± 0.05