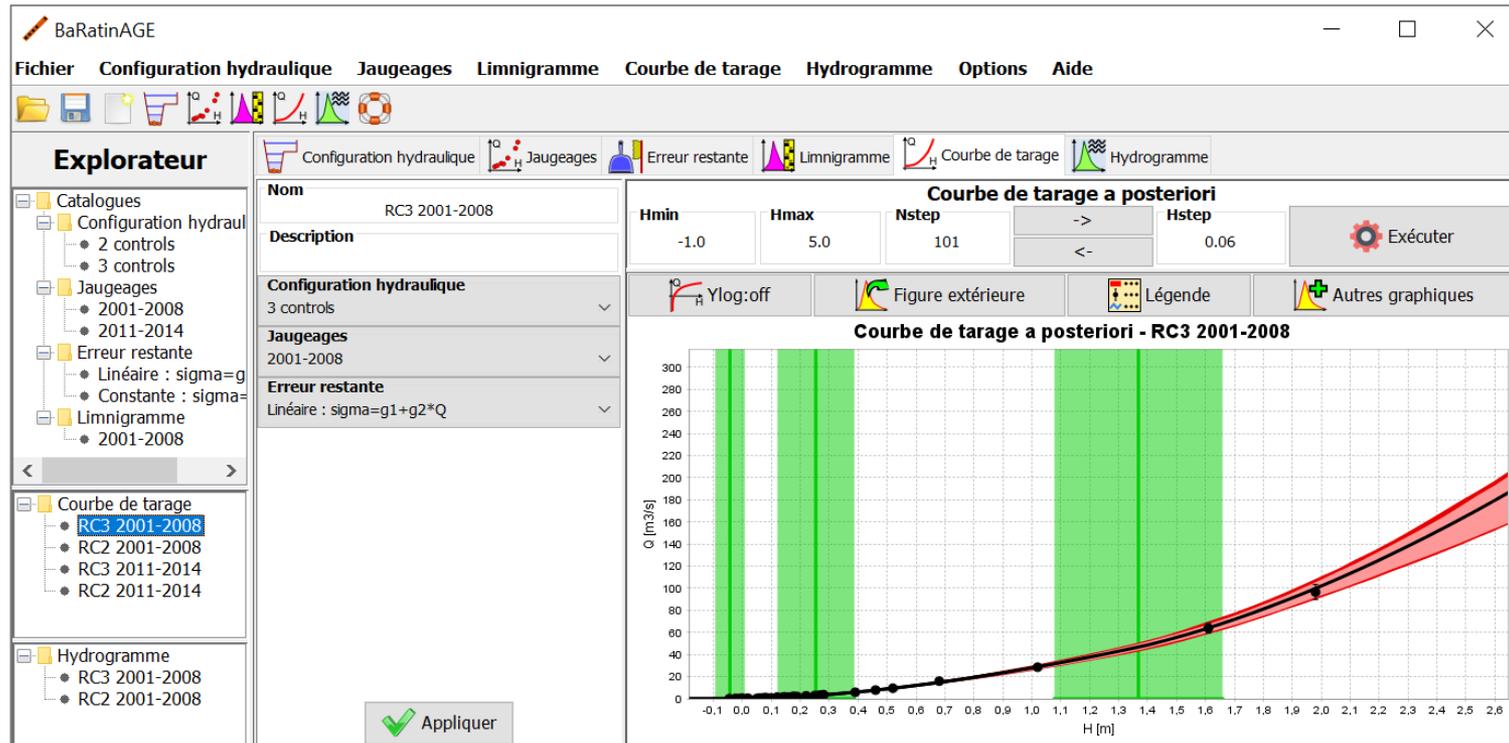
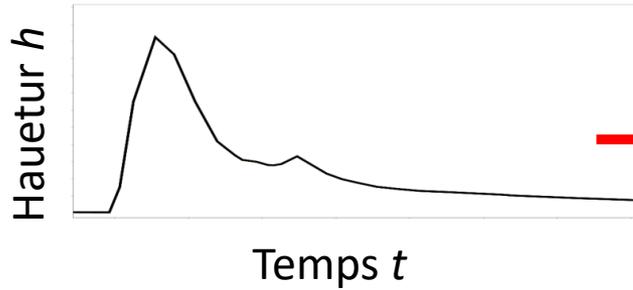


novembre 2021



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

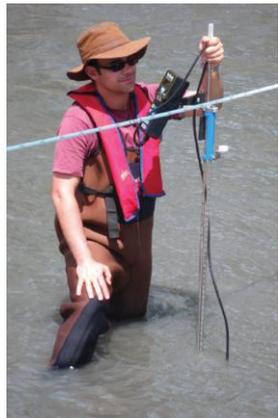
# Produire des séries hydrométriques *probabilistes*



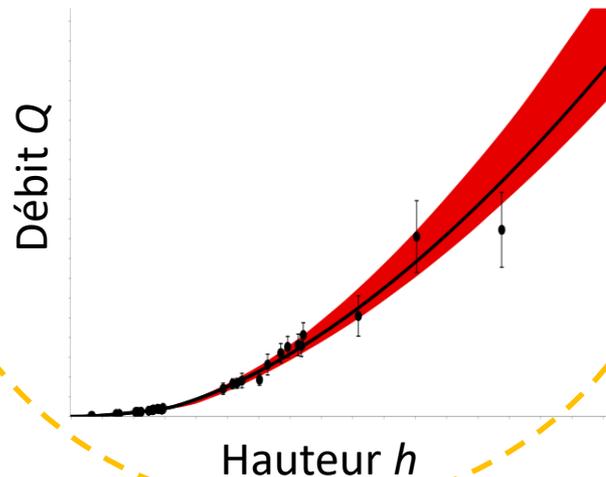
Limnigramme

$h(t)$

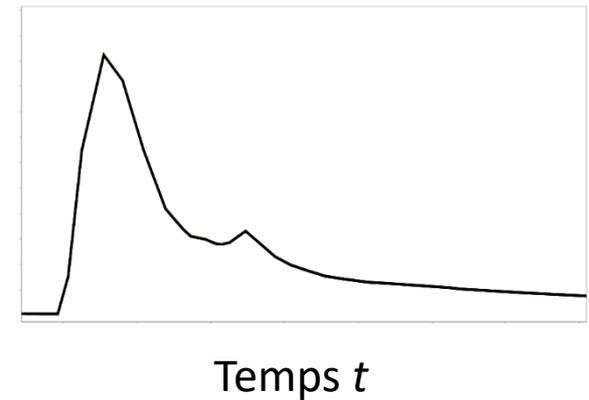
Jaugeages  
( $Q_i, h_i$ )



Courbe de tarage  
 $Q(h)$



Hydrogramme  
 $Q(t)$



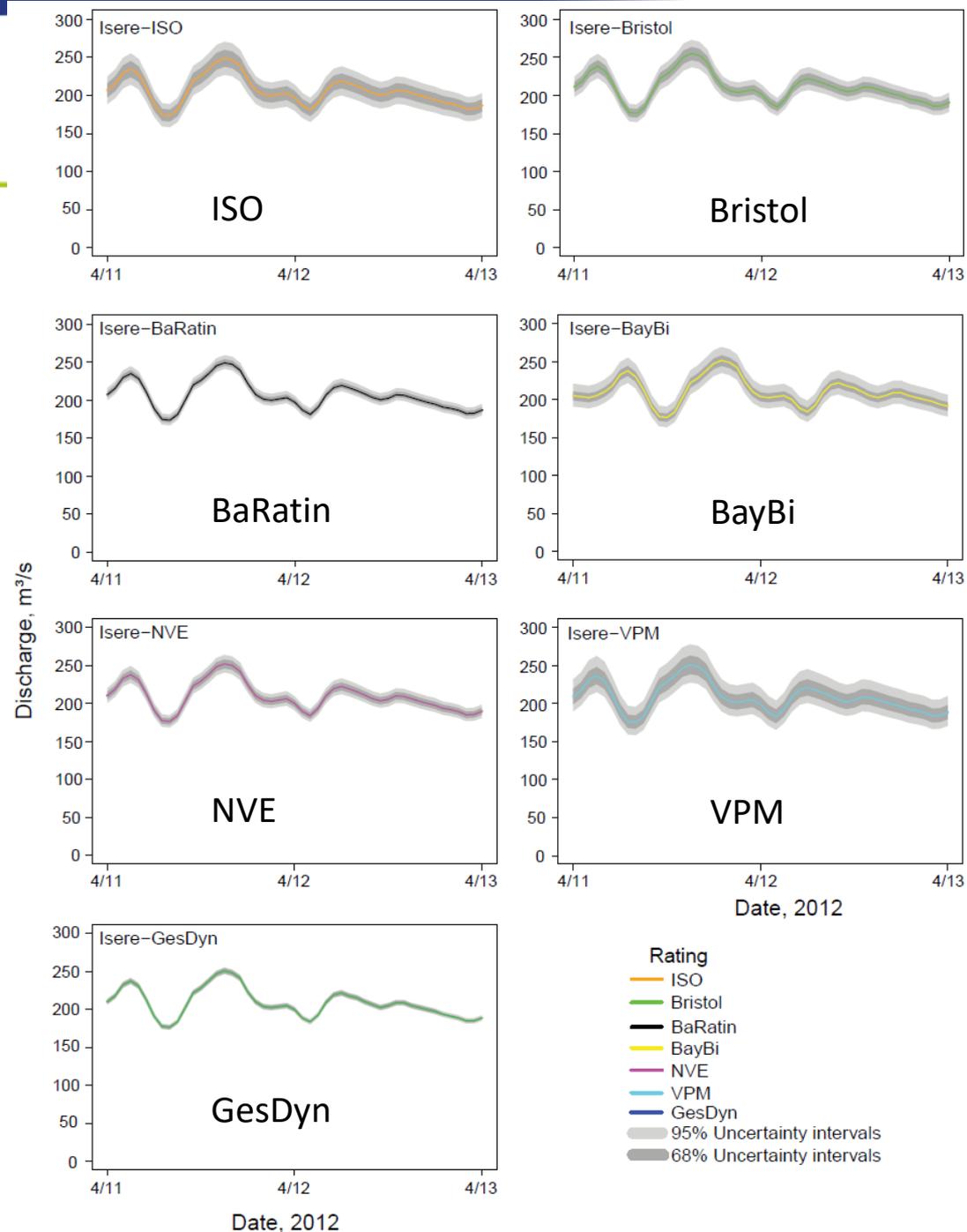
# Intercomparaison de 7 méthodes

Difficile de comparer et d'homogénéiser les méthodes

La signification des résultats dépend des hypothèses de chaque méthode

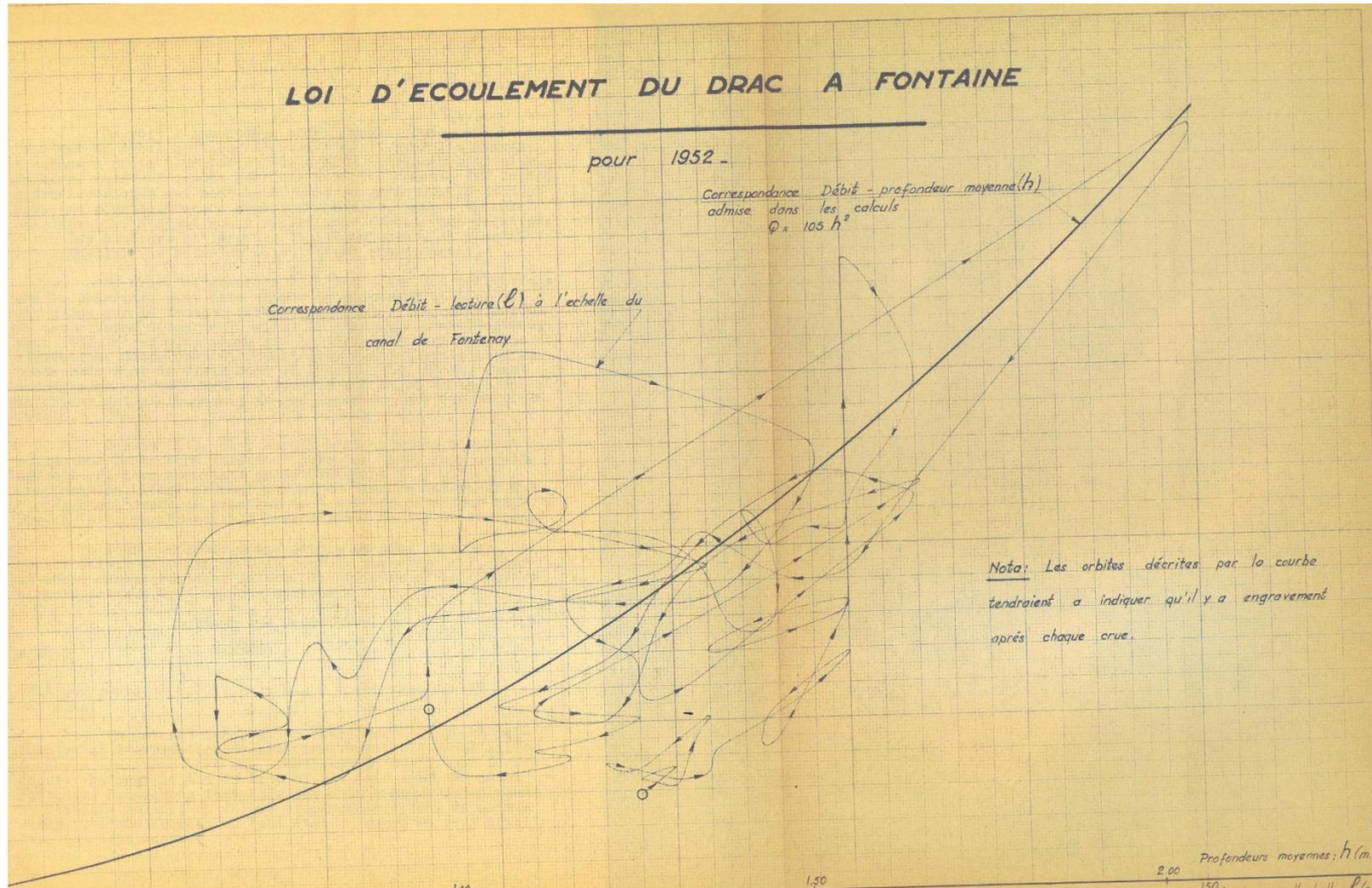
Intervalles d'incertitude à 95% des hydrogrammes de l'Isère à Grenoble

Kiang et al., WRR (2018)



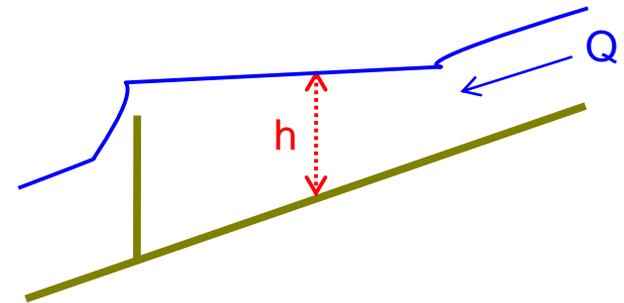
# Contrôles hydrauliques

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



# Contrôles hydrauliques

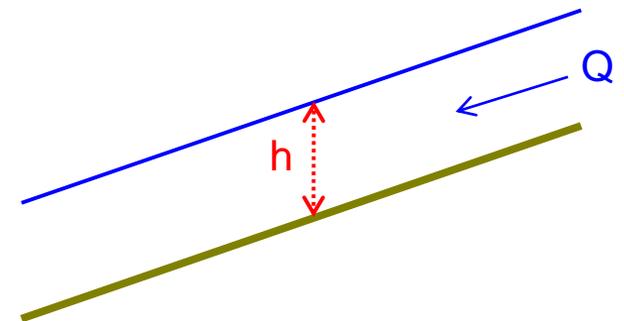
- Propriétés physiques d'un chenal qui déterminent la relation entre la hauteur et le débit en un point de ce dernier (OMM, 2012)



contrôle hydraulique  
par une section

# Contrôles hydrauliques

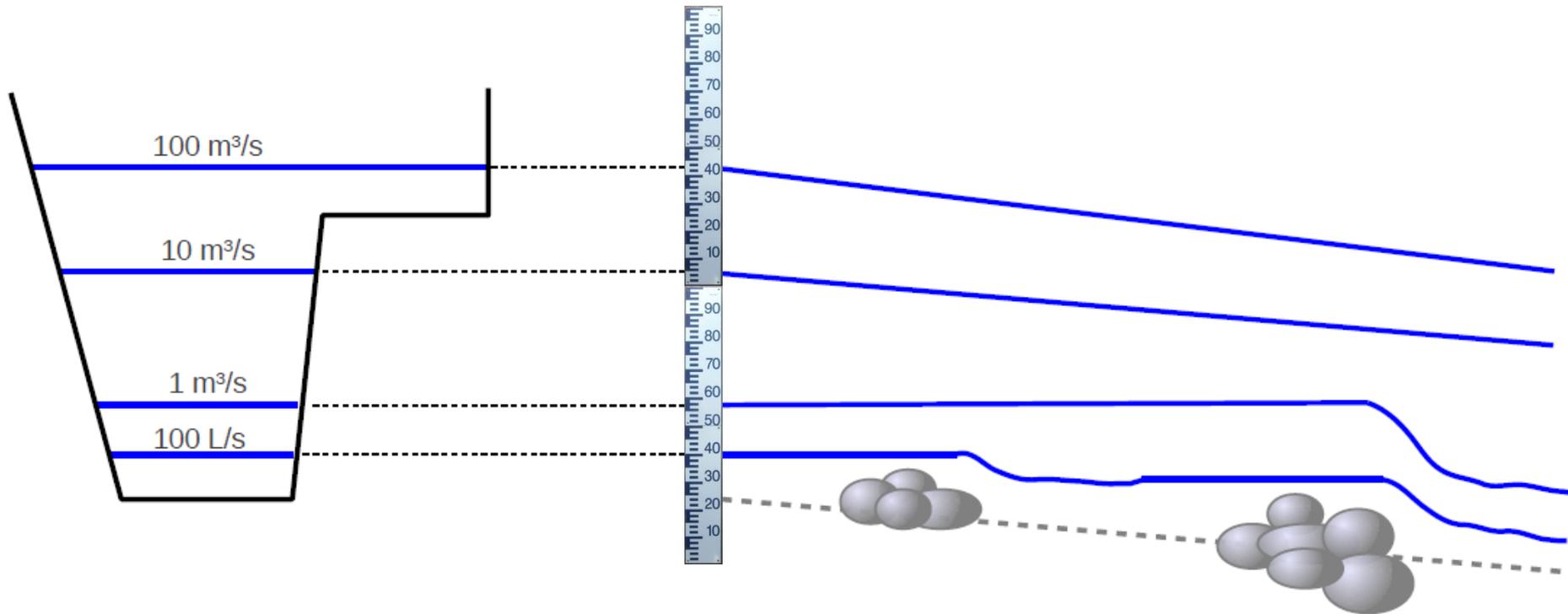
- Propriétés physiques d'un chenal qui déterminent la relation entre la hauteur et le débit en un point de ce dernier (OMM, 2012)



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

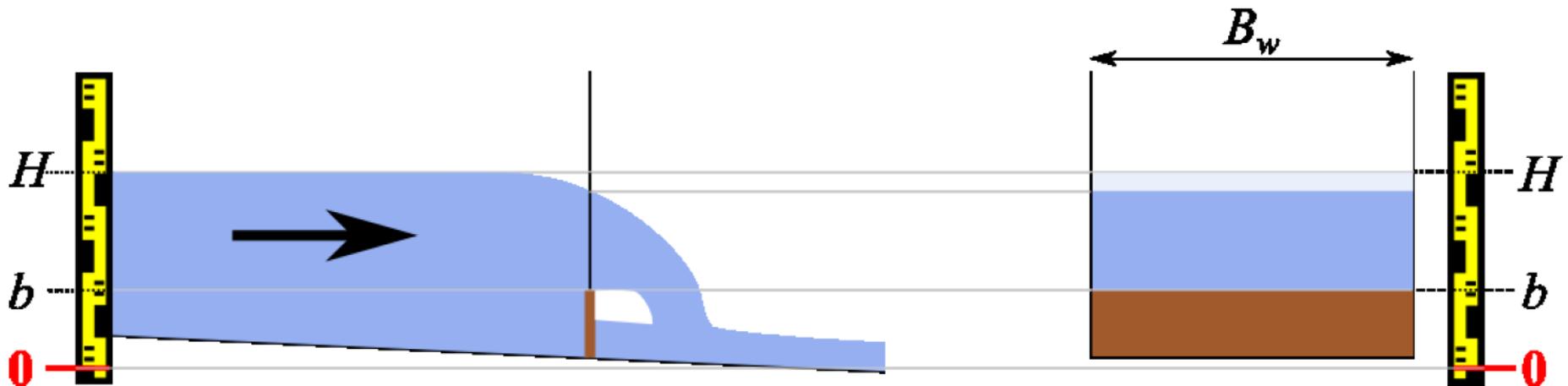


	Radier amont ↓ Contrôle 1	Radier aval ↓ Contrôle 2	Lit mineur ↓ Contrôle 3	Lit majeur ↓ Contrôle 4
Segment 1	<input checked="" type="checkbox"/>			
Segment 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Segment 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>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

- Déversoir rectangulaire / seuil naturel

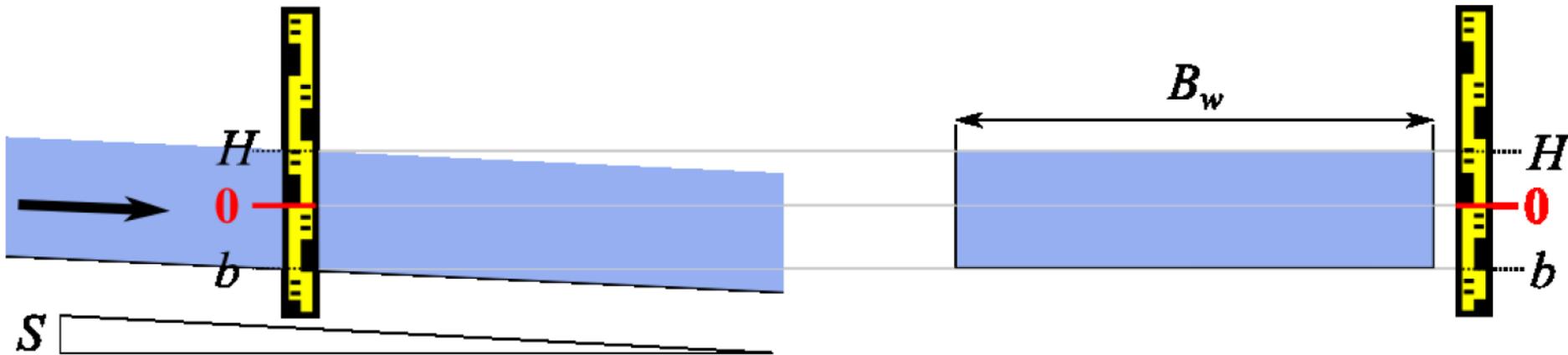


$$Q(H) = C_r \sqrt{2g} B_w (H - b)^c$$

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

# Contrôles hydrauliques types dans BaRatin

- Chenal rectangulaire (régime uniforme, chenal large)

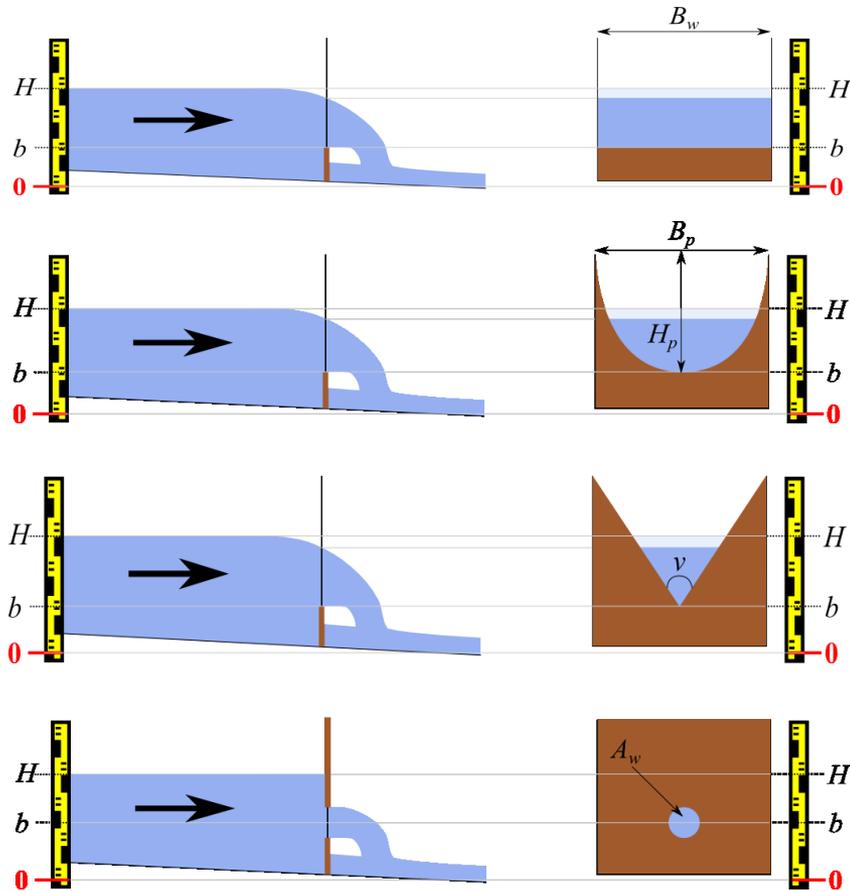


$$Q(H) = K_S \sqrt{S} B_w (H - b)^c$$

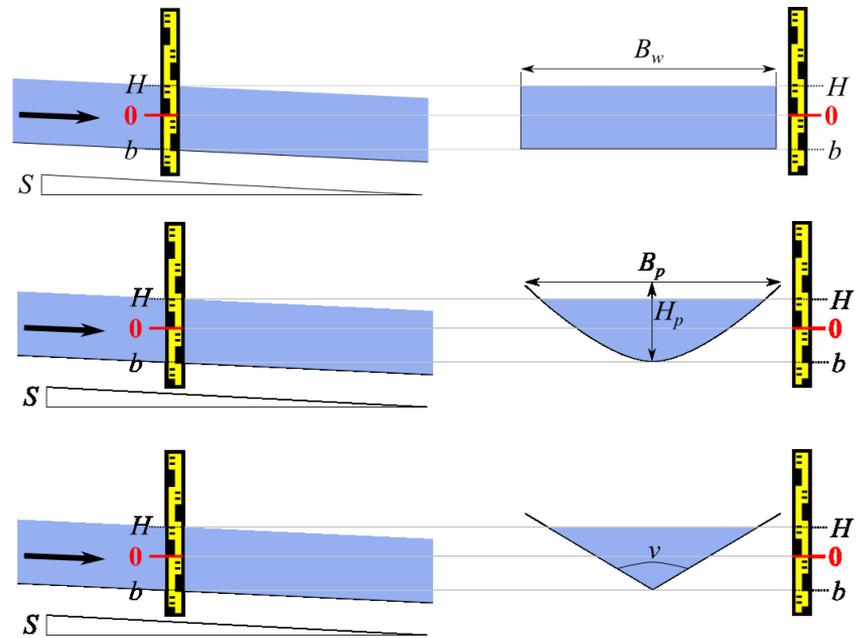
Avec  $K_S$  = coefficient de Strickler et exposant  $c = 1.67$

# Contrôles hydrauliques types dans BaRatin

## Contrôles section



## Contrôles chenal



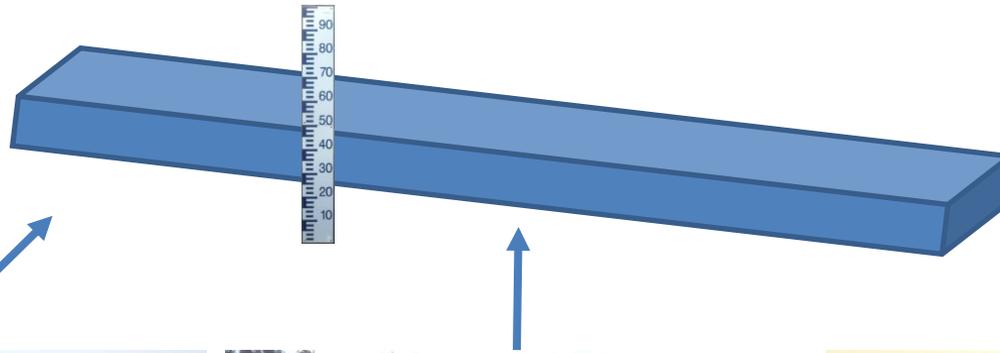
## Contrôles « libres »

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

# 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

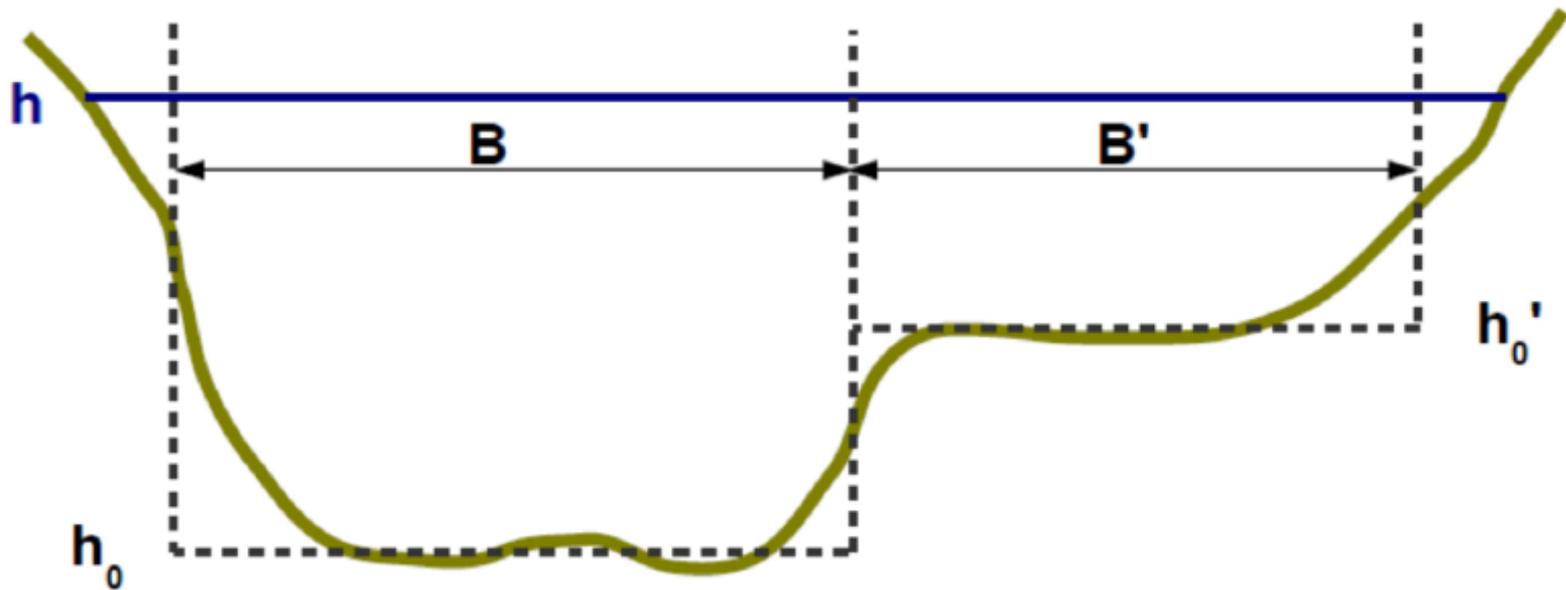


Waimakariri, New Zealand

# Approximation des contrôles naturels

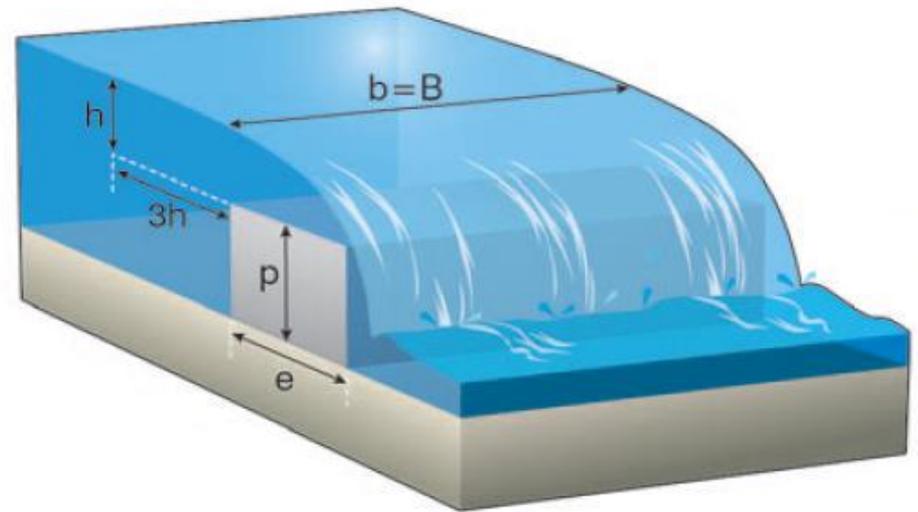
Approximation d'un lit composé par deux chenaux rectangulaires

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



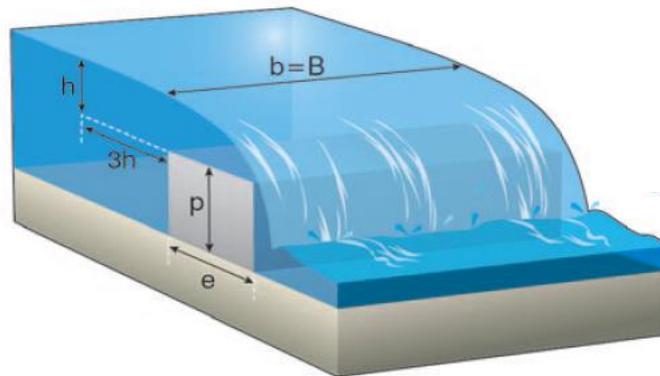
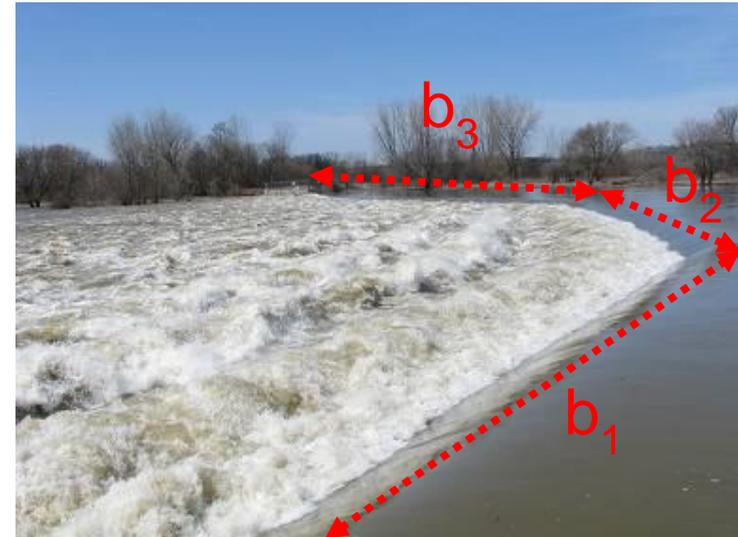
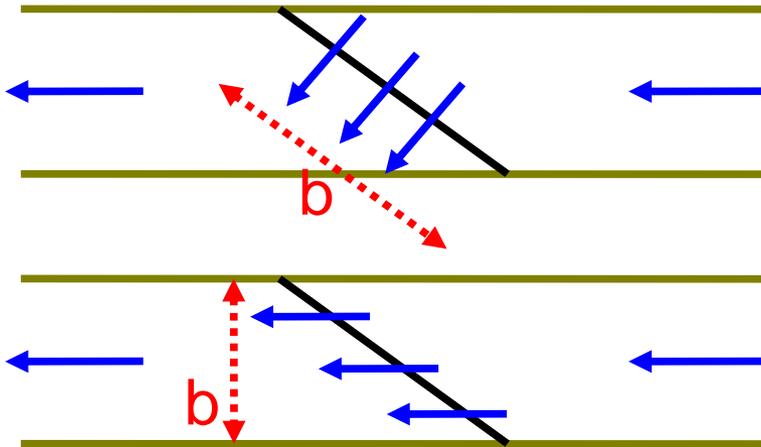
# Approximation des contrôles naturels

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



# Approximation des contrôles naturels

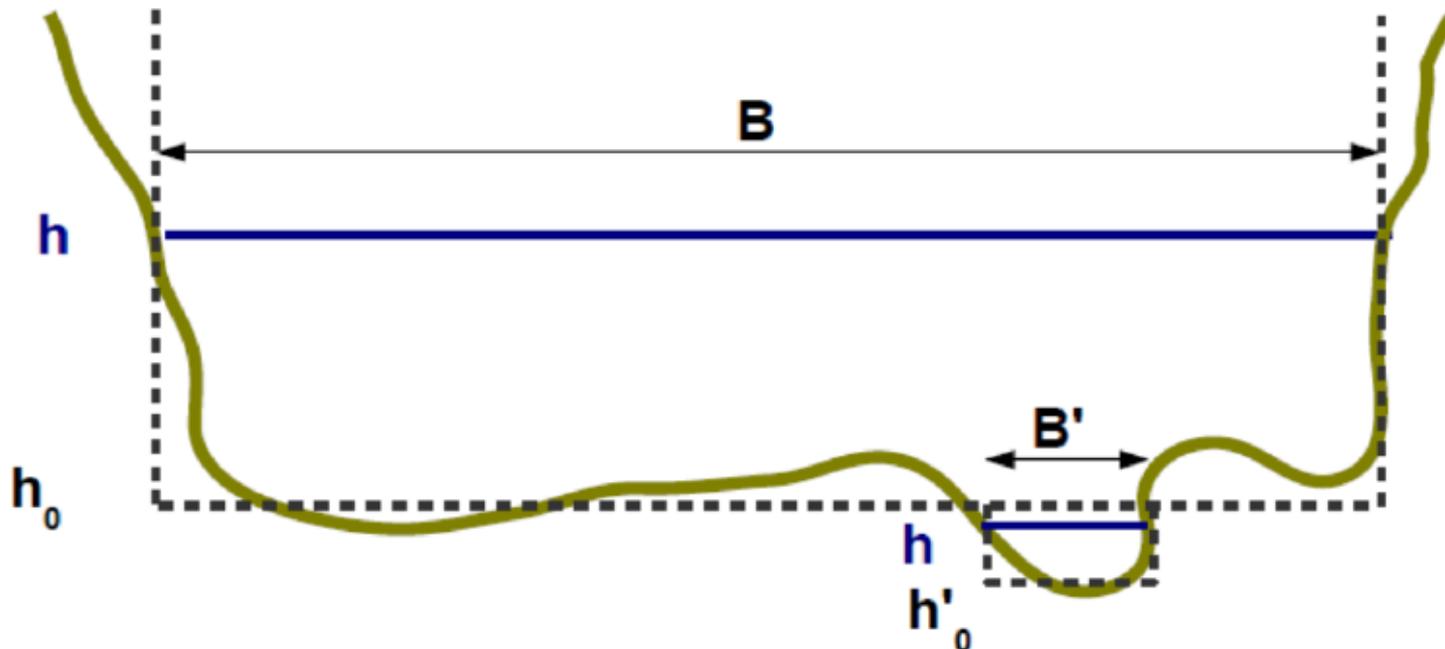
- *Attention! La largeur du déversoir est mesurée perpendiculairement à la direction de l'écoulement.*



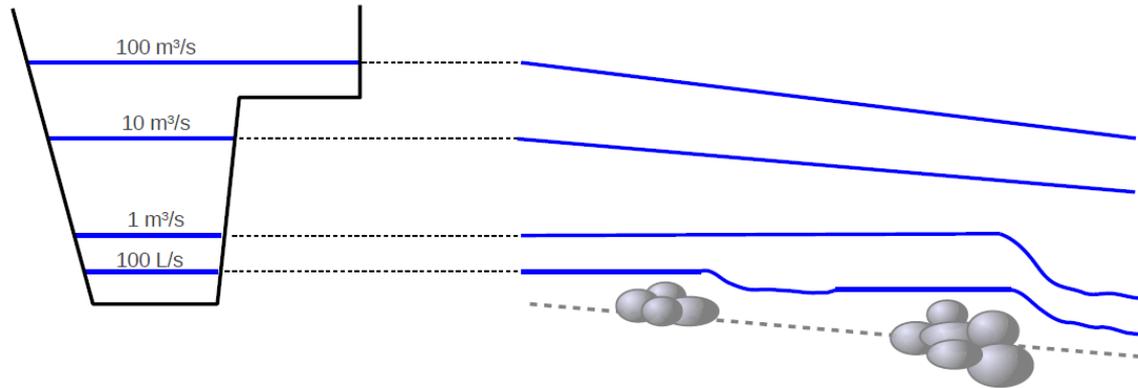
$$b = b_1 + b_2 + b_3$$

# 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...

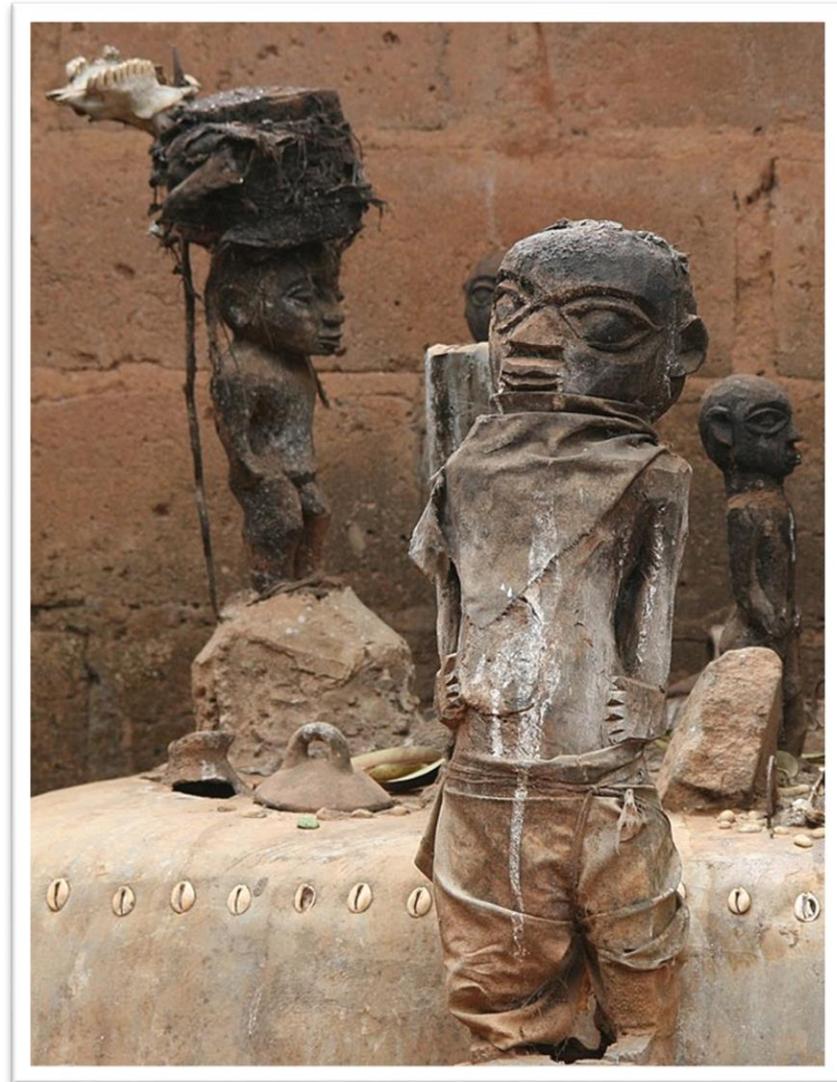
... il faut estimer les paramètres  $k_i, a_i, c_i$  (les  $b_i$  sont déduits par continuité)

# 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*

a posteriori

vraisemblance

a priori

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

Constante de normalisation

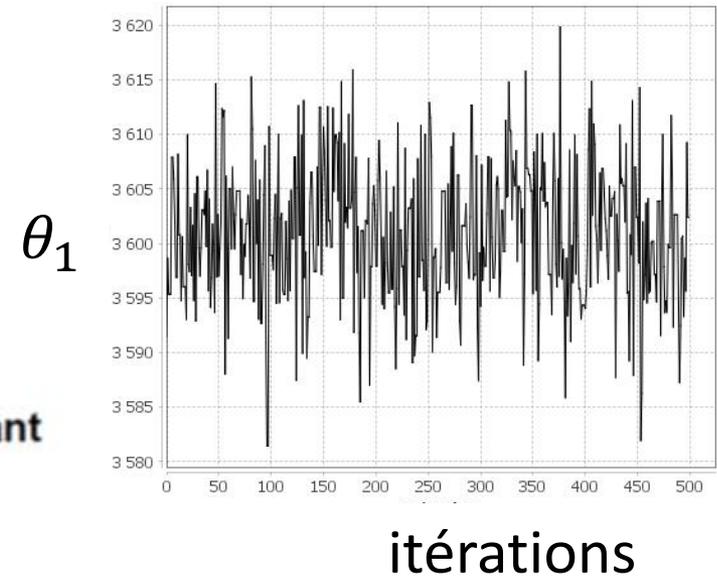
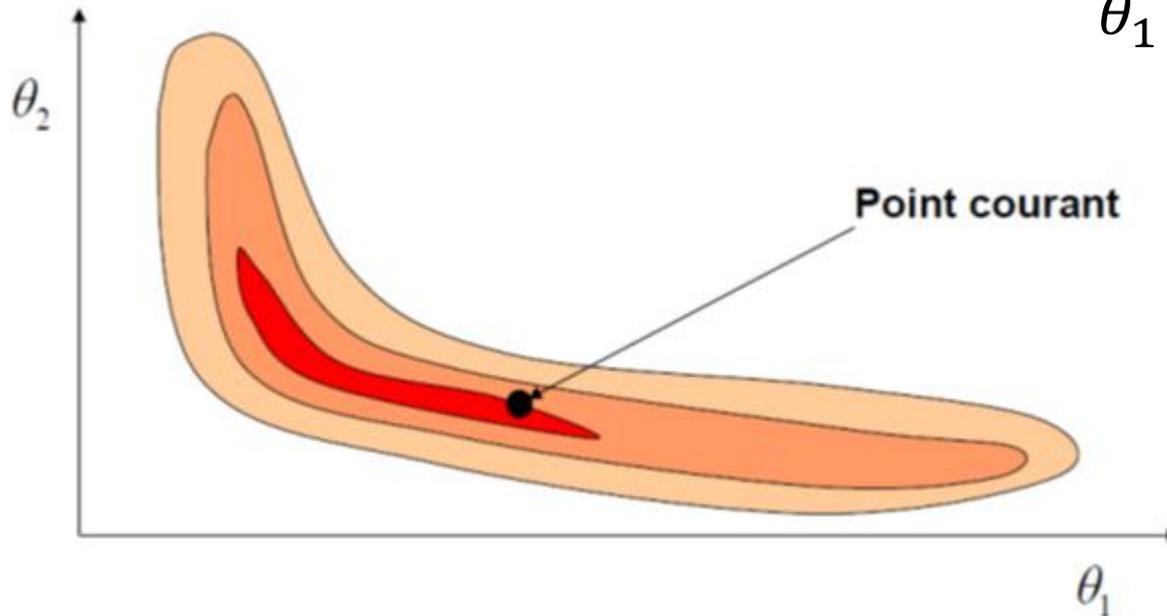
$\mathbf{y}$  : observations  
(couples hauteur-débit)

$\boldsymbol{\theta}$  : paramètres de la courbe de tarage

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

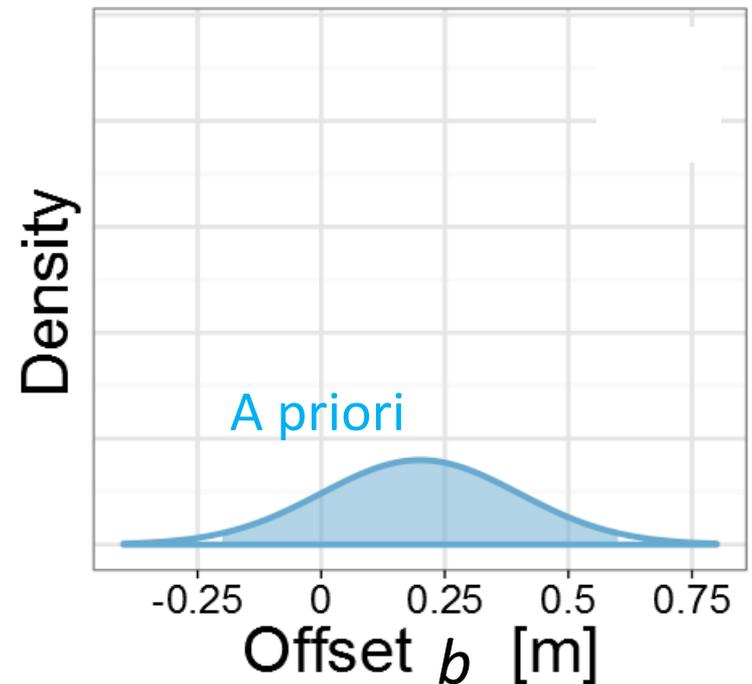


L'Altier à La Goulette, France (EDF-DTG)

# 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 :

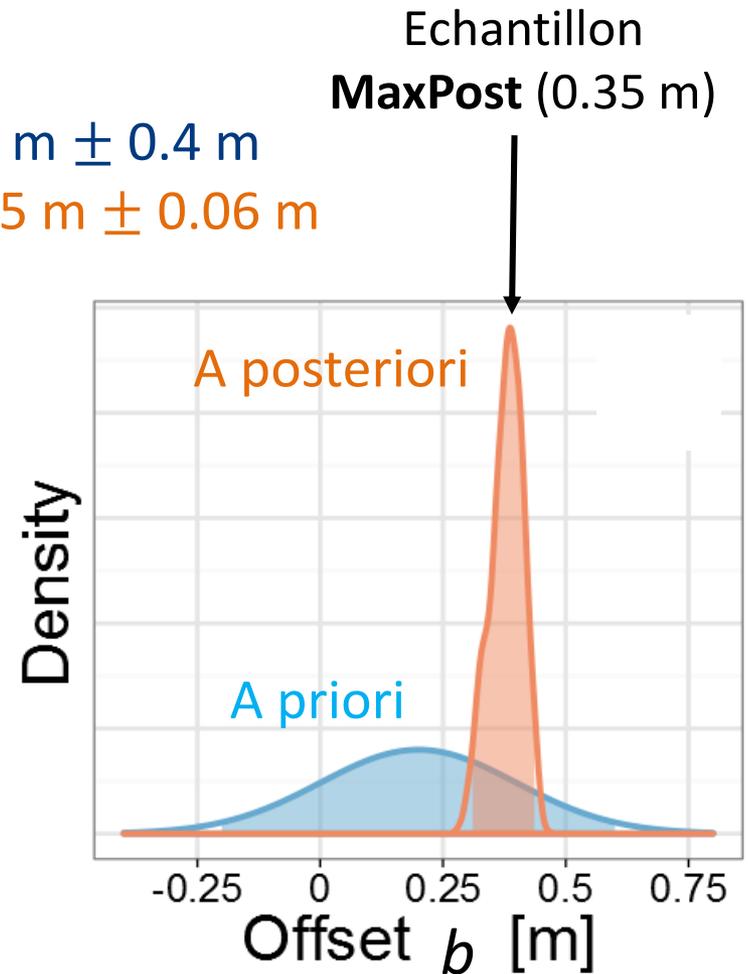
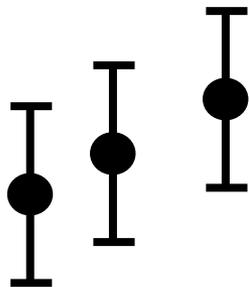
A posteriori :

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

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



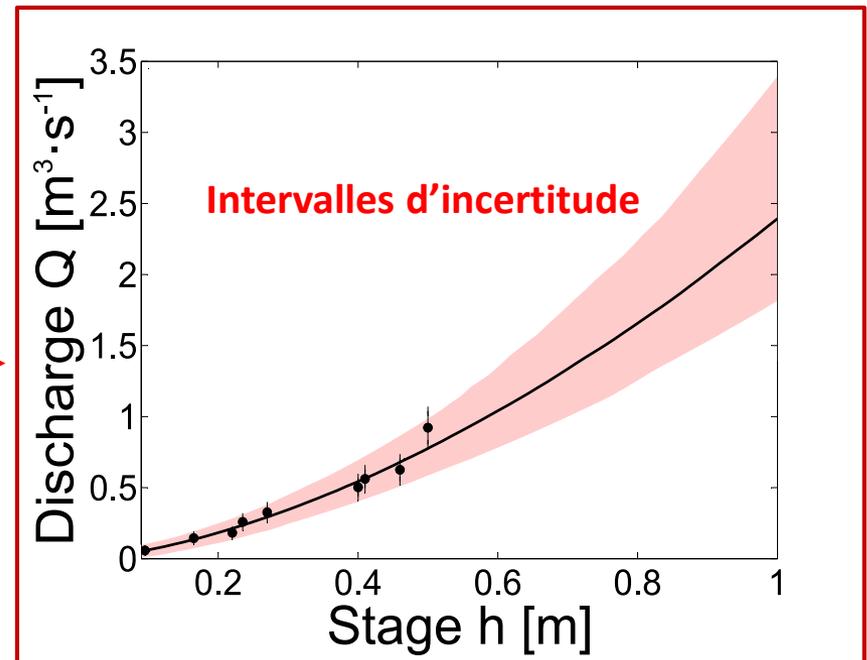
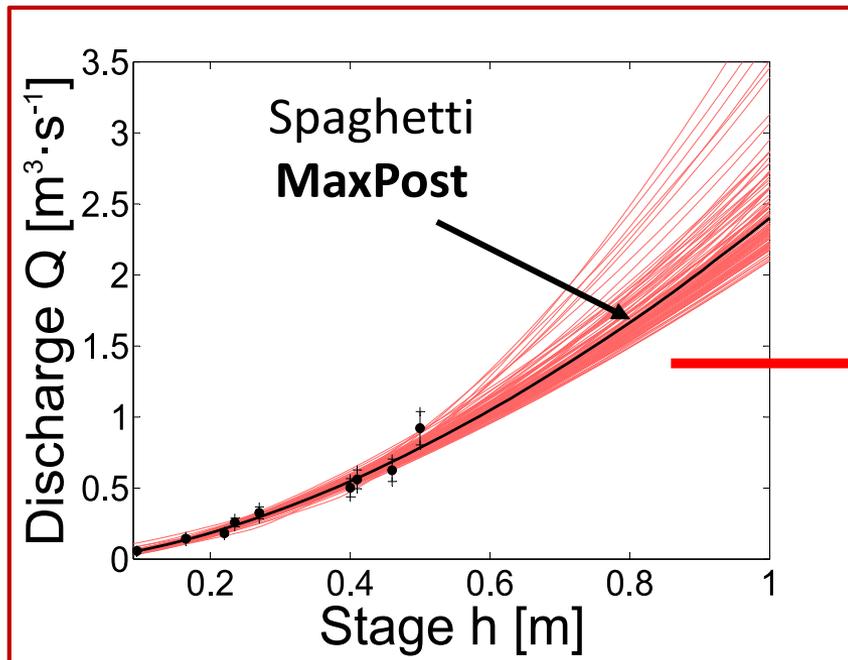
Observations (jaugeages) :





# L'approche « spaghetti »

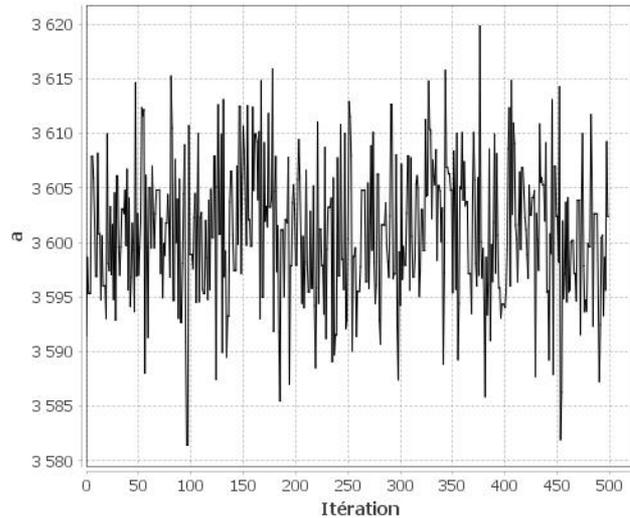
La distribution a posteriori est échantillonnée par techniques MCMC



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

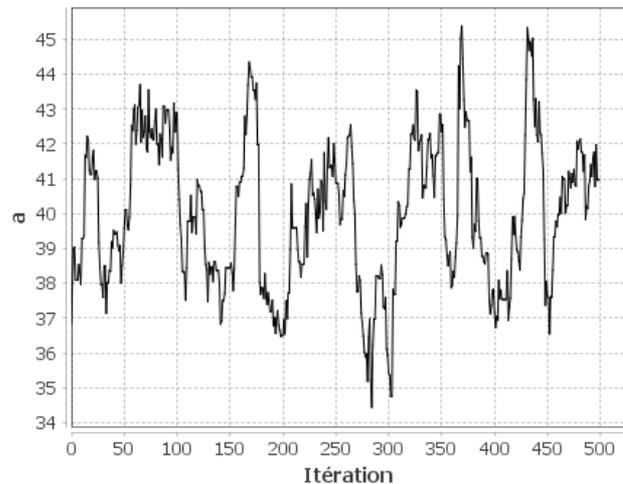
# A retenir en pratique : vérifier les traces MCMC

**a - Contrôle 1**



Bon!  
(gribouillis stationnaire)

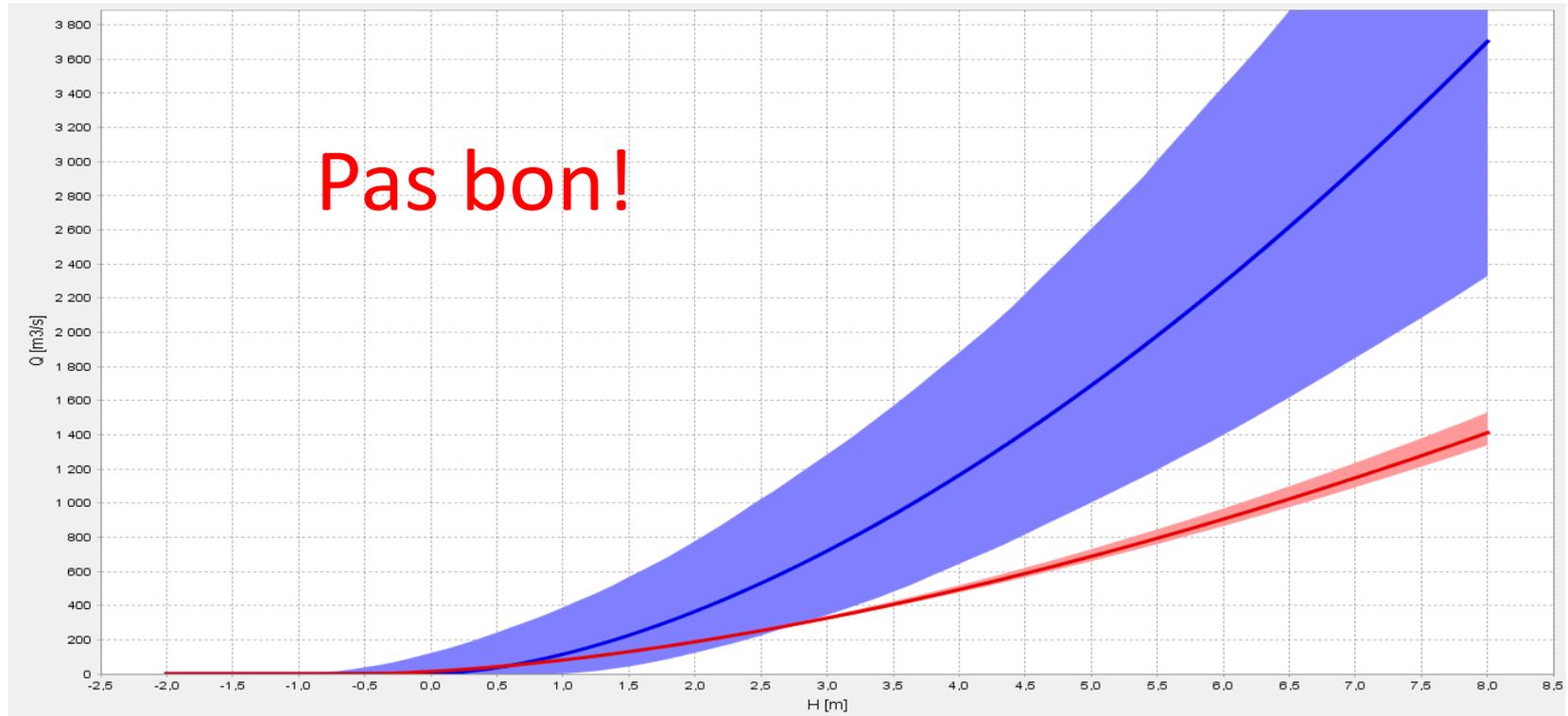
**a - Contrôle 1**



Pas très bon!  
(des tendances se voient)

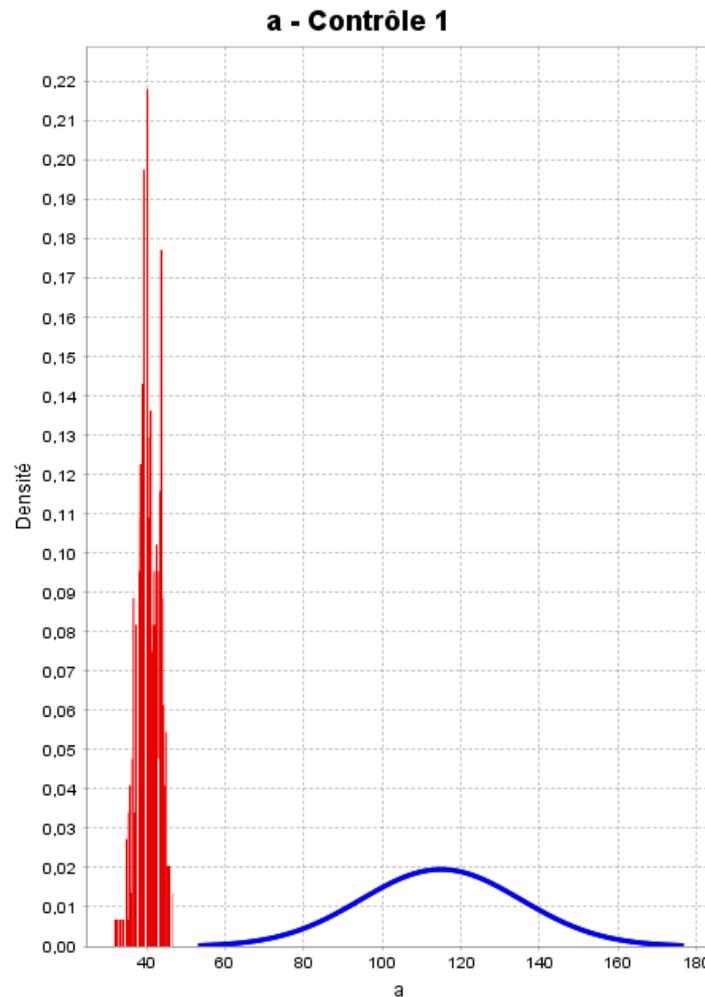
A retenir en pratique :

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**

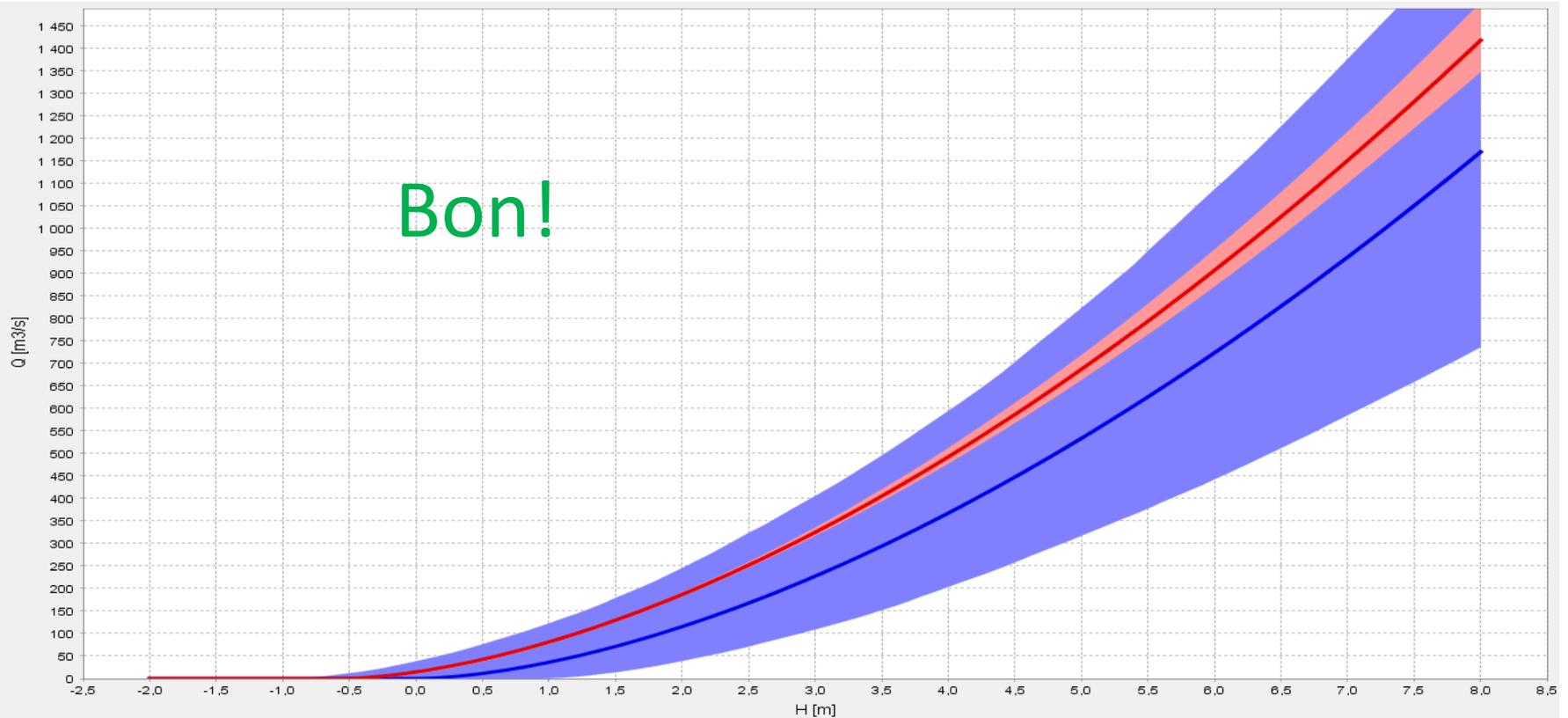


**Pas bon!**

A retenir en pratique :

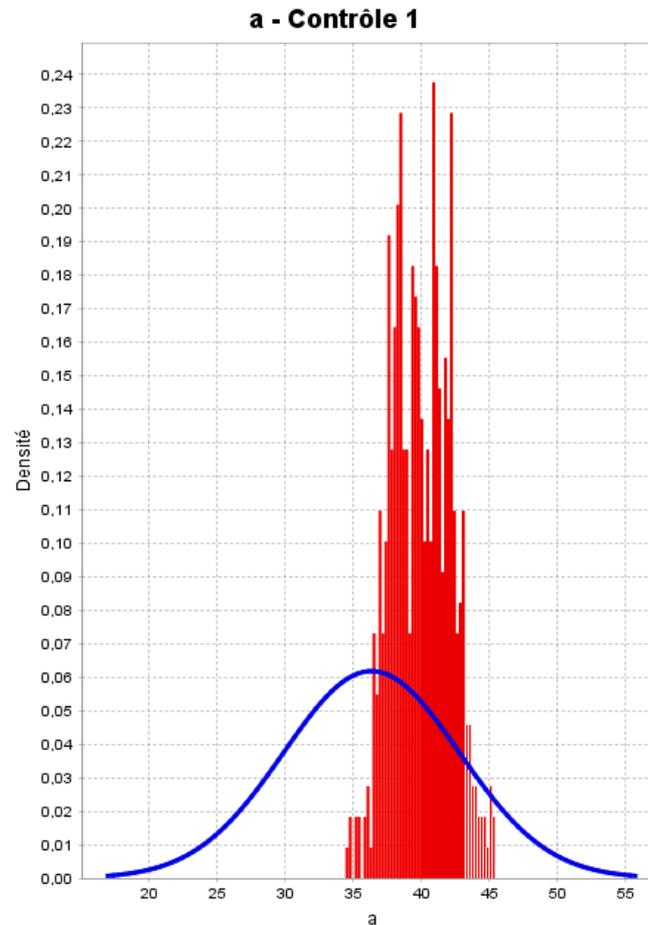
Vérifier l'absence de conflit entre **a priori** et **a posteriori**

Bon!



A retenir en pratique :

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



Bon!

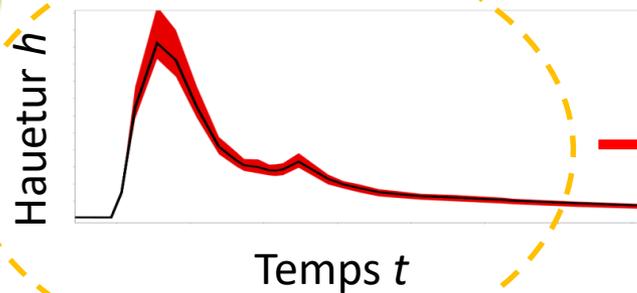
## A retenir en pratique :

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*



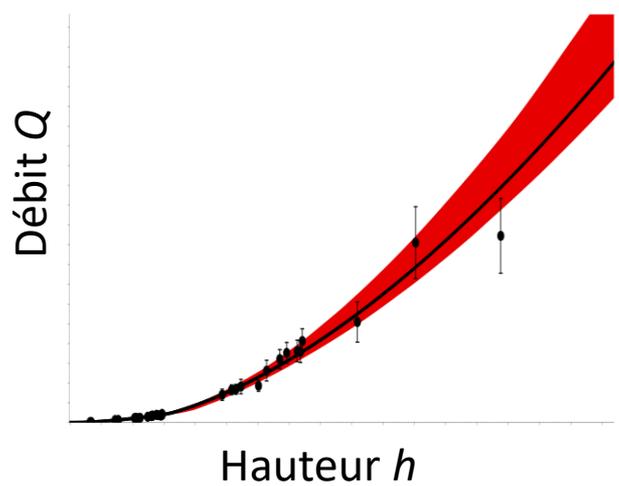
Limnigramme

$$h(t)$$

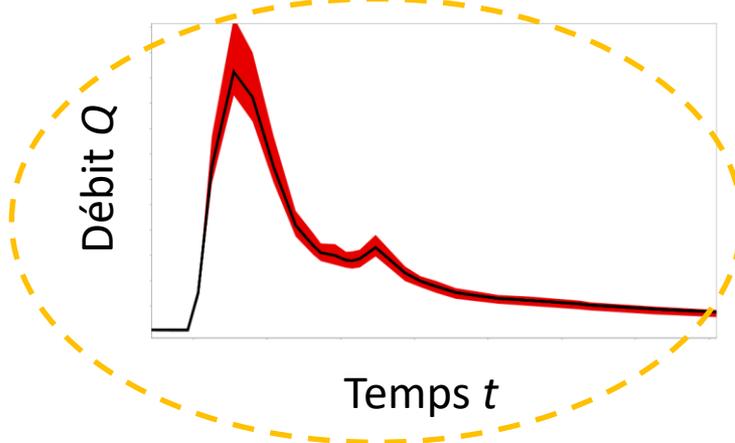
Jaugeages  
( $Q_i, h_i$ )



Courbe de tarage  
 $Q(h)$



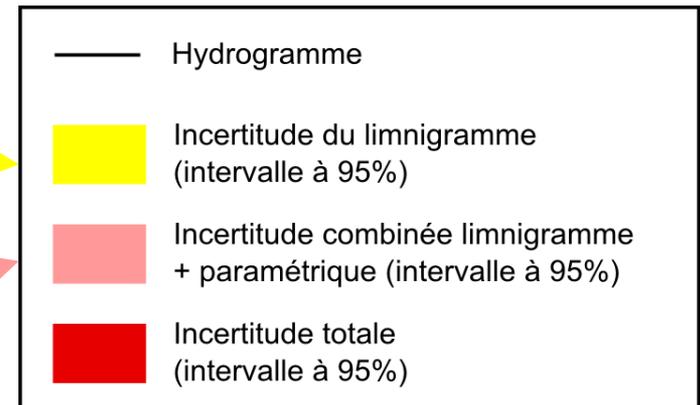
Hydrogramme  
 $Q(t)$



# 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...)

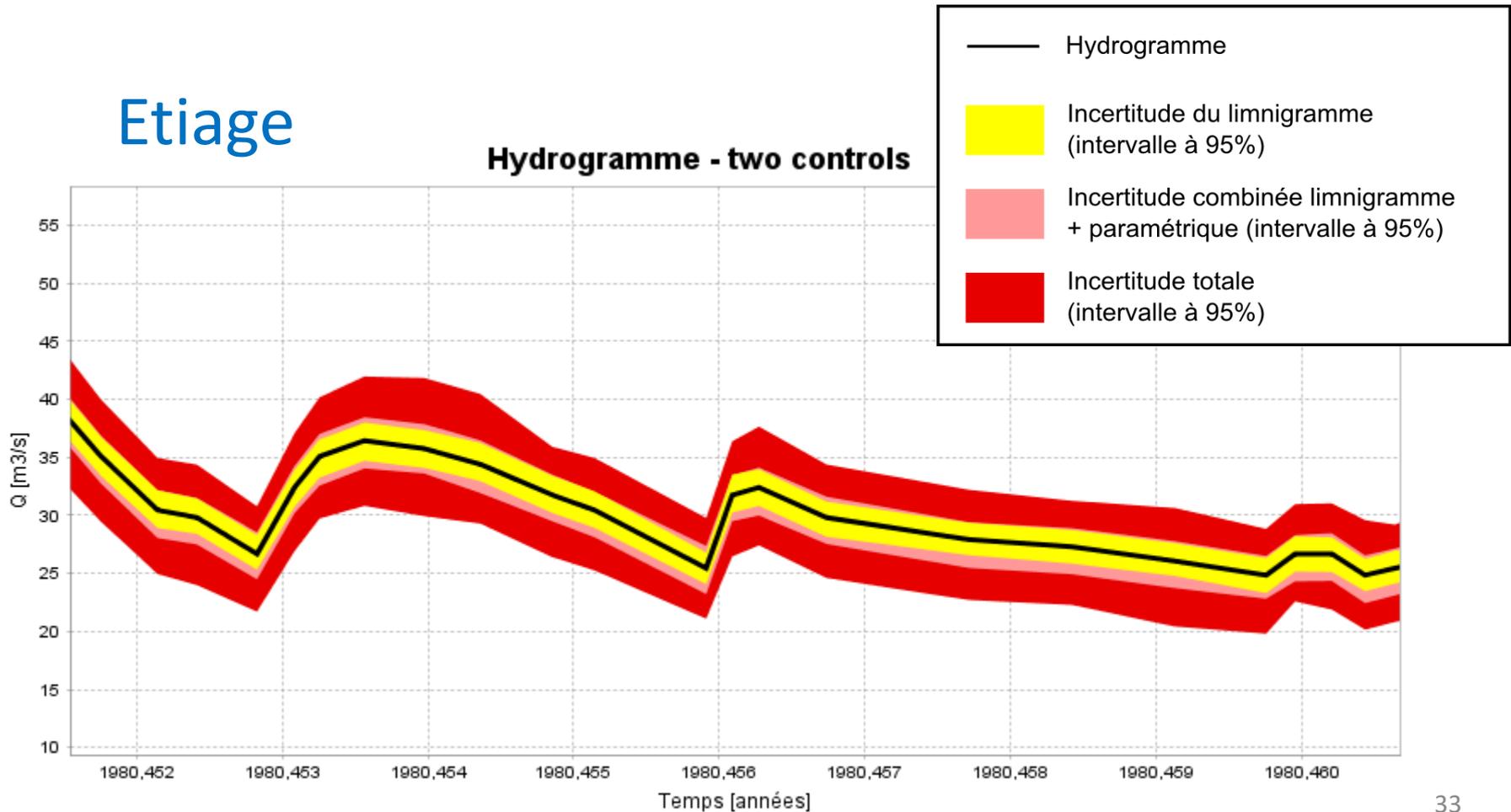


# Bilans d'incertitude

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

## Etiage

Hydrogramme - two controls

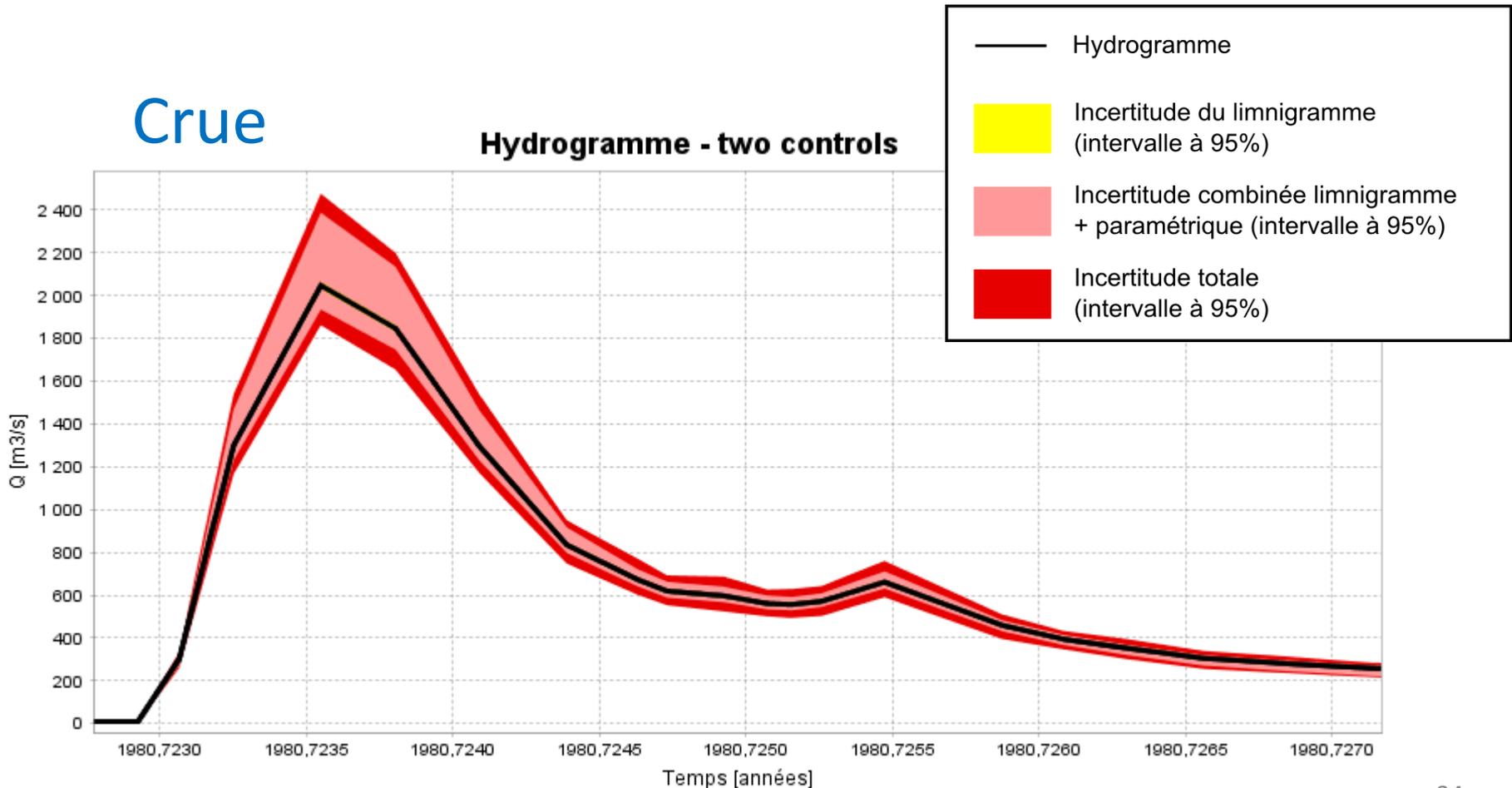


# Bilans d'incertitude

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

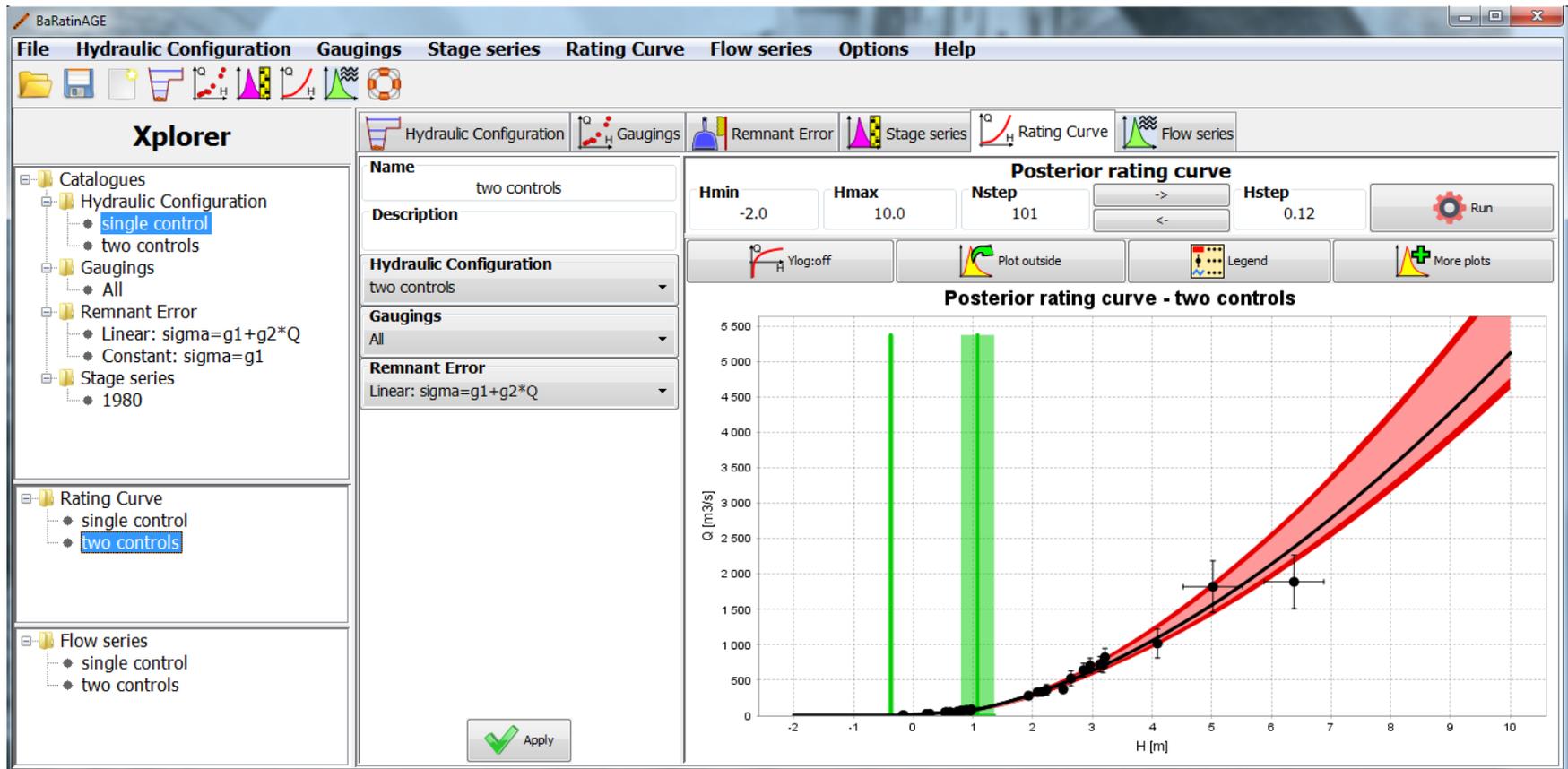
Crue

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](mailto: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) 126166

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Hydrology

ELSEVIER

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://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



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

Rodrigo...

AGU PUBLICATIONS

**Water Resources Research**

RESEARCH ARTICLE

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

10.1002/2016WR020225

David Oclot<sup>1</sup>, Nataliya Le Vine<sup>1</sup>, Ida Westerberg<sup>2</sup>, Florian Pappenberger<sup>3,4</sup>, and Wouter Buytaert<sup>1</sup>

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



AGU PUBLICATIONS



**Water Resources Research**

RESEARCH ARTICLE

High-Elevation Evapotranspiration Estimation Using Streamflow and NASA Airborne Snow Observations to Close the Upper Tuolumne River Water Balance

10.1002/2017WR020473

Key Points:

- Distributed streamflow and evapotranspiration estimates



Advances in Water Resources 105 (2017) 51–66

Contents lists available at ScienceDirect

Advances in Water Resources

ELSEVIER

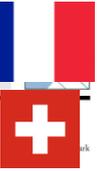
journal homepage: [www.elsevier.com/locate/advwatres](http://www.elsevier.com/locate/advwatres)

Original Article

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

Anna E. Hanes (Eds)

138-02913-2




Water Resour Manage (2016) 30:3191–3205

DOI 10.1007/s11269-016-1340-8

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

Ayoub Zeroul<sup>1,2</sup> · Mohamed Meddi<sup>1</sup> · Ali A. Assani<sup>2</sup>



USGS

science for a changing world



Hanes (Eds)

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

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. Lundquist<sup>1</sup>, James W. Roche<sup>2</sup>, Harrison Forrester<sup>2</sup>, Courtney Moore<sup>3</sup>, Eric Keenan<sup>4</sup>, Gwyneth Perry<sup>5</sup>, Nicoleta Cristea<sup>1</sup>, Brian Henn<sup>1</sup>, Karl Lapo<sup>1</sup>, Bruce McGurk<sup>1</sup>, Daniel R. Coon<sup>3,6</sup>, and Michael D. Dettinger<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington, Seattle, Washington, USA; <sup>2</sup>National Park Service, Yosemite, California, USA; <sup>3</sup>Northwest Hydraulic Consultants, Seattle, Washington, USA; <sup>4</sup>McGurk Hydrologic, Seattle, Washington, USA; <sup>5</sup>Northwest Hydraulic Consultants, Seattle, Washington, USA; <sup>6</sup>Northwest Hydraulic Consultants, Seattle, Washington, USA; <sup>7</sup>Northwest Hydraulic Consultants, Seattle, Washington, USA



Earth Syst. Sci. Data, 10, 1985–2000, 2018

https://doi.org/10.5194/essd-10-1985-2018

© Author(s) 2018. This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Open Access

Earth System Science Data

Bruce M. Hanes (Eds)

138-02913-2

ARTICLE

Water and sediment fluxes in Mediterranean

World Environmental and Water Resources Congress 2016

A Bayesian Approach for the Evaluation of Rating Curve Uncertainties in Flood Frequency Analyses

A. L. N. A. Osorio<sup>1</sup> and D. S. Reis Jr., Ph.D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Brasilia, Brasilia 70.910-900. E-mail: [osorio.analisa@gmail.com](mailto:osorio.analisa@gmail.com)

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Brasilia, Brasilia 70.910-900. E-mail: [direceires@unb.br](mailto:direceires@unb.br)




ABSTRACT: The USGS is engaged in both internal development and collaborative efforts to improve existing methods for characterizing the uncertainty of streamflow measurements (gaging stations), 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 streamflow measurements, and illustrates the results of their application to the ratings of two USGS streamflow gaging stations.

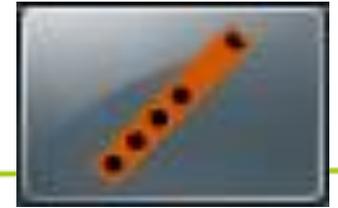
1 INTRODUCTION

The U.S. Geological Survey (USGS) collects stream discharge records at more than 8,100 streamgages across the United States primarily derived from streamflow measurements. The streamflow data are used to estimate stream discharge. The streamflow data are used to estimate stream discharge. The streamflow data are used to estimate stream discharge.

surface exhibits no break in slope, stream reach channel geometry, slope determine the shape of the flow is said to be under "channel control" features in a channel may exert influence on the streamflow data.



# 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](mailto: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

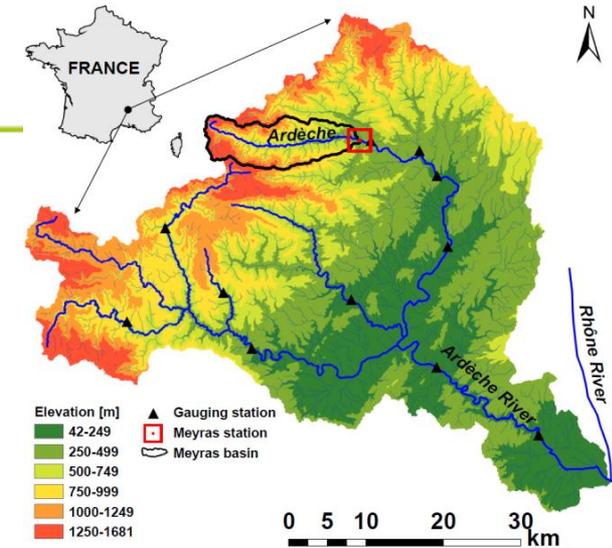


# TP2 – L'Ardèche à Meyras

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

Bassin-versant : 98 km<sup>2</sup>

Débit moyen : 3.69 m<sup>3</sup>/s



PÉRIODE DE RETOUR DE CRUE (en m<sup>3</sup>/s)

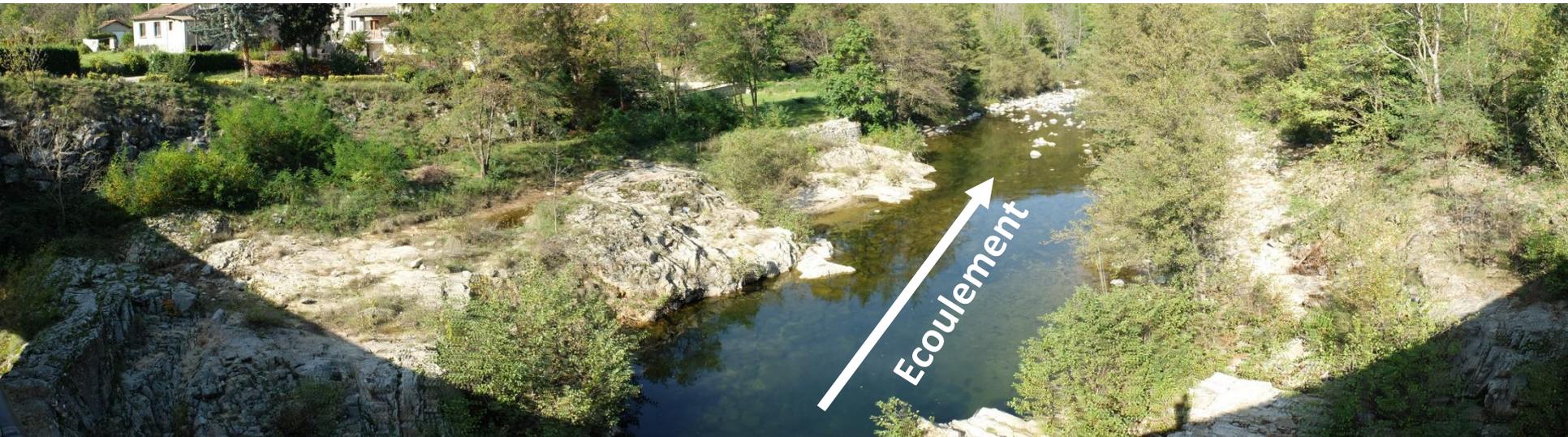
Période de retour de crue	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans
Débit instantané calculé	150	240	290	350	420



# TP2 – L'Ardèche à Meyras

Identification des contrôles (section/chenal) :

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



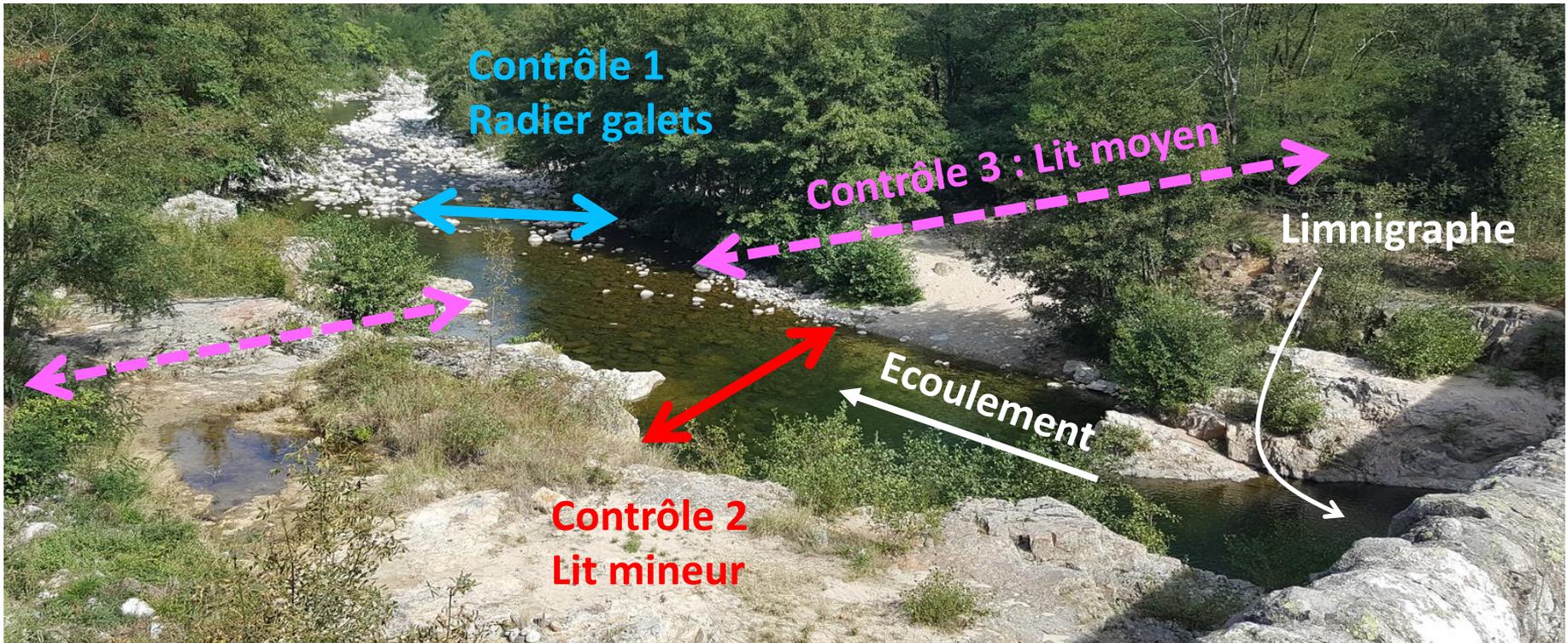
# TP2 – L'Ardèche à Meyras

Identification des contrôles (section/chenal) :



# TP2 – L'Ardèche à Meyras

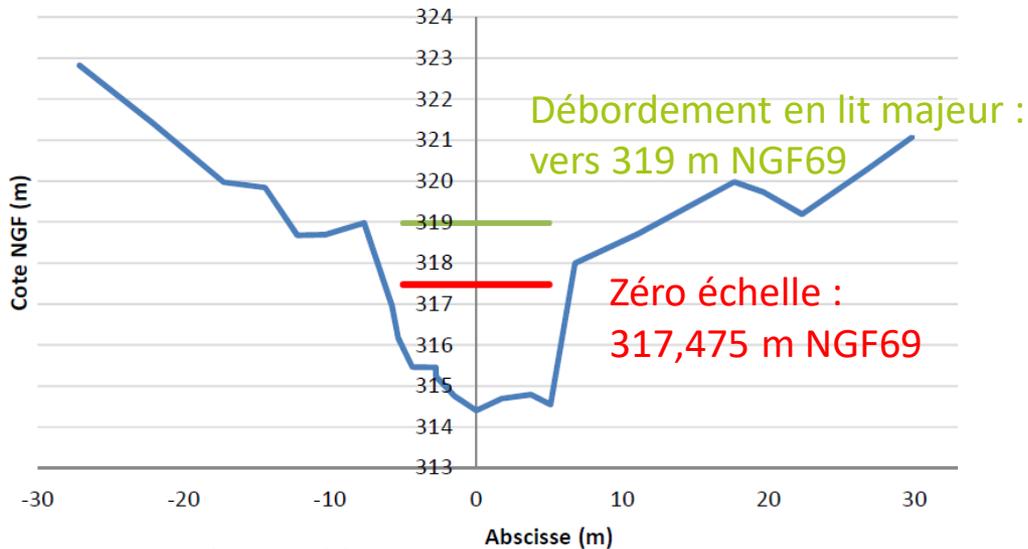
Identification des contrôles (section/chenal) :



# 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 = ?

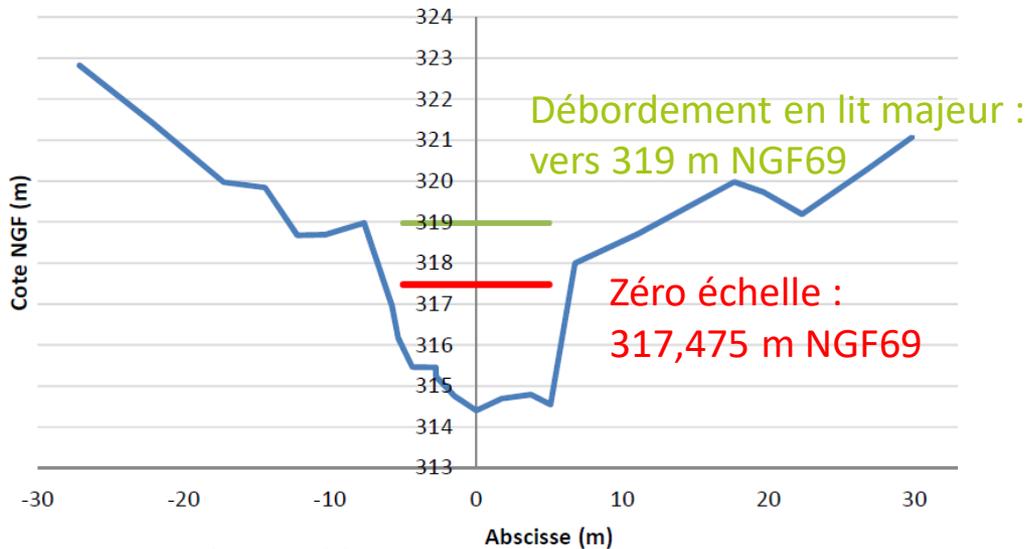
K3 = ?

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 :

$$B1 = 8 \pm 4 \text{ m}$$

$$k1 = 0 \pm 1 \text{ m}$$

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

$$B2 = 15 \pm 5 \text{ m}$$

$$S2 = 5 \pm 5 \text{ m/km}$$

$$K2 = 25 \pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$k2 = 0 \pm 1 \text{ m}$$

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

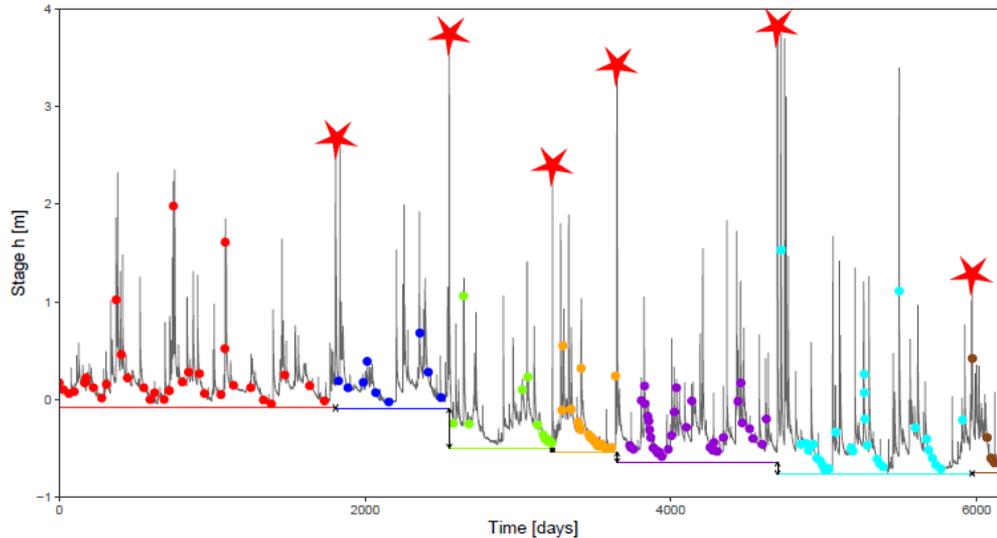
$$B3 = 30 \pm 10 \text{ m}$$

$$S3 = 5 \pm 5 \text{ m/km}$$

$$K3 = 15 \pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

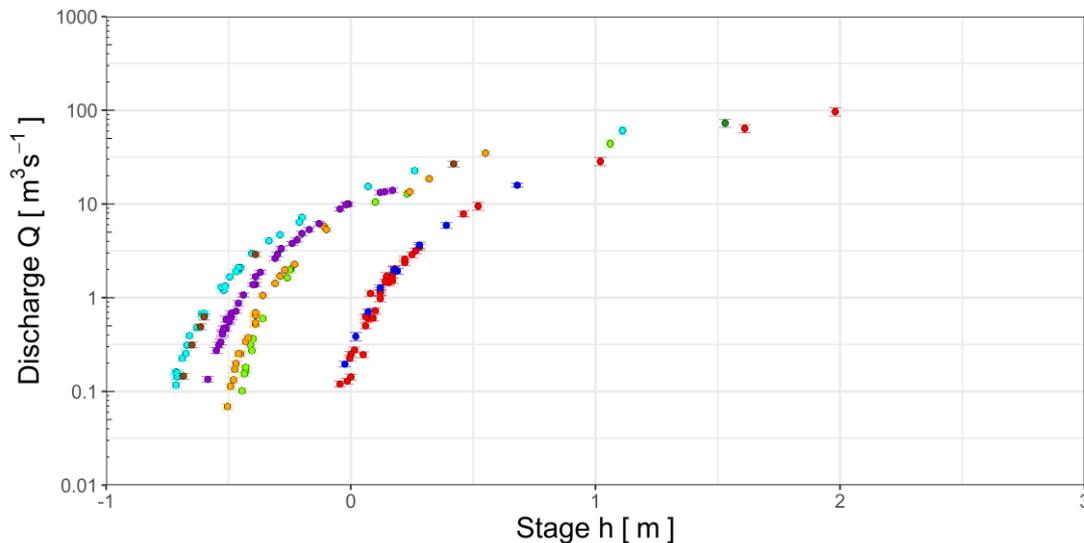
$$k3 = 1.2 \pm 0.5 \text{ m}$$

# 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

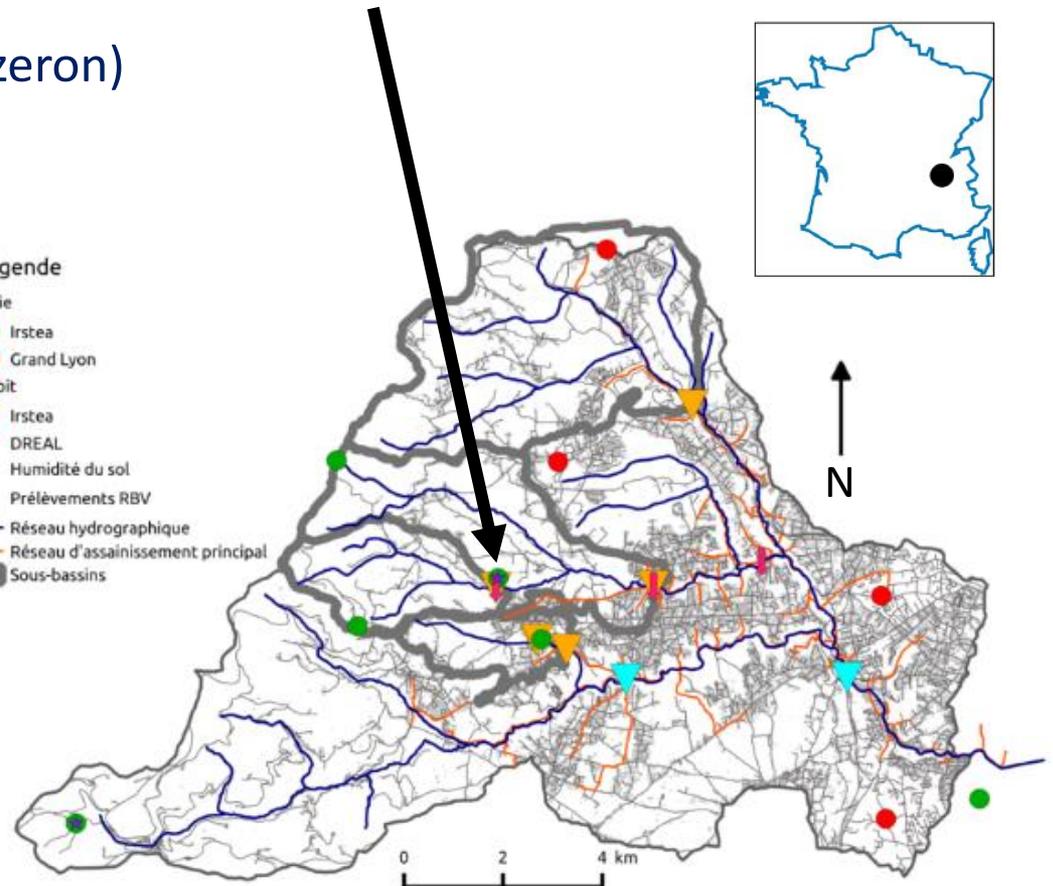
- Station « Mercier au pont D610 » (V3015810)
- Suivi hydrométrique sur le bassin-versant de l'Yzeron (ouest de Lyon, France) depuis 1997
- Station INRAE  
(Observatoire OTHU – site BV Yzeron)

<https://bdoh.irstea.fr/YZERON/>



## Légende

- Pluie
  - Irstea
  - Grand Lyon
- Débit
  - ▼ Irstea
  - ▼ DREAL
- Humidité du sol
  - ★
- Prélèvements RBV
  - ↓
- Réseau hydrographique
  -
- Réseau d'assainissement principal
  -
- Sous-bassins
  -



# 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

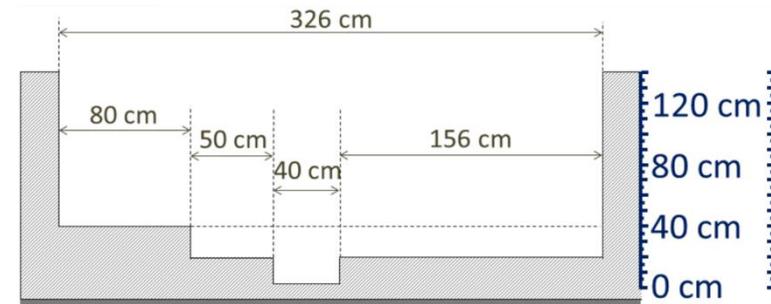
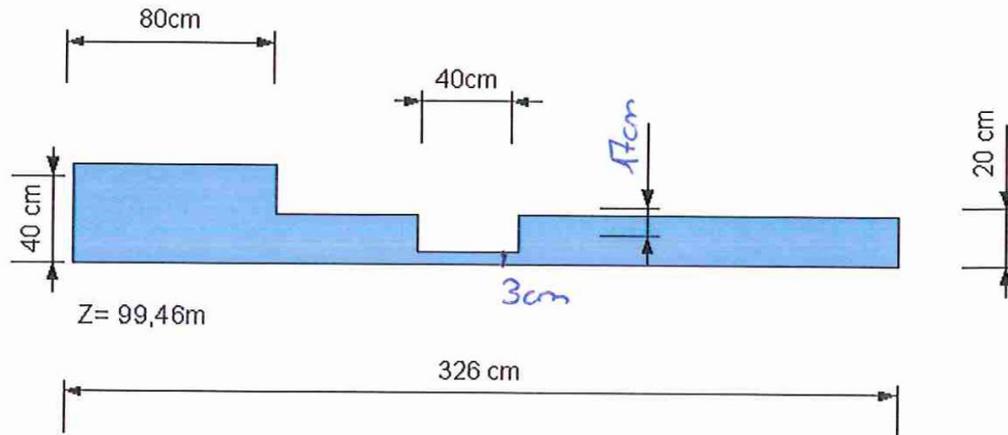
Résumez le modèle de courbe de tarage à estimer

# 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)	$0.03 \pm 0.02$	$0.40 \pm 0.02$	$1.5 \pm 0.05$
Déversoir rectangulaire (Contrôle 2)	$0.20 \pm 0.02$	$2.06 \pm 0.10$	$1.5 \pm 0.05$
Déversoir rectangulaire (Contrôle 3)	$0.40 \pm 0.02$	$0.8 \pm 0.05$	$1.5 \pm 0.05$