

Repenser l'exploitation des stations limnimétriques

La gestion dynamique de la
relation Hauteur Débit

Présenté par
Thomas Morlot

Encadré par
Anne-Catherine Favre (LTHE)
Christian Perret (EDF)



Journées de l'Hydrométrie
6 Février 2012



Repenser l'exploitation des stations limnimétriques

1. Contexte de l'étude
2. Rappels de la méthodologie actuelle
3. Construction d'un modèle de tracé des courbes (Gestion dynamique) avec Intervalle de confiance
4. Vérification de la calibration du modèle
5. Proposition d'un outil d'aide à la gestion des points de mesure
6. Conclusions





Situation actuelle

(1) « La relation hauteur-débit (la courbe de tarage) est stable durant une période donnée »

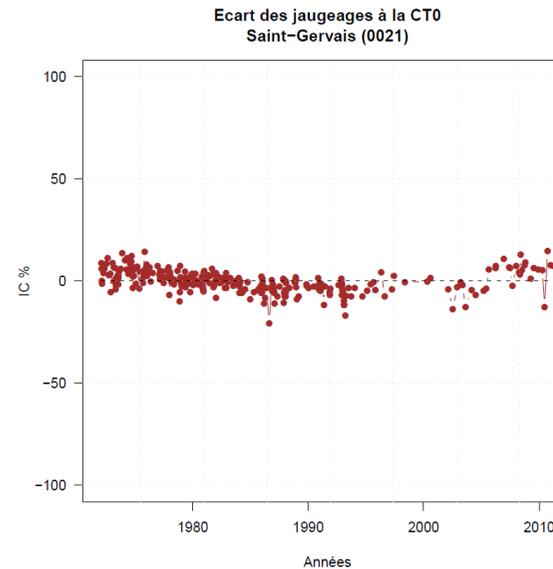
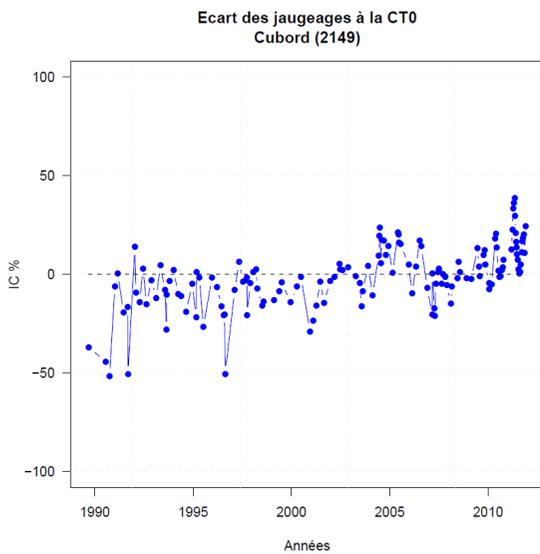
(2) « La courbe de tarage est considérée comme la meilleure estimation de la relation hauteur-débit et les mesures ponctuelles de débit (jaugeages) permettent d'estimer la variance de cette relation »

Deux principes énoncés (pas concrétisés en opérationnel)

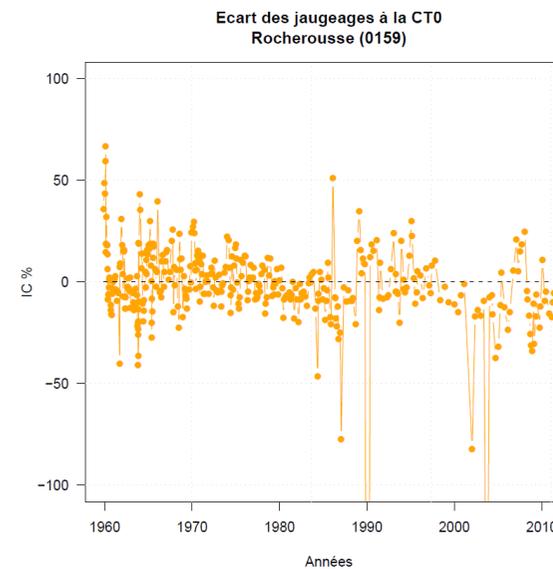
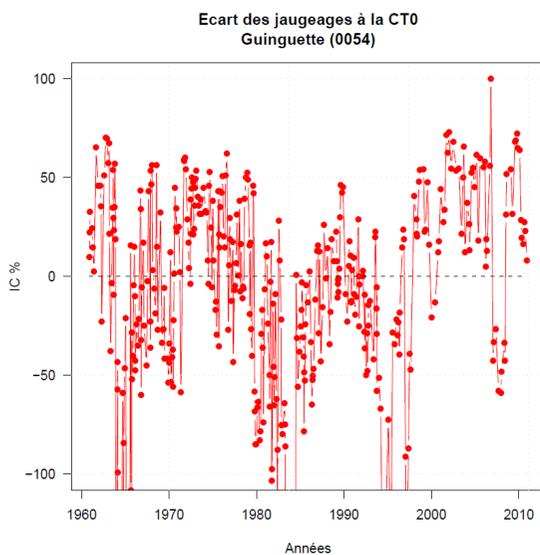
R.GARCON 2000 – Application intégrée d'aide à la gestion des courbes de tarage. Document interne EDF

(3) « Un jaugeage apporte le maximum de son information le jour de sa réalisation et son intérêt décroît ensuite en fonction du temps »

(4) « Un jaugeage apporte le maximum de son information pour le débit qu'il est censé représenter et son intérêt est moindre si on s'éloigne de celui-ci »



Il est souvent difficile
de constituer un
échantillon
homogène de
jaugeages à
partir d'une
vision
chronologique





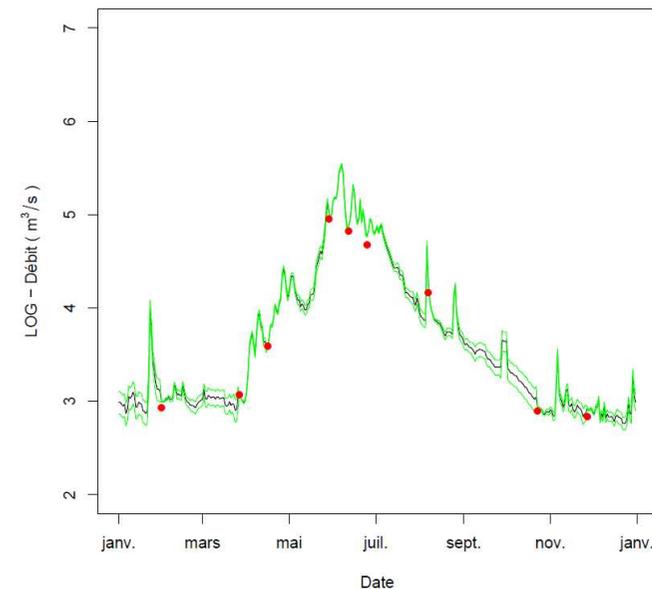
Dans les cas moyennement stable ou instable

- ★ La capacité à produire une Courbe de Tarage n'est pas adaptée aux changements de la relation Hauteur-Débit
- ★ L'estimation de débit est relativement incertaine car elle résulte du croisement de nombreuses incertitudes (La sensibilité de la section de mesure , L'incertitude des jaugeages , L'incertitude du tracé de la courbe de tarage)
- ★ L'incertitude finale associée reste particulièrement difficile à estimer

Où on veut aller...?

- ➔ Une Gestion plus dynamique de la courbe de tarage, pour mieux prendre en compte la variabilité des conditions d'écoulement
- ➔ Un modèle d'estimation de l'incertitude

Année 1985 avec ses jaugeages associés





Introduire la gestion dynamique de la courbe de tarage

3 principes ...

- ★ Un nombre important de jaugeages permet de construire un modèle d'incertitude sur la forme
J-P. ANDRIEU, R.GARCON 2002 - Précision des débits dans les stations hydrométriques. Document interne EDF
- ★ L'approche variographique permet de construire un modèle d'incertitude sur le vieillissement
J. JALBERT, T.MATHEVET, A-C. FAVRE 2010 – Temporal uncertainty estimation of discharges from rating curves using a variographic analysis. Journal of hydrology
- ★ Le jaugeage est le meilleur estimateur de la relation H/Q à un instant donné
C. PERRET 2010 – Vers une gestion dynamique des relations Hauteur Débit – Modélisation des incertitudes. Document interne EDF



... Déclinés en 5 étapes

1. Construction d'une courbe CT0

2. Détermination d'un IC à 67% de la CT0



3. {
- 3.1 **1^{er} tracé**: Détermination de N courbes de tarage (*une par jaugeage*)
 - 3.2 Calcul d'un **1^{er} variogramme** en fonction du temps
4. {
- 4.1 **2nd tracé**: Détermination de N courbes de tarage (*une par jaugeage*)
 - 4.2 Calcul d'un **2nd variogramme** en fonction du temps

5. Et enfin la construction d'un IC final



Étape 1: Tracé de la courbe « CT 0 »

- La courbe CT 0 consiste à trouver une loi qui optimise au mieux un ensemble de jaugeages.
- En première approche, nous prendrons tous les jaugeages d'une station d'hydrométrie donnée, et on y ajustera une loi de la forme :

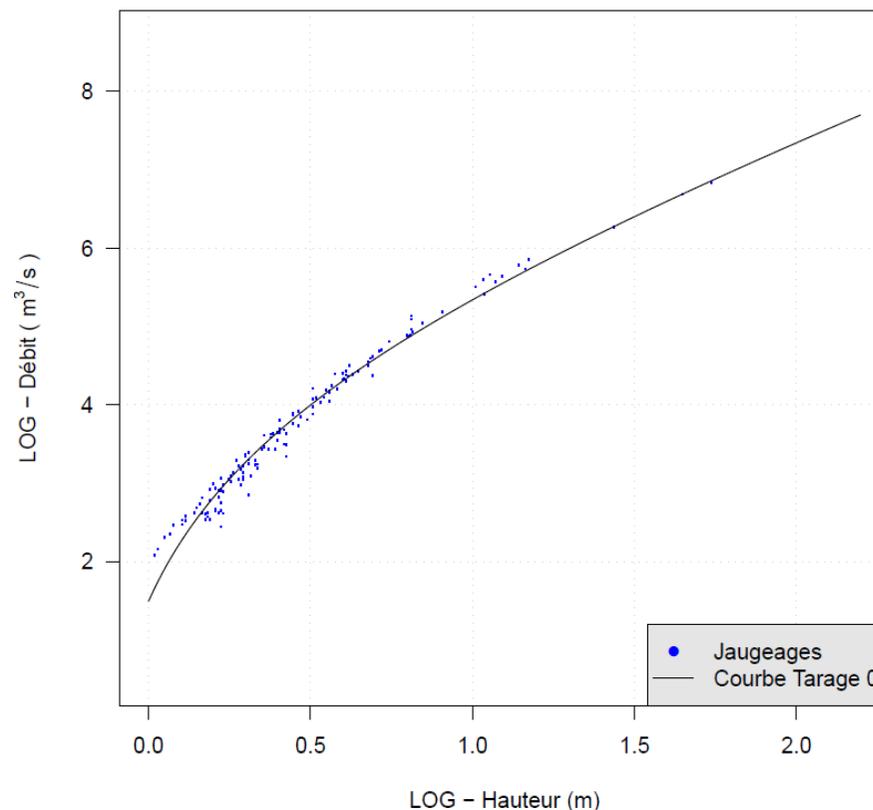
$$Q = a.(H - H_0)^b$$

Où a , b et H_0 sont des coefficients à caler

a et b à l'aide d'une régression linéaire simple

H_0 (hauteur d'eau pour laquelle le débit est nul) à l'aide d'un solveur

Courbe CT0 à la station Cubord (2149)





Étape 2: Afficher un IC à 67% à la CT0

On estime un intervalle de confiance initial en supposant deux termes d'incertitude

$$IC_{Initial} = k \cdot \sqrt{I_r^2 + S_e^2}$$

Part de l'incertitude liée à la mesure de la hauteur et à la sensibilité de la relation H/Q (supposée à 67%)

Part de l'incertitude (à 67%) liée au tracé de la CT (dans la zone de validité de la courbe)



Cette incertitude basée sur la *CT0* constituera alors notre intervalle de confiance initial à 67% ($k = 1$) et sera adapté à toutes nos courbes de tarage



Étape 2.1: Incertitude I_r liée à la mesure de la hauteur et à la sensibilité de la relation H/Q

Sur une station, il faut distinguer :

♥ La sensibilité S :

C'est la variation qui correspond à l'unité de lecture en hauteur (le cm ou le ½ cm au mieux): $S = \Delta Q / Q / cm$

La sensibilité traduit la qualité hydrométrique intrinsèque d'une section de mesure, indépendamment de tout équipement ou de la gestion de cet équipement. Elle sera calculée centimètre par centimètre le long de la CT0.

♥ La précision des capteurs P :

Elle est directement fonction des caractéristiques du matériel installé sur la section de mesure. Elle est fournie à partir des données constructeurs et des certificats d'étalonnage.

♥ Le calage des capteurs C :

Il traduit la qualité du suivi temps réel du site, et il correspond à l'adéquation entre la cote à l'échelle limnimétrique de référence, et celle affichée et/ou enregistrée sur le capteur. Sa précision est directement celle de la lecture échelle. Elle est indépendante de la précision P de l'appareil de mesure lui-même.

➔ Qualité globale de la donnée transmise en temps réel :

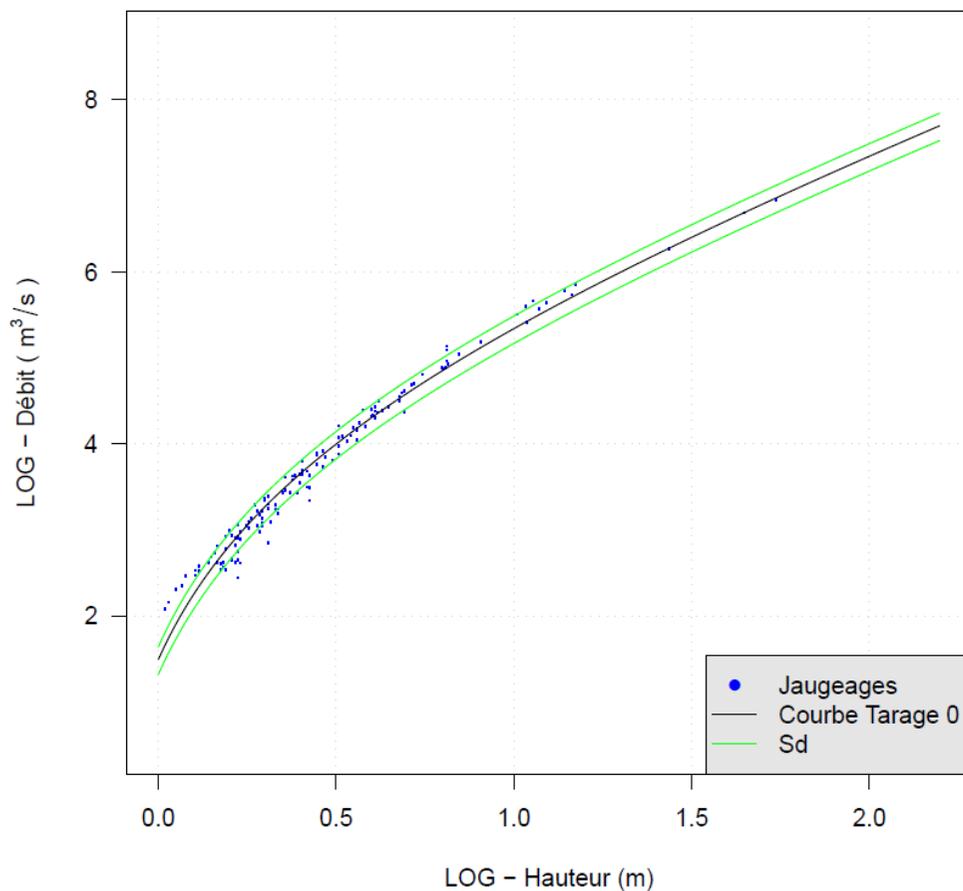
Sur la base des éléments des paragraphes précédents, l'incertitude relative I_r associée à la qualité globale de la station de mesure $\Delta Q/Q$ supposée à 67% selon les paramètres P et C choisis est égale à:

$$I_r = \frac{\Delta Q}{Q} = S \cdot \sqrt{P^2 + C^2}$$



Étape 2.2 : Incertitude Se liée au tracé de la CT

Courbe CT0 à la station Cubord (2149)



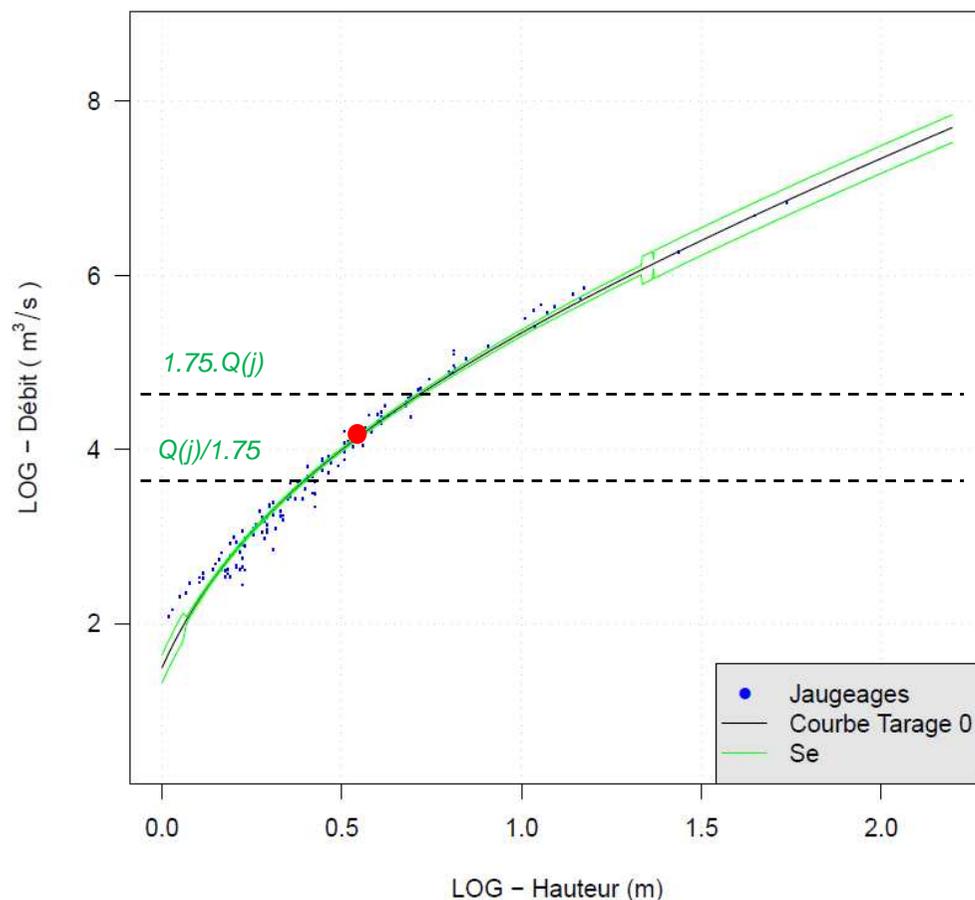
♥ Dispersion des points autour de la CT0:

$$S_d = k \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{jaugé} - Q_{courbe} * 100}{Q_{courbe}} \right)^2}{n-2}}$$



Étape 2.2 : Incertitude S_e liée au tracé de la CT

Courbe CT0 à la station Cubord (2149)



On travaillera alors point par point i de la CT0, en ne considérant que les j jaugeages explicatifs autour de ce point

$$S_e = \frac{S_d}{\sqrt{j}}$$

Les jaugeages explicatifs du point $Q(j)$ sont ceux compris entre $Q(j)/\alpha$ et $\alpha \cdot Q(j)$

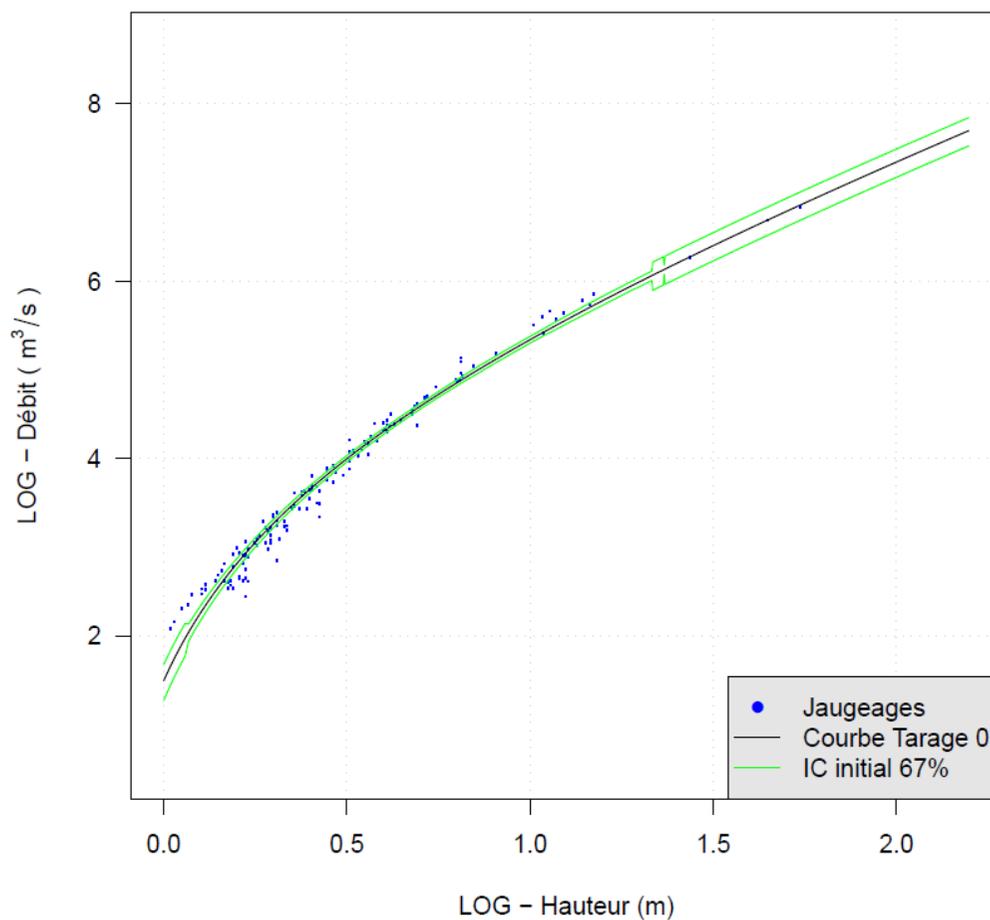
($\alpha=1,75$ par convention)

Pour les tronçons peu jaugeés de la courbe, à savoir pour les points i contenant moins de 8 jaugeages explicatifs, on prendra $S_e=S_d$



Intervalle de confiance initial à 67 %

Courbe CT0 à la station Cubord (2149)



● ● ● $IC_{Initial} = k \cdot \sqrt{I_r^2 + S_e^2}$



Étape 3.1 : Pour chaque jaugeage on trace une courbe de tarage (1^{er} tracé)

➔ On trace la CT i selon ces hypothèses :

🧐 Hypothèse 1:

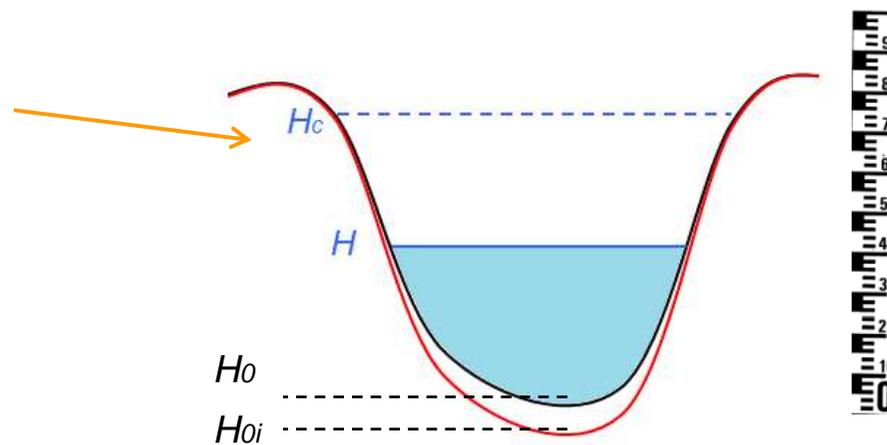
Les N courbes de tarage passe par un point de convergence P_c situé sur la CT0 à haut débit
On fait l'hypothèse que la variation de section a peu d'effets à très haut débit

🧐 Hypothèse 2:

La courbe de tarage i passe par le point de jaugeage $P_j(i)$

🧐 Hypothèse 3:

On décale les points de jaugeages pour les ramener dans le référentiel du jaugeage i considéré avec une pondération qui dépend de la hauteur du jaugeage i .



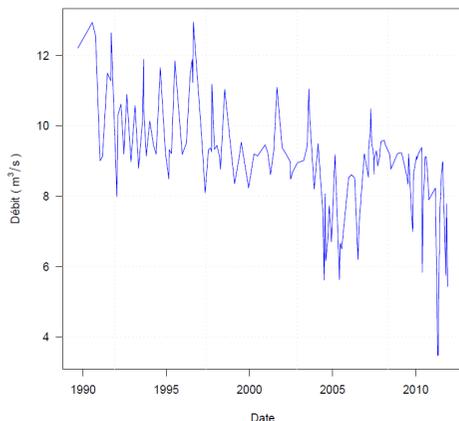
1^{er} tracé des N courbes (une par jaugeage)



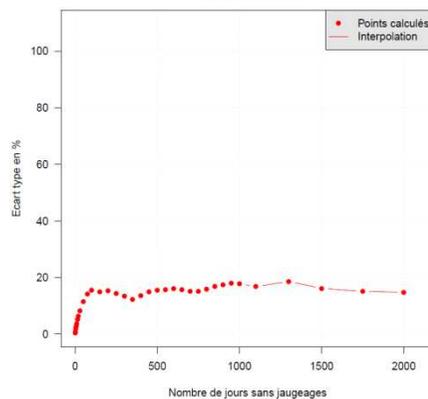
Étape 3.2: variogramme en fonction du temps pour modéliser le vieillissement d'un jaugeage

H=1.1m

Chronique de débits pour H= 1.1 m
Cubord (2149)

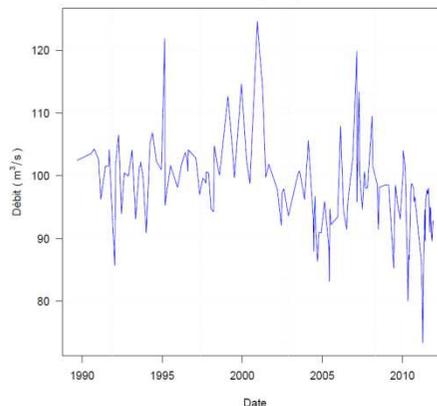


Variogramme pour H= 1.1 m
Cubord (2149)

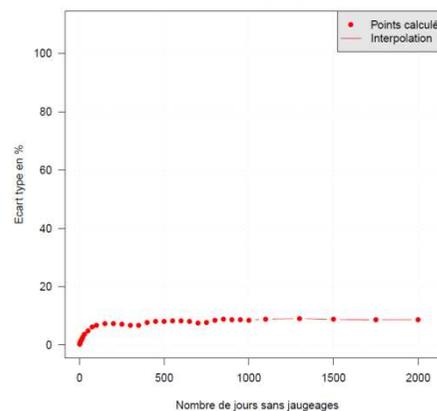


H=2m

Chronique de débits pour H= 2 m
Cubord (2149)

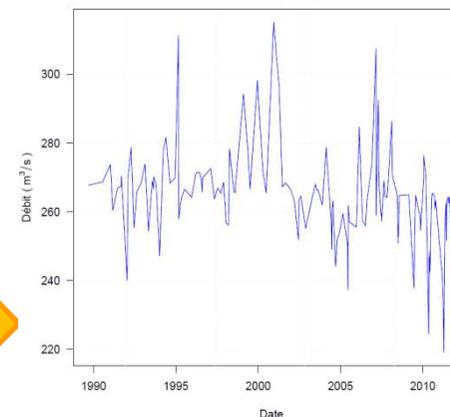


Variogramme pour H= 2 m
Cubord (2149)

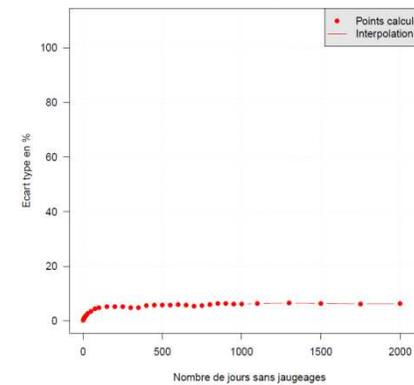


H=3m

Chronique de débits pour H= 3 m
Cubord (2149)



Variogramme pour H= 3 m
Cubord (2149)



(Répétition sur la gamme de la CT)



Étape 3.2: variogramme en fonction du temps pour modéliser le vieillissement d'un jaugeage

Exemple pour une Hauteur de 0.9m et un Δt de 12 jours:

$\Delta t = 12j$

$H = 0.9m$

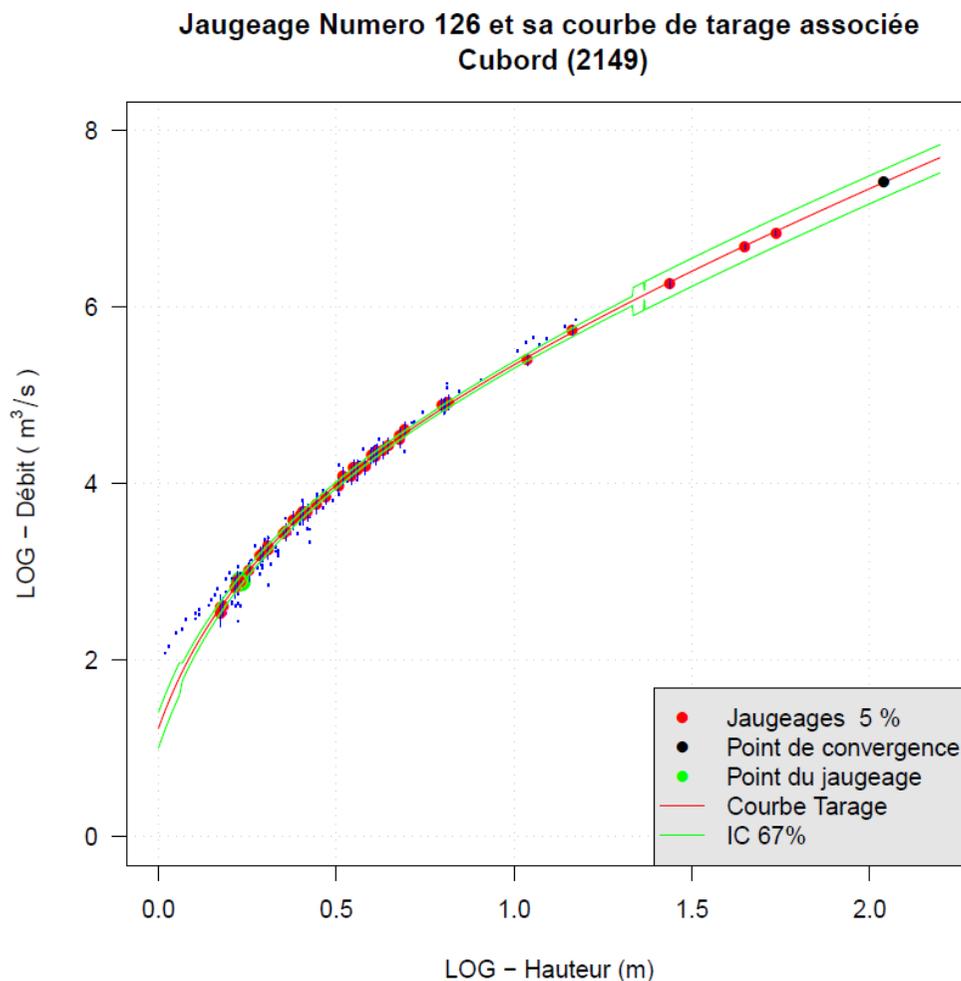
	$\Delta t=1j$	$\Delta t=2j$	$\Delta t=5j$	$\Delta t=7j$	$\Delta t=10j$	$\Delta t=15j$	$\Delta t=20j$...	$\Delta t=750j$	$\Delta t=800j$	$\Delta t=850j$	$\Delta t=900j$	$\Delta t=950j$	$\Delta t=1000j$
H=0.05m	0.01%	1.25%	2.55%	3.29%	4.28%	5.72%	6.96%	...	34.67%	36.14%	37.21%	38.60%	39.91%	40.79%
H=0.1m	0.67%	1.20%	2.46%	3.17%	4.12%	5.51%	6.70%	...	33.25%	34.63%	35.62%	36.92%	38.13%	38.98%
H=0.2m	0.62%	1.10%	2.29%	2.95%	3.85%	5.15%	6.25%	...	30.84%	32.06%	32.94%	34.09%	35.16%	35.93%
H=0.3m	0.57%	1.03%	2.14%	2.76%	3.61%	4.82%	5.86%	...	28.78%	29.88%	30.67%	31.69%	32.65%	33.36%
H=0.4m	0.53%	0.96%	2.00%	2.60%	3.39%	4.54%	5.52%	...	27.00%	27.99%	28.70%	29.63%	30.50%	31.15%
H=0.5m	0.49%	0.89%	1.88%	2.45%	3.20%	4.29%	5.21%	...	25.41%	26.32%	26.97%	27.81%	28.59%	29.20%
H=0.6m	0.46%	0.84%	1.77%	2.31%	3.03%	4.06%	4.93%	...	23.98%	24.82%	25.41%	26.18%	26.90%	27.47%
H=0.7m	0.43%	0.79%	1.68%	2.18%	2.87%	3.84%	4.67%	...	22.68%	23.45%	24.00%	24.70%	25.36%	25.89%
H=0.9m	0.36%	0.66%	1.42%	1.86%	2.45%	3.29%	3.99%	...	19.34%	19.95%	20.38%	20.94%	21.46%	21.90%
H=1.3m	0.30%	0.55%	1.20%	1.58%	2.09%	2.82%	3.43%	...	16.56%	17.06%	17.40%	17.85%	18.27%	18.64%
H=1.5m	0.27%	0.49%	1.08%	1.42%	1.89%	2.55%	3.10%	...	14.93%	15.36%	15.66%	16.05%	16.41%	16.74%
H=1.6m	0.25%	0.47%	1.02%	1.35%	1.79%	2.42%	2.95%	...	14.17%	14.57%	14.84%	15.21%	15.55%	15.86%
H=1.9m	0.21%	0.39%	0.86%	1.14%	1.53%	2.07%	2.52%	...	12.04%	12.36%	12.58%	12.88%	13.15%	13.41%
H=2m	0.20%	0.37%	0.81%	1.08%	1.44%	1.96%	2.39%	...	11.37%	11.68%	11.88%	12.16%	12.41%	12.65%

Valeurs σ des erreurs données en pourcentage





Étape 4.1 : Pour chaque jaugeage on trace une courbe de tarage (2nd tracé)



2nd tracé des N
courbes (Une par
jaugeage)

● ● ● Et puis Étape 4.2 : 2nd variogramme en utilisant les N courbes du 2nd tracé



Étape 5: Construction d'un IC final

♥ Pour chaque hauteur, on dispose:

- D'une valeur de l'IC initial à 67% (*issu du modèle CT0*)
- D'une valeur σ correspondant au vieillissement donné par le variogramme

♥ L'IC final à 67% peut alors être donné avec une somme de variances :

$$IC_{Final} = k \sqrt{IC_{Initial}^2 + \sigma^2}$$

IC initial à 67% issu du modèle CT0

Vieillissement après Δt jours (à 67%)

$$\left(IC_{Final} = k \cdot \sqrt{S_e^2 + I_r^2 + \sigma^2} \right)$$



Vérification du modèle

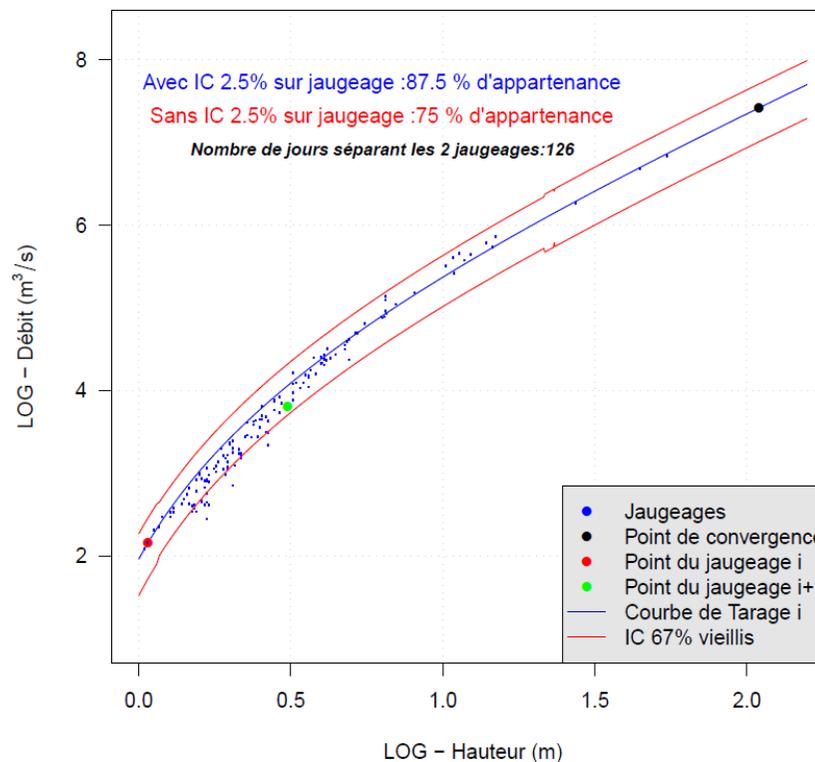
67% des jaugeages devraient rentrer dans $IC_{67\% \text{ Vieillit}}$ calculé à partir du jaugeage précédent

Exemple avec le jaugeage 8 :

1. On trace la courbe de tarage du jaugeage 8 et son IC initial à 67% associé
2. 126 jours séparent le jaugeage 8 du jaugeage 9
3. On « vieillit » l'IC à 67% du jaugeage de 126 jours (avec variogramme)
4. On regarde si le jaugeage 9 se trouve dans ce nouvel intervalle ou non

➔ **65.07 %** d'appartenance en prenant en compte une incertitude sur le jaugeage de 2.5%

Jaugeage Numero 8 et sa courbe de tarage associée
Cubord (2149)



Vérification



Vérification du modèle pour les 45 stations

Vérification

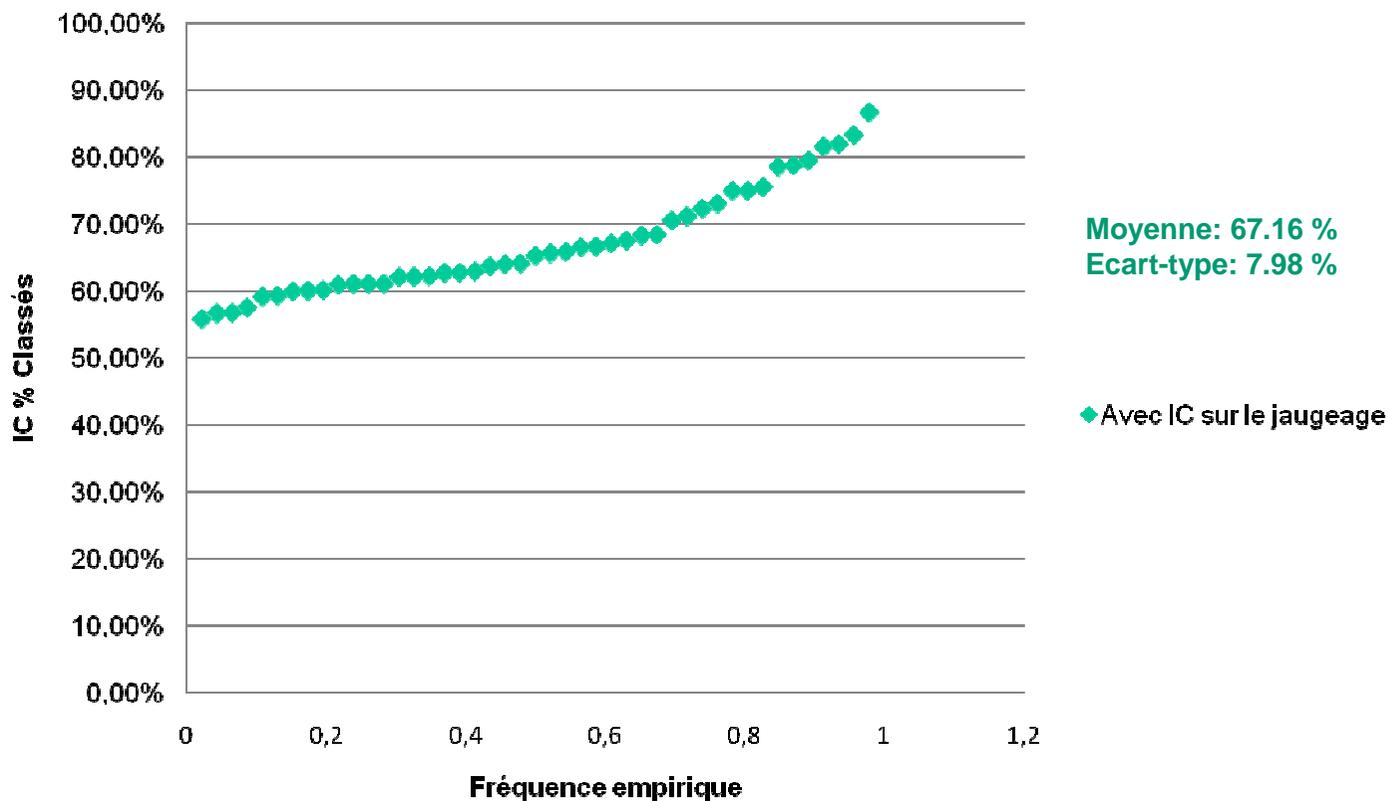
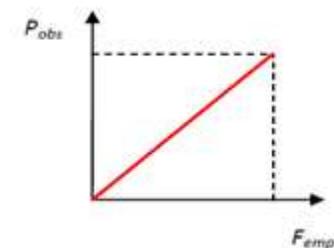
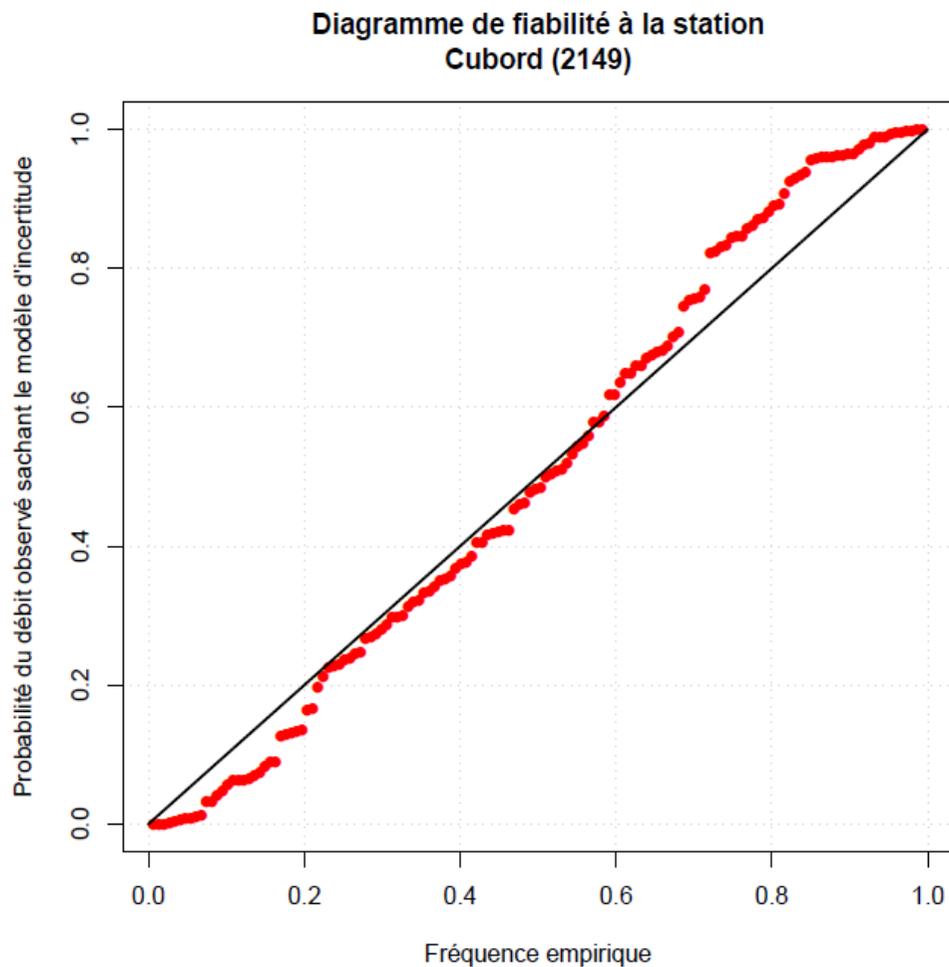
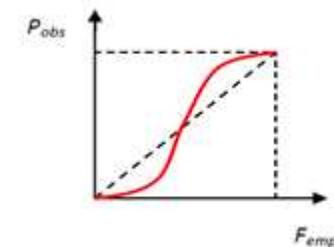




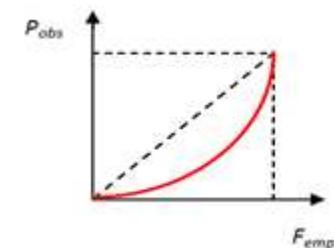
Diagramme de fiabilité (Wilks, 1995)



Prévision Fiable



Prévision sous-dispersive

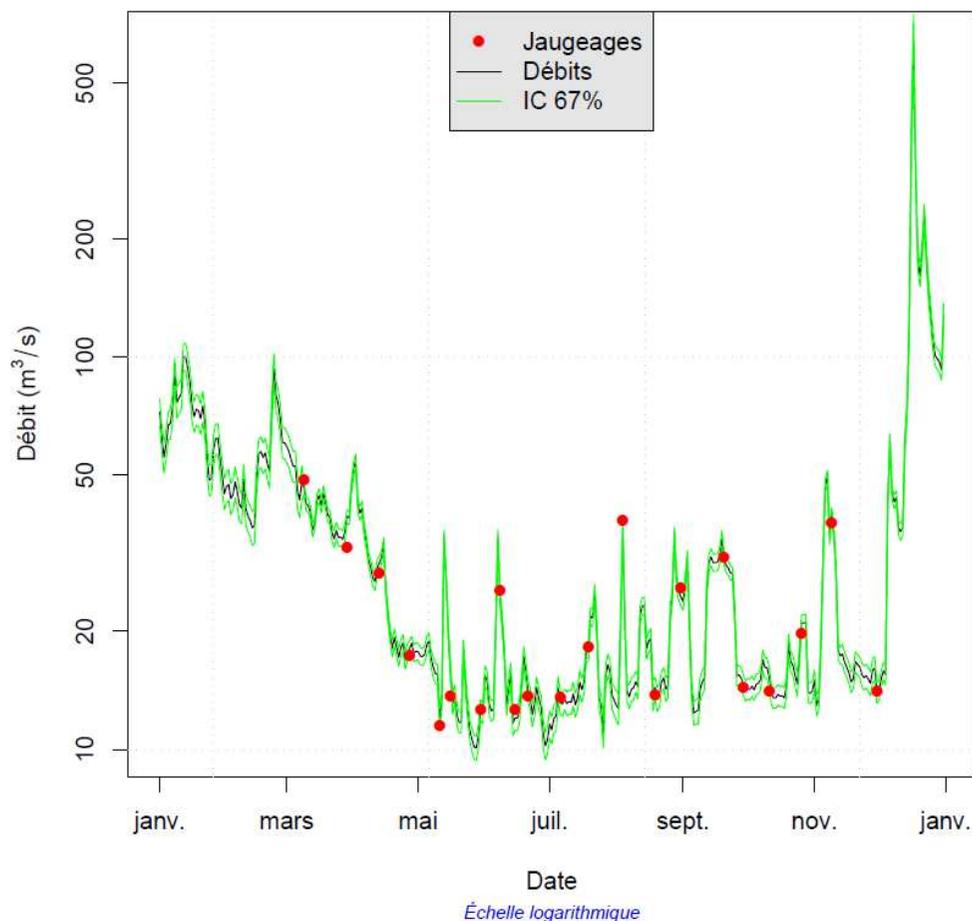


Prévision biaisée



On calcule une chronique de débits à partir de la chronique des hauteurs horaires et des N CT

Année 2011 avec ses jaugeages associés à la station
Cubord (2149)



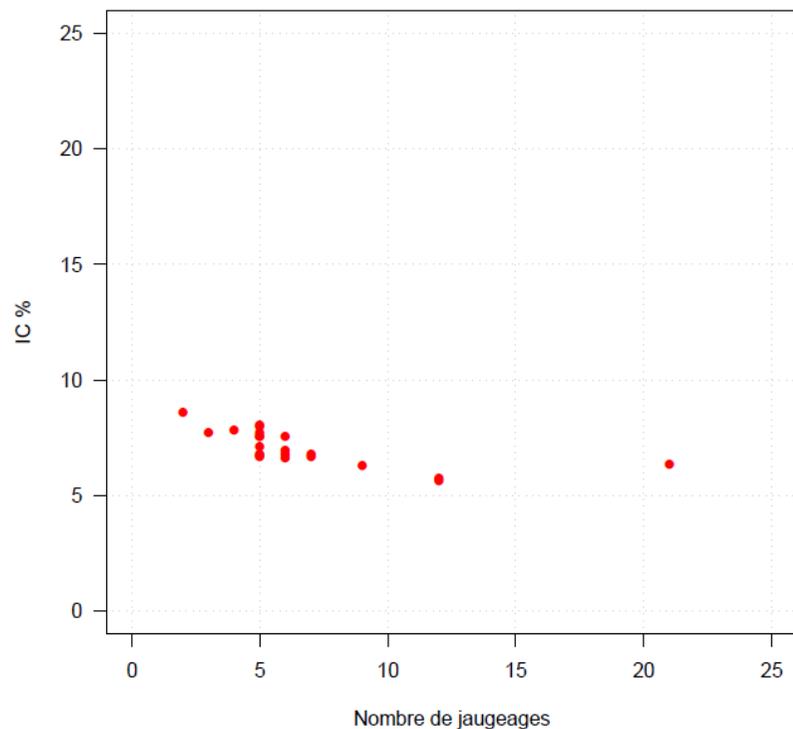
Chronique et IC à
Cubord

Comparaison avec la
méthode historique



Intervalle de confiance VS Nombre de jaugeages et Chronologie

Outil de gestion à la station
Cubord (2149)



Intervalle de Confiance en
fonction du nombre de jaugeages
annuels

Gestion chronologique
Cubord (2149)

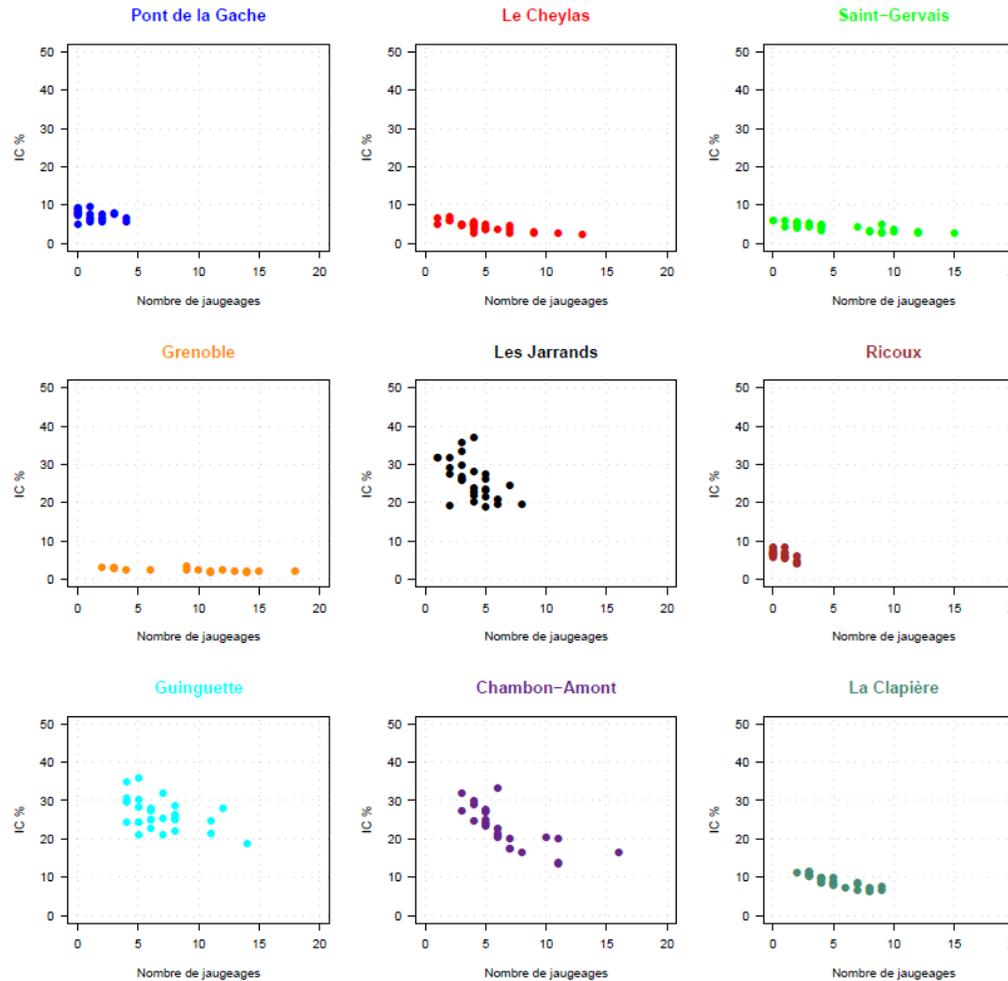


Intervalle de confiance
chronologique dans le temps



Intervalle de confiance VS Nombre de jaugeages et Chronologie

IC% en fonction du nombre de jaugeages annuel





Conclusion

- Première version d'une méthode dynamique du tracé de la courbe de tarage établie
- Méthode d'estimation de l'incertitude
- A terme cette méthode pourrait compléter voir remplacer la méthode existante
- Possibilité de mettre en place un outil d'aide à la gestion de l'exploitation des stations hydrométrique

De nombreuses questions restent cependant posées

- Quand peut-on appliquer cette méthode : vérification de l'hypothèse de stationnarité sur un certain temps?
- Modélisation hydraulique pour conforter les hypothèses lorsqu'on démarre l'exploitation ou pour les extrapolations
- L'incertitude initiale de la CT0 est elle la seule source d'incertitude initiale? Nécessité de prendre en compte une incertitude pour chaque jaugeage (selon méthode, hauts débits...) dans le tracé de la CT0 ?
- Lissage de l'évolution de l'incertitude initiale
- ...

C'est fini...



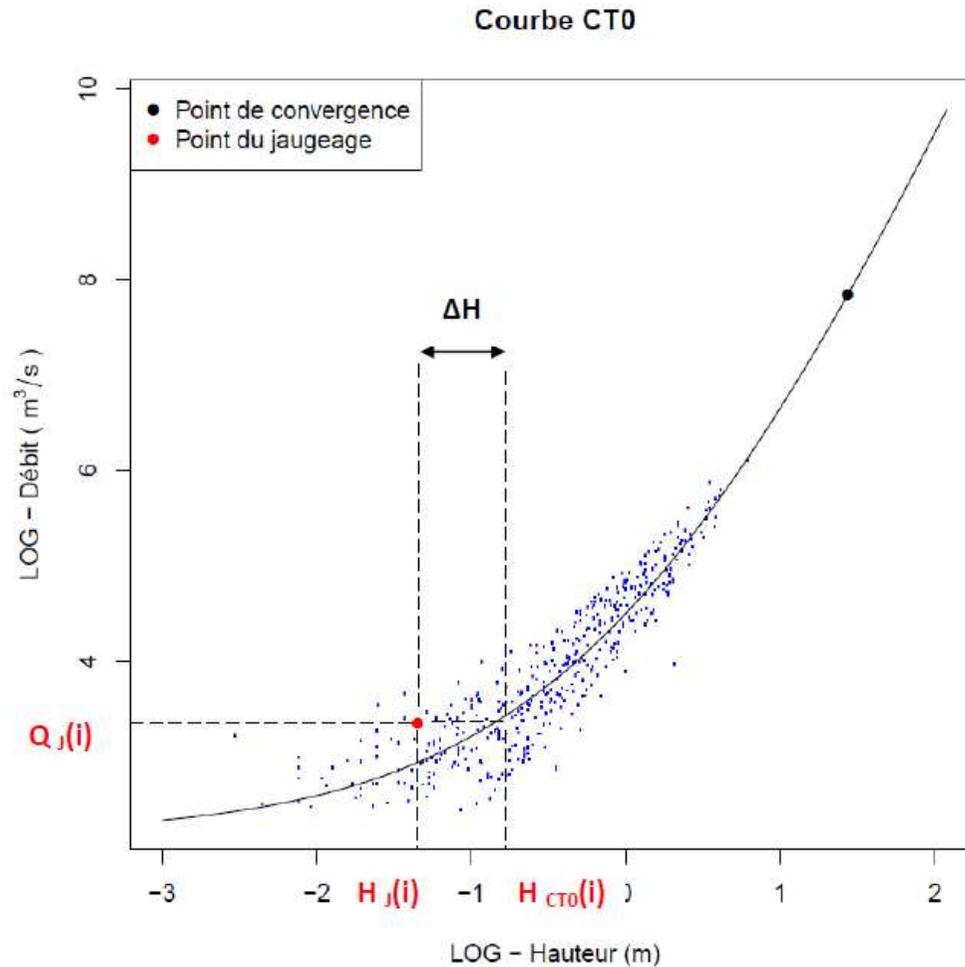
Merci de votre attention !

SLIDES D'EXPLICATION





Étape 3 : Détermination des N courbes de tarage; Hypothèse 1 & 2



Le point du jaugeage i considéré :

$$P_J(i) = [H_J(i), Q_J(i)]$$

Le point de convergence (fixe pour les N courbes) :

$$P_C$$

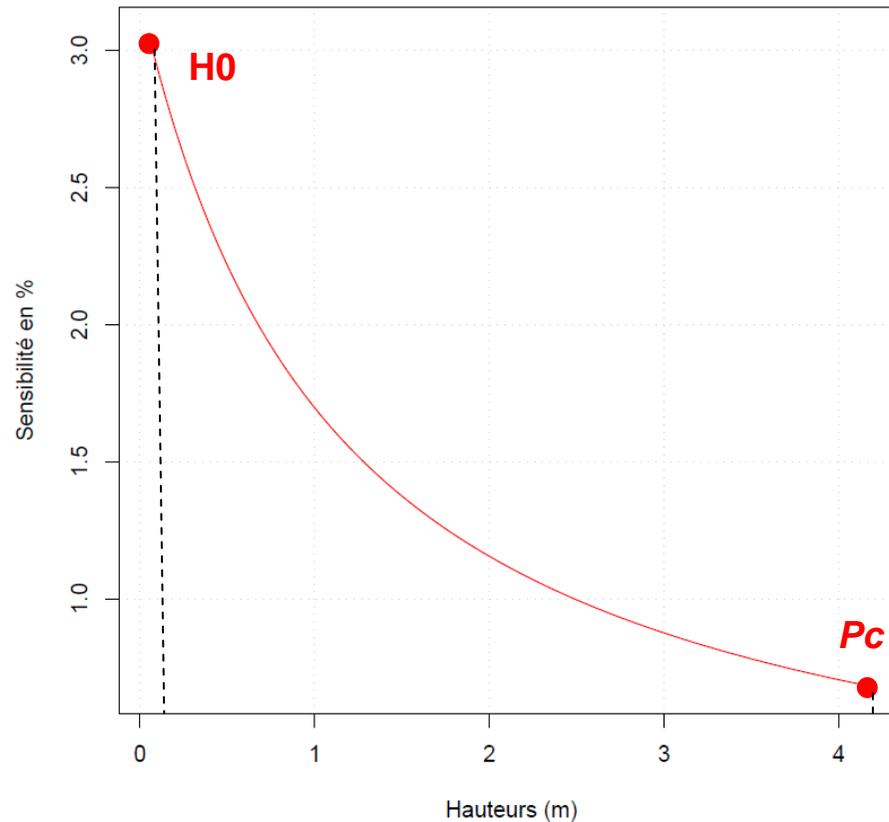
Pour chaque jaugeage, nous évaluons la distance ΔH séparant le jaugeage i en question de la courbe CT0 :

$$\Delta H = H_J(i) - H_{CT0}(i)$$



Étape 3: Détermination des N courbes de tarage ; Hypothèse 3

Sensibilité en fonction de la Hauteur le long de CT0



$$S(j) = \frac{Q_{CT0}(j+1) - Q_{CT0}(j)}{Q_{CT0}(j+1)}$$

$$Poids(j) = \frac{S(j) * 1}{S(1)}$$

Nous disposons alors:

- ✓ d'un vecteur sensibilité S
- ✓ d'un vecteur $Poids$

correspondant à chaque centimètre de la courbe CT0

100%
d'attribution



Diminution proportionnelle du
poids

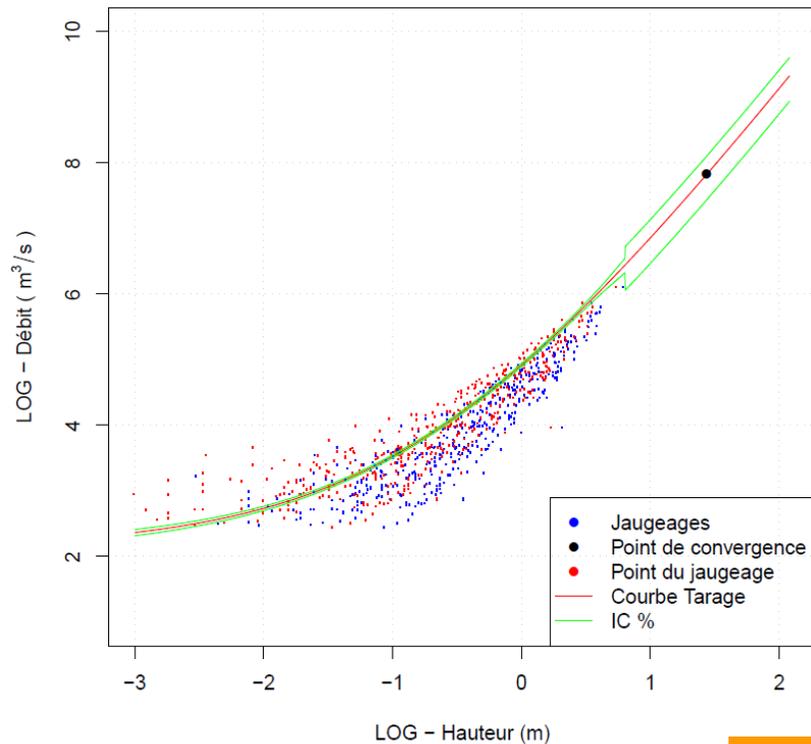


~0%
d'attributio
n

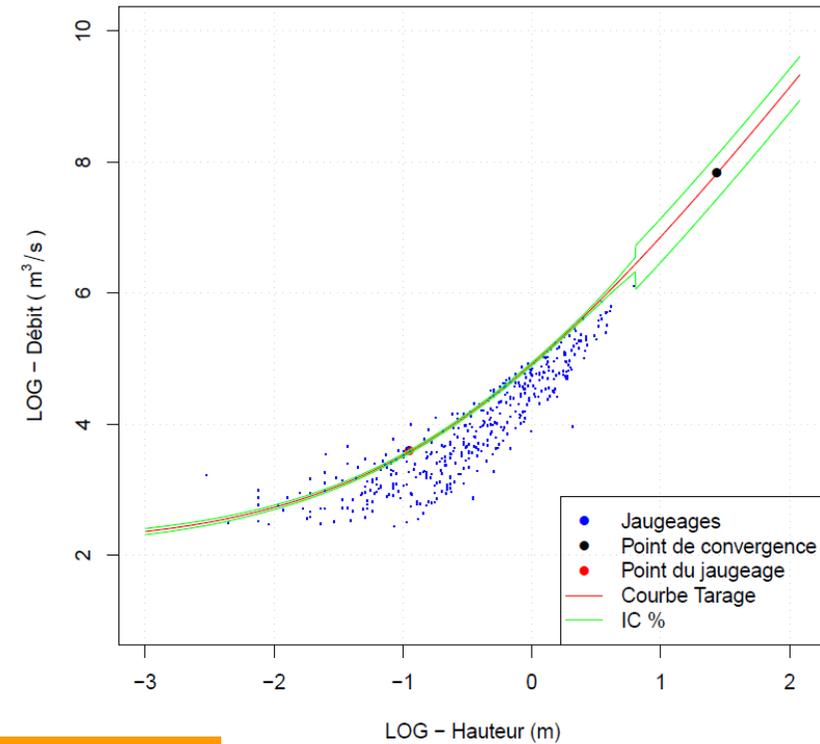


Étape 3: Détermination des N courbes de tarage ; Méthode M1

Jaugeage Numero 31 et sa courbe de tarage associée



Jaugeage Numero 31 et sa courbe de tarage associée



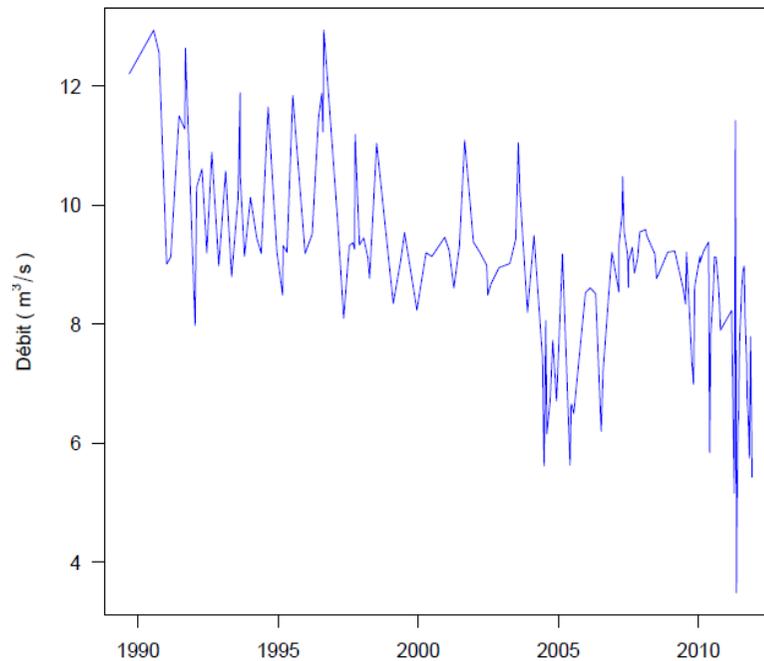
$$H_{New} = H + (\Delta H * Poids(i))$$

- On calcule ainsi, pour les **N jaugeages** les **N courbes de tarage** associées munies de l'IC trouvé à l'aide de la méthode Andrieu
- On associe de poids plus fort dans le régression aux points de convergence et de jaugeages pour influencer le passage de la CT par ces 2 points

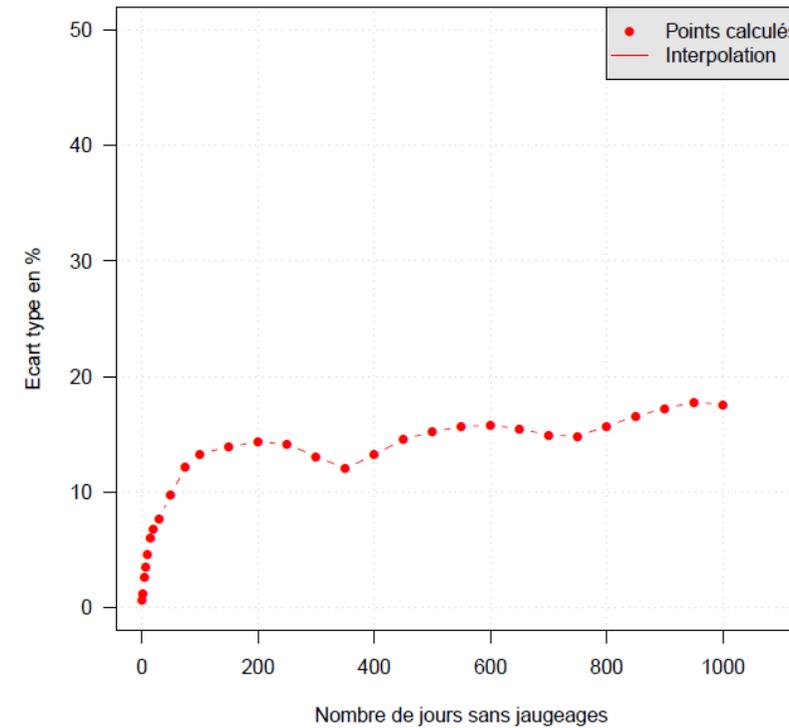


Étape 4: variogramme en fonction du temps pour modéliser le vieillissement d'un jaugeage

Chronique de débits pour H=1.1m à la station Cubord (2149)



Variogramme pour H=1.1m à la station Cubord (2149)

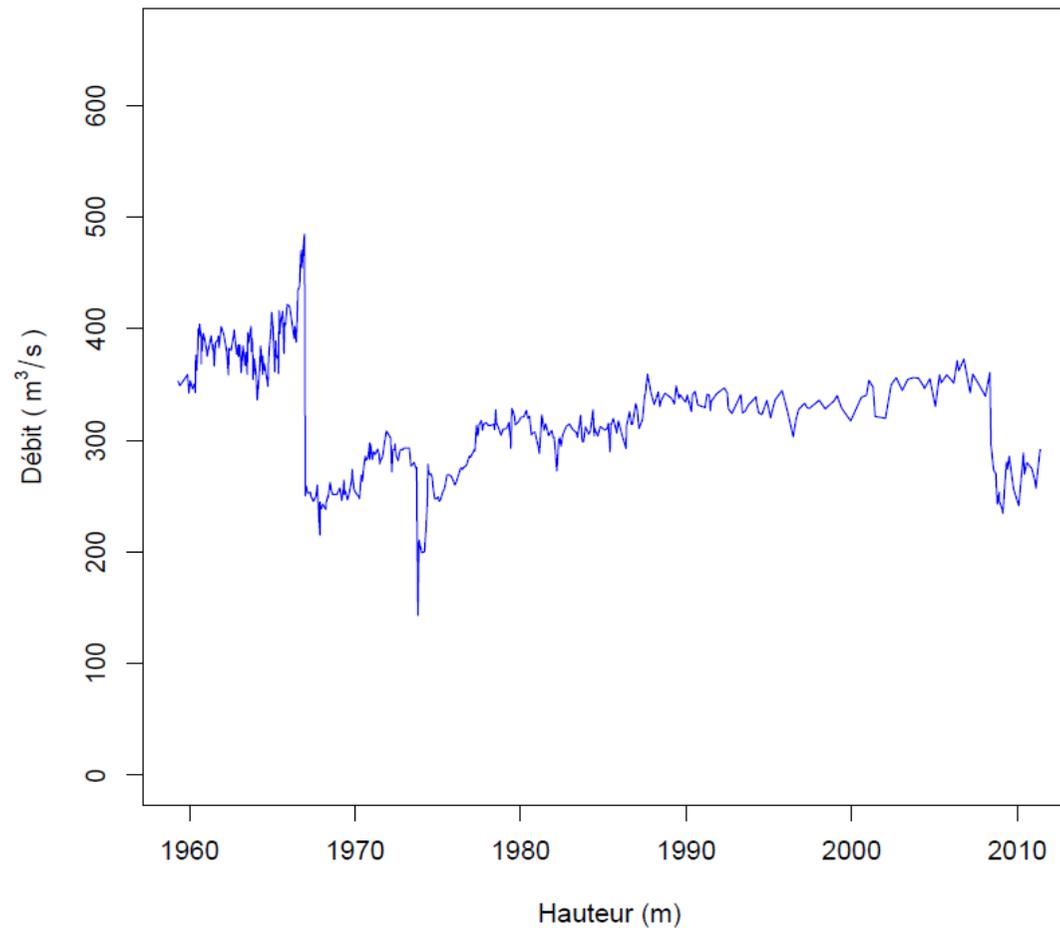


... Répétition sur la gamme de la CT



Étape 4: Variogramme en fonction du temps

Chronique de débits pour H=1.75m



Étant donné qu'à chaque jaugeage est associé une date, on est alors en mesure de représenter graphiquement une chronique de débit pour une hauteur donnée

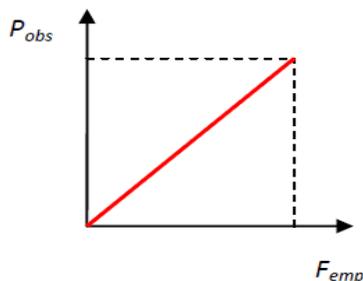
Notons que les jours sans jaugeages sont interpolés linéairement



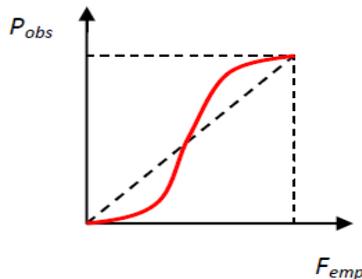


Vérification du modèle: Diagramme de fiabilité (Wilks, 1995)

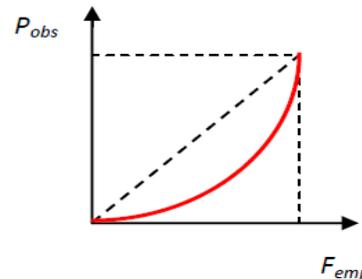
L'outil permettant de caractériser la fiabilité d'une prévision probabiliste est appelé diagramme de fiabilité (Wilks, 1995).



Prévision Fiable



Prévision sous-dispersive

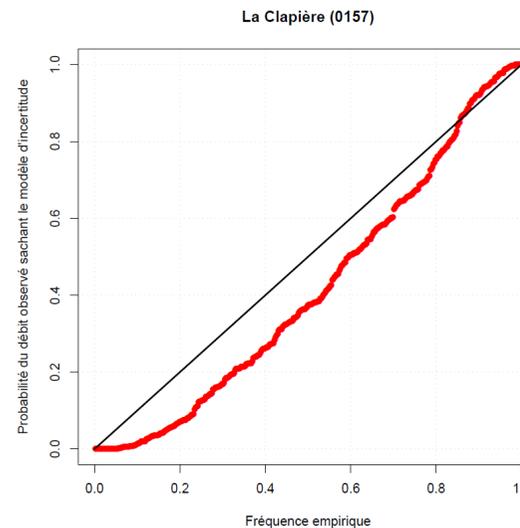


Prévision biaisée

L'idée consiste à vérifier que la distribution des probabilités de non-dépassement des observations dans les distributions de prévisions suit une loi uniforme (les quantiles sont équiprobables).

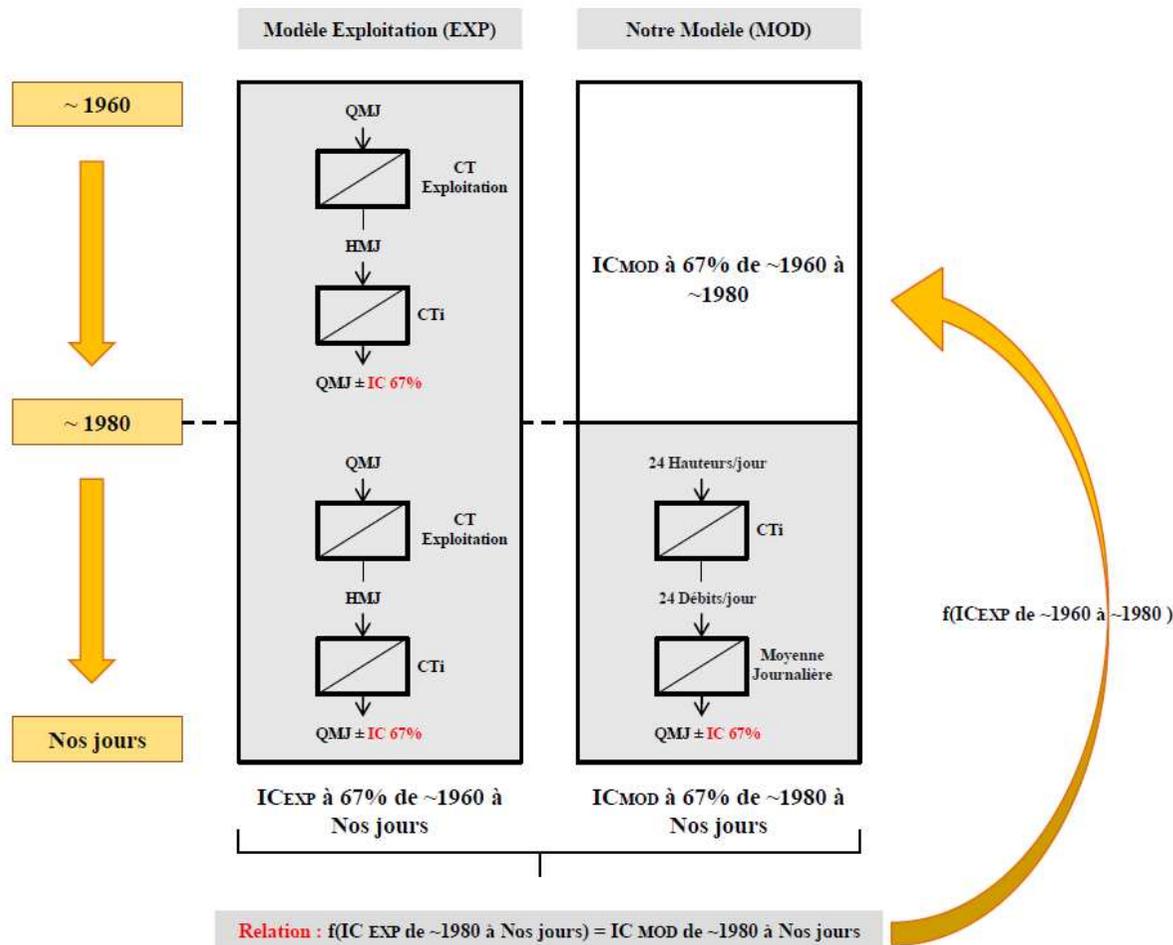
Par exemple, les valeurs des quantiles 90% prévues n'ont en théorie qu'une chance sur 10 d'être dépassées lors de chaque couple prévision/observation.

Un échantillon de couples prévisions/observations important est donc requis, cette propriété ne pouvant se vérifier sur un seul couple.





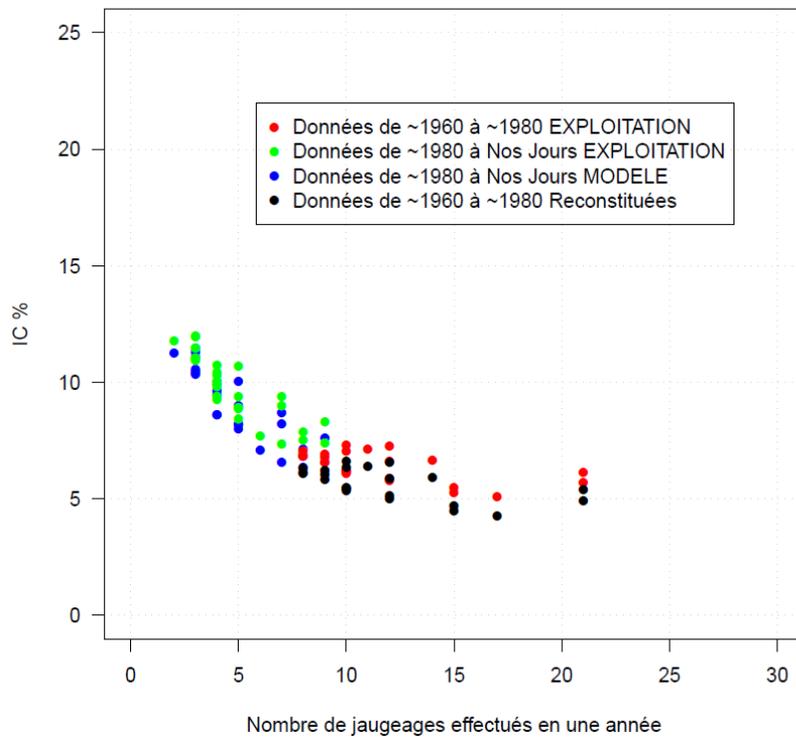
Reconstitution des données à partir de 1960



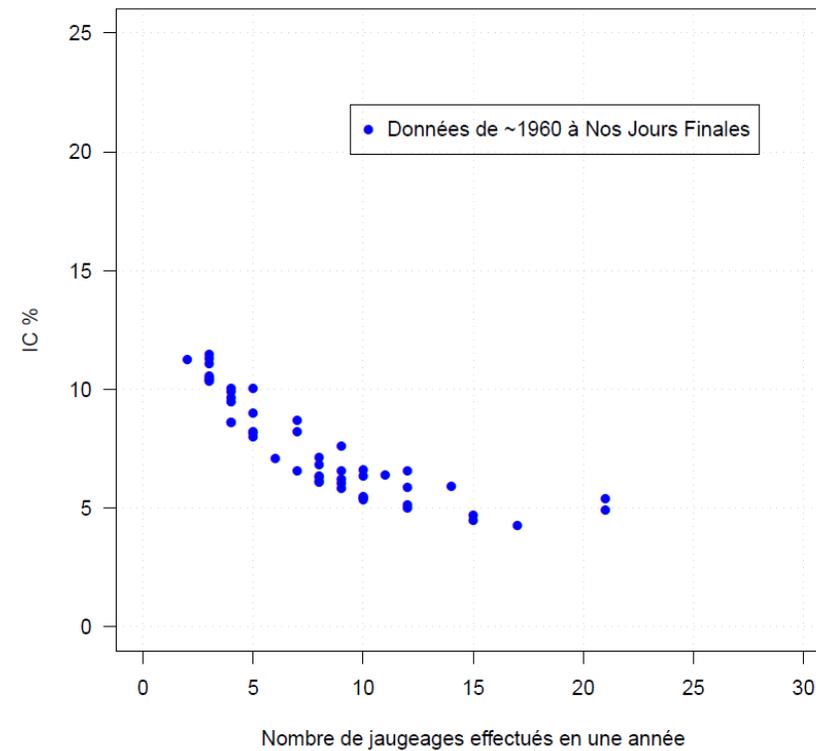


Reconstitution des données à partir de 1960

La Clapière (0157)



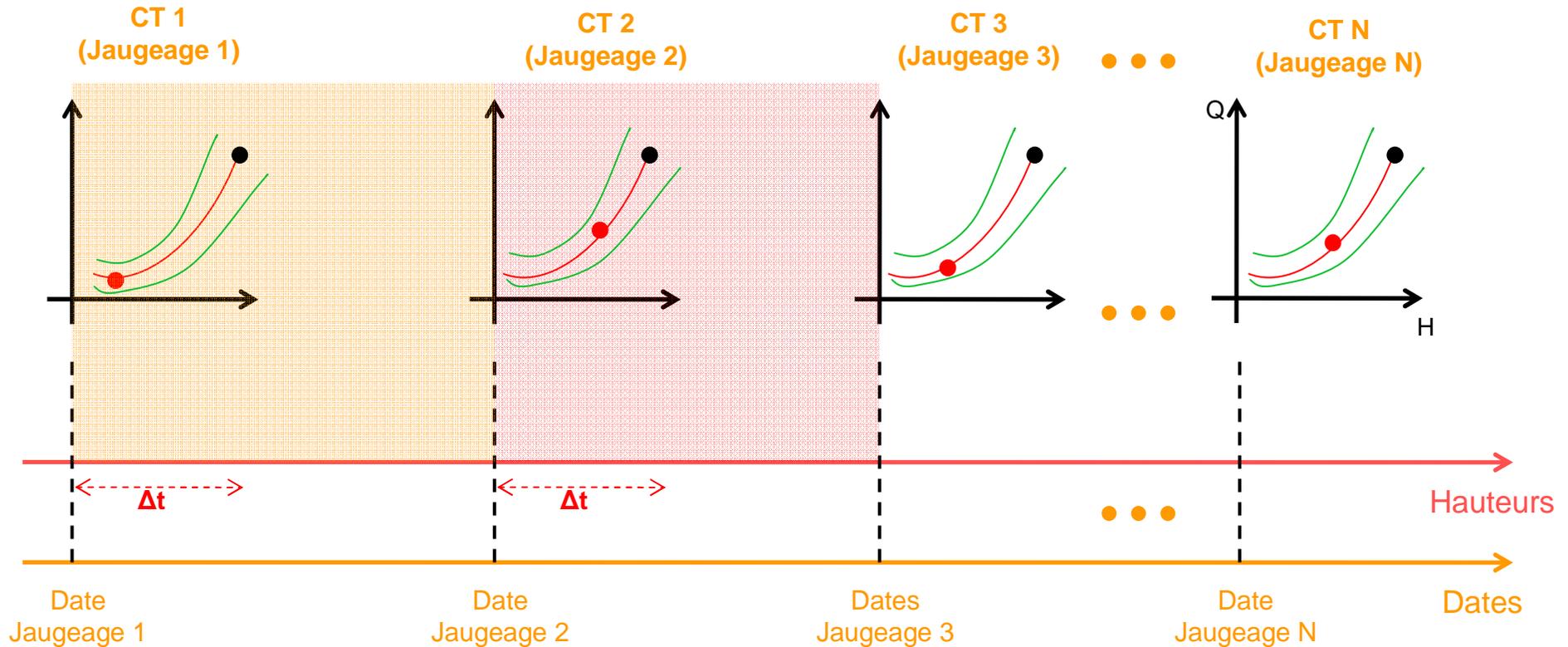
La Clapière (0157)





Gestion Dynamique Terminée

Chaque H est transformée en Q à l'aide de celles des N-CT qui convient, un IC 67% vieillit selon Δt séparant H de la CT est fournit



Chronique de Débits avec IC 67%

