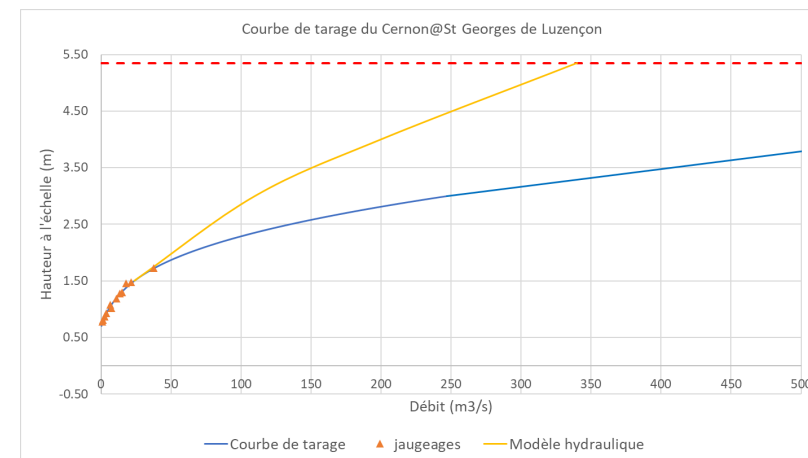
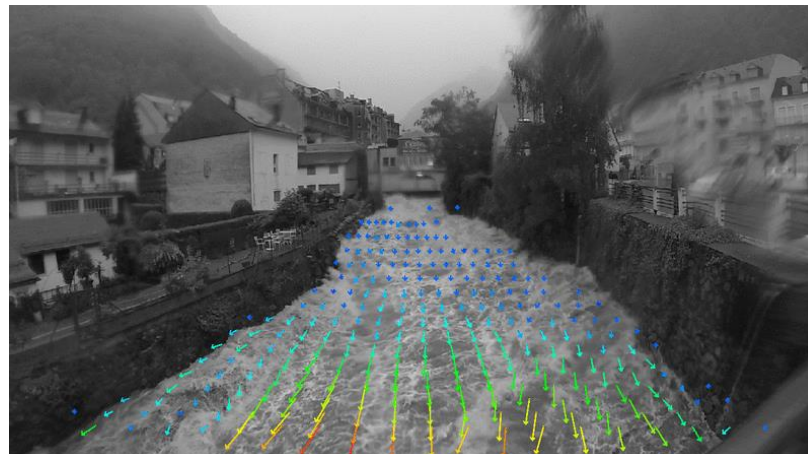


HYDROMÉTRIE EN CRUE : LES DEFIS ET LES SOLUTIONS

Colloque SHF Prédiction des crues et des inondations – 28 au 30 novembre 2023



HAUET Alexandre^{1,2*}, PAYRASTRE Olivier³, LE COZ Jérôme⁴, BONNIFAIT Laurent⁵

¹EDF-DTG, St Martin le Vinoux, France, alexandre.hauet@edf.fr

²Univ. Grenoble Alpes, Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), UMR 5001, Grenoble, France

³Univ. Gustave Eiffel, Laboratoire Eau Environnement, Nantes, France

⁴INRAE, UR RiverLy, Villeurbanne, France, jerome.lecoz@inrae.fr

⁵Cerema, DTerMed/DRN/RIL, Aix en Provence, France, laurent.bonnifait@cerema.fr

DE L'IMPORTANCE DES DONNÉES POUR LA PRÉVISION

- **Pas de bons modèles hydrologiques sans bonnes données !**

- Des données météorologiques
 - Précipitations liquides et solides, température, ETP...
 - Données d'entrée des modèles hydrologiques
- Des données hydrométriques
 - Des séries temporelles de débit → hydrogrammes
 - Pour caler les paramètres des modèles hydrologiques
 - Et pour valider les performances des modèles hydrologiques
 - Les fameux « débits observés »

- **Pour bien prévoir les crues, il faut des hydrogrammes de crue fiables et robustes !**

DE L'IMPORTANCE DES DONNÉES POUR LA PRÉVISION

■ Pas de bons modèles hydrologiques sans bonnes données !

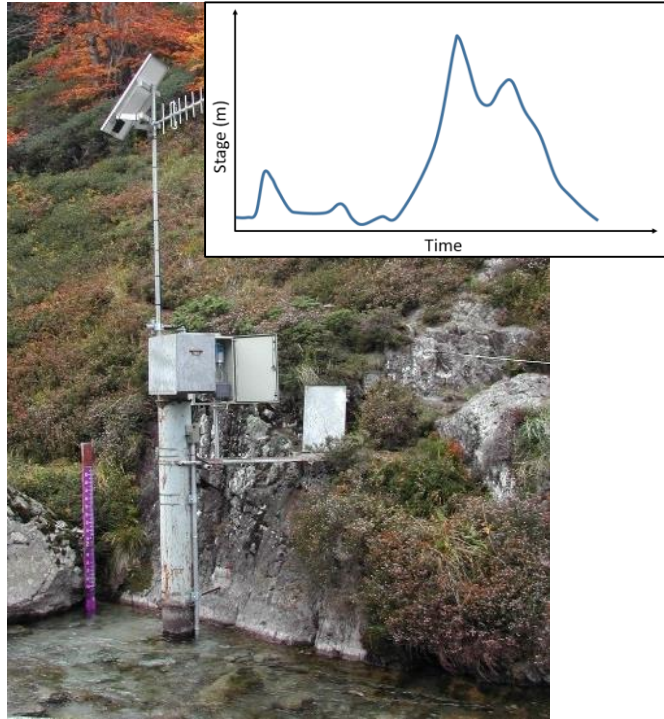
- Des données météorologiques
 - Précipitations liquides et solides, température, ETP...
 - Données d'entrée des modèles hydrologiques
- Des données hydrométriques
 - Des séries temporelles de débit → hydrogrammes
 - Pour caler les paramètres des modèles hydrologiques
 - Et pour valider les performances des modèles hydrologiques
 - Les fameux « débits observés »



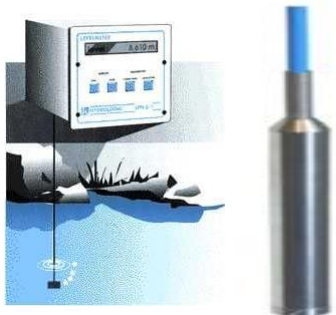
■ Pour bien prévoir les crues, il faut des hydrogrammes de crue fiables et robustes !

DE LA CONSTITUTION DES HYDROGRAMMES

- Débits observés... c'est un peu abusif !

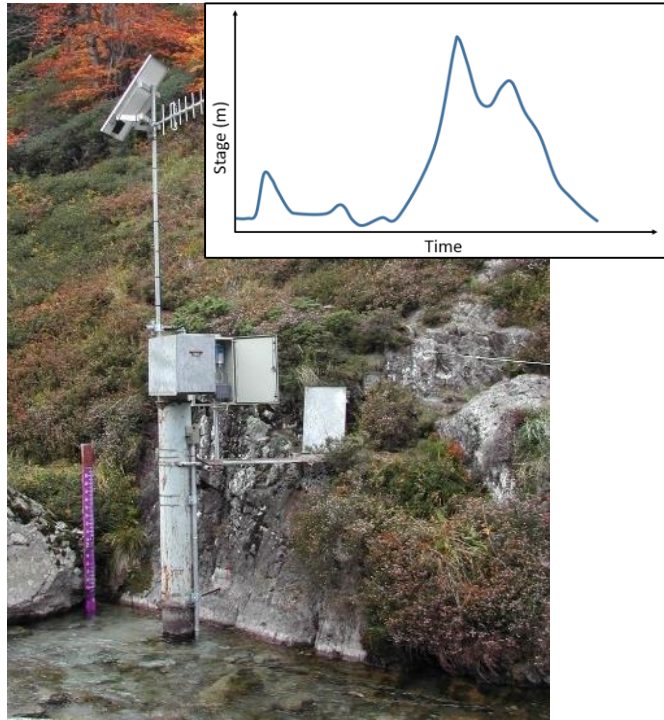


1- Mesure en continu de la hauteur

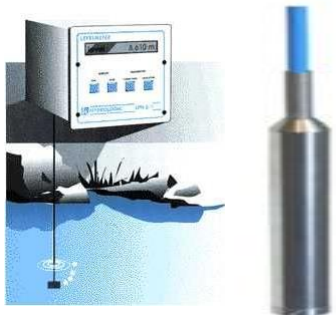


DE LA CONSTITUTION DES HYDROGRAMMES

- Débits observés... c'est un peu abusif !



1- Mesure en continu de la hauteur

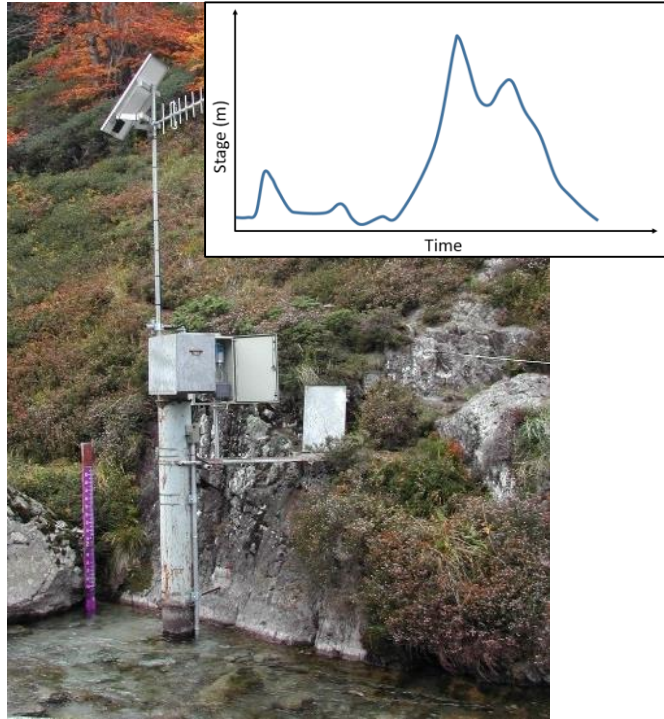


2 – Campagnes de jaugeages

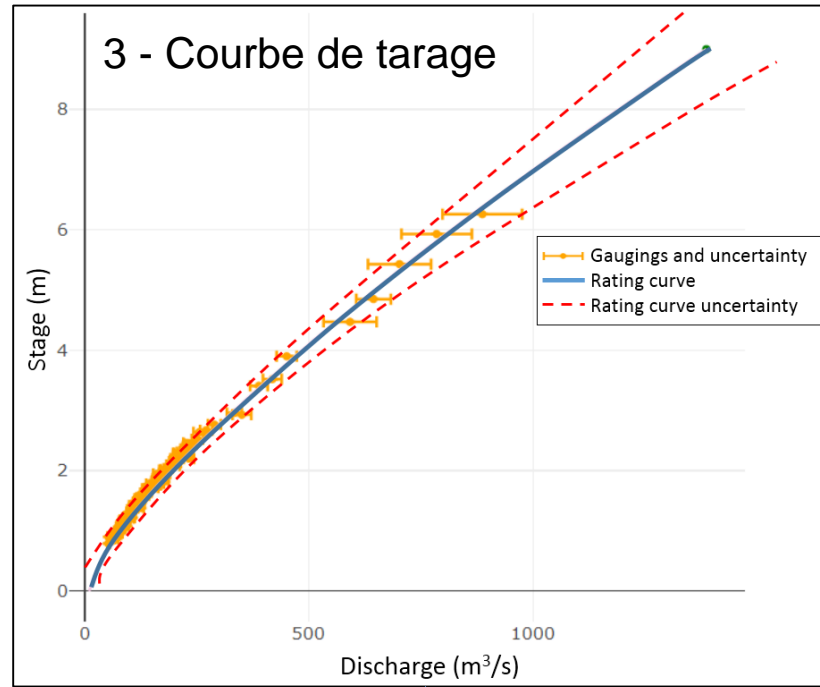
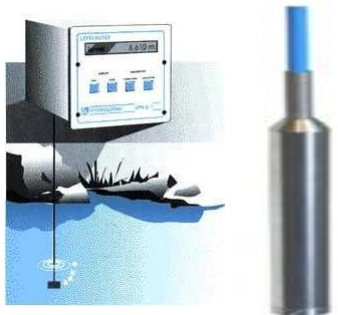


DE LA CONSTITUTION DES HYDROGRAMMES

- Débits observés... c'est un peu abusif !



1- Mesure en continu de la hauteur

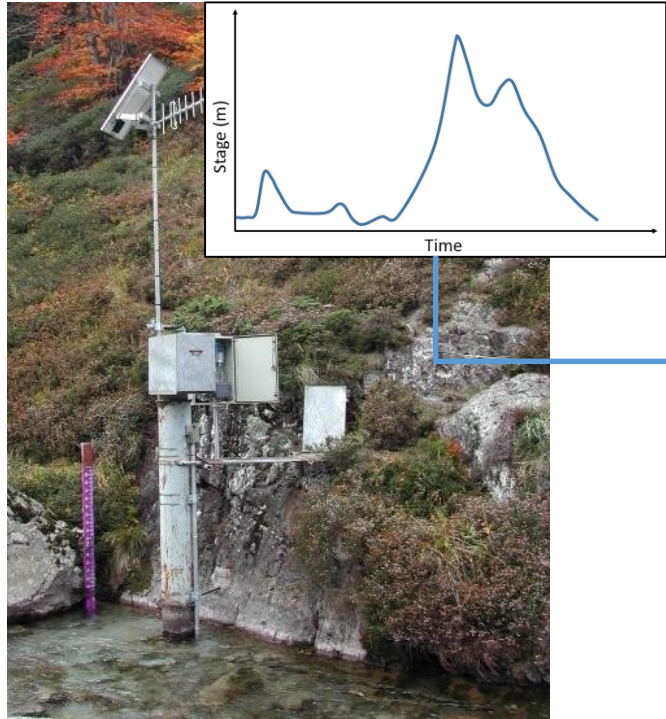


2 – Campagnes de jaugeages

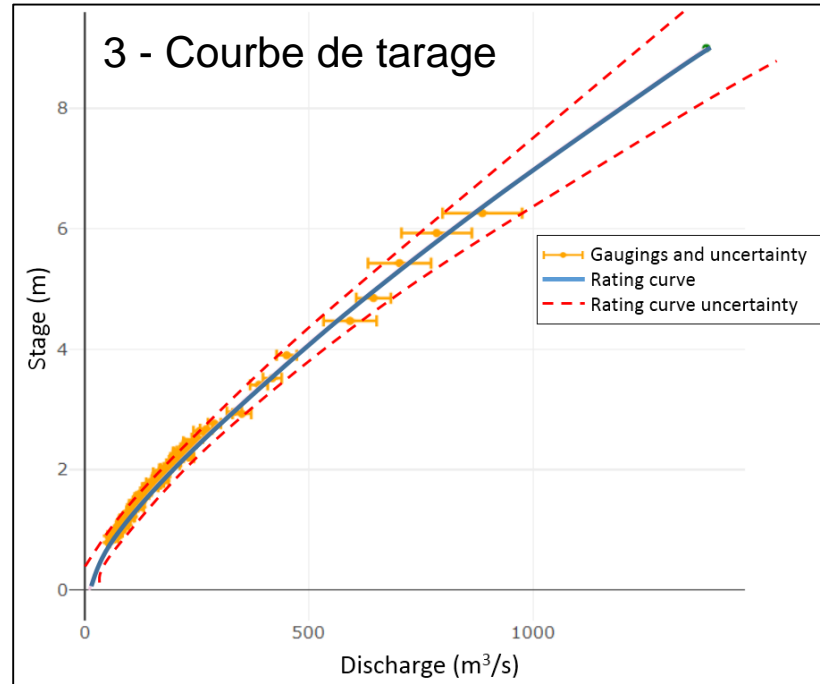
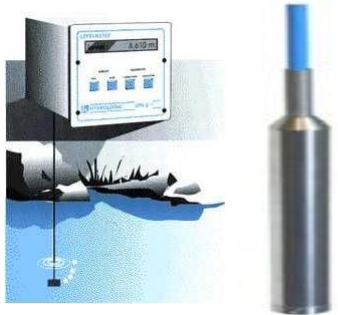


DE LA CONSTITUTION DES HYDROGRAMMES

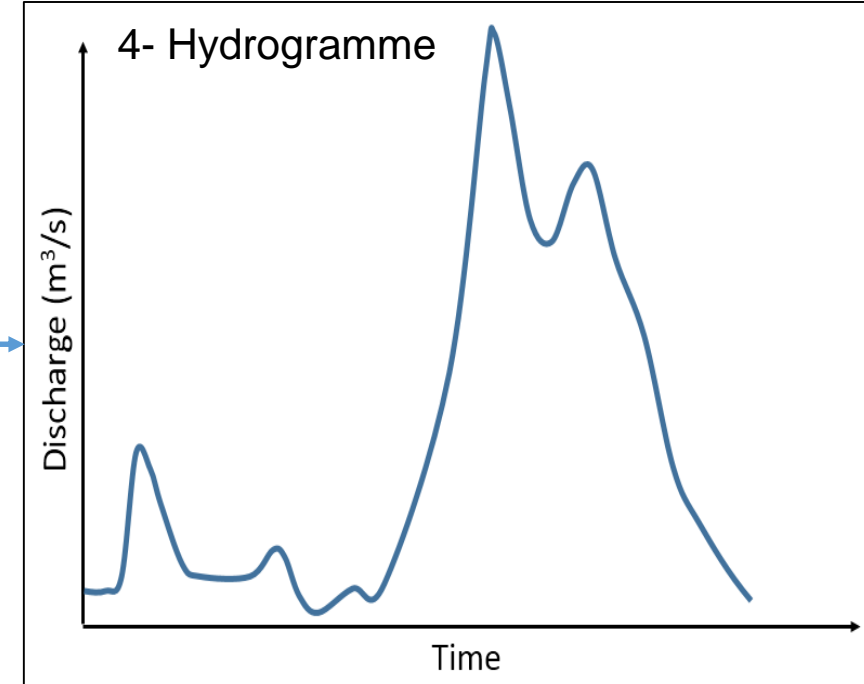
- Débits observés... c'est un peu abusif !



1- Mesure en continu de la hauteur

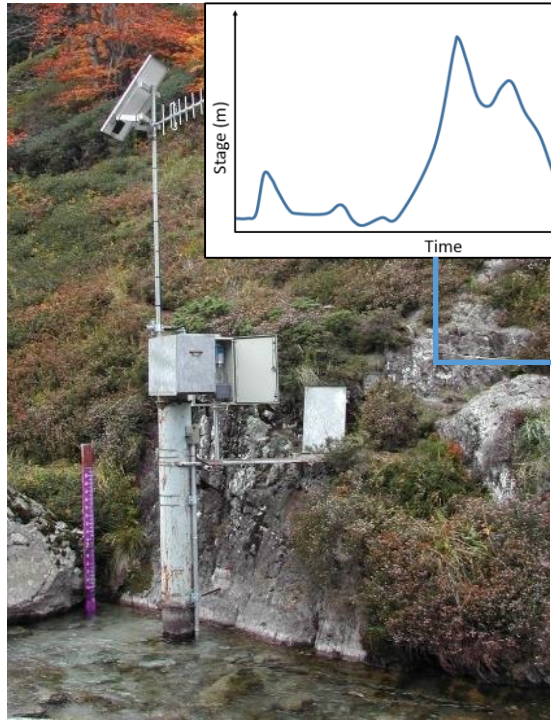


2 – Campagnes de jaugeages

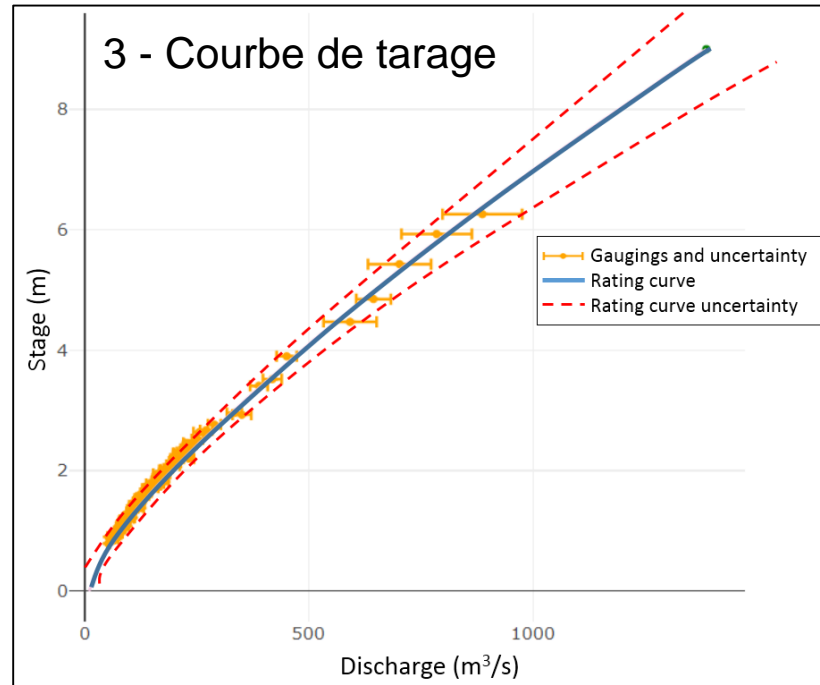
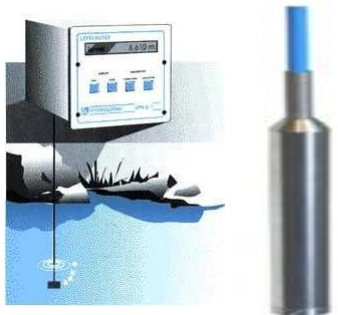


DE LA CONSTITUTION DES HYDROGRAMMES

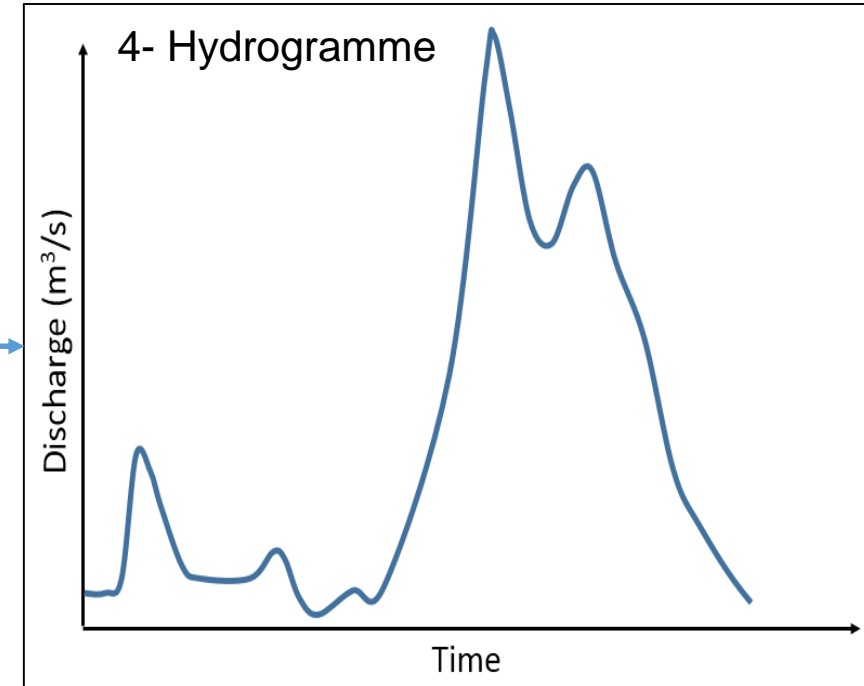
- Débits observés... c'est un peu abusif !



1- Mesure en continu de la hauteur



2 – Campagnes de jaugeages



EN CRUE, TOUT DEVIENT COMPLIQUÉ !

■ Mesure de hauteur d'eau

- Représentativité de la mesure de hauteur
 - Effets hydrauliques des ponts où les capteurs sont souvent installés
 - Réhausse de la ligne d'eau à cause d'embâcle
 - Batillage, colmatage des puits de mesure...
 - Très important... mais pas traité dans cette présentation



EN CRUE, TOUT DEVIENT COMPLIQUÉ !

■ Réaliser des jaugeages en crue : les limitations

- Les techniques de jaugeages sont intrusives
 - Capteurs et / ou opérateurs dans l'eau → danger (fortes vitesses et débris flottants)
- Un jaugeage, ça prend du temps
 - De 30min à 1h ≠ dynamique fortement instationnaire des crues
- Les flux sédimentaires associés perturbent les jaugeages
 - Matières en suspension (MES) et charriage
- Il est souvent difficile d'accéder aux sites de jaugeages
 - Conditions d'accès difficiles (routes fermées, berges instables à cause de l'érosion...)
 - Épisodes de crue généralisés → les hydromètres ne peuvent pas être partout en même temps..



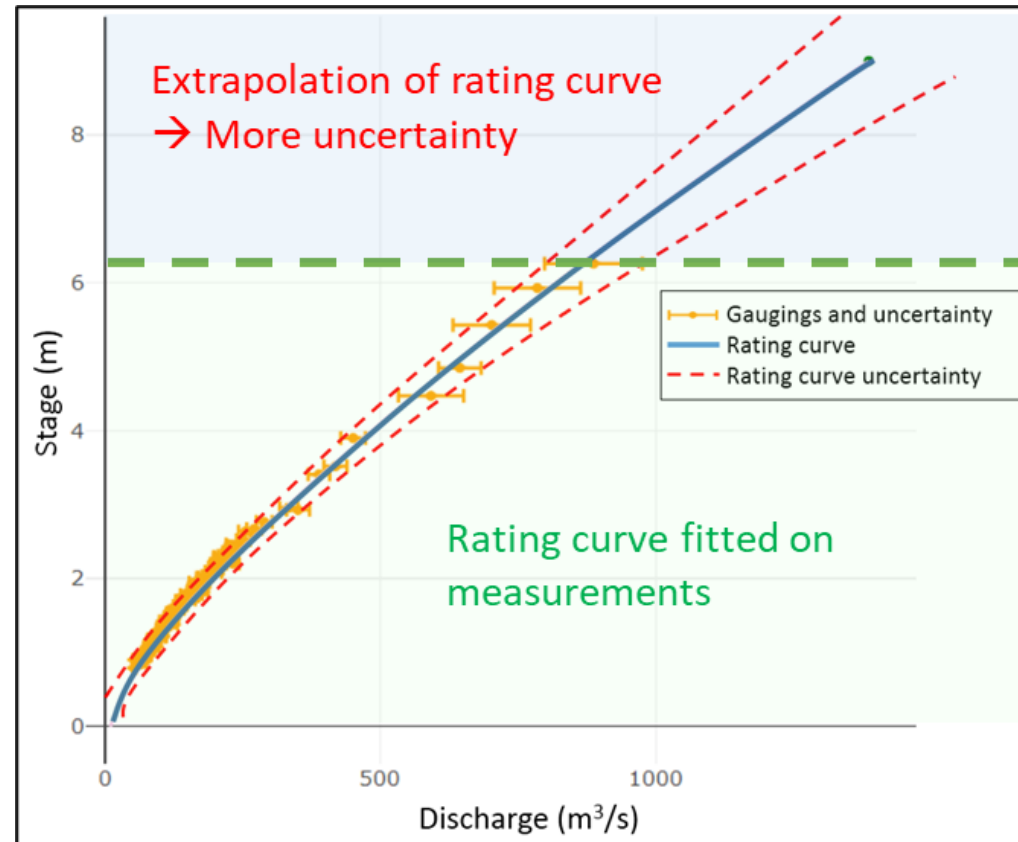
C'était pas ma crue



EN CRUE, TOUT DEVIENT COMPLIQUÉ !

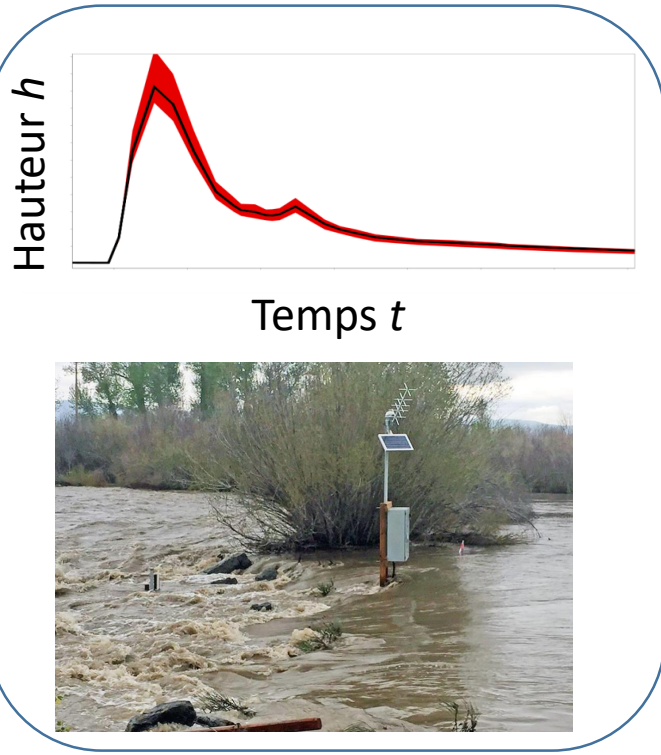
■ Les conséquences sur les courbes de tarage

- La gamme jaugée des courbes de tarage est limitée
- Les relations hauteur/débit doivent être largement extrapolées aux hautes eaux
 - Biais possibles et incertitudes associées importantes (Kiang et al., 2018).

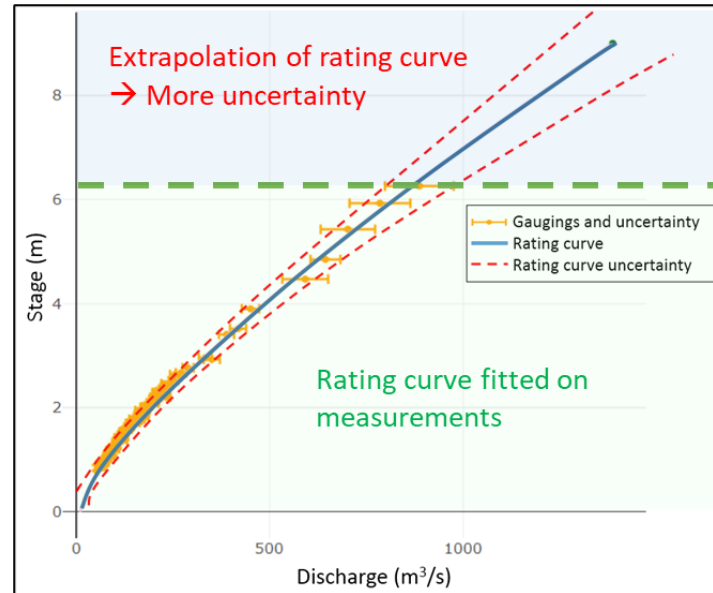


EN CRUE, TOUT DEVIENT COMPLIQUÉ !

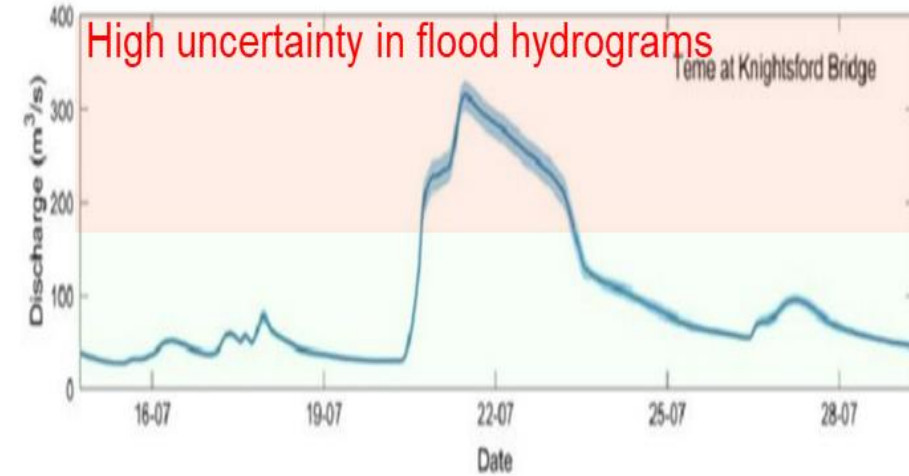
- Les conséquences sur les hydrogrammes de crue



+

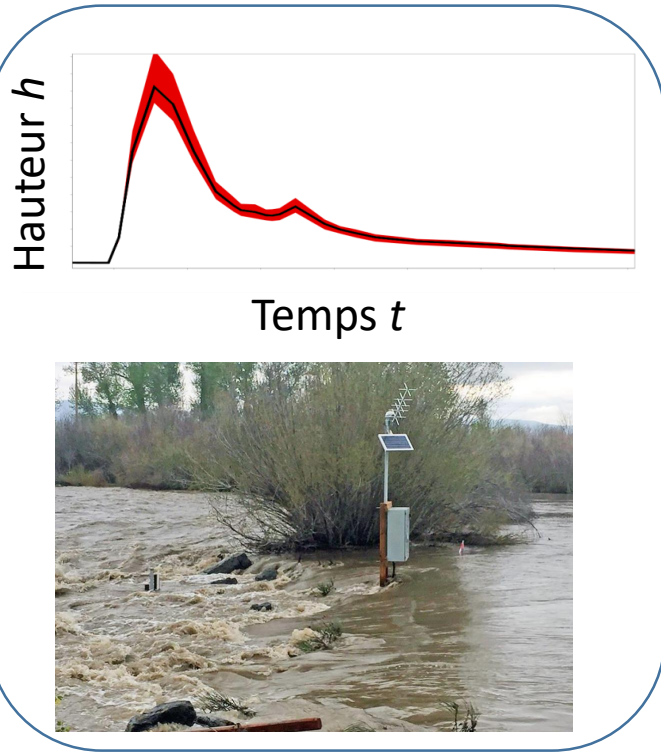


=

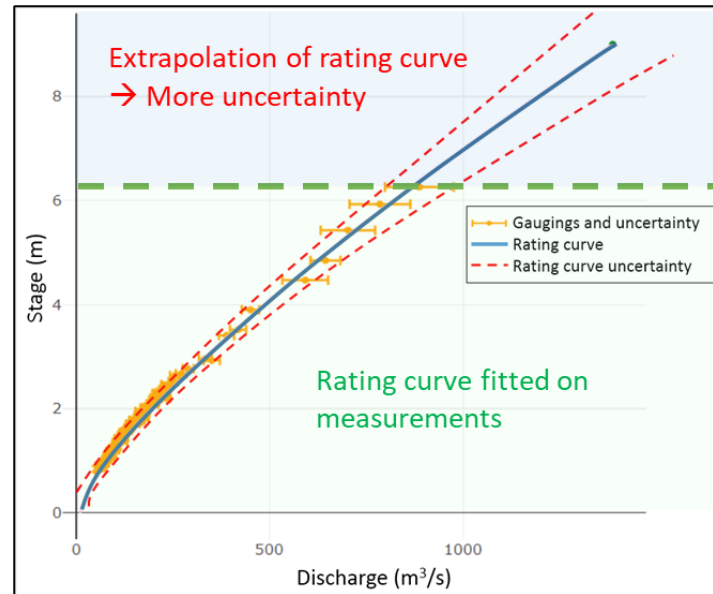


EN CRUE, TOUT DEVIENT COMPLIQUÉ !

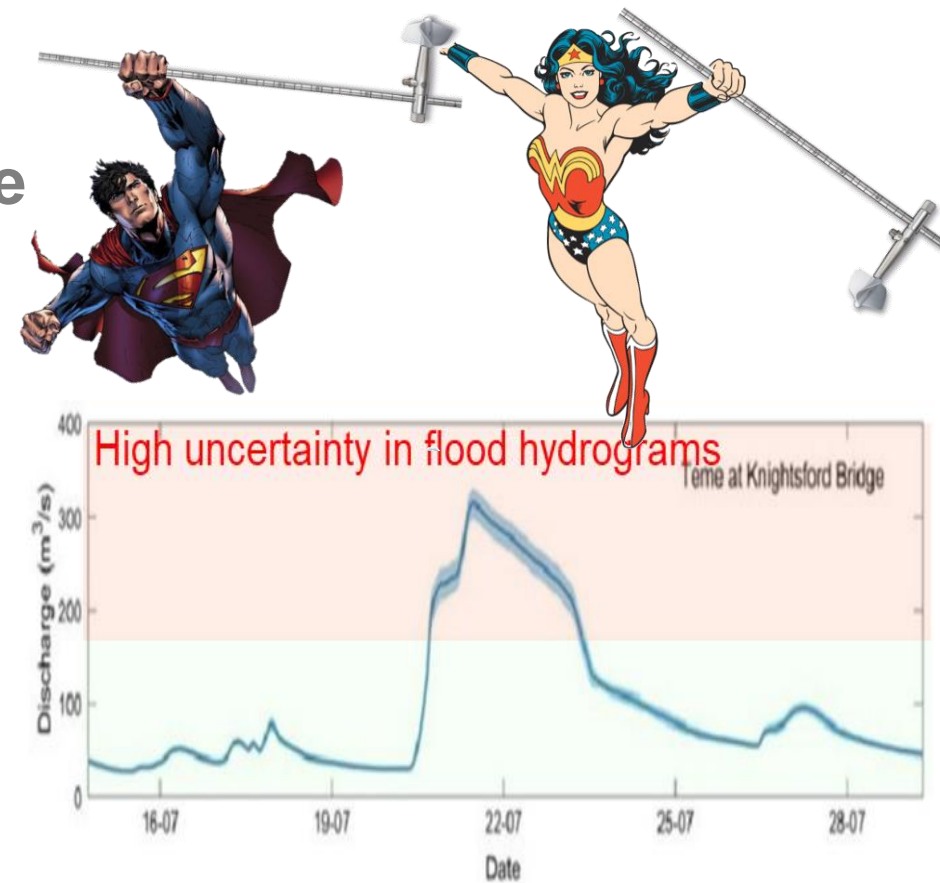
■ Les conséquences sur les hydrogrammes de crue



+



=



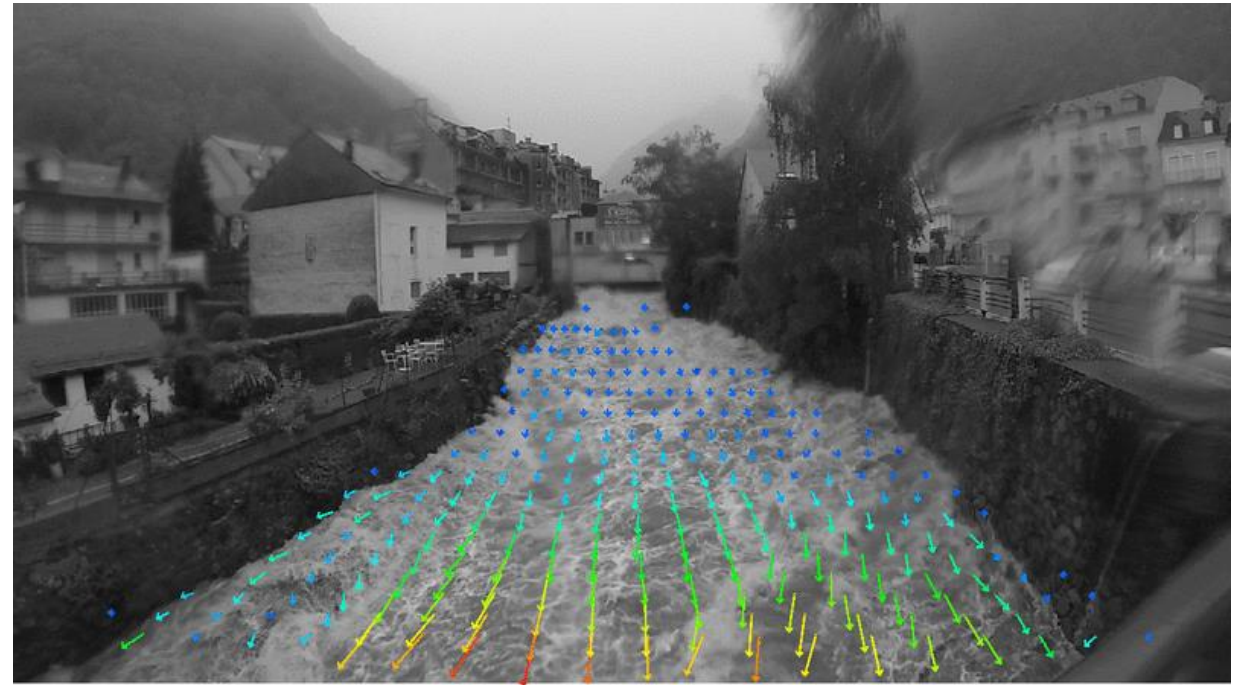
■ Mais les hydromètres sont pleins de ressources !

- Solutions récemment développées pour améliorer la qualité des données de débit en crue
 - Méthodes de jaugeage non intrusives par analyse Doppler d'écho radar ou par imagerie
 - Estimation a posteriori les débits de pointe des crues
 - Modélisation hydraulique, numérique ou simplifiée, pour l'extrapolation des courbes de tarage

LES JAUGEAGES NON-INTRUSIFS

■ Jaugeages non-intrusifs : késako ?

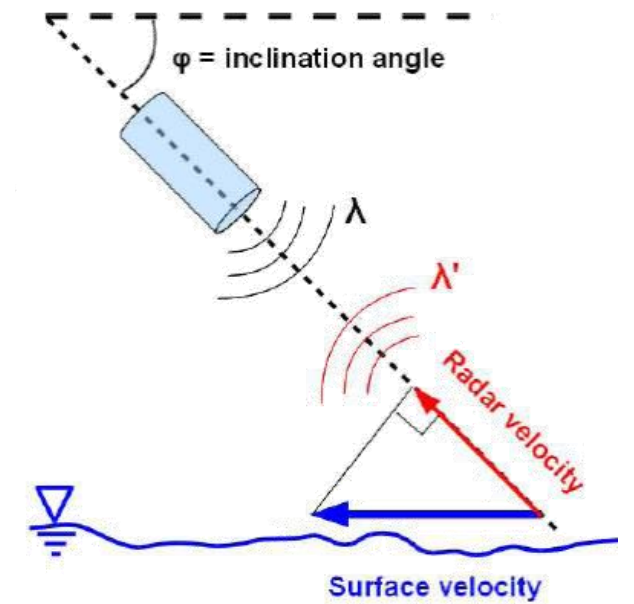
- Techniques permettant de mesurer des vitesses d'écoulement sans contact avec le cours d'eau
- Deux méthodes principales:
 - Radar vélocimétrique de Surface (Surface Velocity Radar, SVR)
 - Analyse d'images (Image Velocimetry, IV)



LES JAUGEAGES NON-INTRUSIFS

■ Surface Velocity Radar (SVR)

- Principe de fonctionnement :
 - Émission vers la surface libre d'une onde radar de fréquence λ
 - Onde radar rétrodiffusée par les rugosités sur la surface libre et revient vers l'appareil
 - Écho rétrodiffusé affecté par un décalage Doppler (fréquence λ')
 - Connaissant l'angle d'inclinaison $\theta \rightarrow$ vitesse de surface ponctuelle
- Déploiement
 - Depuis un pont ou une passerelle car mesure de la vitesse radiale uniquement
 - Tenu à la main, sur trépied, en position fixe...



LES JAUGEAGES NON-INTRUSIFS

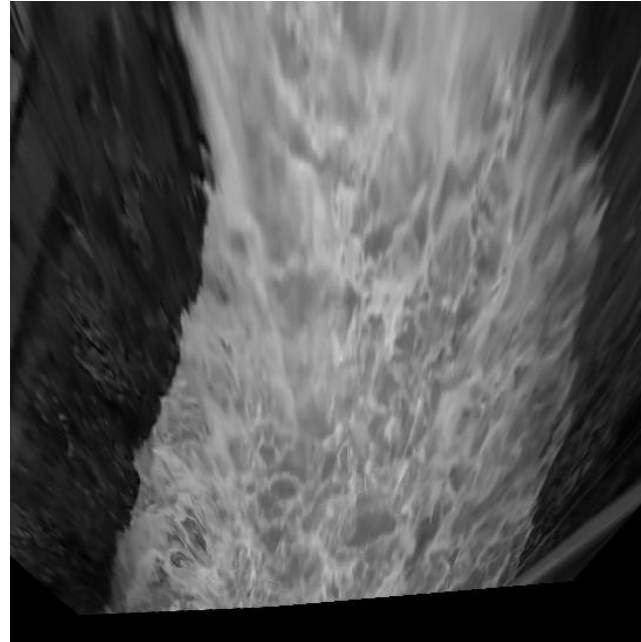
■ Analyse d'image IV

□ Principe de fonctionnement :

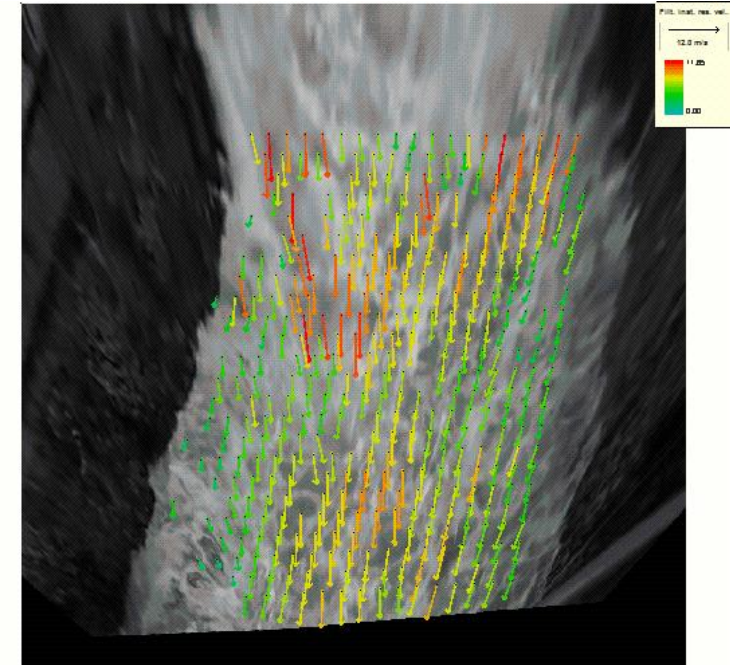
1 – Enregistrement d'une vidéo
du cours d'eau



2 – Orthorectification
des images



3 – Mesure des vitesses
surfaiques

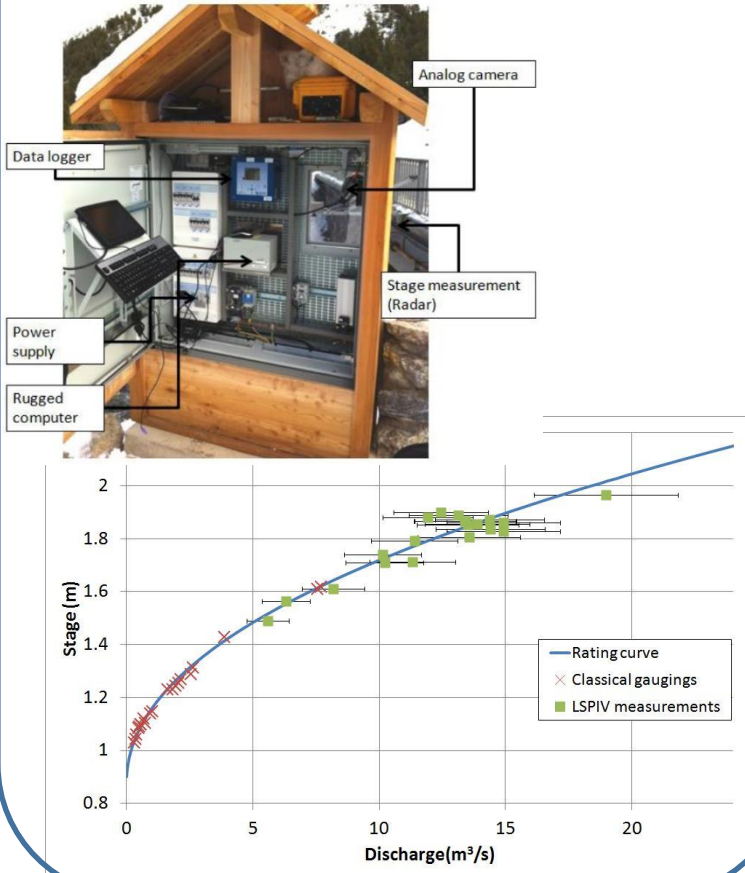


LES JAUGEAGES NON-INTRUSIFS

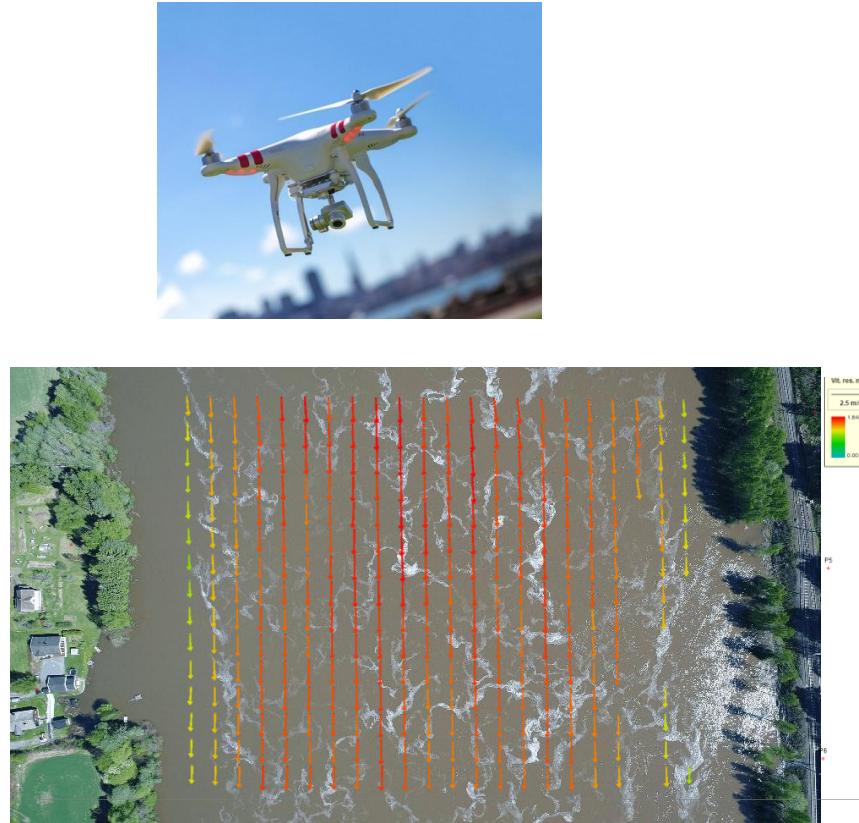
■ Analyse d'image IV

- Exemples d'applications pour l'hydrométrie en crue

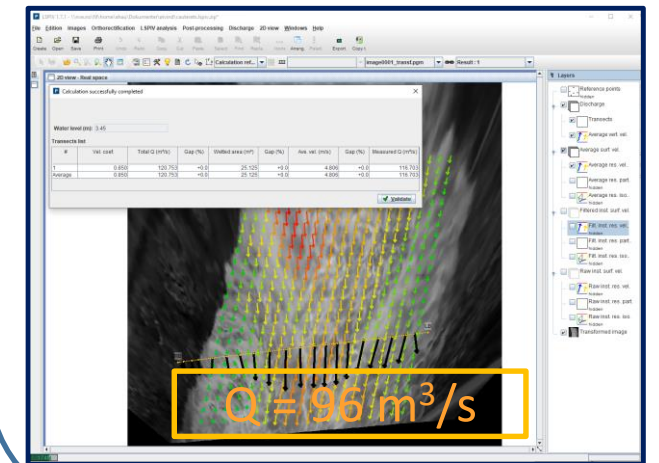
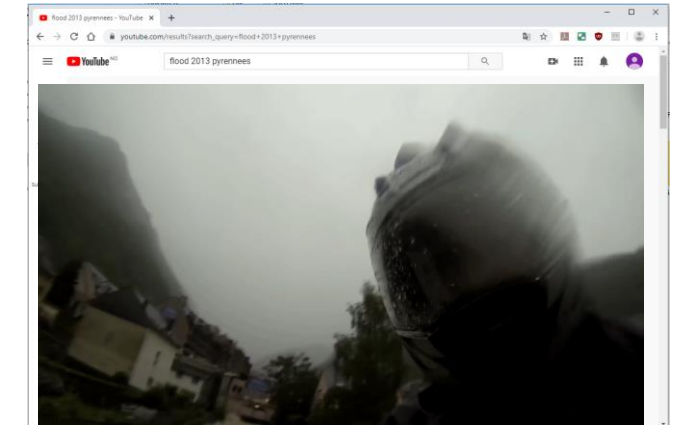
Stations fixes à demeure



Mesures par drone



Films de témoins



LES JAUGEAGES NON-INTRUSIFS

■ De nombreux intérêts

- Mesure très rapide : < 30 minutes pour les SVR; quelques secondes pour l'imagerie
- Peuvent être déployés en toute sécurité, avec des mises en œuvre simples
- Pour du jaugeage ponctuel ou sur des installations à demeure (mesures en continu pour ne pas rater les crues)

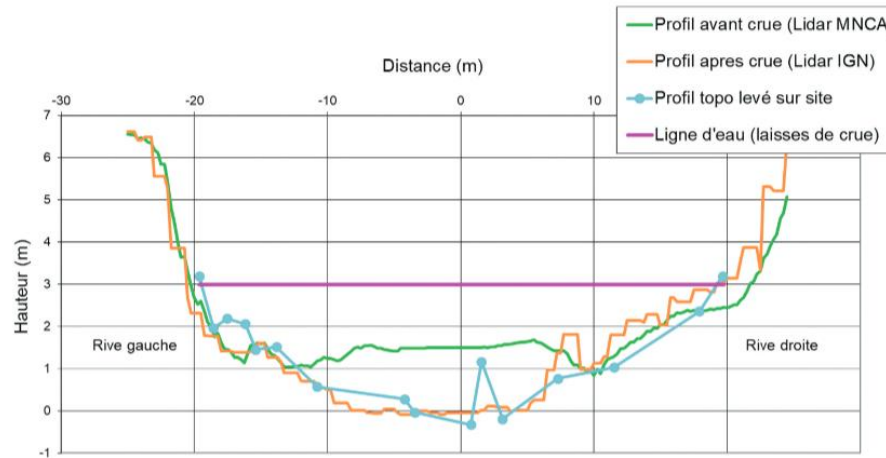
■ Mais des limitations

- Mesurent la vitesse de traceurs de l'écoulement : vaguelettes pour le radar, motifs visibles pour l'imagerie
 - hypothèse que Vitesse traceurs = Vitesse Surface (pb du vent, vagues gravitaires, ressauts hydrauliques, reflets, etc..)
 - conditions de crue cependant favorables à la présence de traceurs et à la limitation des effets parasites
- Mesurent uniquement la vitesse de surface
 - hypothèses hydrauliques sur la distribution des vitesses en profondeur $\rightarrow V_{moy} = \alpha * V_{surf}$; avec $0,7 < \alpha < 0,9$
- Besoin de connaître la bathymétrie de sections en travers
 - avec des moyens intrusifs (perche, sonar acoustique) \rightarrow ne peut être réalisé pendant les crues
 - utilisation de bathymétries avant ou après les crues \rightarrow représentativité pour les crues morphogènes ?

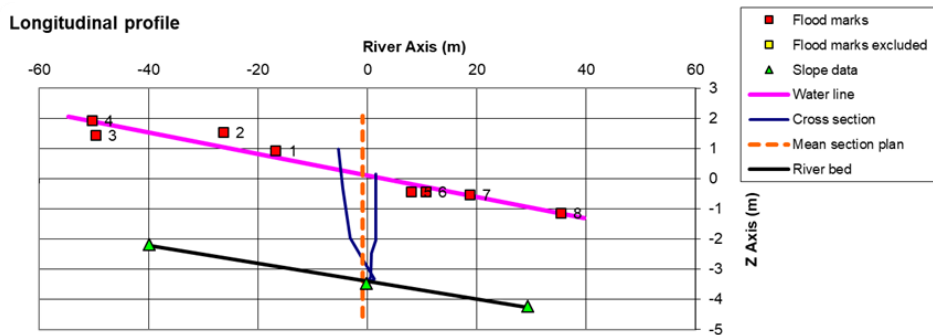


L'ESTIMATION POST-CRUE DES VITESSES ET DÉBITS DE POINTE

- **Quand on ne peut pas faire de mesures pendant la crue**
 - Conditions d'accès et de sécurité ne permettant pas de jauger / Capteurs arrachés
- **Estimation des débits de pointe**
 - Basée sur des relevés topographiques de terrain post crue pour estimer
 - la section d'écoulement, la pente et forme de la ligne d'eau (relevé de laisses de crue)
 - Dans des sections à hydraulique simple
 - Tronçons uniformes / contrôles hydrauliques simple → lois hydrauliques simples



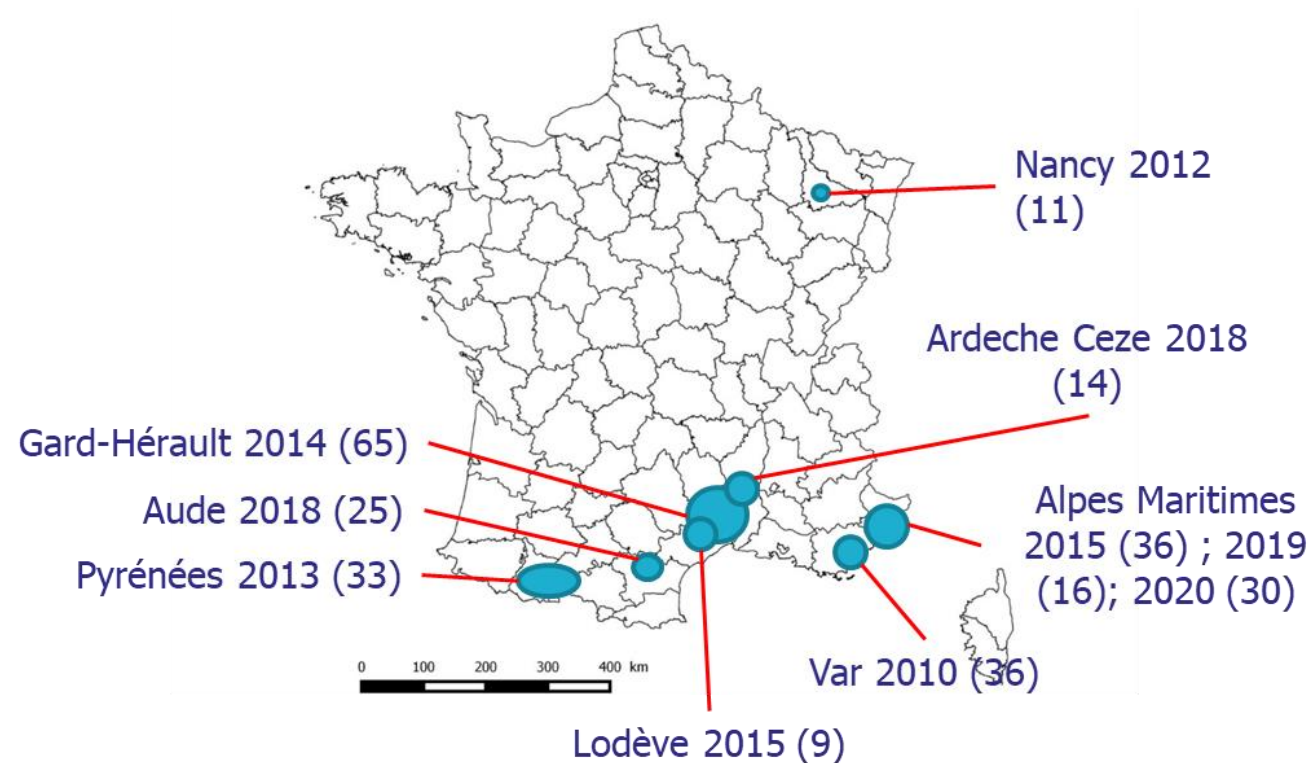
Longitudinal profile



- Validation des estimations de hauteurs d'eau et de vitesse grâce à des éléments objectifs
 - photos, vidéos, témoignages
 - pluviométrie observée, autres estimations disponibles à l'amont ou aval immédiat, info des stations d'hydrométrie
 - analyse de sensibilité aux sources d'incertitude (section, pente, $K...$) → intervalle des débits possibles

L'ESTIMATION POST-CRUE DES VITESSES ET DÉBITS DE POINTE

- **Des projets de long cours !**
 - SNO INSU OHM-CV (2002-aujourd'hui)
 - Projet HyMeX (2010-2020)
 - soutien DGPR (2010-aujourd'hui)
- **275 débits de pointe estimés depuis 2010 (+199 avant 2010)**



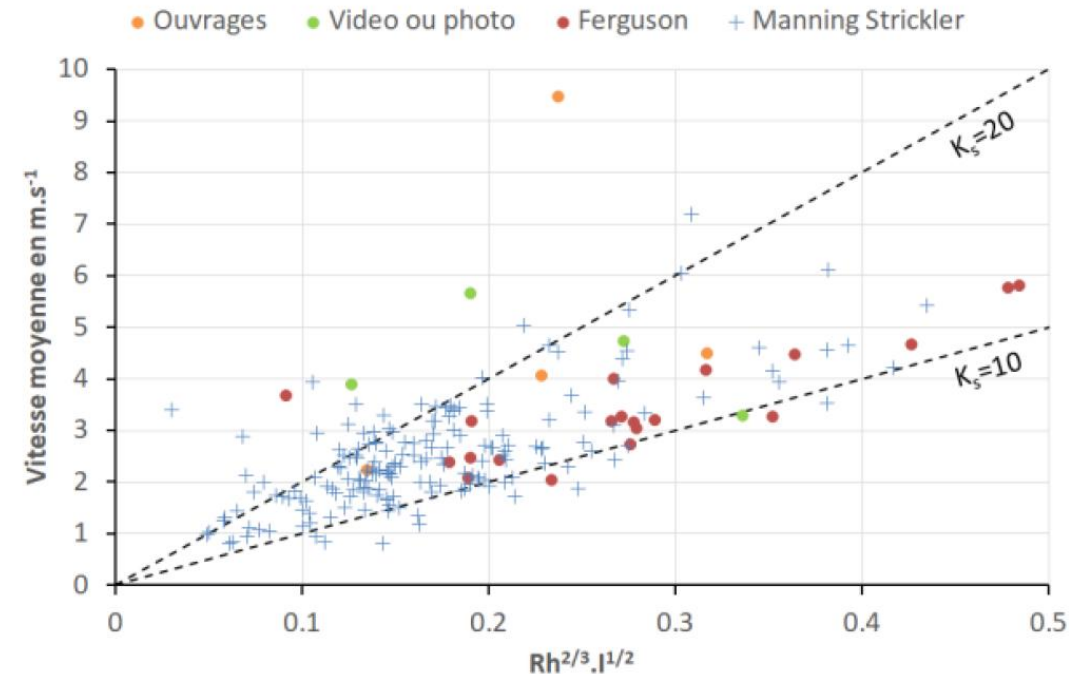
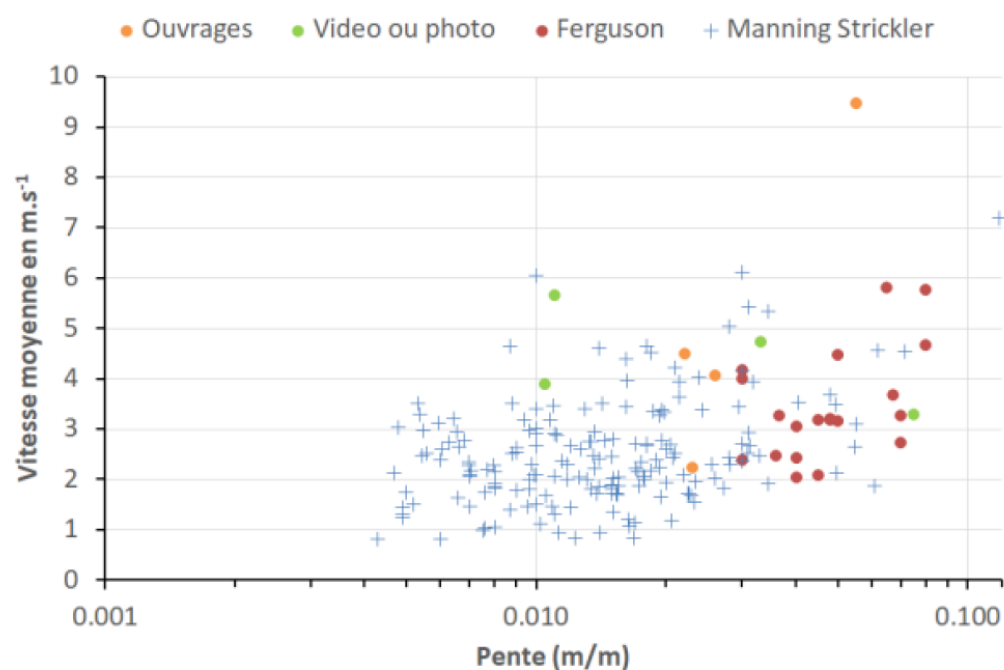
Partenariats :



L'ESTIMATION POST-CRUE DES VITESSES ET DÉBITS DE POINTE

■ Une très grande diversité de conditions hydraulique répertoriée !

- Des pentes hydrauliques de 4‰ à 10%
- Des vitesses moyennes de 1 à 10 m/s → diversité des sections d'écoulement
 - plus ou moins larges et présentant des hauteurs d'eau très variables
 - présence dans certains cas de sections mixtes lit mineur/lit majeur.
- Augmentation des vitesses estimées avec la pente et le rayon hydraulique
 - comme prévu par la formule de Manning-Strickler .
 - une grande diversité subsiste : plage de coefficients de Strickler de 10 à 20, mais peuvent ponctuellement sortir de cette gamme
 - caractère parfois mixte des sections (distinction lit mineur/majeur)



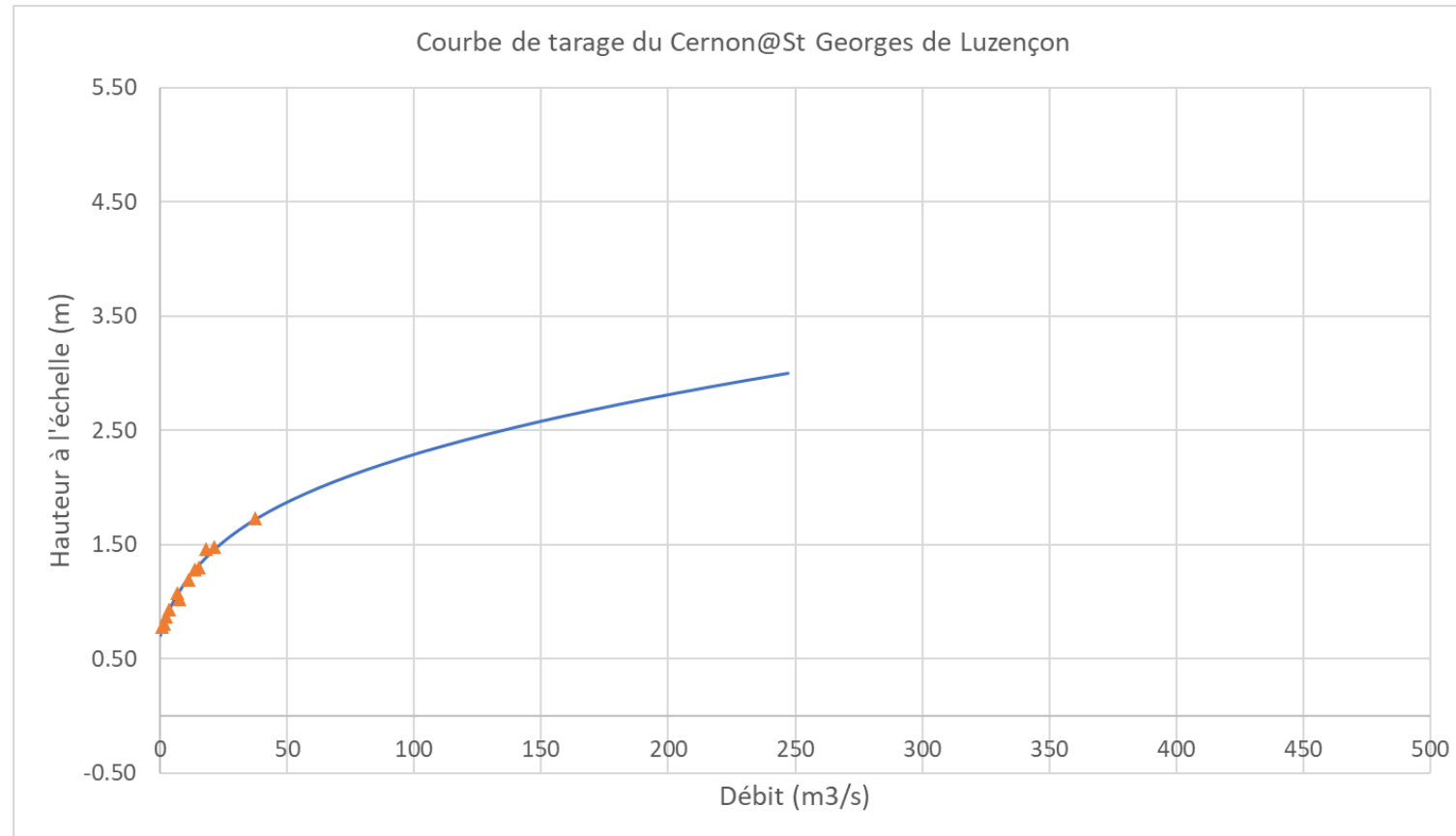
AMÉLIORER L'EXTRAPOLATION DES COURBES DE TARAGE

- **Les courbes de tarage doivent toujours être extrapolées... mais comment ?**
 - Souvent par ajustement sur les jaugeages de crue (lorsqu'il y en a !)
 - Parfois une simple analyse géométrique, voire « esthétique », sur la forme de la courbe
- **Maximums jaugés souvent loin des limites d'extrapolation des courbes de tarage...**
 - Représentent souvent des écoulements encore contenus dans les lits mineurs
 - pas de prise en compte de l'effet de la géométrie et de la rugosité des lits majeurs
 - ni du changement possible du contrôle hydraulique en fonction du débit (noyage de seuil, mise en charge d'ouvrages, contrôles hydrauliques en aval comme des barrages ou des confluences, etc.)
- **Essentiel de guider l'extrapolation des CT par une modélisation des contrôles hydrauliques**
 - basée sur de simples formules de déversoir ou de frottement (méthode BaRatin par exemple)
 - Basée sur des résultats de simulation numérique, 1D en général.

AMÉLIORER L'EXTRAPOLATION DES COURBES DE TARAGE

- Exemple du Cernon@St Georges de Luzençon

- Max jaugé : $h=1,73\text{m}$ / $Q= 38\text{m}^3/\text{s}$
- Courbe extrapolée par ajustement log sur les jaugeages jusqu'à une hauteur de 3m

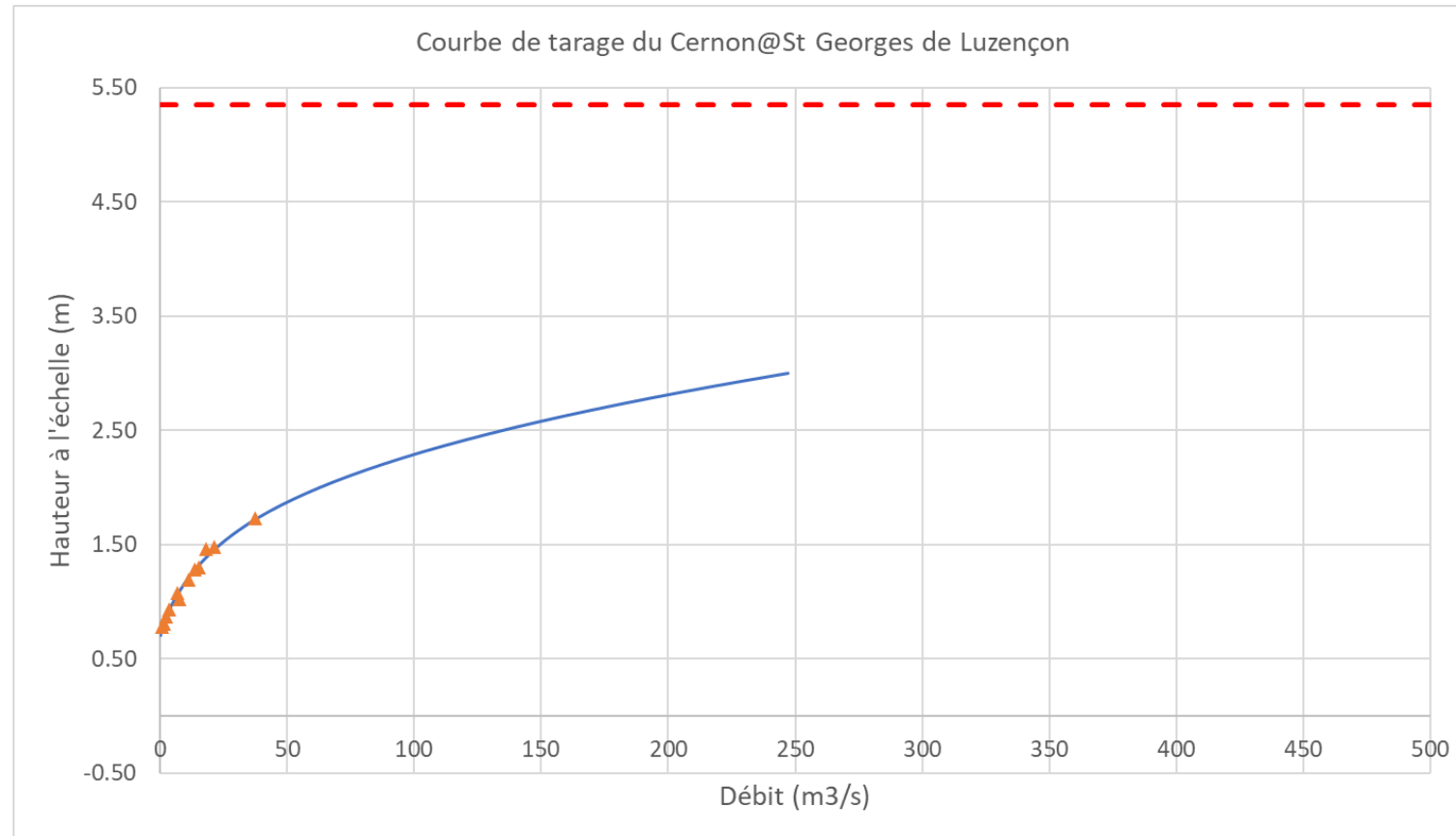


AMÉLIORER L'EXTRAPOLATION DES COURBES DE TARAGE

- Exemple du Cernon@St Georges de Luzençon

- Max jaugé : $h=1,73\text{m}$ / $Q= 38\text{m}^3/\text{s}$
- Courbe extrapolée par ajustement log sur les jaugeages jusqu'à une hauteur de 3m

- Crue du 28/11/2014 : hauteur maximale de 5,35m...

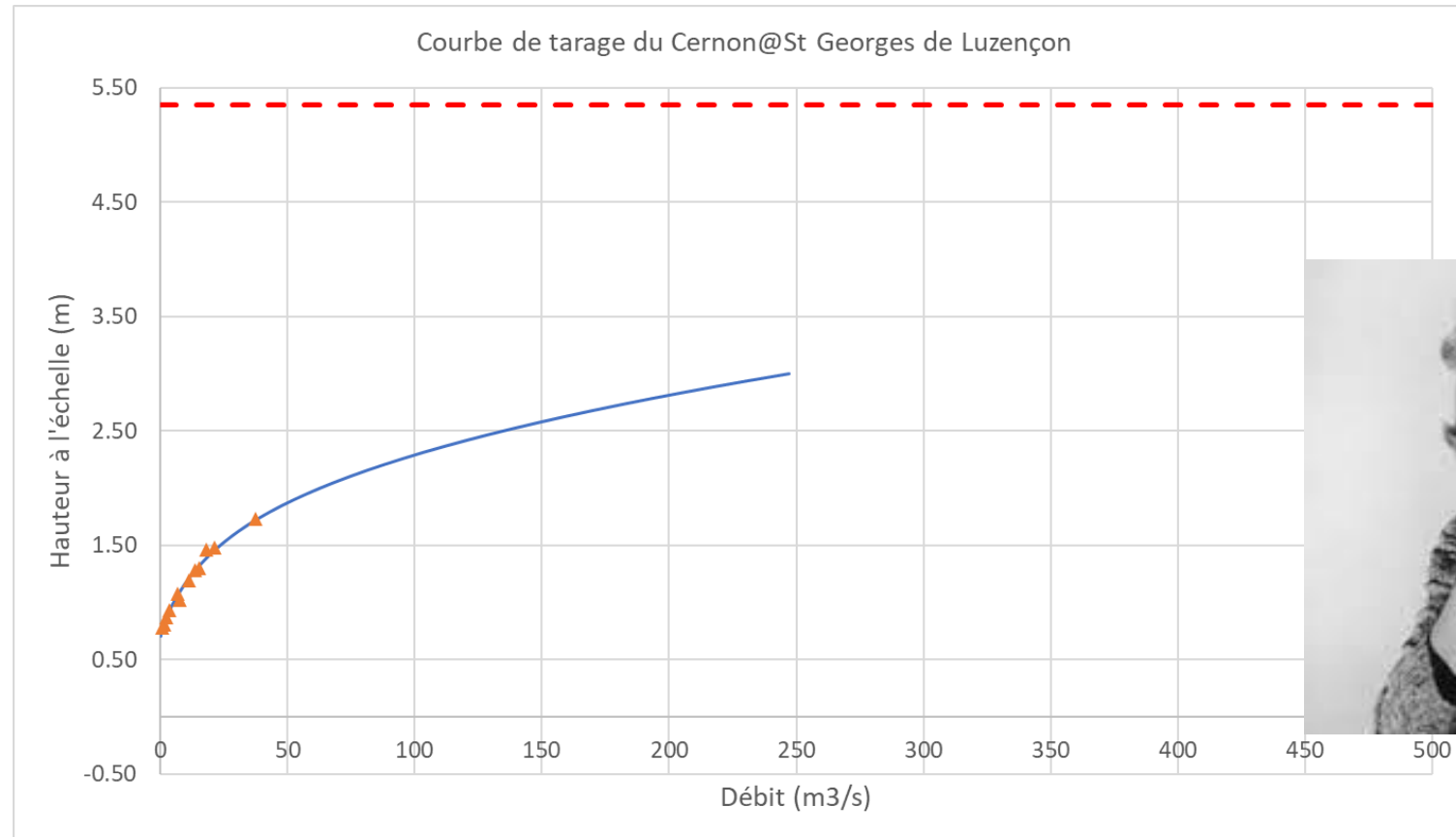


AMÉLIORER L'EXTRAPOLATION DES COURBES DE TARAGE

- Exemple du Cernon@St Georges de Luzençon

- Max jaugé : $h=1,73\text{m}$ / $Q= 38\text{m}^3/\text{s}$
- Courbe extrapolée par ajustement log sur les jaugeages jusqu'à une hauteur de 3m

- Crue du 28/11/2014 : hauteur maximale de 5,35m...



Mais qu'est-ce que je vais dire à mon prévisionniste ??



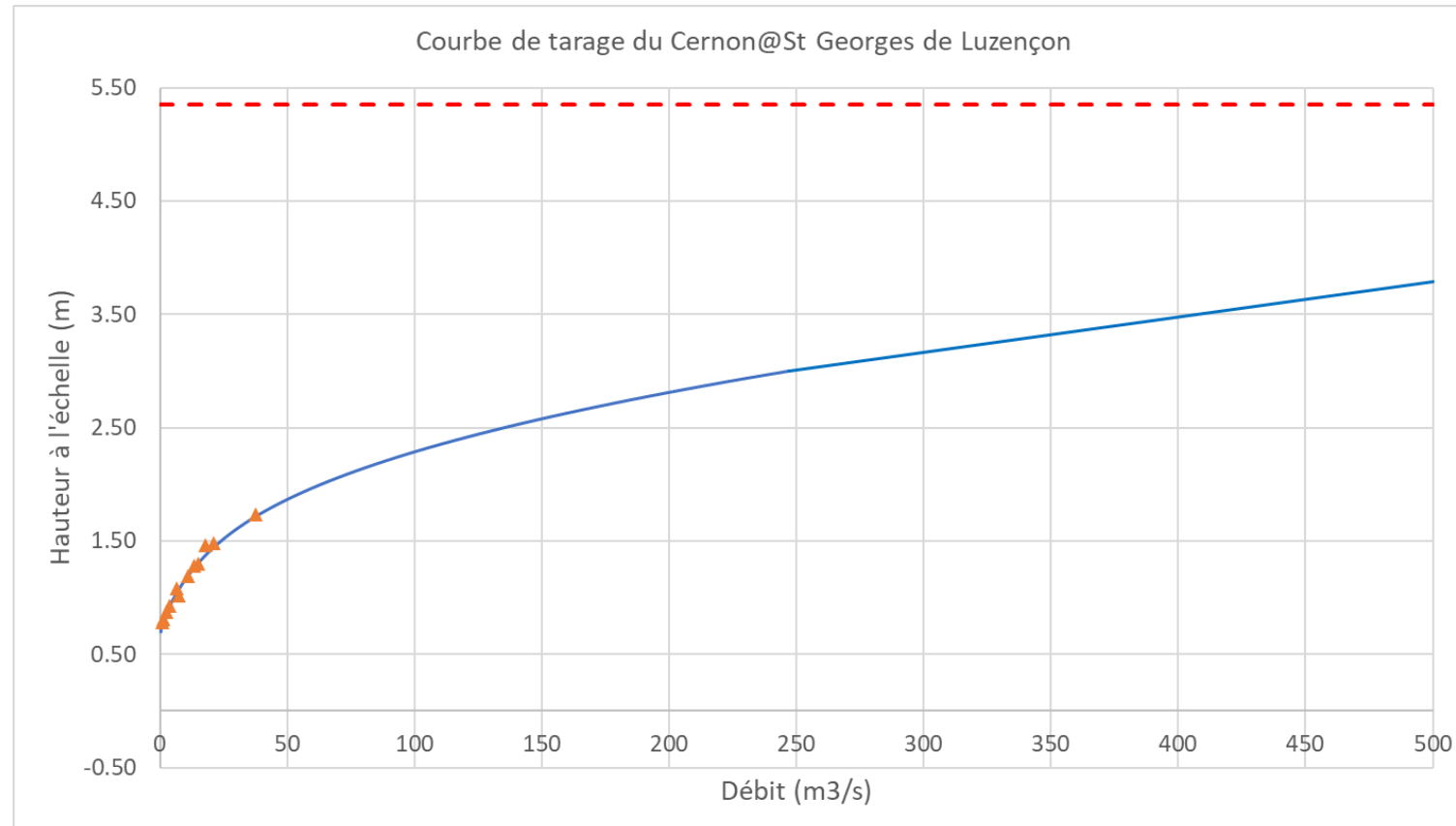
AMÉLIORER L'EXTRAPOLATION DES COURBES DE TARAGE

- Exemple du Cernon@St Georges de Luzençon

- Max jaugé : $h=1,73\text{m}$ / $Q= 38\text{m}^3/\text{s}$
- Courbe extrapolée par ajustement log sur les jaugeages jusqu'à une hauteur de 3m

- Crue du 28/11/2014 : hauteur maximale de 5,35m...

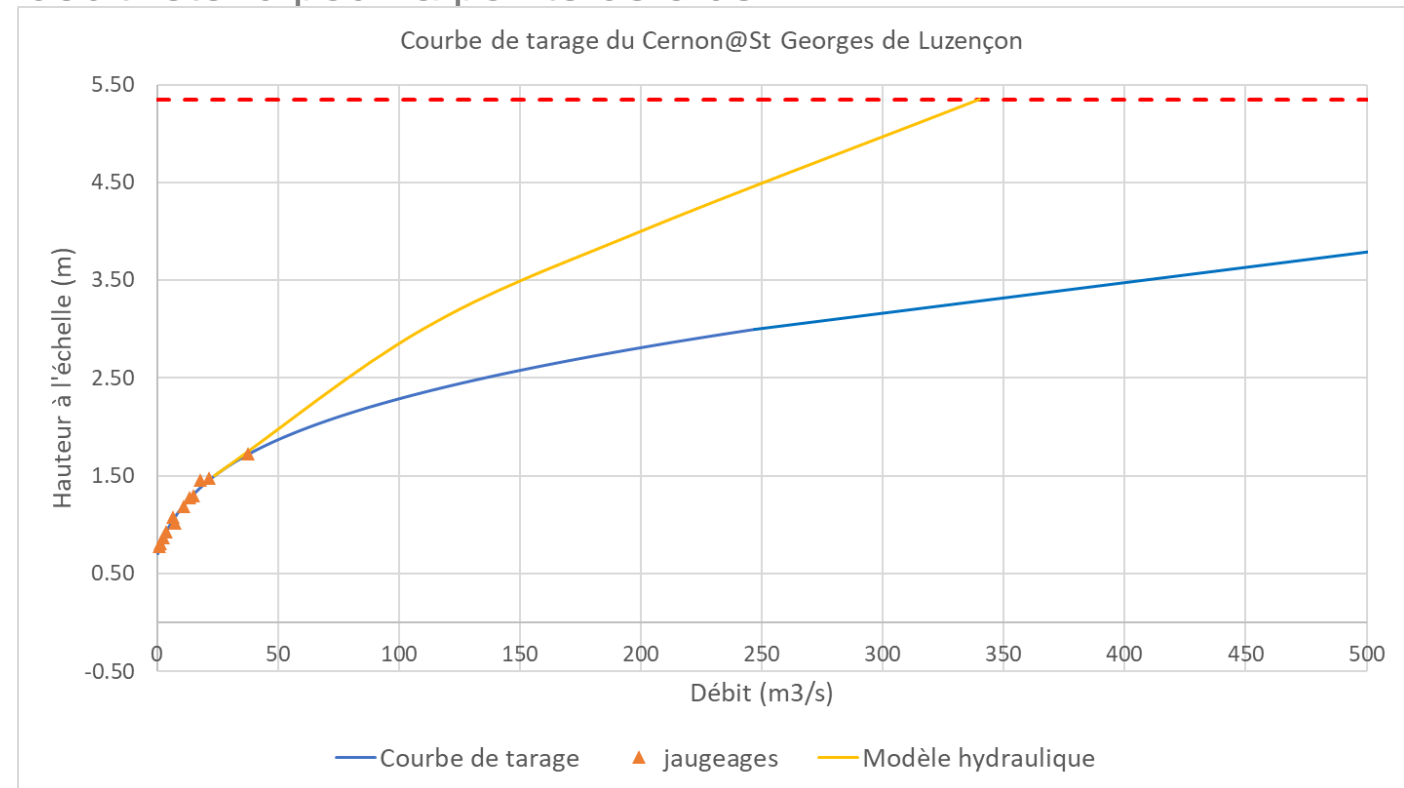
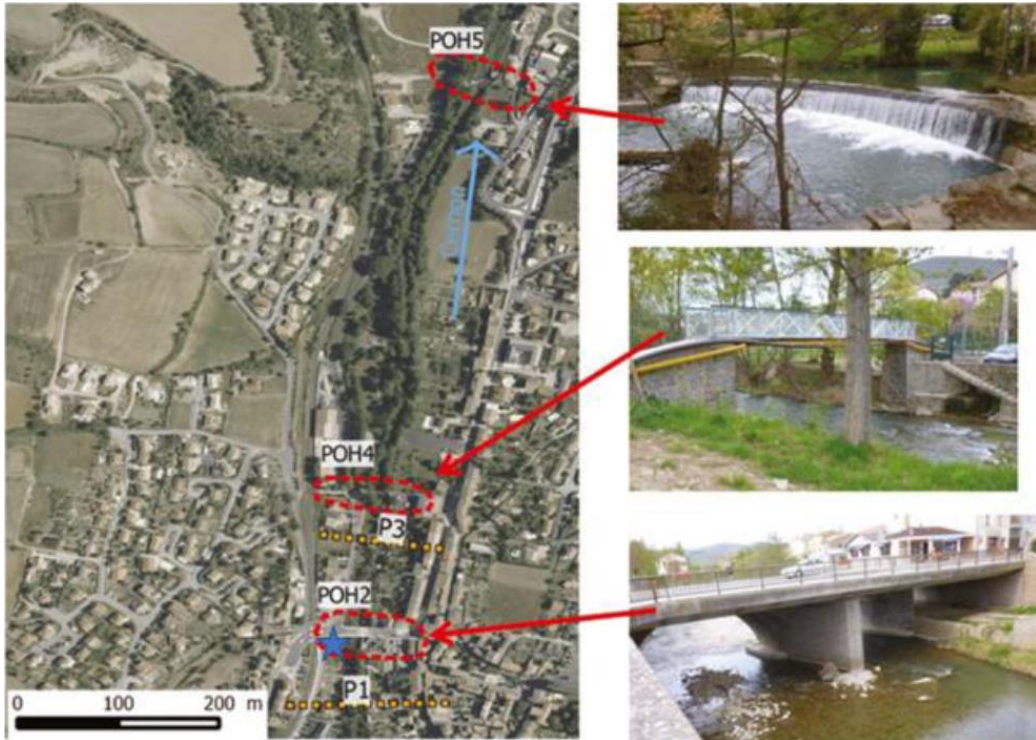
- Poursuite de l'extrapolation jusqu'à 5,35m $\rightarrow 1410 \text{ m}^3/\text{s}$, soit un Q spécifique de presque $10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$...



AMÉLIORER L'EXTRAPOLATION DES COURBES DE TARAGE

■ Exemple du Cernon@St Georges de Luzençon : Modèle hydraulique numérique 1D

- Prise en compte des singularités à l'aval:
 - Pont routier / Passerelle piétonne / Seuil
- Modélisation à 5,35m à la station:
 - Pont routier pas en charge, mais diminue la débitance → remous
 - Passerelle piétonne en charge + embâcles → remous
 - Seuil reste dénoyé
- Courbe de tarage modélisée : $Q = 340 \text{ m}^3/\text{s}$ → débit retenu pour la pointe de crue !



CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Pas facile d'avoir des données en crue, mais on essaie !

■ Nouveaux moyens de jaugeages non-intrusifs

- Imagerie, Radar Doppler → Utilisation de plus en plus importante chez les hydromètres
- Aidé par la démocratisation du drone volant, permettant des mesures plus aisées
- Reste le problème de la mesure de la bathymétrie → Perspectives intéressantes (Lidar, Radar, Imagerie...) !
- Peut-on être encore moins intrusif ? Les mesures satellitaires !
 - Mission SWOT permet de fournir des lignes d'eau haute résolution
 - Utilisation de vidéos satellitaires (projet FluViSat)

■ Estimation de débits de pointe post-crue

- De plus en plus souvent mis en œuvre malgré la logistique importante qu'ils demandent sur le terrain
- Photos, vidéos de témoins → estimation des vitesses maxi
 - intérêt pour l'amélioration de la modélisation hydraulique des crues
- Approche participative par le grand public (crowdsourcing) ou par des partenaires permettrait d'obtenir des informations plus complètes, plus facilement

■ Modélisation hydraulique pour l'extrapolation des courbes de tarage

- Simplifiée (BaRatin) ou numérique
- Riche en enseignements, et devrait être largement utilisée sur les réseaux d'hydrométrie.
- La revue des résultats de modélisation par les hydromètres de terrain, connaissant les stations hydrométriques et les écoulements à différents régimes, est essentielle !

AMÉLIORER L'EXTRAPOLATION DES COURBES DE TARAGE

■ **Modèle hydraulique numérique 1D pour l'extrapolation des courbes de tarage**

- Suffisamment simples pour être utilisés et valorisés par des hydromètres non aguerris à la modélisation
- Zone modélisée doit être assez grande pour inclure les éléments pouvant modifier le lien entre la hauteur et le débit
 - éléments latéraux (forme du lit, passage du lit mineur au lit majeur, présence de casiers...)
 - éléments longitudinaux (singularités dans la pente, présence de retenues, de rampes, d'ouvrages d'art)
 - une attention particulière est donc à apporter aux relevés topographiques et bathymétriques.
- Calage réalisé sur les coefficients de frottement
 - en essayant de reproduire au plus juste les jaugeages à haut débit mesurés à la station, ou, encore mieux, les pentes de la surface libre telles que relevées grâce aux laisses de crue.
 - et en restant réaliste...

■ **Un outil de compréhension des contrôles hydrauliques pertinent**

- Permet de prendre du recul sur le fonctionnement hydraulique
- Permet de comprendre la modification des contrôles hydrauliques selon les gammes de débits
- A EDF-DTG, par exemple, cette application a été généralisée à la quasi intégralité des stations hydrométriques.