



Observatoire  
des Sédiments  
du Rhône

# Les sables, ces passagers invisibles des fleuves : mieux les connaître pour mieux les gérer

Guillaume Dramais (INRAE) / Benoît Camenen (INRAE)

Stéphane Rodrigues (Univ. De Tours) / François Lauters (EDF-DTG)

Un dispositif de recherche animé par le **graie**

## Plan de la présentation

- **Qu'est-ce que le sable ? Comment est-il transporté ? Pourquoi s'y intéresser ?**
- **Comment mesurer le sable, calculer des flux ? Résultats issus des travaux de l'OSR et de projets en lien**
  - **Conclusions et perspectives**

# Qu'est-ce que le sable ?

## Caractéristiques du sable

- Granulométrie : particules de diamètre compris entre 63  $\mu\text{m}$  et 2 mm
- Transporté par charriage au fond et en suspension dans l'eau (variabilité spatiale)
- Transporté dans les cours d'eau de manière intermittente (variabilité temporelle)



*Sable prélevé en suspension  
Port-Saint-Louis-du-Rhône (2016)*

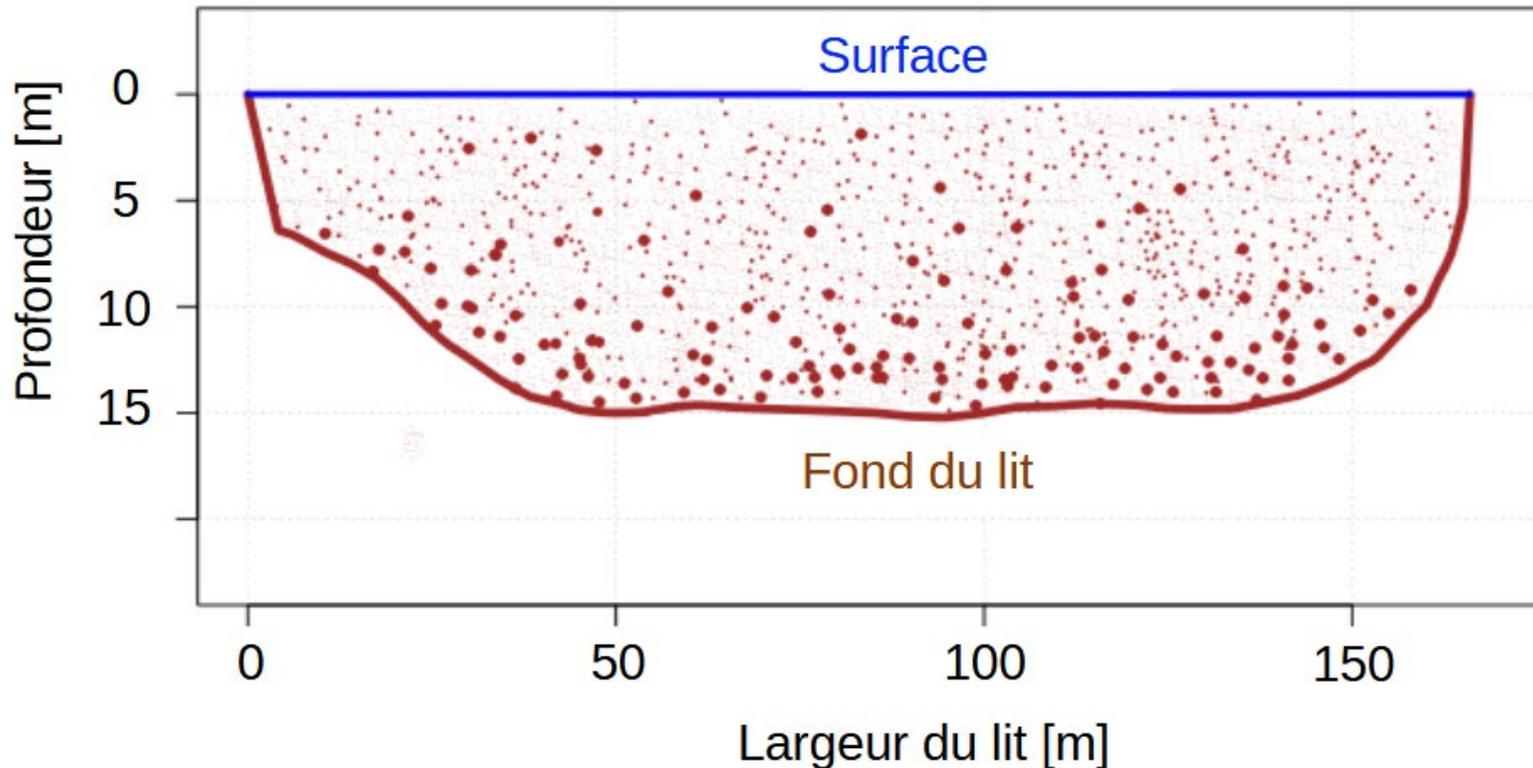


*Dépôts de sable sur les berges du Rhône suite aux crues de l'Isère (2023)*

# Comment le sable est-il transporté ?

## Modes de transport du sable

- Transporté dans les cours d'eau de manière intermittente (variabilité temporelle)
- **Transporté dans la section, dans différents compartiments (variabilité spatiale)**

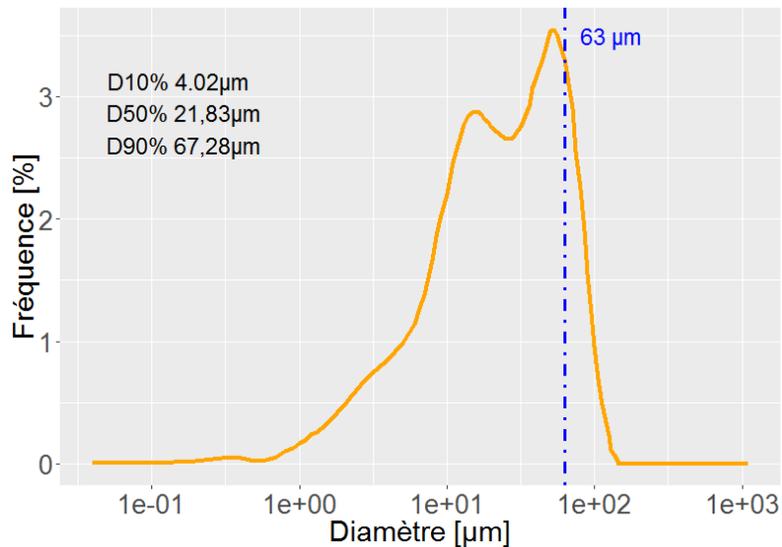


- Suspension fine (limons/argiles) ( $<63\mu\text{m}$ )
- **Suspension graduée (sables/limons grossiers)**
- **Charge de fond (graviers/sables)**

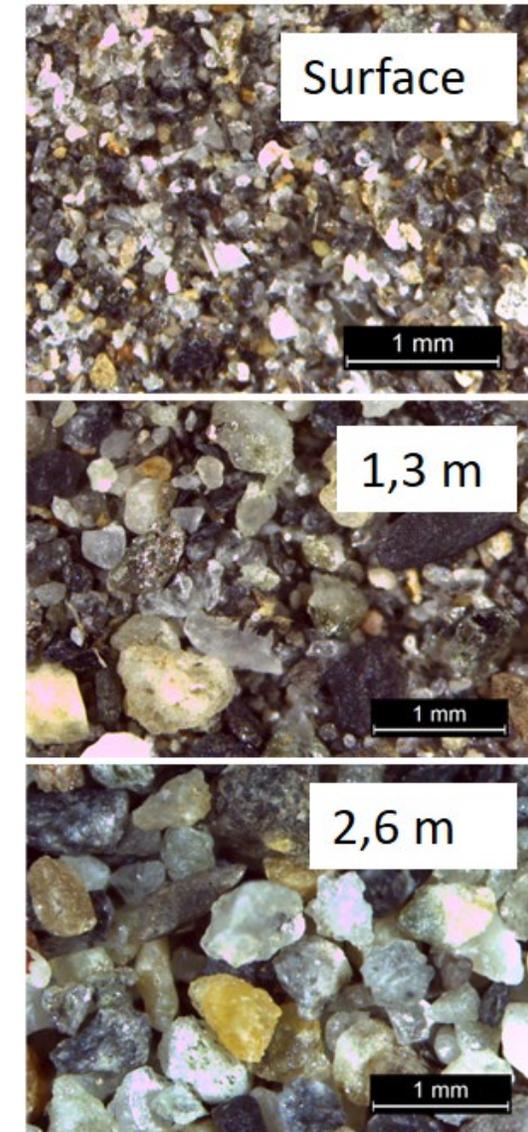
# Comment le sable est-il transporté ?

## Prélever, analyser

- Difficile de prélever un échantillon représentatif du sable en mouvement
- Difficile à analyser (tamisage, filtration, granulométrie)  
→ distribution granulométrique bimodale



*Courbe granulométrique avec distribution bimodale*



*Exemple d'une suspension graduée de sable sur le Rhône (Les Rippes) (APAVR 2016)*

# Pourquoi s'intéresser au sable ?

## Le transit du sable dans les grands fleuves à fond graveleux : exemple du Rhône

- Fort impact anthropique (chenalisation, barrages, etc.)
- Modification du fonctionnement naturel du bassin versant du Rhône
- Dynamique des graviers dans le Rhône aujourd'hui très limitée
- Dans certains tronçons, dynamique du lit est partiellement contrôlée par le sable



# Pourquoi s'intéresser au sable ?

## Enjeux de la gestion du sable le long du Rhône

- Sécurité des personnes, des ouvrages, du chenal navigable (prévention des inondations, dragage, chasses, APAVER)
- Enjeux écologiques dans le fleuve et ses annexes (variabilité temporelle des apports, recharges dans certains tronçons)
- Aider le Rhône à retrouver un équilibre sédimentaire, (gestion sédimentaire le long du Rhône, recharge du trait de côte)



*Dépôts dans le RCC suite à la chasse de la basse Isère (2021)*



*RCC près de Givors (2018)*

## Plan de la présentation

- Qu'est-ce que le sable ? Comment est-il transporté ? Pourquoi s'y intéresser ?
- **Comment mesurer le sable, calculer des flux ? Résultats issus des travaux de l'OSR et de projets en lien**
  - Conclusions et perspectives

# Comment mesurer le sable, calculer des flux ?

- **Charriage**

- Jaugeages solides par prélèvements et acoustique passive
- Application et validation d'une courbe de tarage pour le charriage

- **Suspension graduée**

- Jaugeages solides par prélèvements combinés avec un jaugeage liquide
- Approches indirectes pour la mesure de suspension par acoustique active

- **Modélisation des flux**

- Intérêts des courbes de tarage sédimentaire
- Quels stocks de sable disponibles en amont?
- Apports de la modélisation numérique

# Jaugeages solides par prélèvements et acoustique passive

- **Objectif** : Quantifier le flux de sable par charriage avec un préleveur (Helley-Smith)
- **Méthode** : Prélèvements sur plusieurs verticales décrivant la section
- **Résultat** : Extrapolation du flux charriés de sable sur la section



*Jaugeage solide sur le Rhône à Bognes (traille) (05/2016)*



*Jaugeage solide sur le Rhône à Pyrimont (pont) (05/2021)*

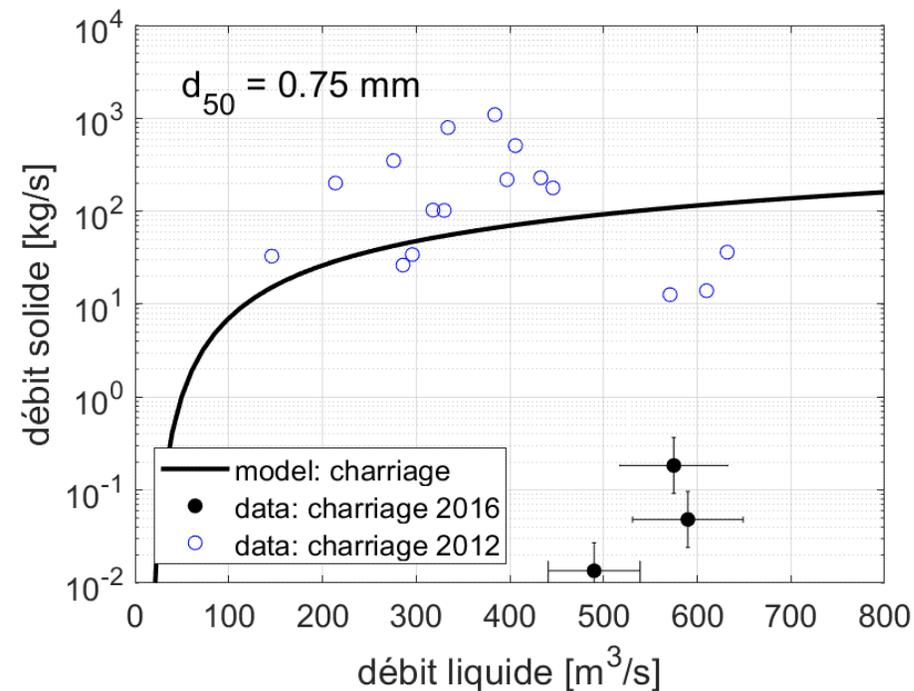
- Expérimentations lourdes à mettre en œuvre
- Prélèvements de charge de fond très incertains  
→ répétitions pas toujours aisées
- Mesure de référence
- Tentatives d'utilisation de l'hydrophone (jaugeage solide par acoustique passive, Nasr et al., 2023)  
→ échec car transport de sable sur une matrice graveleuse (mais marche dans d'autres contextes)

*Radeau dérivant  
équipé d'un  
hydrophone (photo  
Zanker)*

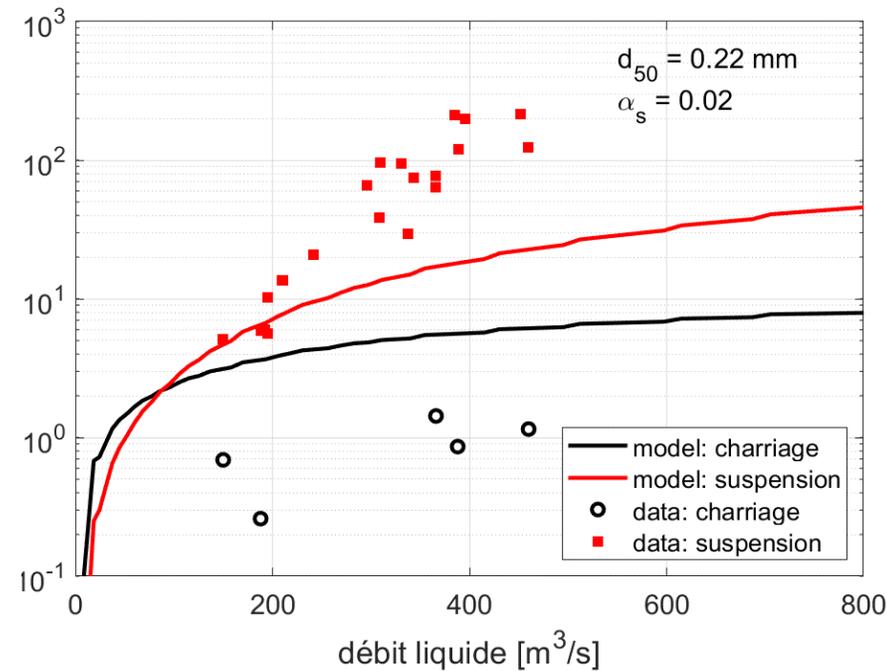


# Etablissement d'une courbe de tarage sédimentaire

- **Objectif** : Trouver une relation directe entre le débit liquide et le débit solide
- **Méthode** : Construire une courbe de tarage du flux charrié à partir de jaugeages solides ponctuels
- **Résultats** : Estimation du flux charrié en continu, flux charriés moyen annuel



Courbe de tarage sédimentaire à base physique sur le Rhône à Bognes



Courbe de tarage sédimentaire à base physique sur l'Isère à Grenoble

Un outil pour les courbes de tarage sédimentaire:  
<https://www.bedloadweb.com/>

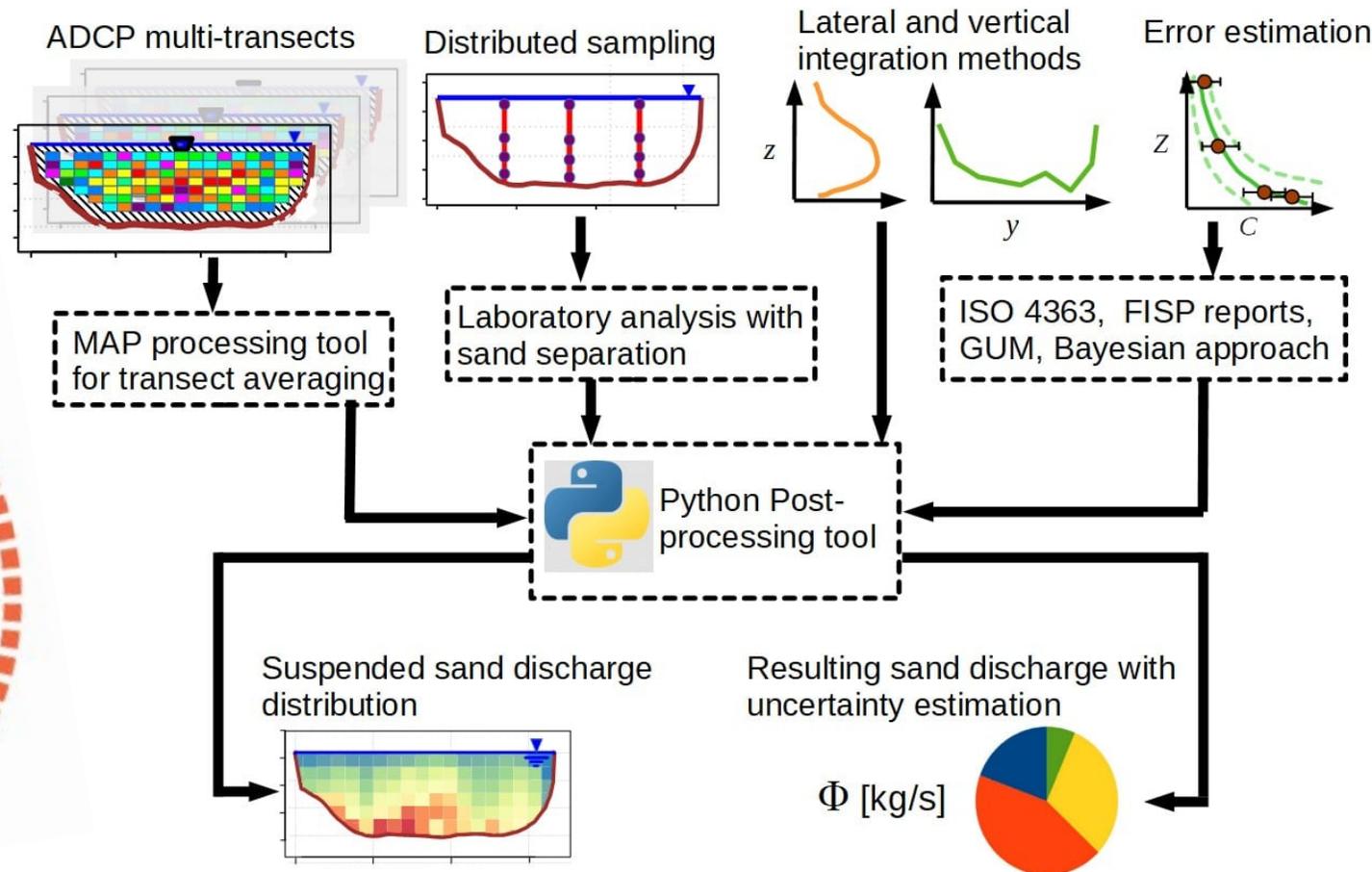
- Très forte sensibilité aux apports en sable dans le cas de rivière à graviers
- Pas d'équilibre → **formulations semi-empiriques** peu adaptées
- Charriage négligeable devant la suspension graduée

# Comment mesurer le sable, calculer des flux ?

- **Charriage**
  - Jaugeages solides par prélèvements et acoustique passive
  - Application et validation d'une courbe de tarage pour le charriage
- **Suspension graduée**
  - Jaugeages solides par prélèvements combinés avec un jaugeage liquide
  - Approches indirectes pour la mesure de suspension par acoustique active
- **Modélisation des flux**
  - Intérêts des courbes de tarage sédimentaire
  - Quels stocks de sable disponibles en amont?
  - Apports de la modélisation numérique

# Approches par jaugeages solides et mesures de la suspension graduée

Une méthode de calcul avec estimation d'incertitude sur le flux de sable (SDC)



# Approches par jaugeages solides et mesures de la suspension graduée

**Objectif :** quantifier le flux de sable « instantané »

**Méthode :** jaugeages solides

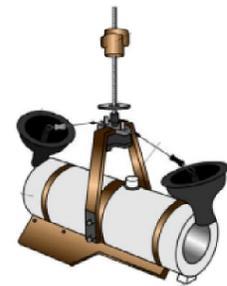
- Embarqués : prélèvements distribués dans la section (~ 12 échantillons, jaugeages ADCP)
- Depuis des ponts : prélèvements distribués dans la section,
- Mesures comparatives, validations, travaux sur le pompage distribué (CNR, EDF, INRAE Grenoble)

**Résultat :** calcul du flux de sable et de MES dans la section

## Jaugeages solides embarqués



*Jaugeage solide sur le Rhône ADCP et prélèvements (2023)*



*Bouteille horizontale*



*US-P06*

## Jaugeages solides depuis des ponts ou des trailles



*Suivi de la chasse de la Basse Isère (2021)*



*Bouteille de Delft*

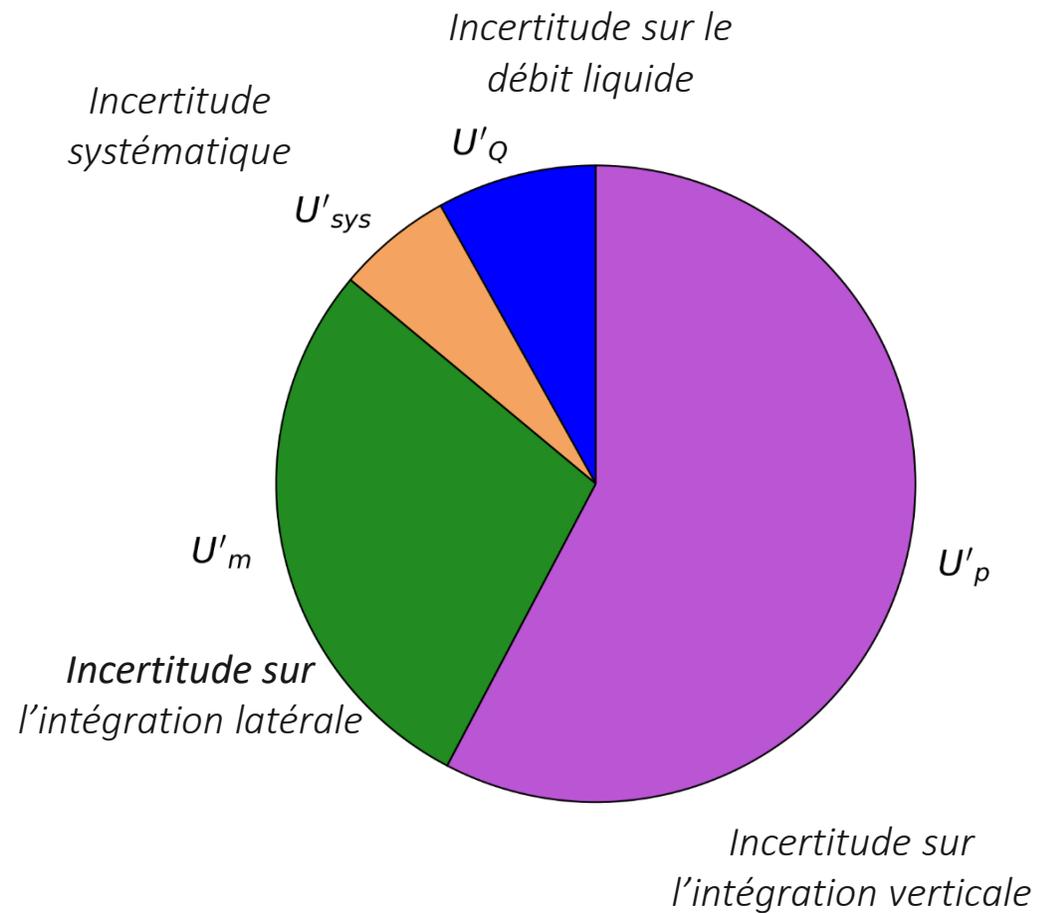
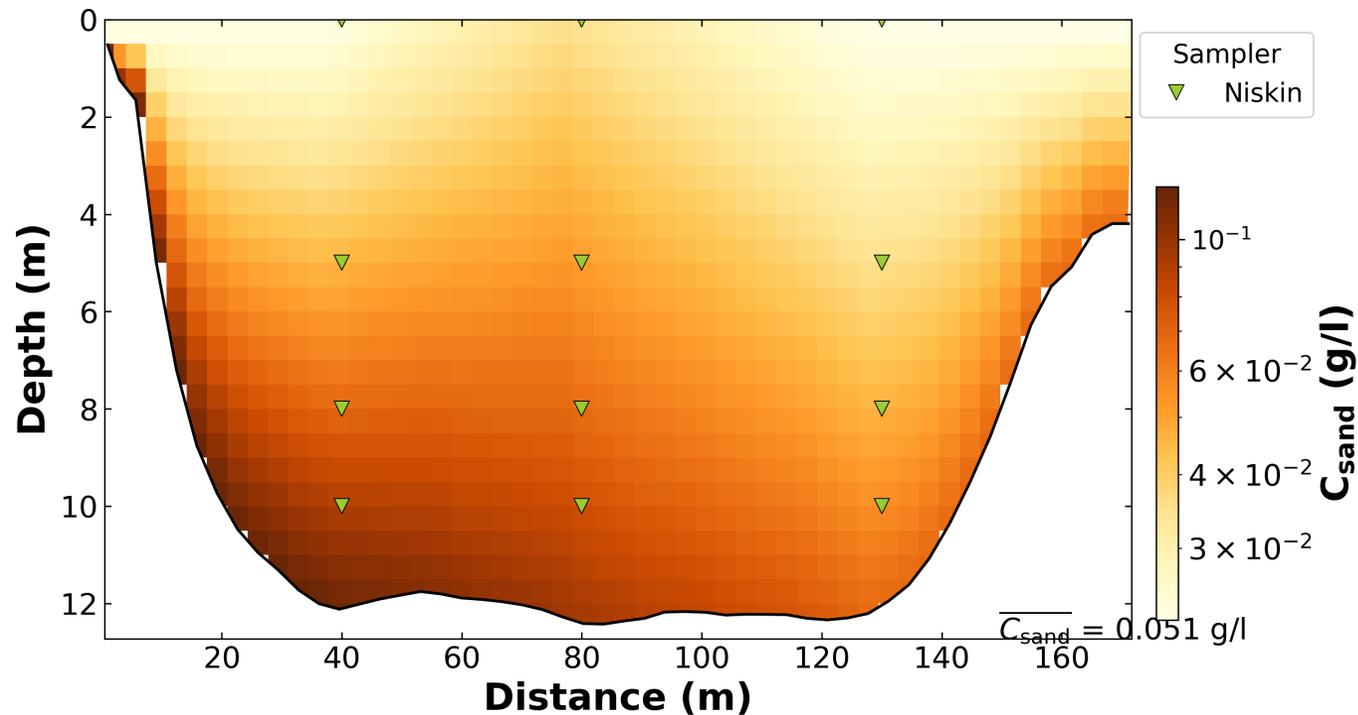


*Pompe PP36*

# Approches par jaugages solides et mesures de la suspension graduée

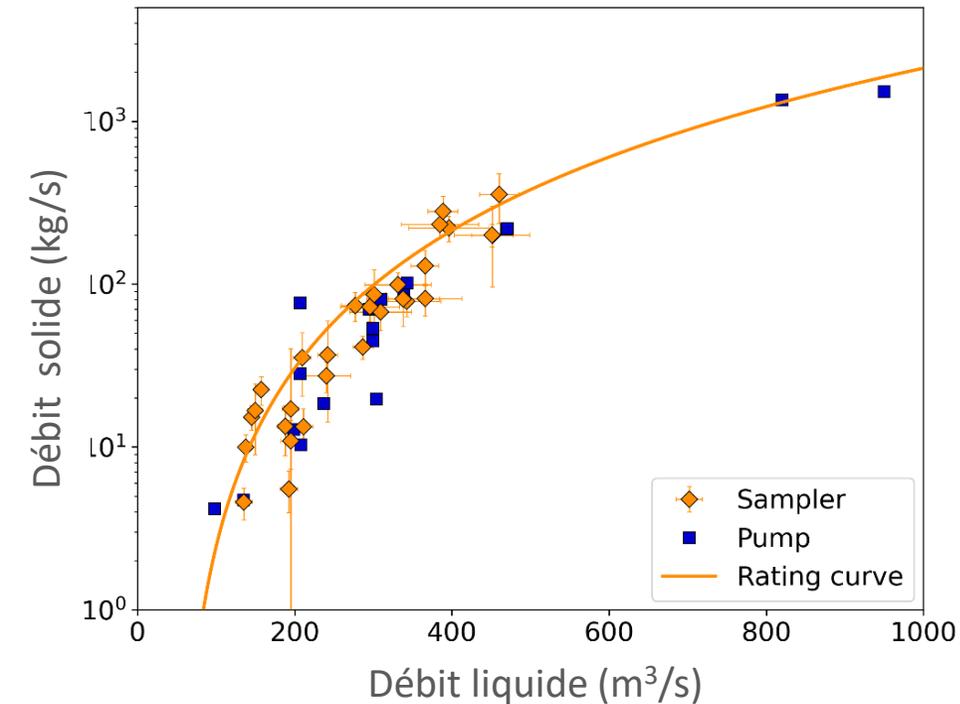
L'exemple du Rhône à Lyon Perrache

$$U'_{\Phi} = 18,6 \%$$

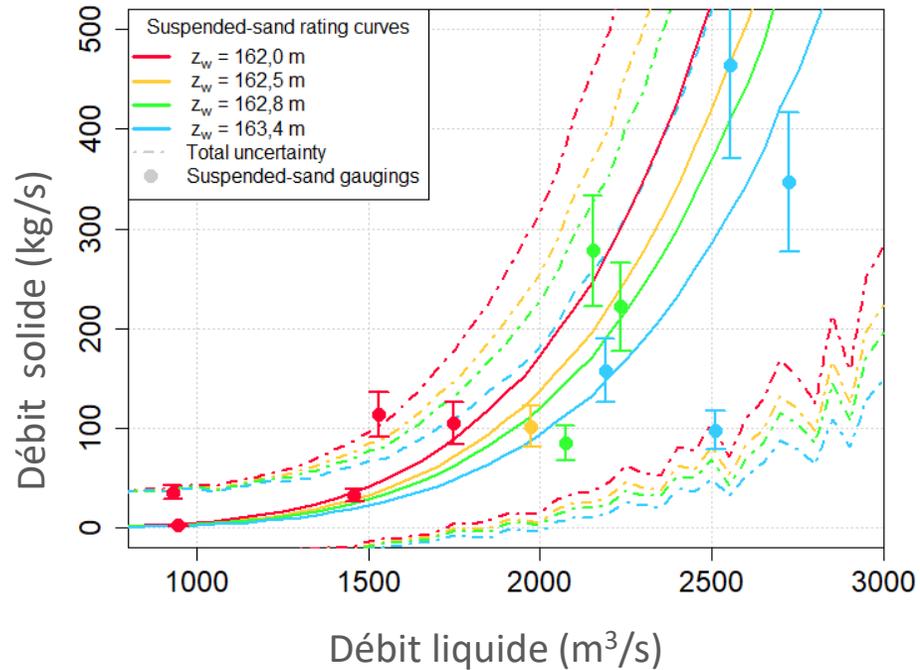


# Etablissement d'une courbe de tarage sédimentaire

- **Objectif** : Trouver une relation directe entre le débit liquide et le débit solide en suspension
- **Méthode** : Construire une courbe de tarage du flux charrié à partir de jaugeages solides ponctuels
- **Résultats** : Estimation du flux charrié en continu, flux charriés moyen annuel



*Courbe de tarage sédimentaire empirique sur l'Isère à Grenoble (Marggraf, 2024)*

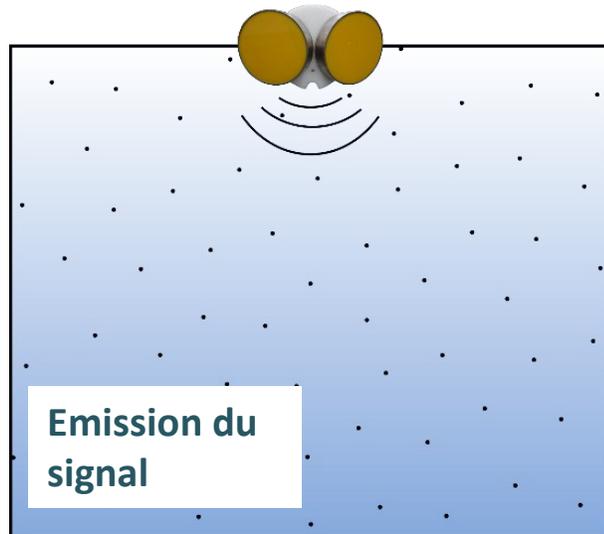


*Courbe de tarage semi-empirique sur le Rhône à Perrache (Dramais, 2020)*

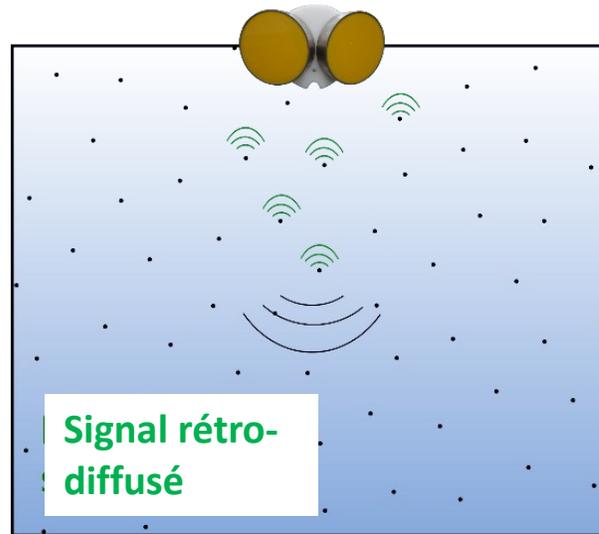
**Les courbes de tarage empiriques peuvent donner des résultats intéressants mais on fait l'hypothèse d'un équilibre global (local + apports)**

# Mesures par acoustique active, ADCP, ABS

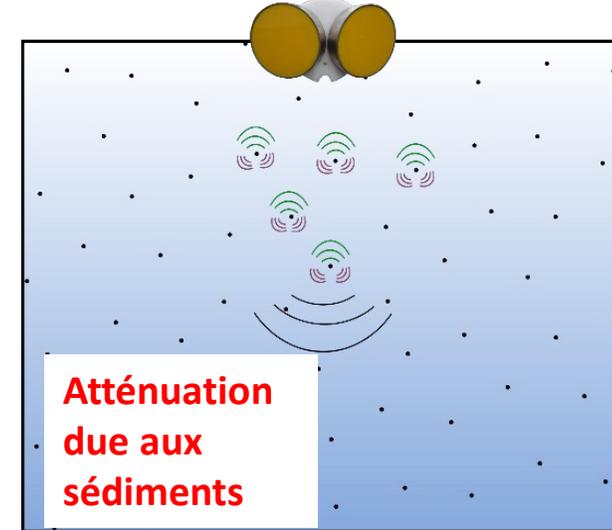
## Sonar acoustique actif



Principe de mesure : mesure du signal acoustique rétro-diffusé



Rétro-diffusion dominée par les sables si les concentrations en fines sont faibles



Atténuation du signal dominée les fines

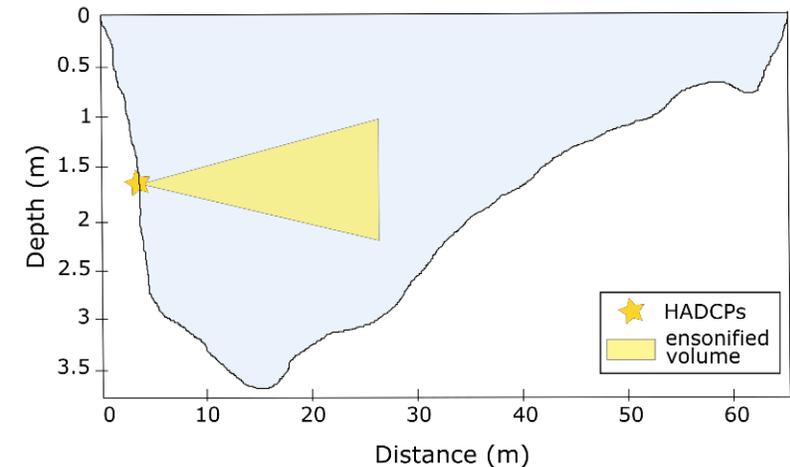
- Existence de modèles théoriques mais calibration nécessaire...
- Plusieurs thèses se sont succédées : S. Moore (2011), A. Vergne (2018), J. Marggraf (2024) avec pour objectif d'arriver à déterminer la granulométrie des particules et leur concentration grâce à l'acoustique

# Mesures par acoustique active, ADCP, ABS



## Déploiement de la méthode acoustique

- en vertical (jaugeage acoustique depuis un bateau, suspension hétérogène)
- en horizontal (mesure fixe en continue mais partielle, suspension supposée homogène)

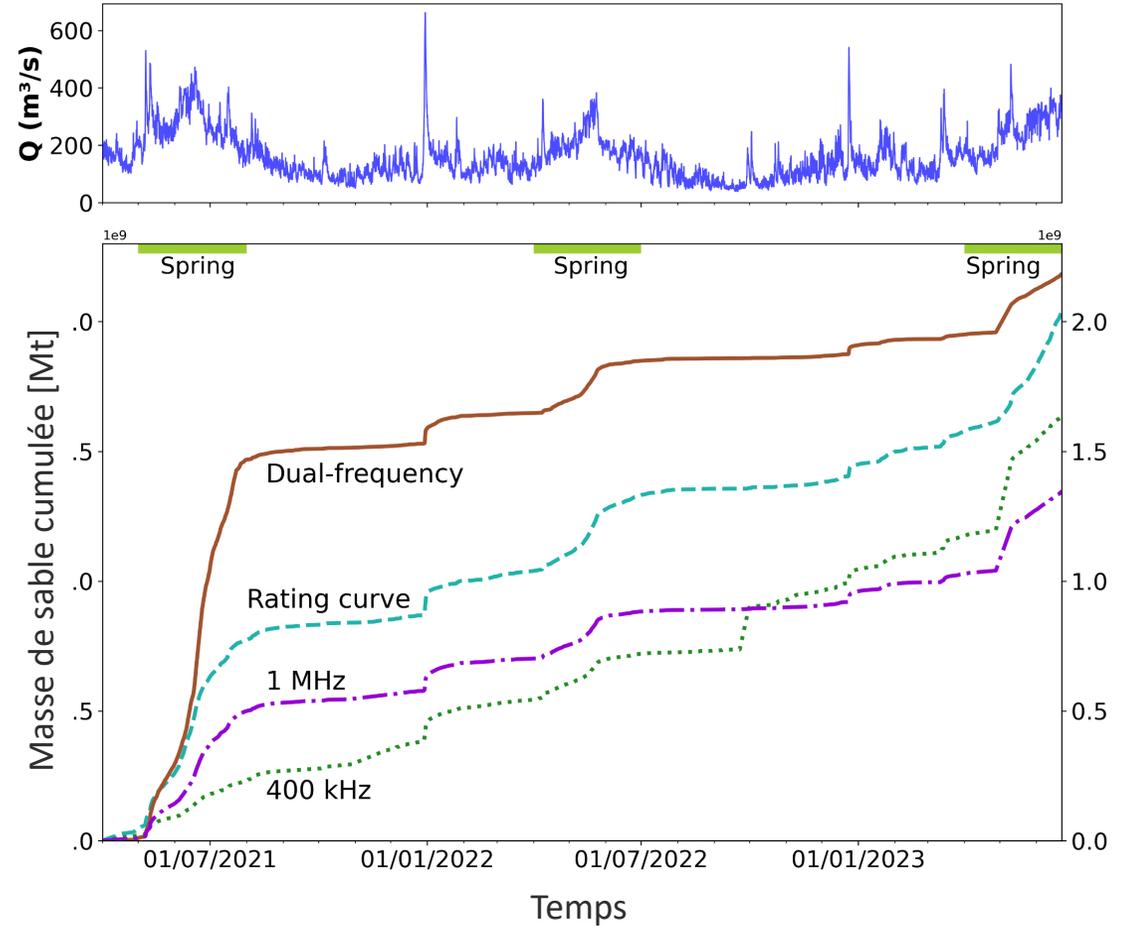
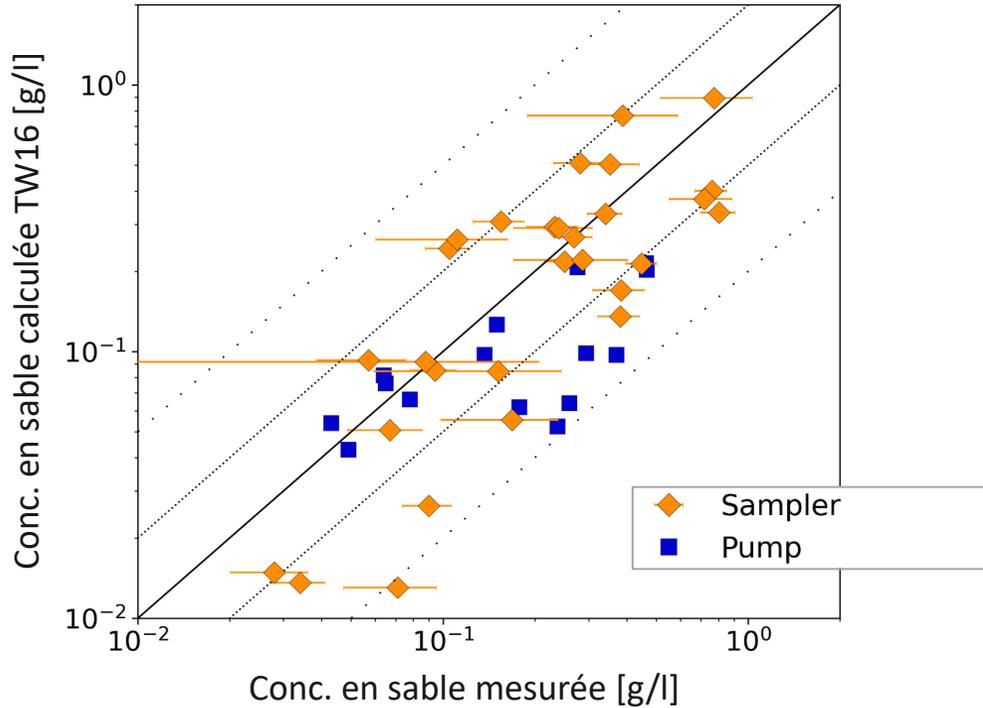
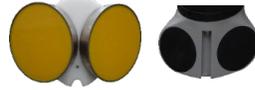


*Déploiement de l'Aquascats (ABS multifréquence)  
Pendant l'APAVER 2026. A. Vergne (2018)*

*Station Grenoble campus. J. Marggraf (2024)*

# Mesures par acoustique active, ADCP, ABS

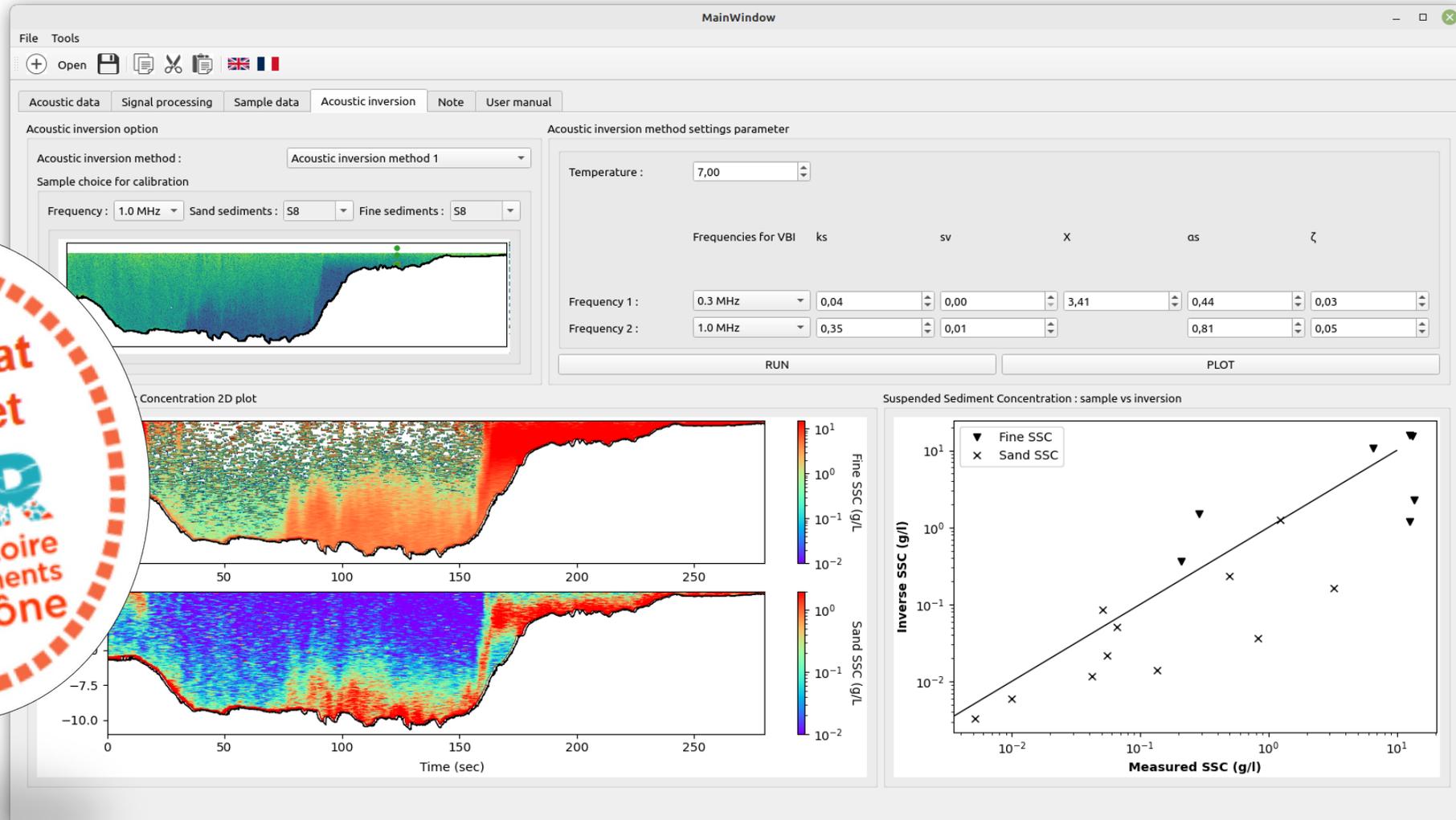
Double fréquence



Station Grenoble campus. J. Marggraf (2024)

- Nécessité d'une calibration avec de nombreux échantillons distribués (représentatifs)
- Meilleure sensibilité de la méthode acoustique (dual-Frequency) aux variations temporelles de la granulométrie pour la mesure en continue

# Acoused, un logiciel pour analyser les jaugages acoustiques



✓ Résultat  
du projet  
**OSR**  
Observatoire  
des Sédiments  
du Rhône

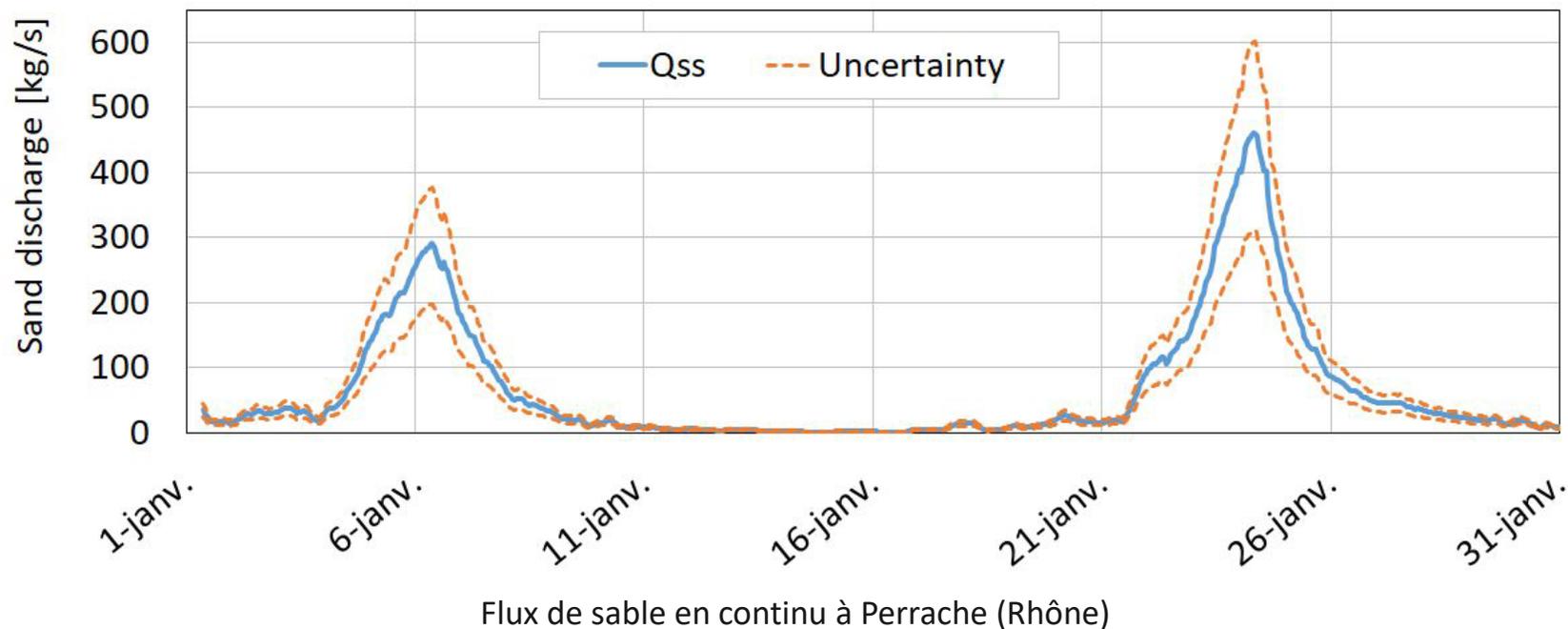
(Acoustic Backscattering for Concentration of Suspended Sediment in Rivers) B. Moudjed

# Comment mesurer le sable, calculer des flux ?

- **Charriage**
  - Jaugeages solides par prélèvements et acoustique passive
  - Application et validation d'une courbe de tarage pour le charriage
- **Suspension graduée**
  - Jaugeages solides par prélèvements combinés avec un jaugeage liquide
  - Approches indirectes pour la mesure de suspension par acoustique active
- **Modélisation des flux**
  - Intérêts des courbes de tarage sédimentaire
  - Quels stocks de sable disponibles en amont?
  - Apports de la modélisation numérique

# Intérêts des courbes de tarage sédimentaire

- **Objectif** : Calculer des bilans de flux de sable
- **Méthode** : combinaison de formules par capacité de transport du sable en suspension et de mesures expérimentales
- **Résultats** : « Arénogrammes » et bilans cumulés (avec incertitudes) pour des événements donnés

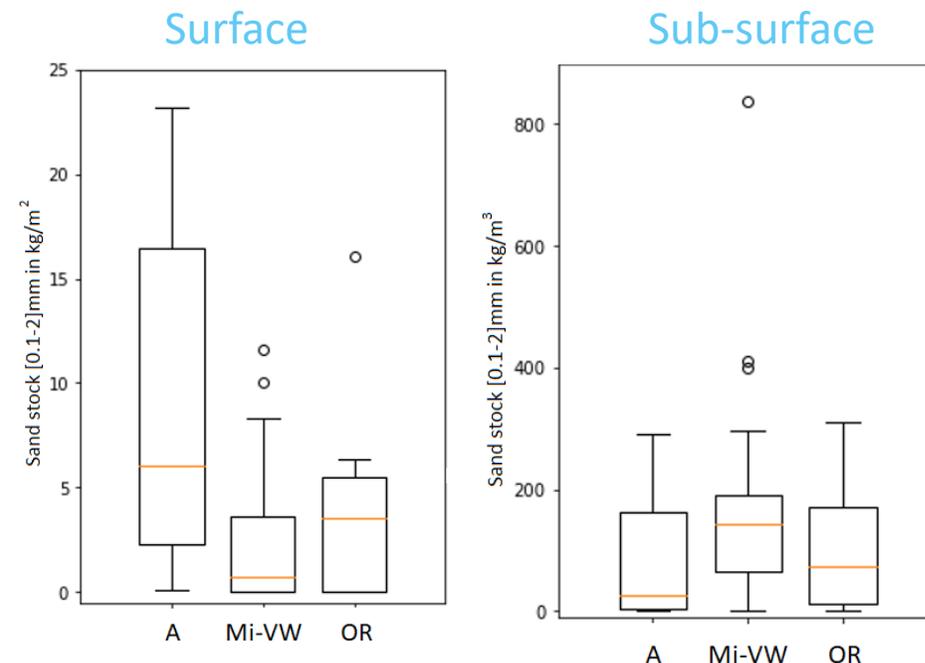


**175 000t de sable en suspension en janvier 2018**

[120000-226000] pour 572000 t de fines

# Quels stocks de sable disponibles en amont?

Rhône: rivière à graviers. D'où viennent ces sables et comment ont-ils été remobilisés lors de la crue?

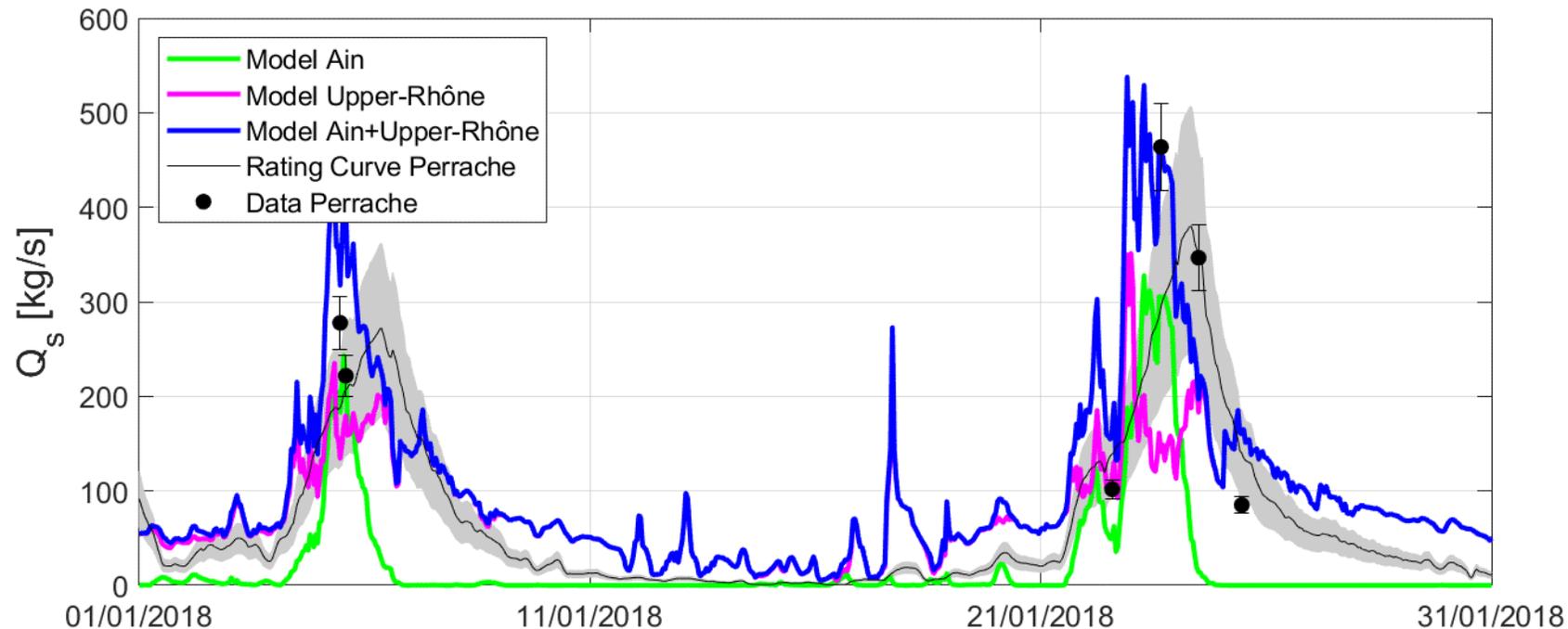


- **Objectif** : Evaluation des stocks de sable en amont de Lyon et leur potentielle remobilisation
- **Méthode** : Échantillonnage sur les bancs (placette « Deng ») et dans le lit mineur (tube McNeil) + évaluation d'un volume remobilisé (épaisseur x surface ou volume mobilisé par avulsion)
- **Résultats** : Stocks négligeables sur Miribel mais potentiellement beaucoup plus important sur l'Ain

# Apport de la modélisation: estimation des apports de l'Ain et du Rhône-amont lors de la crue de janvier 2018

Utilisation du modèle du Rhône développé dans le cadre de l'OSR avec les solveur Mage-AdisTS (Guertault, 2016) pour modéliser les flux en suspension

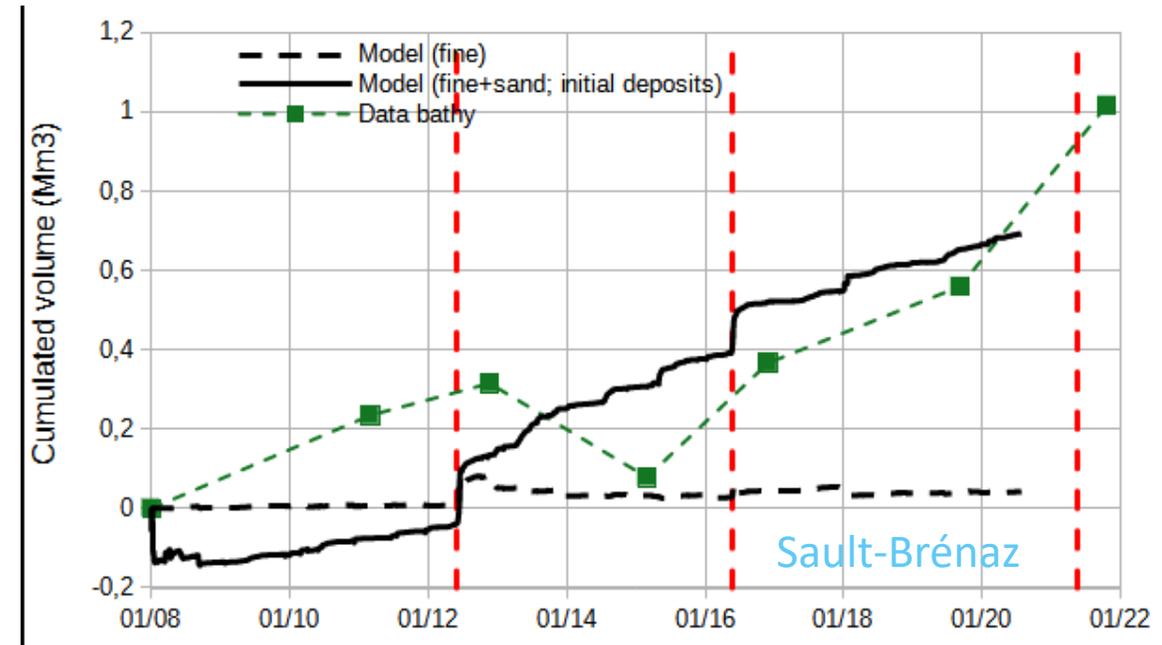
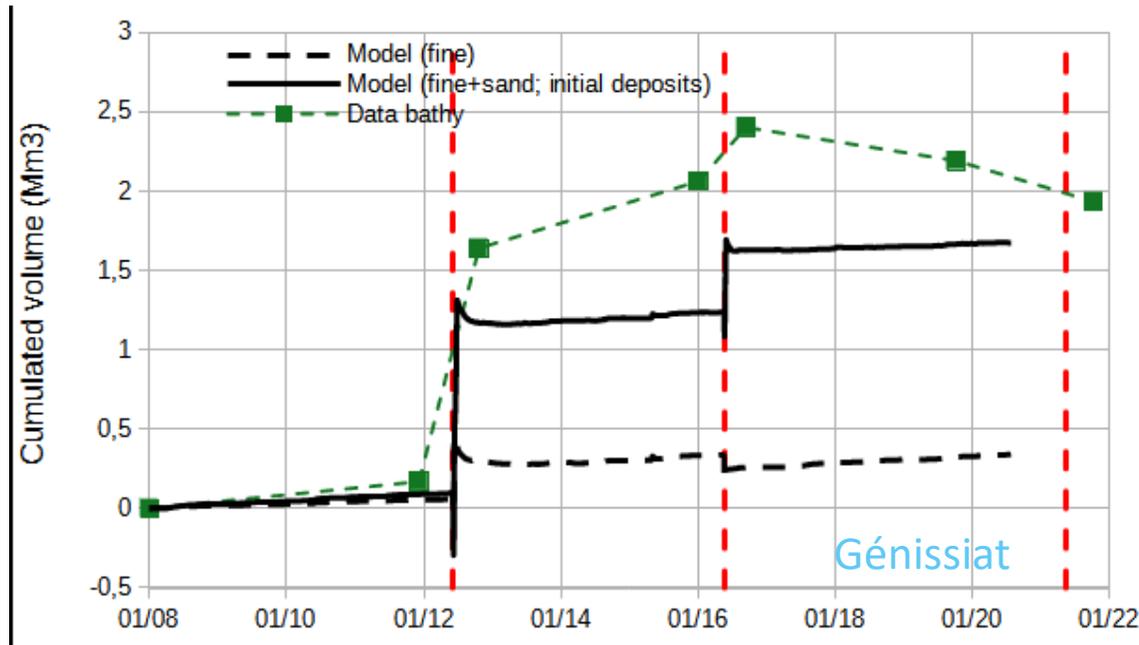
Test d'hypothèses sur les apports de l'Ain et du Haut-Rhône



Apports importants de l'Ain (1<sup>er</sup> pic) mais aussi du Rhône amont, soit des retenues CNR (2<sup>nd</sup> pic)  
Limite d'une courbe de tarage sédimentaire si apports limités

# Apport de la modélisation: compréhension de la dynamique des retenues CNR sur le long-terme

Utilisation du modèle du Rhône développé dans le cadre de l'OSR avec les solveur Mage-AdisTS (Guertault, 2016) pour modéliser les flux en suspension et les dépôts érosion dans les retenues



Reproduction de la dynamique des retenues correcte, sensibilité à la vitesse de chute  
Importance de l'estimation des stocks initiaux, des apports en sable des affluents → besoin de mesures

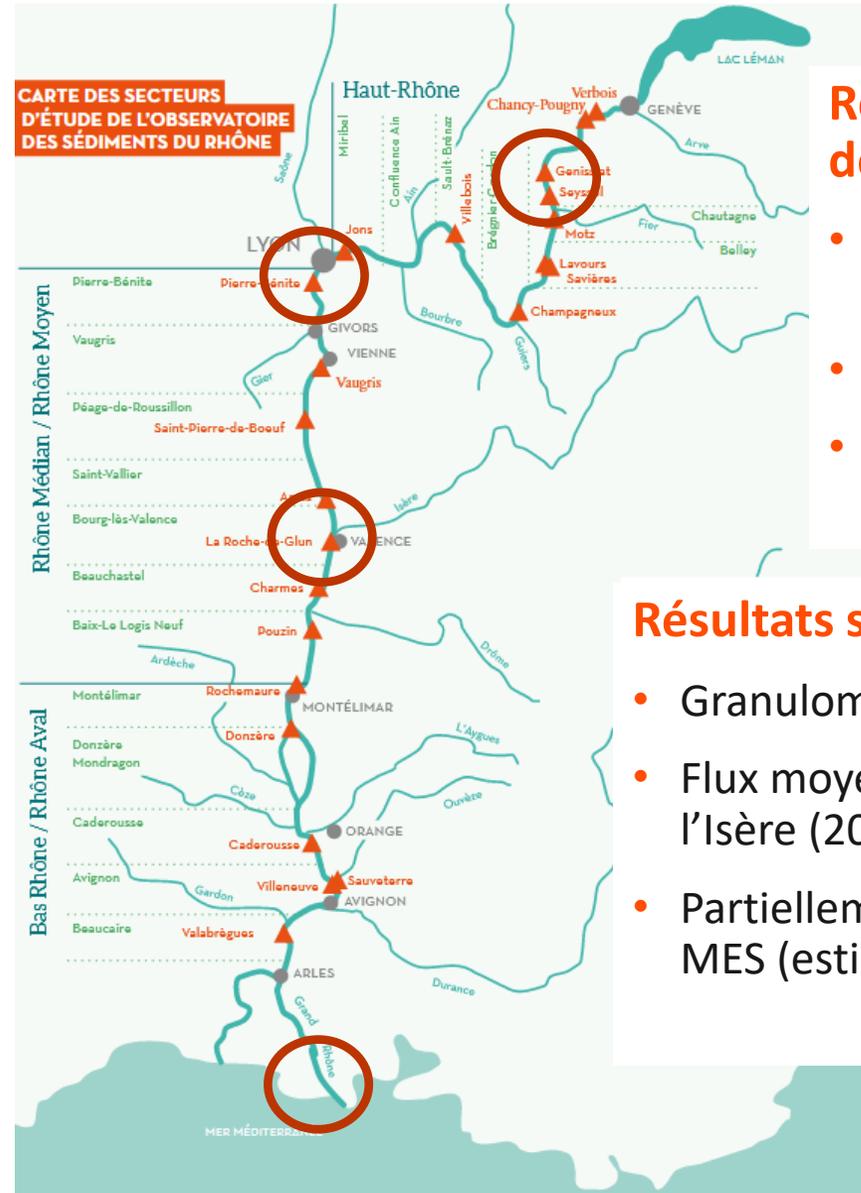
# Bilan des mesures du sable sur le Rhône

## Résultats à Lyon (Perrache)

- Granulométrie entre 0,15 et 0,2 mm
- Flux total de sable 0,175 Mt (soit 30% du flux MES) crue de janvier 2018

## Résultats à l'embouchure

- Granulométrie ~0,1 mm: flux variant entre 10 et 500 kg/s selon les débits
- Estimations de Antonelli (2002) et Provensal et al (2014) entre 0,6 et 1,4 Mt à confirmer
- Bilan sédimentaire à l'embouchure négatif depuis les années 2000



## Résultats autour de Génissiat lors des APAVER

- Granulométrie proche de 0,1 mm (2016 et 2021)
- Flux variant entre 100 et 1000 kg/s
- Flux total de sable ~0,2 Mt, soit 10% du flux MES (mai 2021)

## Résultats sur l'Isère

- Granulométrie proche de 0,2 mm
- Flux moyen annuel des apports en sable de l'Isère (2008-2022) : 0,7 Mt
- Partiellement inclus dans le flux moyen en MES (estimé à Grenoble): 2 Mt

## Plan de la présentation

- Qu'est-ce que le sable ? Comment est-il transporté ? Pourquoi s'y intéresser ?
- Comment mesurer le sable, calculer des flux ? Résultats issus des travaux de l'OSR et de projets en lien
- **Conclusions et perspectives**

## Conclusion et perspectives

### Avancées depuis les premiers programmes OSR :

- Il y a du sable en suspension dans le Rhône ! Parfois en quantités importantes.
- Progrès sur l'analyse des sables (méthode de mesure des concentrations et granulométrie)
  - intercomparaison de granulomètres laser, banc CNR
- Expérience des prélèvements avec différents types de préleveurs
- Stations hydroacoustiques
- Calcul de flux par jaugeage solide (SDC) et acoustique active (Acoused)
- Bilan de flux de sable sur événements (crue, chasse)

D'autres travaux et développements ne sont pas cités ici et plusieurs autres équipes travaillent sur cette thématique du sable.

# Conclusions et perspectives

La connaissance des flux de sables est un enjeu opérationnel important du fait de l'impact que peuvent avoir les dépôts et des coûts de gestion associés.

Une « grande » quantité de sable transite dans le Rhône (Haut-Rhône, Ain, Isère...) lors de crues des affluents ou lors de déstockages pour la gestion des barrages.

Différentes approches méthodologiques étudiées lors des programmes OSR successifs permettent maintenant d'avoir des outils et des équipes à même de quantifier ponctuellement les flux sur le Rhône et ses affluents à partir de mesures de terrain et de modélisation.

# Conclusions et perspectives

Si l'on veut connaître en continu les flux de sable en suspension sur le Rhône et/ou ses affluents on doit mettre en place des stations de mesure spécifiques, des processus d'analyse, des équipes de jaugeage solide, des camions jaugeurs dédiés, remettre en état des trailles hydrométrique, organiser des suivis.

La future station hydroacoustique de Lyon Perrache sera potentiellement un bon site pour démarrer un suivi de long terme du sable en suspension sur le Rhône.

Une réflexion sur les enjeux écologique du transit et des dépôts du sable est à engager à l'interface entre l'OSR et l'observatoire écologique RhônEco.

Quel bénéfice pour la diversification des habitats physiques ?  
Quels impacts écologiques du colmatage des substrats ?

# Quelques références pour aller plus loin

Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B. et al. (2022). Comment prélever les sédiments en suspension dans les cours d'eau ? *La Houille Blanche*, 108(1) <https://hal.science/OSR/hal-04044890v1>

Laible-Marggraf, J., Dramais, G., Le Coz, J., et al. (2024). River suspended-sand flux computation with uncertainty estimation, using water samples and high-resolution ADCP measurements. *Earth Surface Dynamics*. <https://hal.science/OSR/insu-04831461v1>

Laible-Marggraf, J. (2024). Improving methods for the hydroacoustic monitoring of suspended sand concentration and grain size : application to the Isère River at Grenoble Campus. Université Lyon 1. <https://hal.science/OSR/tel-04641805v1>

Dramais, G. (2020). Observation et modélisation des flux de sable dans les grands cours d'eau. Université Claude Bernard Lyon 1 <https://hal.science/OSR/tel-03188258v1>

Vergne, A. (2018). Mesure acoustique des sédiments en suspension dans les rivières. Université Grenoble Alpes. <https://hal.science/OSR/tel-02115348v1>

Guertault, L. (2015). Évaluation des processus hydro-sédimentaires d'une retenue de forme allongée : application à la retenue de Génissiat sur le Haut-Rhône. Université Lyon 1 <https://hal.science/OSR/tel-01273431v1>

Moore, S. (2011). Suivi des flux d'eau et de matières en suspension dans les cours d'eau par profileurs acoustiques Doppler horizontaux. Université de Grenoble <https://theses.hal.science/tel-00680090v1>



**Portail documentaire**  
de l'Observatoire des Sédiments du Rhône

Plus de 240 documents en libre accès

<https://hal.science/OSR/>



Observatoire  
des Sédiments  
du Rhône

Dispositifs scientifiques cadres



Partenaires techniques et financiers

