

INRAE



- **Présentation du guide technique pour la mesure et la modélisation du transport solide, édition OFB**

Benoît CAMENEN

UR Riverly, Inrae Lyon-Grenoble

**Journée technique Transport solide et recharge sédimentaire
Mardi 8 novembre 2022 à Pinay (42)**

> Un bref CV

- Chercheur en hydraulique des rivières sur la thématique du **transport solide en rivière**
Cemagref (2006) → Irstea (2012) → Inrae (2020)
- Doctorat (Grenoble, 2002) suivi de deux postdoctorats (Lund, Suède, 2002-2004 ; Kyoto, Japon, 2004-2006) sur la modélisation du transport solide dans un **environnement côtier**
- Thématiques principales :
 - Charriage, morphodynamique des rivières alpines, interaction fines-grossiers
 - Dynamique des Matières en Suspension, tout particulièrement des sables
 - Approches via la mesure in situ (et de laboratoire) et la modélisation

INRAE

➤ Pourquoi un guide sur le transport solide?

- Directive Cadre Européenne sur l'eau (octobre 2000) → continuité écologique
- Article L214-17 2° du code de l'environnement → liste de cours d'eau où un « **transport suffisant** » de sédiment doit être assuré (décembre 2006)
- Séminaire organisé par l'Onema (OFB) les 30 mai et 1^{er} juin 2011 à St Lary → brainstorming sur la question « Qu'est-ce qu'un transport suffisant ? »
 - Comment mesure-t-on le transport solide ?
 - Quelle est la référence pour définir un transport suffisant ?



➤ Pourquoi un guide sur le transport solide?

- **Opérations de restauration physique**

- augmentation débits, effacement ouvrages, élargissement du lit, injection sédimentaire, création de zones tampons, gestion de la végétation rivulaire
- 10 à 20 % du budget des Agences de l'Eau



➤ Pourquoi un guide sur le transport solide?

- **Opérations de restauration physique**

- augmentation débits, effacement ouvrages, élargissement du lit, injection sédimentaire, création de zones tampons, gestion de la végétation rivulaire

- 10 à 20 % du budget des Agences de l'Eau

- Besoins très forts de **recommandations** pour les agences de l'eau, gestionnaires de rivières, et bureaux d'études pour ces opérations :

- état morphodynamique avant travaux

- suivi de ces projets



➤ Pourquoi un guide sur le transport solide?

- Ouvrages existants selon une vision plus naturaliste, géomorphologue
 - Malavoi, J.-R. & Bravard, J.-P. (2010). *Éléments d'hydromorphologie fluviale*. Onema, 228p.
 - Malavoi, J.-R., Garnier, C.C., Landon, N., Recking, A. & Baran, Ph. (2011). *Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière*. Onema. 216 p.
- Autres besoins
 - approches plus techniques de la mesure
 - propositions de méthodologie et modélisation



➤ Petit historique du guide

- Projet avec l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, accord cadre AERMC/Cemagref (2012-2013)
 - Proposition de méthodologies et outils de mesures de transport solide appliqués à quelques sites pilotes
 - Quelle expérience en France ?
→ V0 du guide
- Projet convention Onema(AFB)/Irstea (2016-2018)
 - Élaboration d'outils et support de formation pour l'évaluation et la modélisation de la géomorphologie et du transport solide
→ V1 du guide

INRAE

➤ Le guide technique pour la mesure et la modélisation du transport solide

- Parution le 1^{er} mars 2021 aux éditions OFB
 - 7 chapîtres, 160 p.
 - Beaucoup d'illustrations !
 - 16 tableaux
 - 126 figures
 - Mais beaucoup d'équations !
 - 177 équations...
 - Et de références
 - 24 ouvrages
 - ~350 références



Guide technique pour la mesure
et la modélisation du transport solide



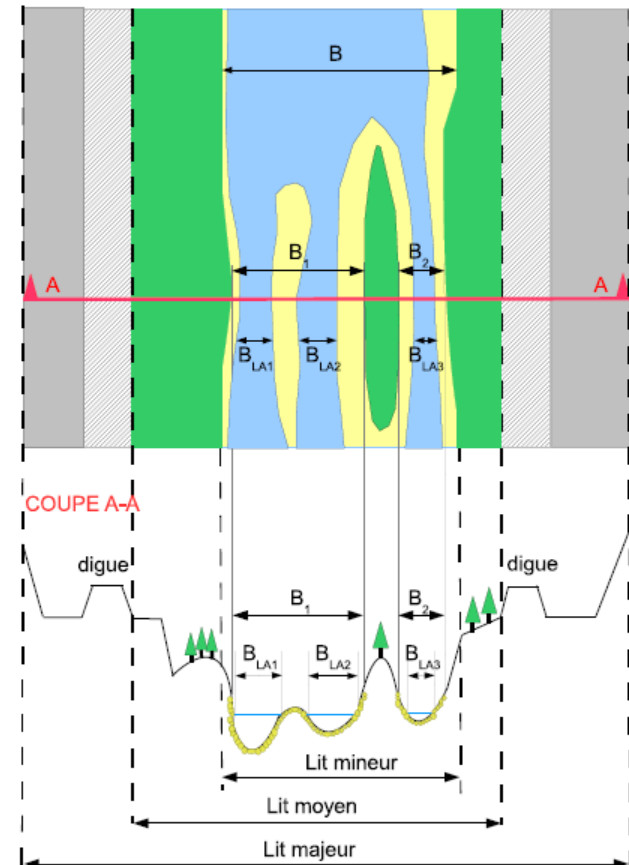
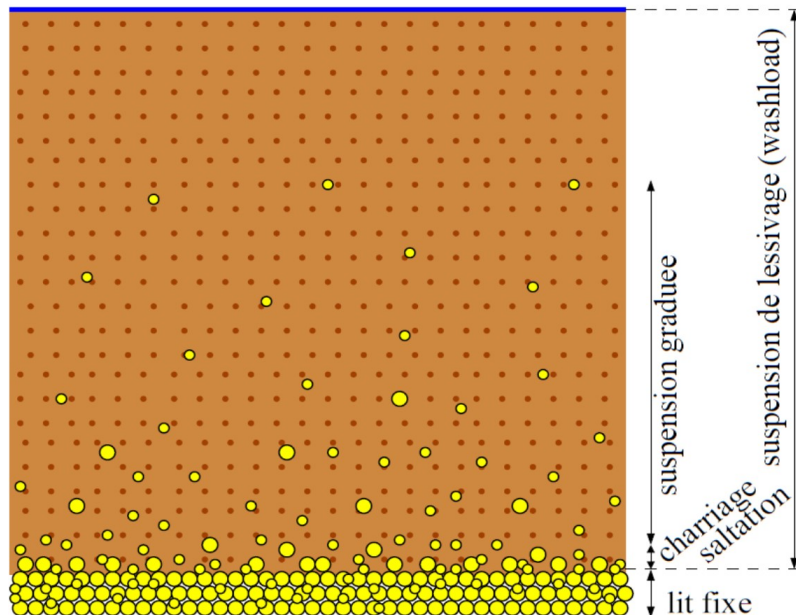
INRAE


RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE

➤ 1. Introduction

- Généralités sur le transport solide et la morphologie des rivières



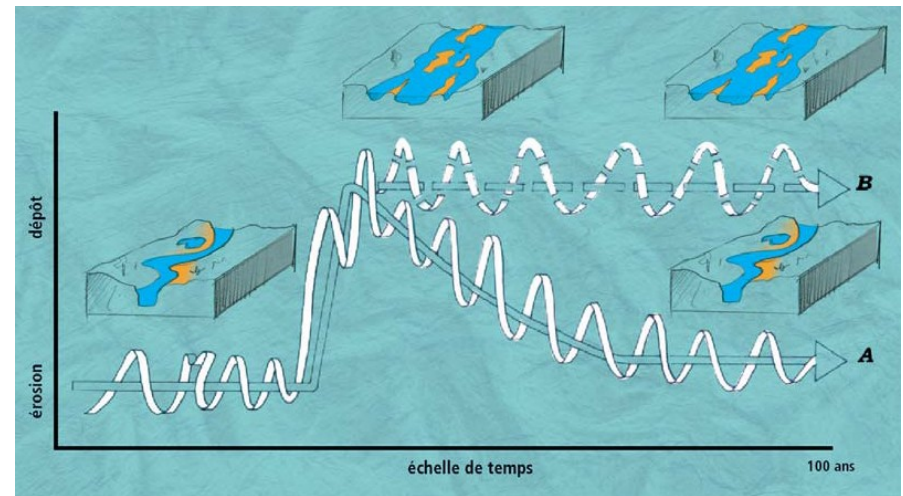
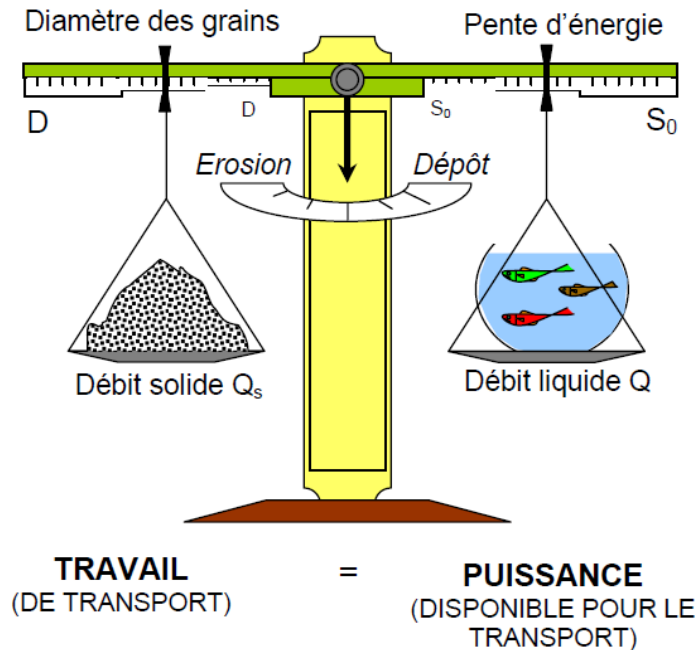
> 1. Introduction

- Généralités sur le transport solide et la morphologie des rivières
- Pourquoi étudier le transport solide ? Réglementation, mission technique des agents OFB.

Processus physiques	Impacts physiques	Impacts écologiques	Impacts sociétaux
Érosion	<ul style="list-style-type: none">▪ Incision du lit▪ Abaissement du niveau limnimétrique (chenal)▪ Abaissement du niveau piézométrique (nappe alluviale)▪ Déconnexion des annexes hydrauliques▪ Disparition des macroformes (dunes, bancs)▪ Modifications des habitats	<ul style="list-style-type: none">▪ Dépérissement de la végétation riveraine▪ Glissement typologique▪ Érosion des biocénoses	<ul style="list-style-type: none">▪ Déstabilisation d'ouvrages d'art▪ Rupture de digues▪ Déconnexion des captages▪ Problème de navigation
Dépôt	<ul style="list-style-type: none">▪ Exhaussement du lit▪ Suraccumulation sédimentaire▪ Colmatage / ensablement des fonds▪ Modifications des habitats	<ul style="list-style-type: none">▪ Enfouissement de la végétation du lit et des berges▪ Glissement typologique▪ Érosion des biocénoses	<ul style="list-style-type: none">▪ Risque inondation▪ Problème de navigation

➤ 2. Caractéristiques morphologiques d'une rivière

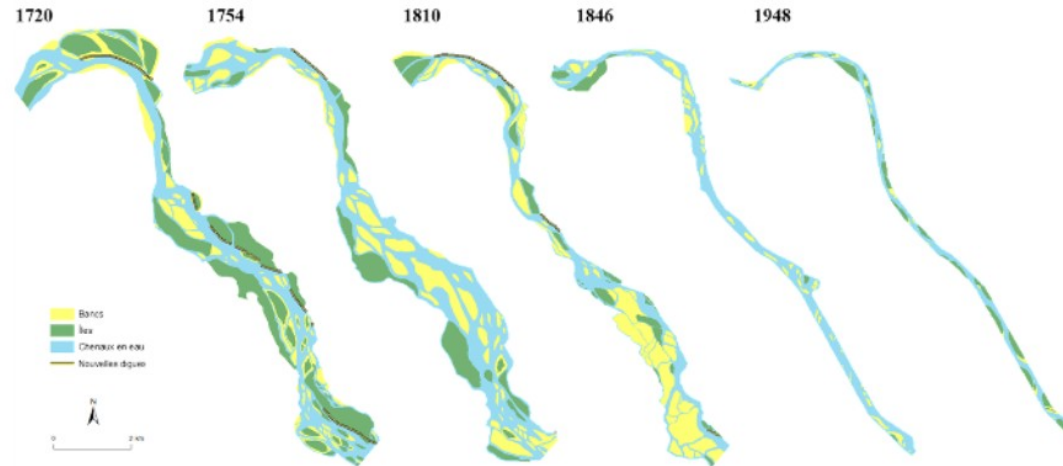
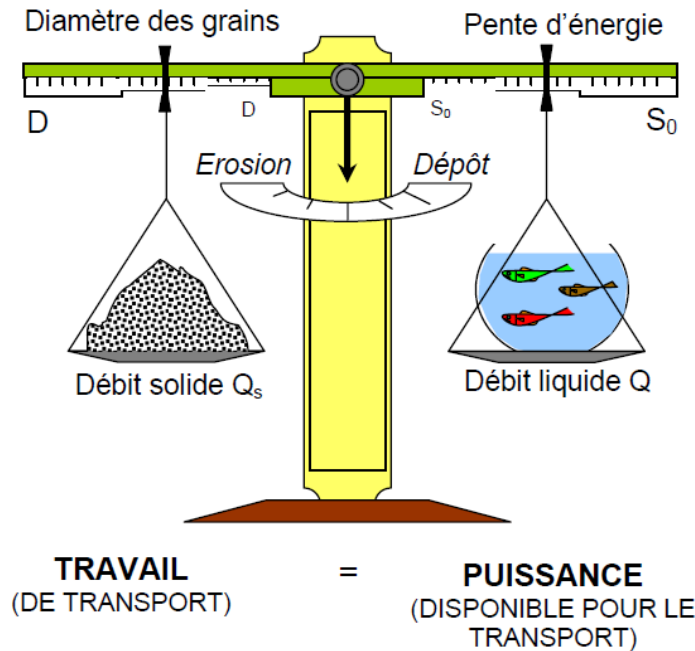
- Dynamique fluviale et ajustements des rivières



Ajustement du cours d'eau à sa capacité de transport et sa fourniture sédimentaire

➤ 2. Caractéristiques morphologiques d'une rivière

- Dynamique fluviale et ajustements des rivières



Ajustement du cours d'eau aux contraintes anthropiques



➤ 2. Caractéristiques morphologiques d'une rivière

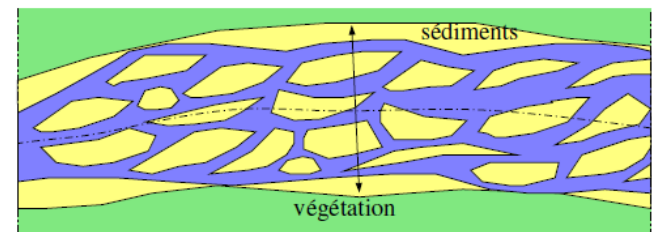
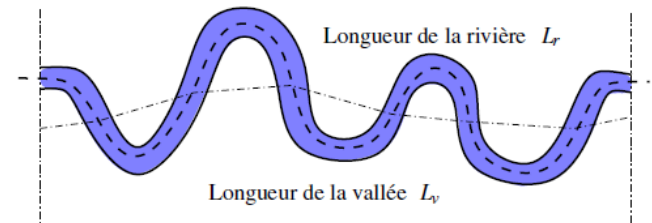
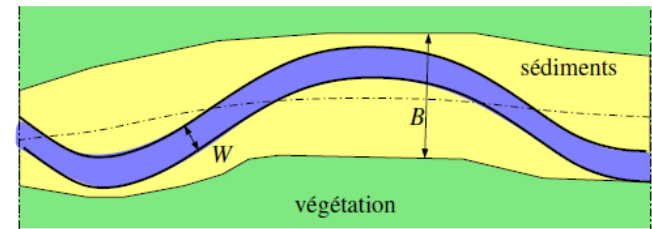
- **Forme des rivières**

Naturelle et anthropique



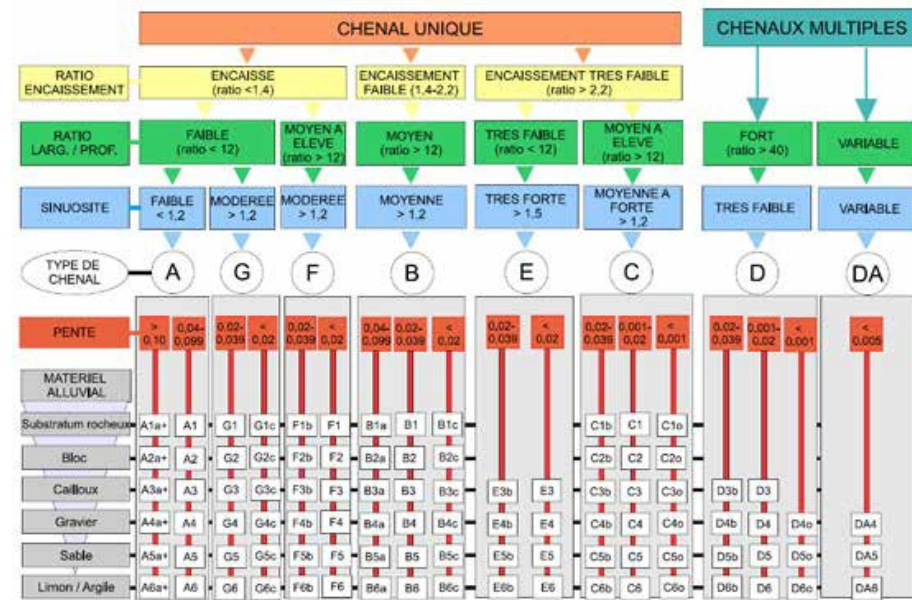
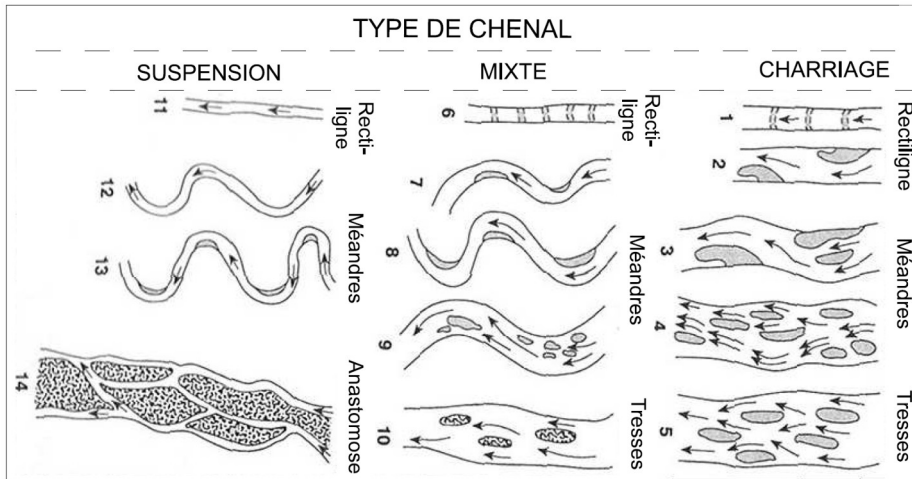
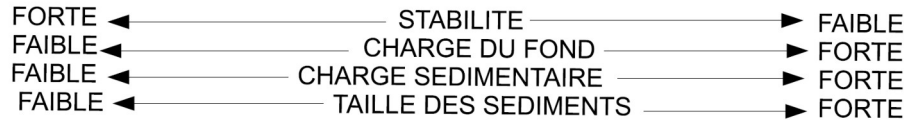
➤ 2. Caractéristiques morphologiques d'une rivière

- Caractérisation des rivières
 - Longitudinal : profil en long, granulométrie
 - Transversal : forme du profil en travers, rapport d'aspect largeur / profondeur
 - Forme en plan (méandre, tresses) → indices



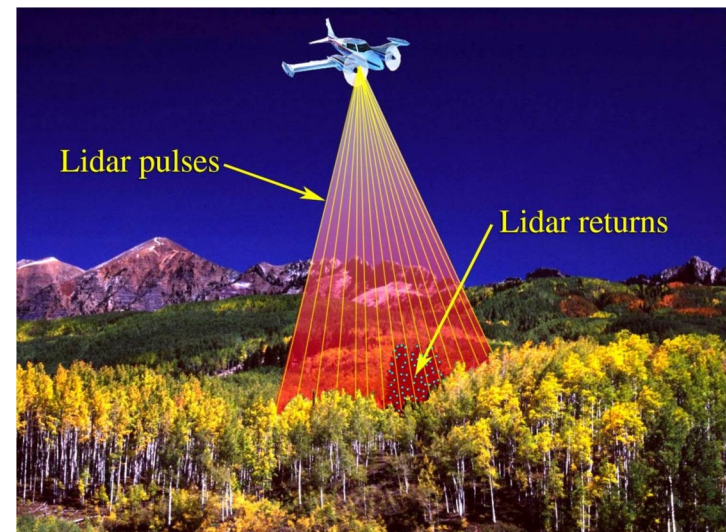
➤ 2. Caractéristiques morphologiques d'une rivière

- Caractérisation des rivières → classification



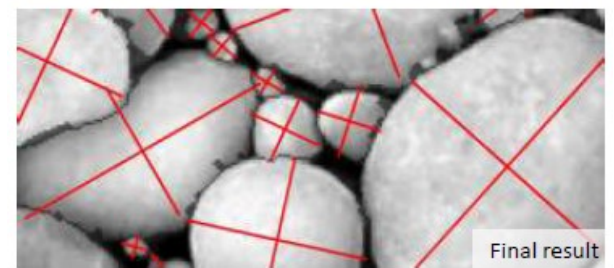
➤ 2. Caractéristiques morphologiques d'une rivière

- Mesures de la topographie et bathymétrie
 - Avant : Terrain (tachéo, DGPS), photogrammétrie
 - Maintenant : Lidar (terrestre et aéroporté), sonar

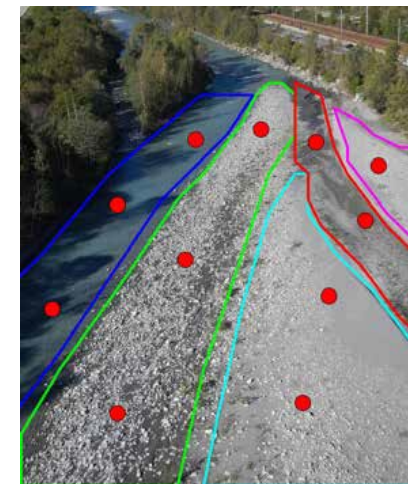
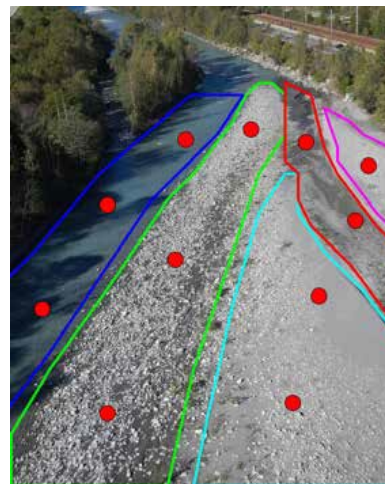


➤ 2. Caractéristiques morphologiques d'une rivière

- Caractéristiques des matériaux
 - Granulométrie des grossiers



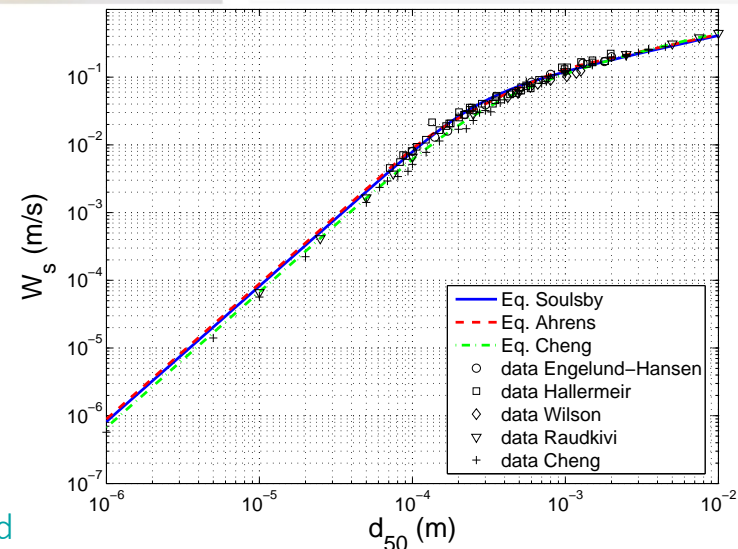
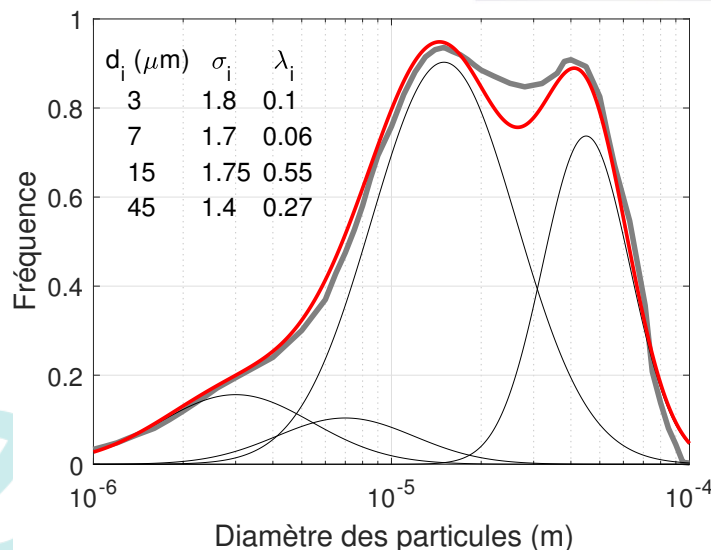
Mesures ponctuelles
Stratégie de mesure
Analyse spatiale (photos aériennes)



➤ 2. Caractéristiques morphologiques d'une rivière

- Caractéristiques des matériaux
 - Granulométrie et vitesse de chute des sédiments fins

Granulomètres laser



:charge séd

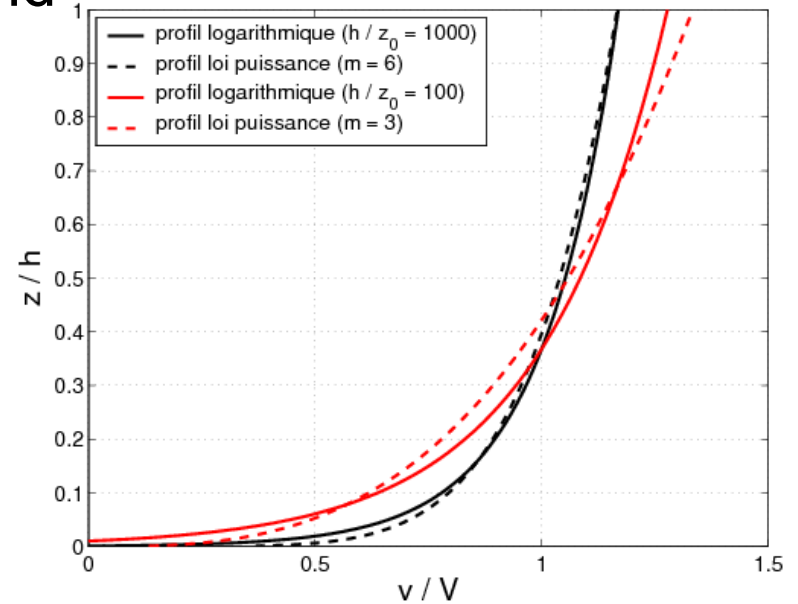
➤ 3. Contraintes sur le fond des rivières et mise en mouvement des sédiments

- Contrainte de cisaillement au fond

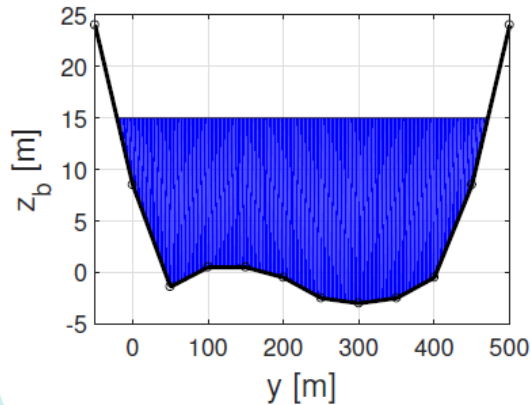
$$\tau_0 \approx \rho g h I$$

Contrainte de cisaillement au fond
fonction :

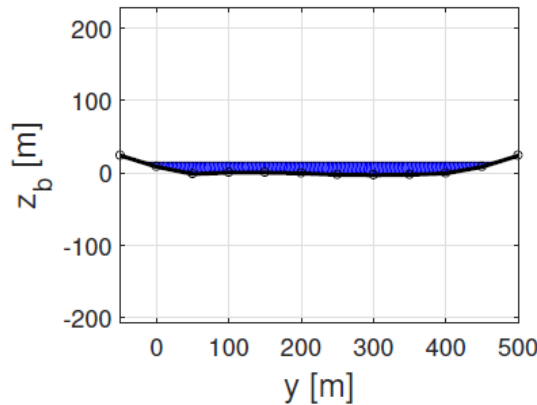
- Hauteur d'eau et pente
- Profil de vitesse



(a)



(b)



$$\frac{h}{W} \ll 1$$

➤ 3. Contraintes sur le fond des rivières et mise en mouvement des sédiments

- Mise en mouvement d'une particule

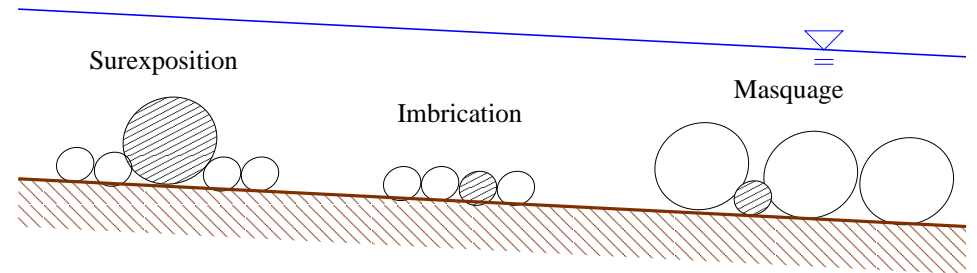
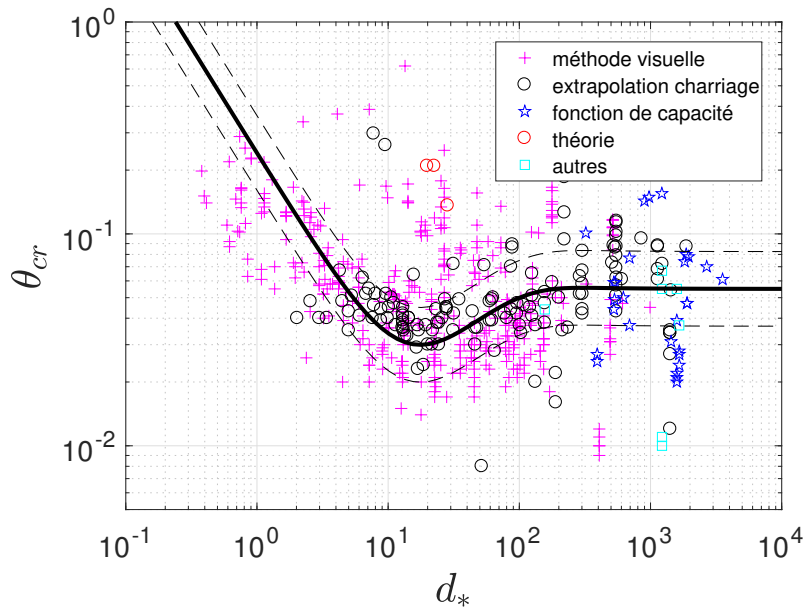
Paramètre de Shields

$$\theta = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho) g d_{50}}$$

Forces hydrodynamiques

Poids déjaugé

$$\theta = \theta_{cr}$$



➤ 3. Contraintes sur le fond des rivières et mise en mouvement des sédiments

- Mise en mouvement d'une particule

Paramètre de Shields $\theta = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho) g d_{50}}$ Forces hydrodynamiques
Poids déjaugé

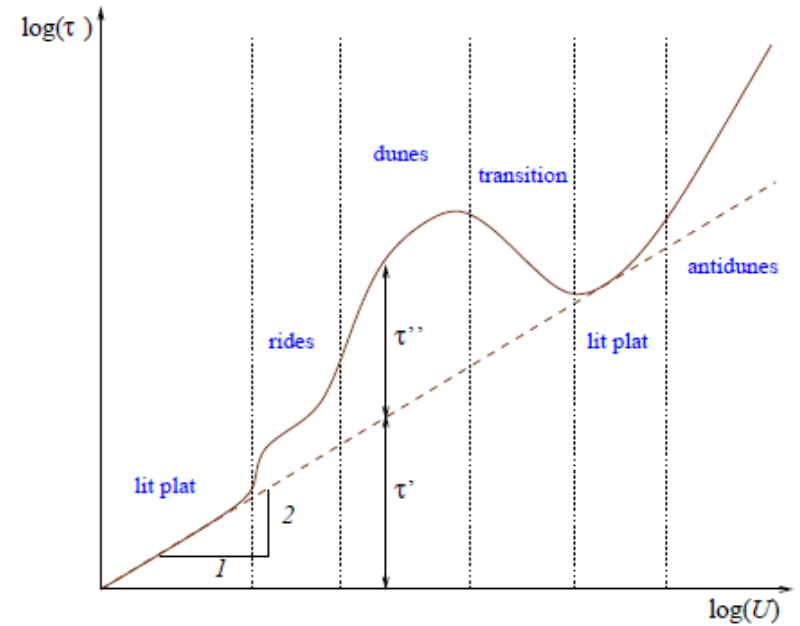
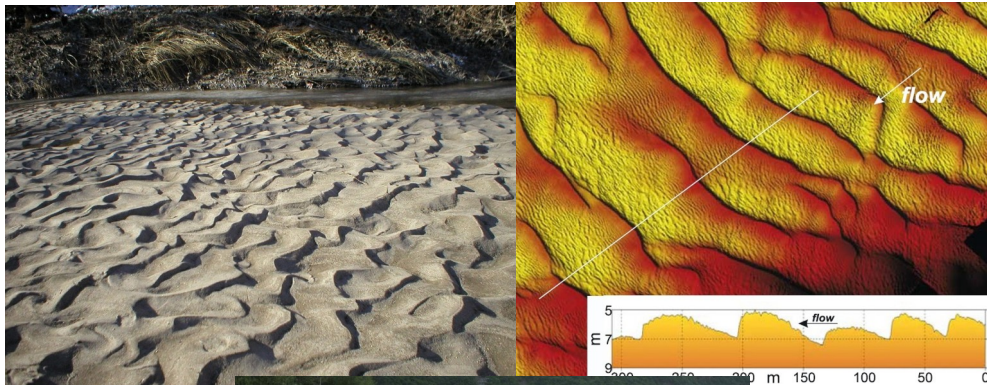
Paramètre Shields	Transport solide
$\theta < 0,03$	Aucun mouvement
$0,03 < \theta < 0,06$	Transport partiel
$0,06 < \theta < 0,25$	Charriage (formation rides/dunes)
$0,25 < \theta < 2,5$	Charriage + suspension (dunes)
$\theta > 2,5$	Suspension intense (fond plat)



➤ 3. Contraintes sur le fond des rivières et mise en mouvement des sédiments

- Formes sédimentaires et leurs impacts sur la dynamique hydro-sédimentaire

Rides, dunes, antidunes



➤ 4. Transport solide par charriage

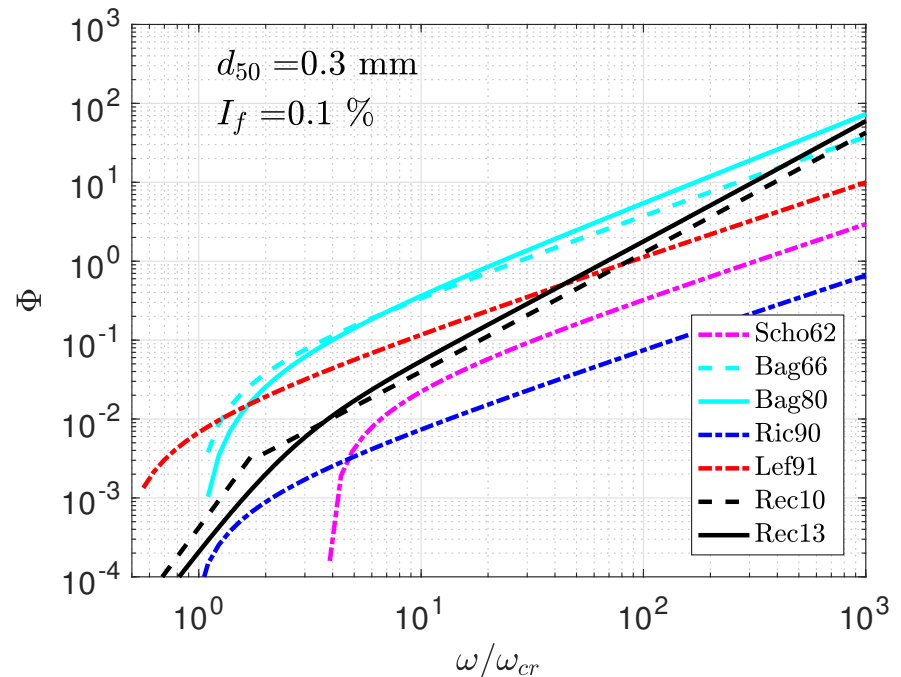
- Processus et modélisation

Meyer-Peter & Müller (1948)

$$\Phi = \frac{q_{sb}}{\sqrt{(s-1)g} d_{50}^3} = 8 (\theta_{eff} - \theta_{cr})^{3/2}$$

$$\omega = \tau U \approx \rho g \frac{QI}{B}$$

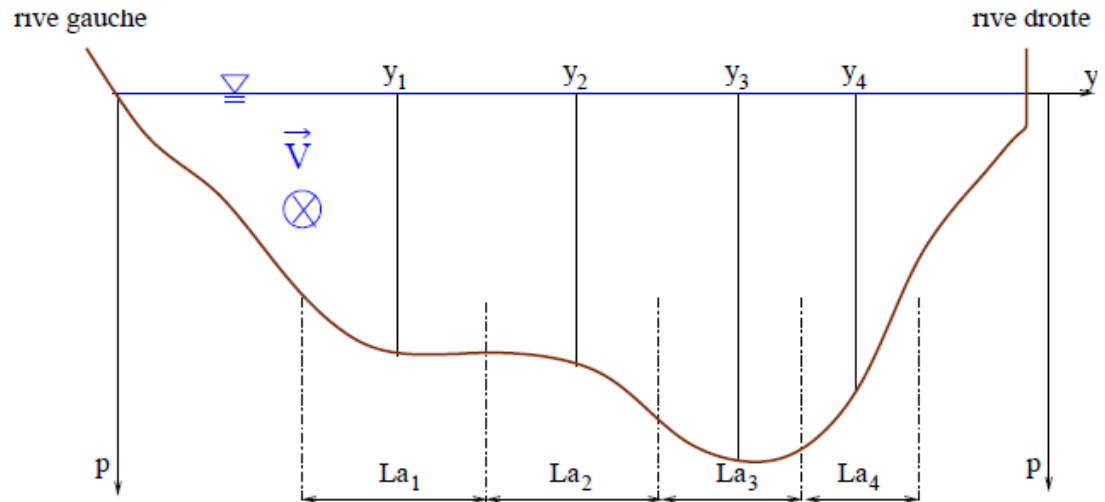
Nombreuses formules
fonction du paramètre de
Shields ou de la
puissance spécifique
Attention aux limites
d'utilisation ; fortes
incertitudes !



➤ 4. Transport solide par charriage

- Mesure des flux charriés

Échantillonnage versus acoustique



➤ 4. Transport solide par charriage

- Mesure des flux charriés

Pièges à sédiments → mesure plus ou moins intégrée dans le temps



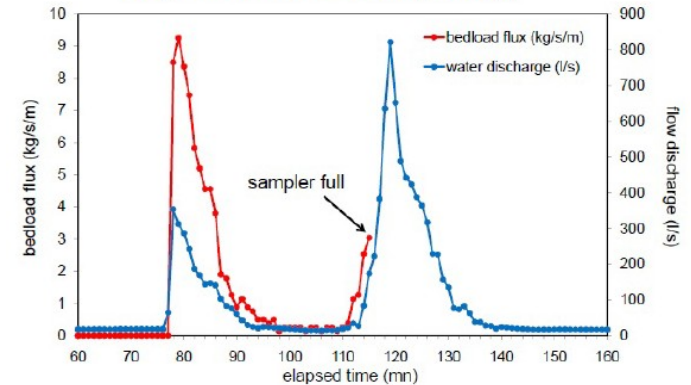
(a)



(b)



August 25th 2012 event (RI: 5 yr)

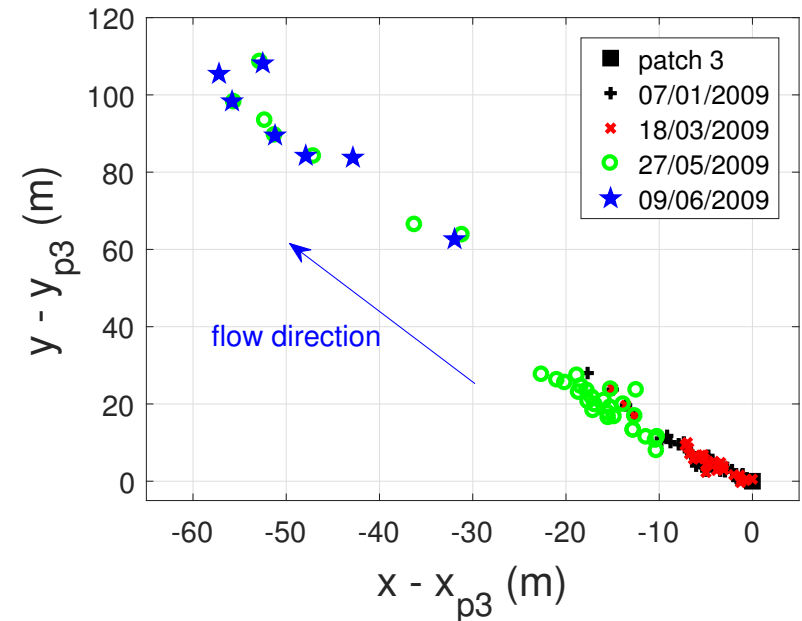
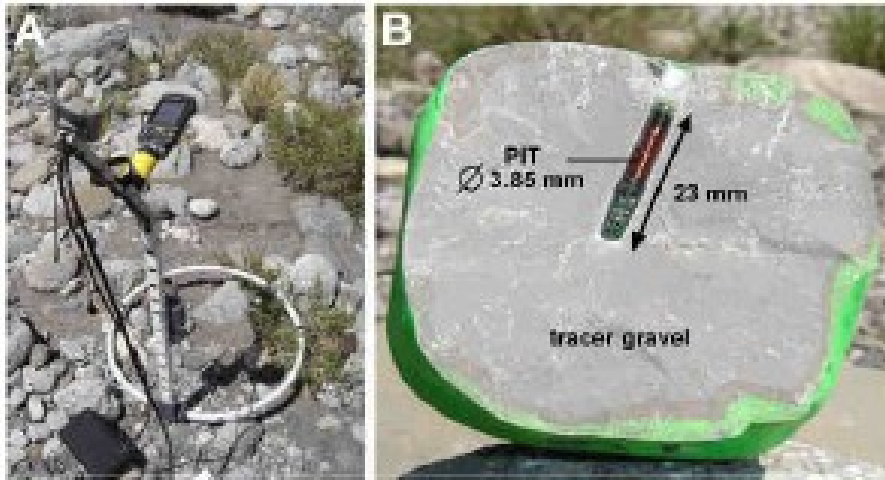


➤ 4. Transport solide par charriage

- Mesure de la dynamique particulaire

Transpondeur passif et actif

- utile pour suivre le parcours des particules (Lagrangien)
- limite liée au taux de recouvrement

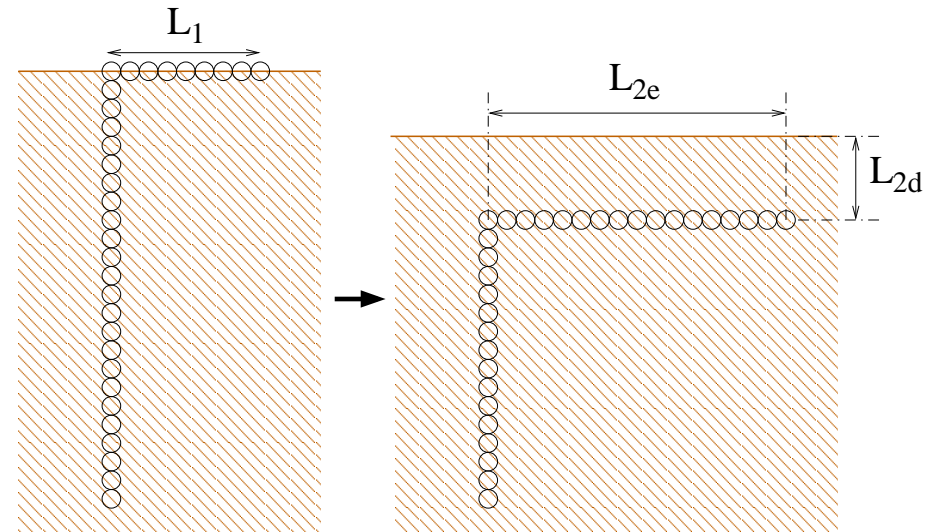


➤ 4. Transport solide par charriage

- Mesure de la respiration d'un cours d'eau

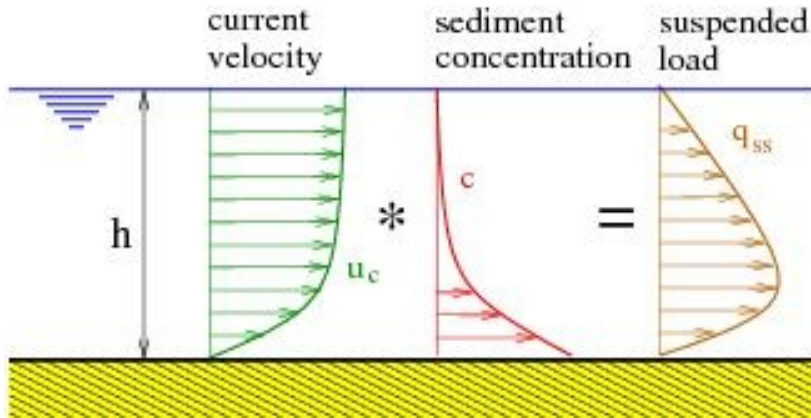
Chaines d'érosion

Très utile pour appréhender la dynamique sédimentaire suite à une crue (phase érosion puis phase de dépôt)



➤ 5. Transport solide en suspension

- Processus et modélisation



$$c = c_a \left[\frac{(h-z)}{z} \frac{z_a}{(h-z_a)} \right]^{W_s / (\kappa u_*)}$$

$$P_R = \frac{W_s}{\kappa u_*}$$

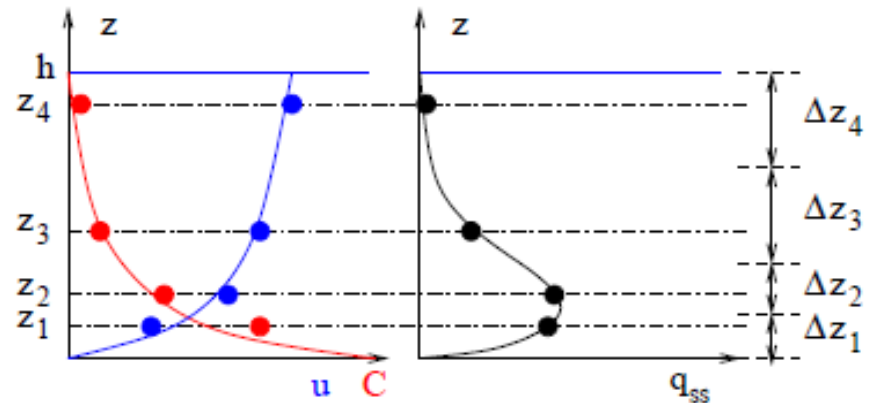
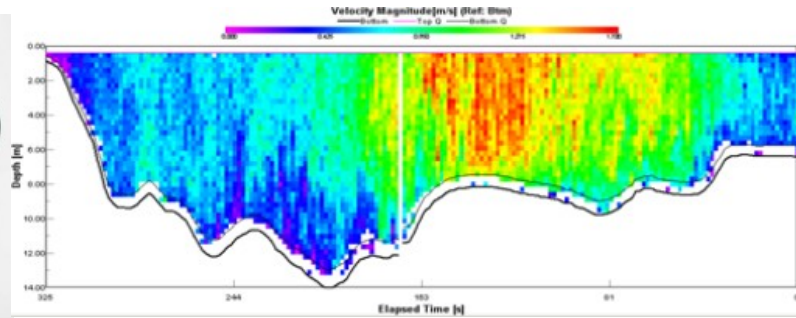
Vitesse de chute
Turbulence

Paramètre Rouse	Transport solide
$P_R > 2,5$	Charriage prépondérant
$1,2 < P_R \leq 2,5$	Suspension modérée (<50%)
$0,8 < P_R \leq 1,2$	Suspension intense (>50%)
$P_R \leq 0,8$	Suspension de lessivage

➤ 5. Transport solide en suspension

- Mesure de la suspension graduée

Exploration d'une section de mesure
Développements en acoustique



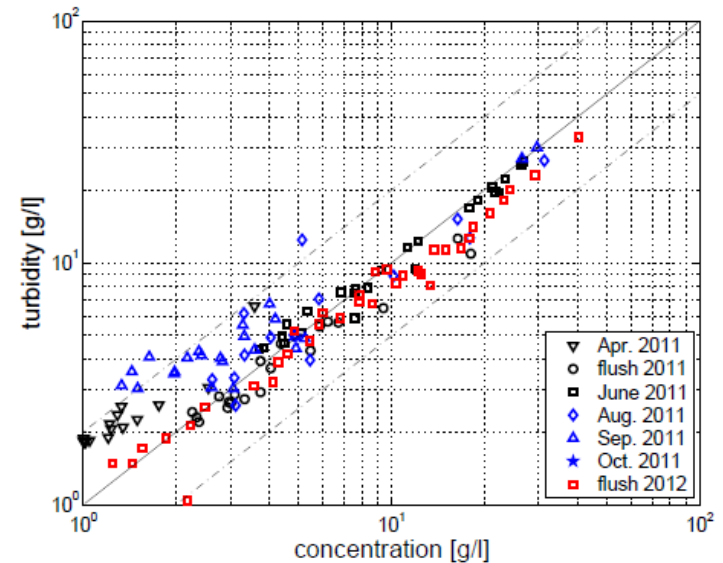
➤ 5. Transport solide en suspension

- Mesure de la suspension de lessivage

Hypothèse d'une homogénéité des concentrations et de la granulométrie sur la section

Attention à la sensibilité de la turbidité à la granulométrie → courbe de tarage

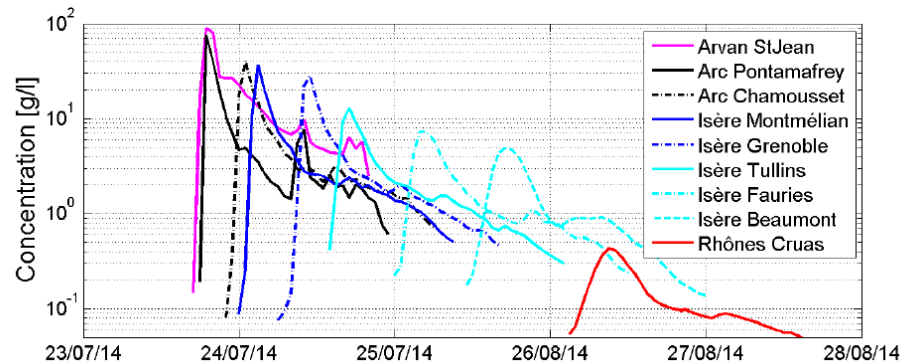
$$Q_{sl}(t) = Q(t)C(t)$$



➤ 5. Transport solide en suspension

- Mesure de la suspension de lessivage

Mise en place d'un réseau de mesure haute fréquence
Bilans sédimentaires

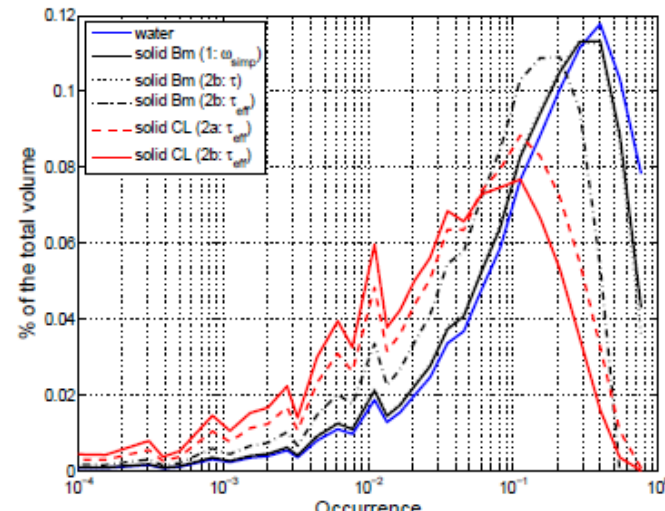
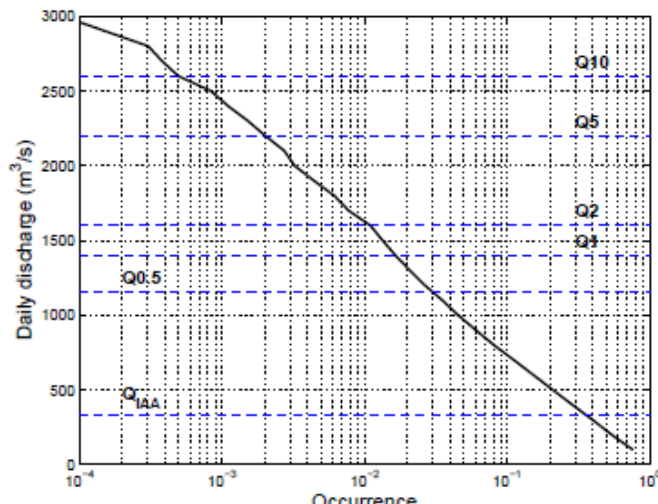
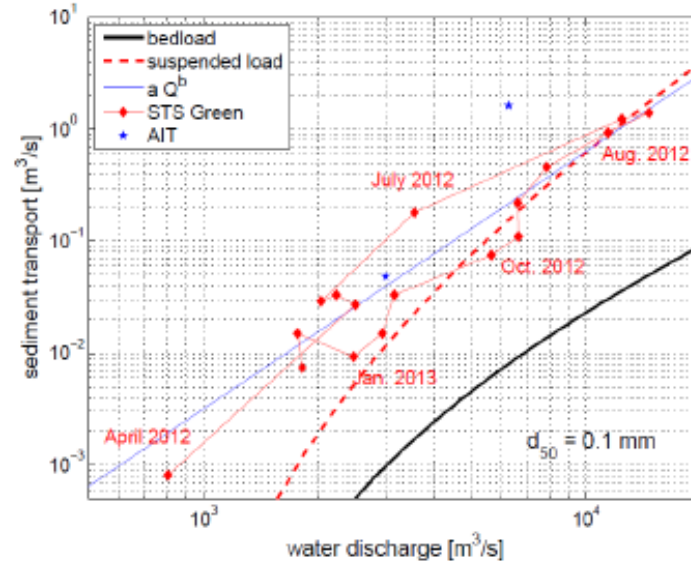


Année	Flux annuel M_{an} [t]	Événement majeur annuel	Flux lié à l'événement [t]	% flux
2011	6.5×10^5	Chasse juin 2011	1.7×10^4	2.5%
2012	5.1×10^5	Chasse juin 2012	4.9×10^4	9.6%
2013	12.8×10^5	Crue juin 2013	54.0×10^4	42%
2014	5.3×10^5	Chasse juin 2014	1.4×10^4	2.6%
2015	6.1×10^5	Chasse juin 2015	2.1×10^4	2.8%
2016	3.9×10^5	Chasse juin 2016	6.8×10^4	17%
2017	3.0×10^5	Chasse juin 2017	2.9×10^4	8.3%
2018	7.6×10^5	Chasse juin 2018	3.6×10^4	4.7%

➤ 6. Analyse et modélisation de la dynamique sédimentaire

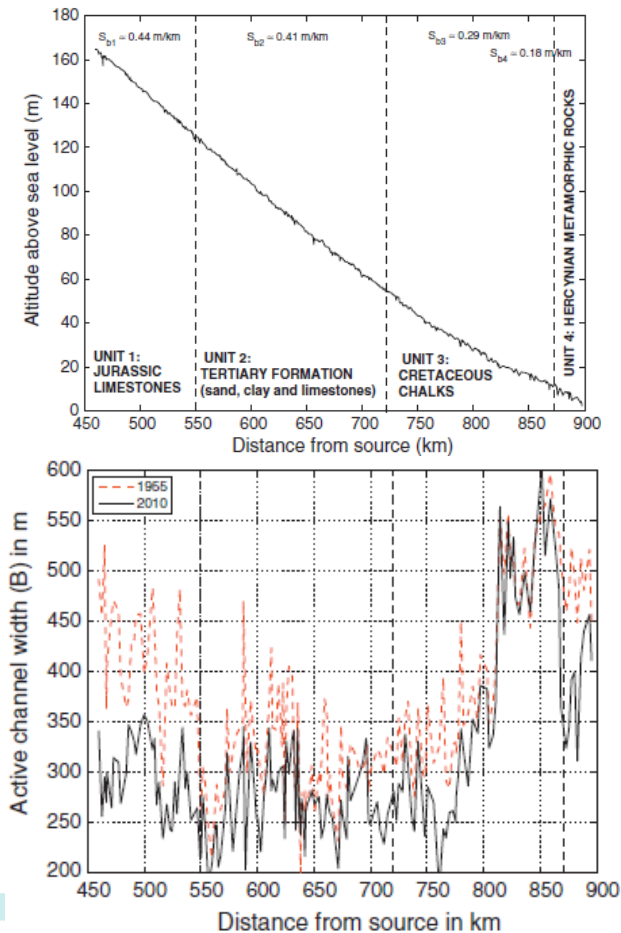
- Établissement d'une courbe de tarage sédimentaire

Relation débit solide /
débit liquide
→ estimation d'un débit
solide moyen annuel

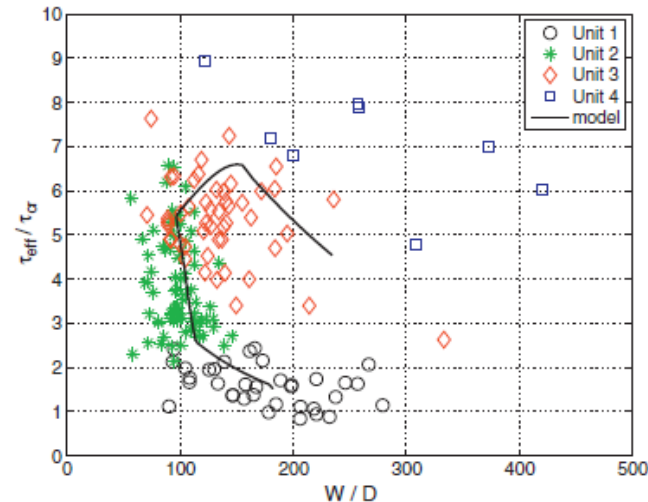


➤ 6. Analyse et modélisation de la dynamique sédimentaire

- Découpage en tronçons homogènes



Analyse d'un secteur de rivière
Simplification hydro-géomorpho pour
une meilleure compréhension de l'état
de la rivière
Bilans sédimentaires

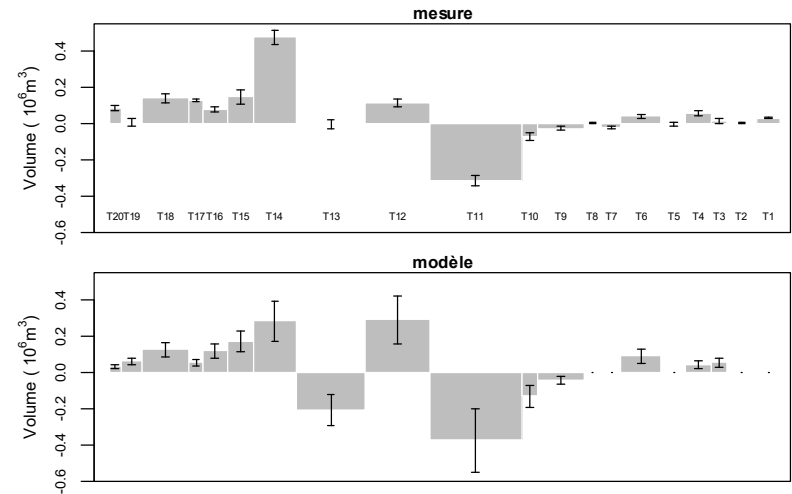
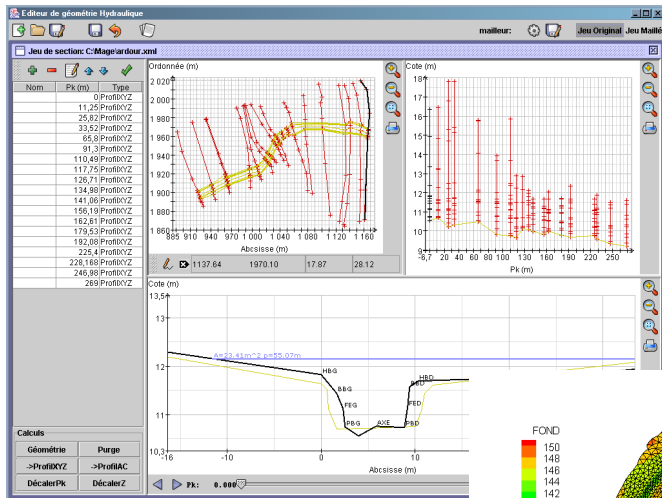


➤ 6. Analyse et modélisation de la dynamique sédimentaire

- Modèles numériques

Bilan de masse $(1-p) \frac{\partial S_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0$

1D, 2D, 3D selon les besoins
 Modèles de plus en plus demandeurs en données et calage de plus en plus complexe
 → outils prédictifs (?)



➤ 6. Analyse et modélisation de la dynamique sédimentaire

- Modèles physiques

Basé sur la similitude de Froude (ou Reynolds)
Complexe à mettre en œuvre (surtout en sédimentaire) mais permet de reproduire des processus complexes

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$$



INRAE

➤ 7. Synthèse opérationnelle

- Quelles mesures réaliser en fonction des objectifs de l'étude ?

Méthode	Type de cours d'eau			Facilité	Facilité	Coût	Coût
	Torrent	Rivière alpine	Rivière de plaine	Œuvre	Trait.	Instal.	Mesures
Préleveur Helley-Smith	-	++	++	+	++	€	€€€
Préleveur Helley-Smith portable	++	-	-	++	++	€	€€
Préleveur Ehrenberger	--	+	++	+	++	€	€€€
Préleveur BTMA	-	+	++	+	++	€	€€€
Piège à sédiments	++	+/-	--	++	+	€€	€
Trappe à sédiments	++	-	--	+	+	€€€	€
Suivi de dune	--	-	++	-	--	€€	€
Géophone	++	+/-	--	-	-	€€€	€
Hydrophone	+	+	+	+/-	--	€	€
Suivi de fond ADCP	--	-	+	+/-	--	€€€	€
Bouteille Niskin	-	+/-	++	++	+	€	€
Bouteille de Delft	--	+/-	++	+	+	€€	€€€
Préleveur iso-cinétique ponctuel	--	+/-	++	+	+	€	€€€
Préleveur iso-cinétique intégrateur	--	+/-	++	+	+	€	€€€
Rétro-diffusion ADCP	--	-	++	+	--	€€€	€
Échantillonneurs optiques et acoustiques	+/-	+/-	+	+/-	-	€€€	€€
Marquage colorimétrique	++	+/-	--	++	++	€	€
Tranpondeurs actifs	+	+/-	+/-	-	-	€€€	€€
Tranpondeurs passifs	++	+/-	+	+/-	+	€	€€€
Mesures topographiques	++	+/-	+	+	+/-	€	€€
Mesures Lidar	++	+/-	+	+	+/-	€€€	€€
Chaînes d'érosion	++	+/-	+/-	+/-	+	€	€€€

++ : très adapté, + adapté, +/- : utilisable, - : peu adapté, -- : inadapté

€ : très peu coûteux, € : peu coûteux, €€ : coûteux, €€€ : très coûteux

➤ 7. Synthèse opérationnelle

- Quelle méthode utiliser en fonction des objectifs de l'étude ?

	Approche géomorphologique	Approche terrain	Approche ingénieur	Modélisation numérique 1D	Modélisation numérique 2D/3D	Modélisation physique
Évaluation globale du transport solide échelle bassin	***	*	*			
Évaluation globale du transport solide échelle tronçon	**	*	**	*		
Estimation de l'équilibre d'un tronçon	**	*	***	**		
Impact d'un ouvrage transversal (barrage, seuil)	**	**	**	**		
Impact d'un effacement d'ouvrage transversal	**	**	**	**		
Impact d'un ouvrage localisé (piles de pont)	*	**	*		**	**
Dimensionnement de curages localisés	**	*	**	*	*	
Plan de gestion hydro-sédimentaire	***		***	*		
Recalibrage de géométrie	**	*	***	**	*	*
Restauration hydro-sédimentaire (injection, élargissement, etc.)	**	***	**	**	**	
Expertise d'un événement extrême	***	*	***	*		

*: intéressant, **: utile, ***: indispensable

➤ 7. Synthèse opérationnelle

- Quelle modélisation réaliser en fonction des objectifs de l'étude ?

Paramètres	Modèle 1 ω simp	Modèle 2 MS	Modèle 3 modèle 1D
Besoin en données géométriques ¹	+	+/-	-
Besoin en données sédimentaires ¹	-	--	--
Besoin en données hydrauliques ¹	++	+	-
Construction et calibration du modèle ¹	+	+/-	-
Estimation du transport solide ²	+/-	+	+
Estimation du bilan sédimentaire ²	-	-	+
Efficacité du calcul ²	++	+	+/-
Capacité de prédiction ²	-	-	+/-

1 : -- très difficile , - difficile, +/- moyen, + simple, ++ très simple

2 : -- non adapté, - mauvais, +/- moyen, + bon, ++ très bon

INRAE

➤ Merci pour votre attention !
Des questions?

Lien vers le guide:

<https://professionnels.ofb.fr/fr/doc-guides-protocoles/guide-technique-mesure-modelisation-transport-solide>