

Les rivières, systèmes naturels et complexes

Tout le monde a déjà eu l'occasion de voir des cours d'eau, plus ou moins grands : fleuve, rivière, ruisseau, torrent, etc.

Les paysages dans lesquels ils s'écoulent et qu'ils contribuent à sculpter sont très variés, comme on le voit sur ces photos.



La rivière Waimakariri, en Nouvelle-Zélande, forme des tresses sur quasiment tout son cours.
© G. O'Beirne, via Wikimedia Commons

Les rivières assurent une grande part du **transport** de matière (solide et liquide) à la surface de la Terre.

Comprendre leur mécanique est essentiel pour la prévision des crues, l'aménagement urbain et le génie civil.

Mais ces belles rivières cachent une grande complexité...



Un méandre de la Sioule (Auvergne).
© J-M Aubelle, via Wikimedia Commons

Le méandre ci-dessus, les tresses ci-contre, et la cascade ci-dessous, sont tous formés par le passage d'un cours d'eau, qui a déplacé le sol.

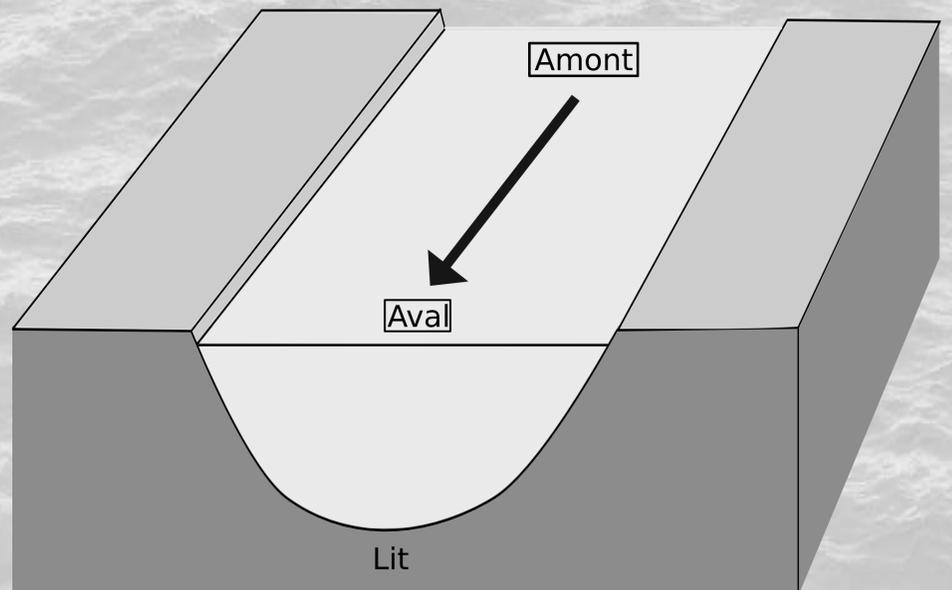
Comment les rivières arrivent-elles à transporter la matière et à créer des motifs aussi différents ?



Chute d'eau en cascade dans un massif rocheux.

Une rivière : du liquide...

Pour descendre des montagnes à la mer, de l'**amont** vers l'**aval**, un cours d'eau suit le chemin qu'il s'est créé dans le sol : c'est son **lit**. Une rivière, c'est donc de l'eau **liquide** qui s'écoule sur un sol **solide**. Ces deux milieux ont des mécaniques différentes, et c'est leur **interaction** qui permet aux rivières de façonner les reliefs.



Coupe schématique d'une rivière, coulant dans le sens de la flèche. © F. Lachaussée



Transition entre écoulement laminaire et turbulent au barrage de Noisiel.

Un écoulement peut contenir des tourbillons : on dit alors qu'il est **turbulent**. Dans le cas contraire, on parle de régime **laminaire**.

Le **nombre de Reynolds Re** (sans dimension) permet de quantifier l'importance des différents termes dans les équations de Navier-Stokes, en se servant de grandeurs caractéristiques de l'écoulement.

Cela donne une information sur le régime attendu : la turbulence ne peut survenir que pour des nombres de Reynolds élevés.

La mécanique des fluides est régie par les **équations de Navier-Stokes** (ci-dessous). Celles-ci se révèlent très complexes du point de vue mathématique : on ne peut pas leur donner de solution générale. Cette complexité reflète celle des phénomènes que l'on observe dans les fluides.

$$\begin{cases} \rho \cdot \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad}) (\vec{v}) \right) = -\text{grad} P + \rho \vec{g} + \rho \nu \Delta \vec{v} \\ \text{div} \vec{v} = 0 \end{cases}$$

ρ : masse volumique
 ν : viscosité cinématique
 P : champ de pression
 \vec{v} : champ de vitesse

Expression des **équations de Navier-Stokes** dans le cas d'une rivière, formée d'un fluide incompressible.

$$Re = \frac{LV}{\nu}$$

L : taille caractéristique
 V : vitesse caractéristique
 ν : viscosité cinématique

Expression du **nombre de Reynolds Re**.

...sur un lit (pas si) solide

Le lit d'une rivière est souvent constitué de grains. Du grain d'argile de quelques micromètres au rocher de plusieurs mètres, on rencontre de nombreux types de **sédiments** dans un lit : ils diffèrent par leur taille, leur forme, leur densité...

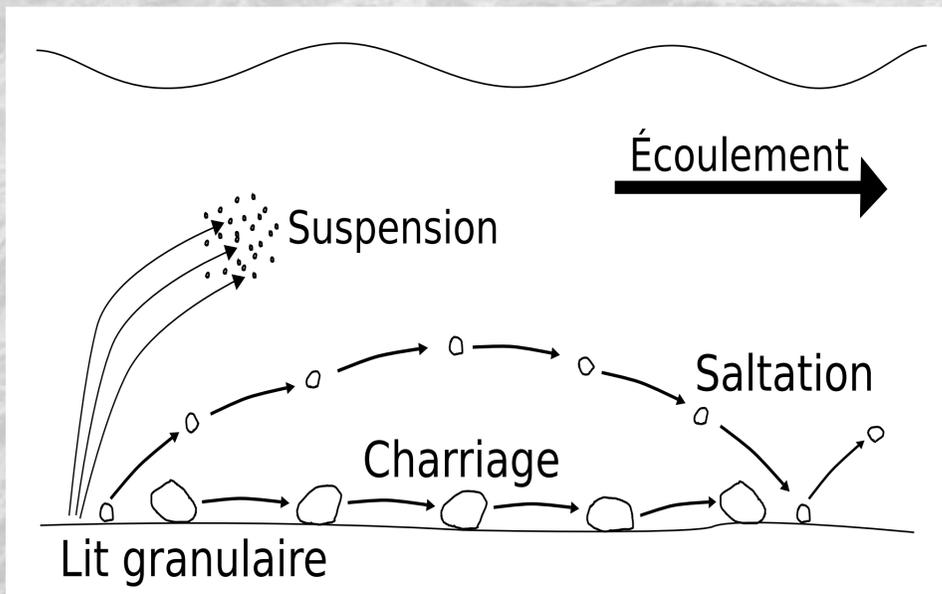


Schéma résumant les différents modes de transport solide en rivière. © F. Lachaussée

L'eau qui s'écoule exerce une force sur les grains du lit. Cette force va mettre en mouvement les grains : la rivière **érode** son lit. Puis les grains sont transportés par le cours d'eau.

Les plus petits sédiments vont se déplacer en suspension dans l'eau, tandis que les plus gros vont bouger par bonds successifs (saltation) ou en roulant et glissant sur le fond (transport par charriage).

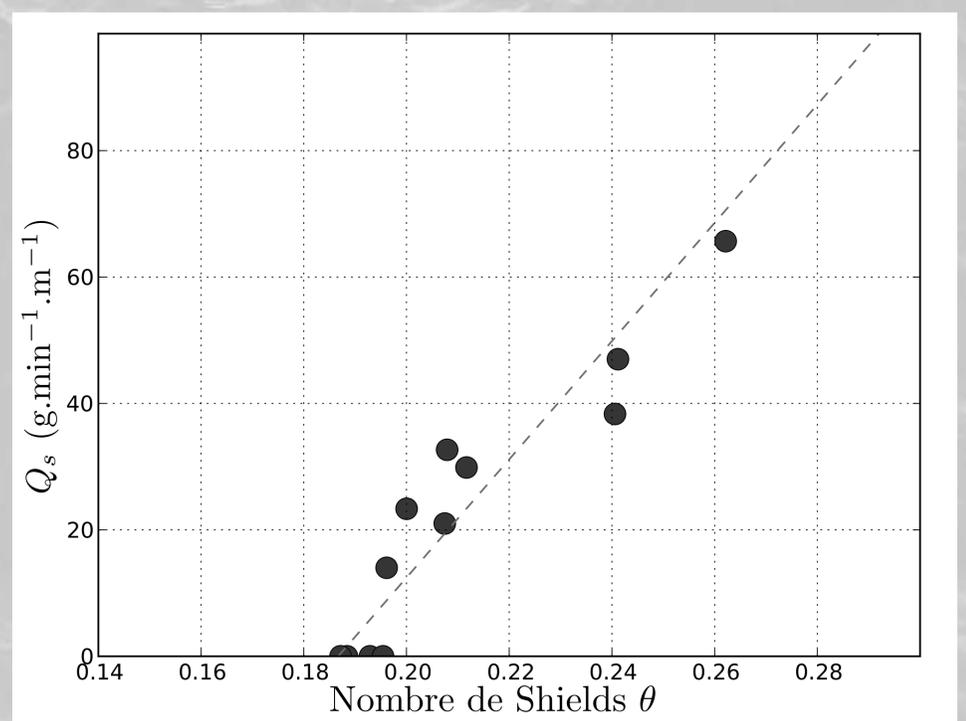
Si la vitesse du fluide n'est pas assez grande, les grains ne se déplacent pas : on parle de **seuil d'érosion**. Au-delà de ce seuil, plus l'écoulement est fort, plus les grains mis en mouvement sont nombreux et rapides. La valeur du seuil dépend notamment du mode de transport, du fluide, et des grains.

Les travaux d'Albert Shields en 1936 ont constitué une importante avancée dans la compréhension de ces phénomènes. C'est pour cette raison que l'on nomme **nombre de Shields** le paramètre sans dimension θ qui permet de comparer les seuils d'érosion.

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gd}$$

τ : contrainte exercée par le fluide
 ρ_s : masse volumique des grains
 ρ : masse volumique du fluide
 g : accélération de la pesanteur
 d : taille des grains

Définition du nombre de Shields θ .



Flux par unité de largeur de sédiments charriés en fonction du nombre de Shields, dans un canal expérimental. On observe un seuil de mise en mouvement pour $\theta \sim 0,19$.

© F. Lachaussée

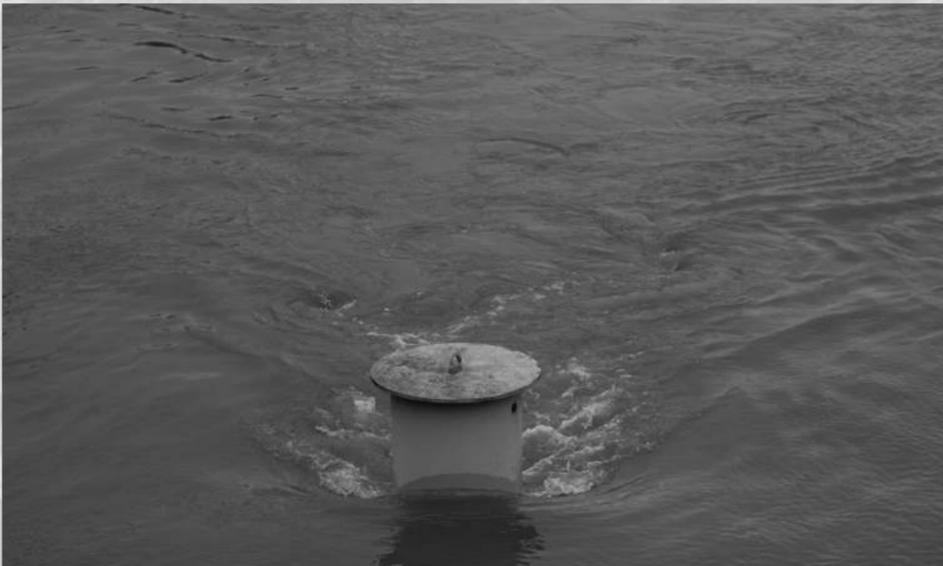
Un équilibre fragile

L'eau qui s'écoule transporte les grains dans la rivière. En se déplaçant, ceux-ci modifient le lit, ce qui change l'écoulement de l'eau, et par conséquent l'érosion... La forme d'une rivière résulte donc d'un **équilibre**. Si l'on aménage le lit, cet équilibre est **perturbé** et de nombreux phénomènes indésirables peuvent se produire.

C'est notamment le cas lorsqu'on place des obstacles dans la rivière, par exemple les **pires d'un pont**. La présence de l'obstacle va fortement modifier l'écoulement, en faisant apparaître de nombreux tourbillons, comme on le voit sur ces photos. Le schéma en bas à droite présente le complexe système tourbillonnaire qui existe au voisinage d'un cylindre.



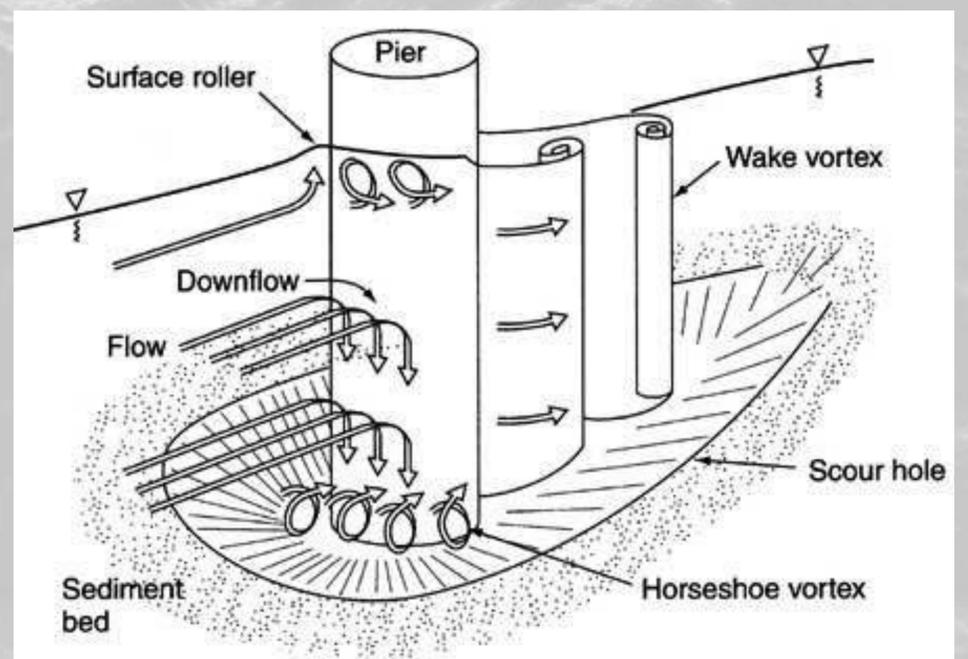
Façade amont du pont des Invalides (Paris) sur la Seine en crue, le 5 juin 2016. En surface, on observe la formation de bouillonnements d'eau au niveau des piles.
© F. Lachaussée



Plot d'amarrage dans la Seine en crue. De nombreux tourbillons sont présents, notamment dans le sillage de l'obstacle. © F. Lachaussée

La présence de ces tourbillons va accélérer localement l'eau, provoquant une importante érosion au voisinage de l'obstacle, appelée **affouillement**.

Si celui-ci est important, les fondations de certaines piles sont déterrées : le pont peut alors s'effondrer. C'est ce qui est arrivé au pont Wilson à Tours en 1978.



Système tourbillonnaire se développant au voisinage d'un cylindre (une forme simple d'obstacle). L'affouillement (*Scour*) est principalement dû aux tourbillons en fer à cheval (*Horseshoe vortex*) et de sillage (*Wake vortex*).
© L. Hamill

La complexité des études sur l'affouillement

Afin de mieux protéger les ouvrages maritimes et fluviaux, il est nécessaire de maîtriser les phénomènes d'affouillement.

Ceux-ci sont très complexes à modéliser. À l'heure actuelle, les prédictions théoriques sont limitées, et les simulations numériques (sur ordinateur) ont du mal à gérer la variété des situations et la durée des évolutions.

Les **études sur le terrain** sont un bon moyen d'accroître nos connaissances, mais elles sont très lourdes à mettre en œuvre. En effet, elles nécessitent d'inspecter de nombreux et vastes sites, et impliquent de multiples contraintes humaines, matérielles et techniques. Bien qu'indispensables, elles doivent donc être complétées par d'autres approches.

La **modélisation physique** est une autre possibilité : on reconstitue les phénomènes naturels au laboratoire, à une échelle plus ou moins réduite. Les conditions sont alors contrôlées, et il est plus facile de réaliser observations et mesures.

Ces modèles ne restituent pas l'entière complexité du système naturel, mais permettent d'en étudier finement certains aspects, grâce à une **mise à l'échelle** adaptée.

C'est cette dernière démarche qui est adoptée au laboratoire FAST à Orsay, à l'aide du dispositif présenté ci-contre.

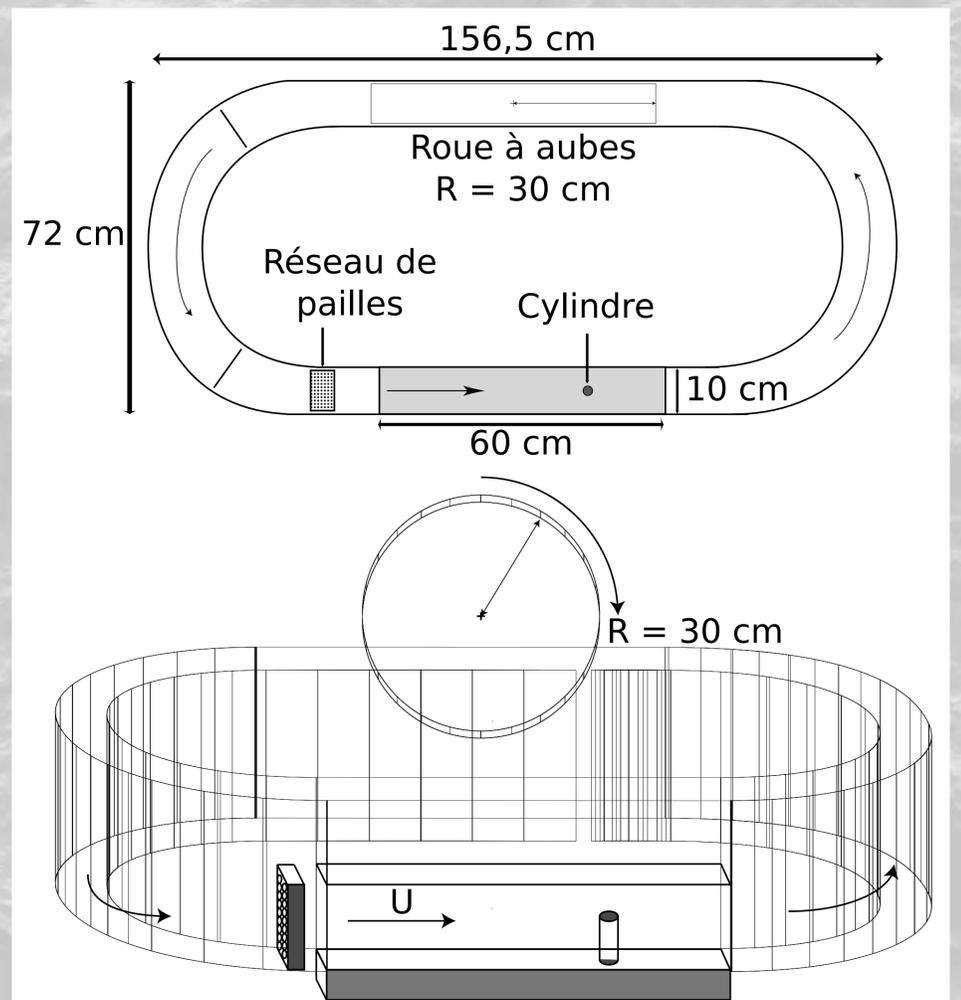
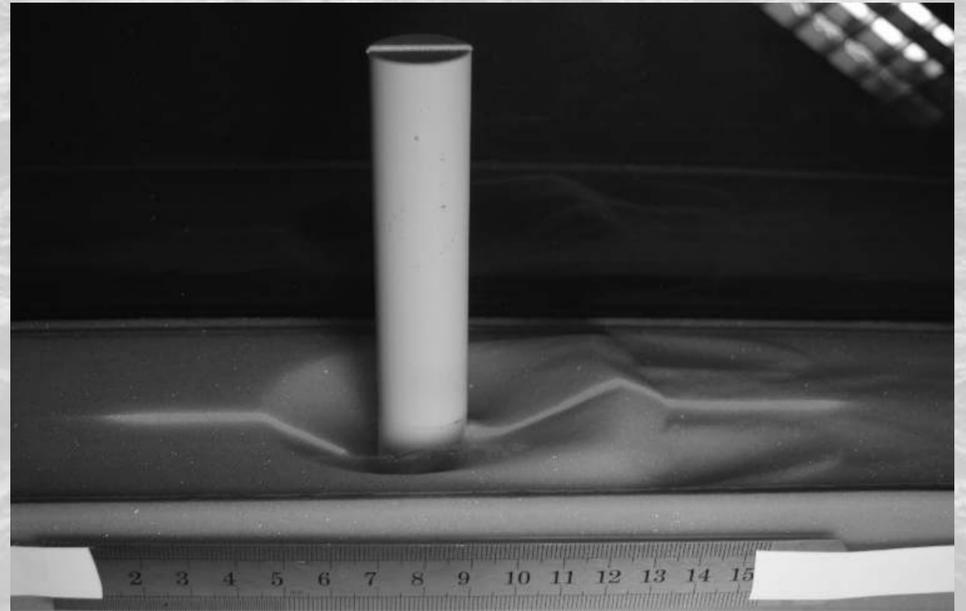


Schéma et photo du canal permettant l'étude de l'affouillement au laboratoire FAST à Orsay.
© F. Lachaussée



Observations et mesures au laboratoire

Le canal hydraulique du FAST permet de créer des phénomènes d'affouillement à l'échelle du laboratoire. Comme on le voit sur la photo ci-contre, on obtient une fosse d'érosion au voisinage du cylindre qui modélise la pile de pont. Le lit est constitué de billes de verre de 0,3 mm de diamètre.



Fosse d'affouillement obtenue au laboratoire. Le cylindre a un diamètre de 2 cm.

© F. Lachaussée

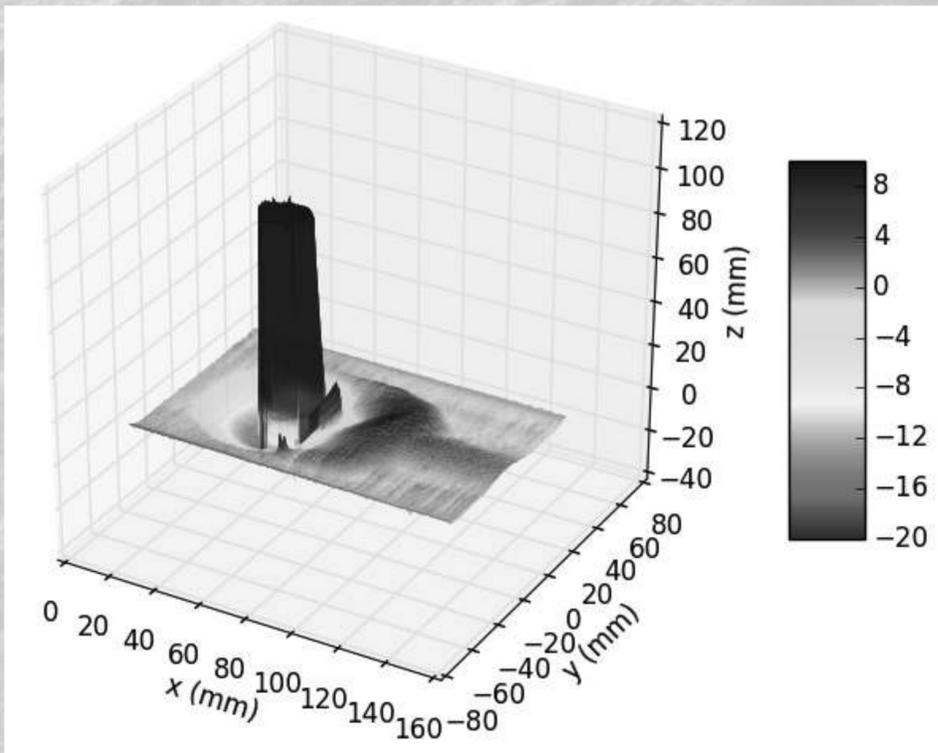


Image d'une fosse d'affouillement obtenue par profilométrie laser.

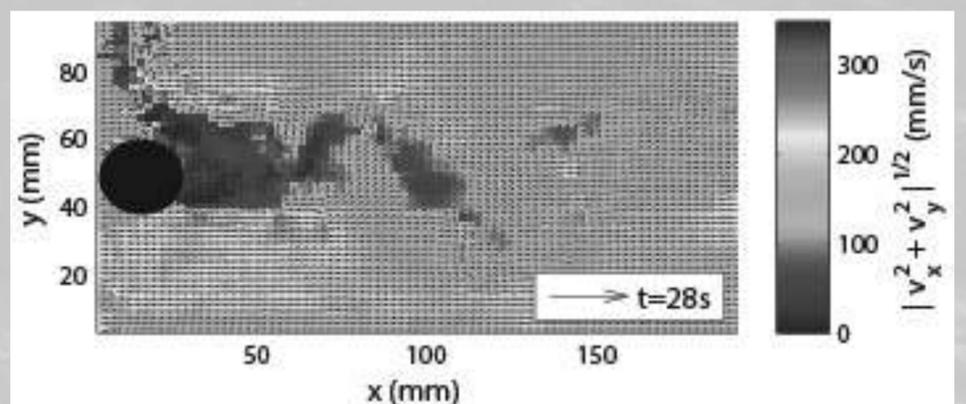
© F. Lachaussée

Ces expériences s'inscrivent dans le cadre du **projet SSHEAR** (financé par l'ANR). Le but est d'obtenir au laboratoire des données quantitatives et fines sur l'affouillement, et de les confronter à des observations de terrain.

Tout ceci permettra d'enrichir les modèles numériques, qui à terme seront utilisés pour améliorer la prévention des risques d'affouillement.

Grâce à la réduction d'échelle, les expériences sont relativement rapides et de nombreux paramètres peuvent être testés (type de grains, taille et forme des piles, type de fluide, etc.).

On peut également réaliser des mesures optiques : soit de profilométrie pour connaître le relief du lit et suivre l'affouillement (ci-contre), soit de vélocimétrie laser pour connaître le champ de vitesse de l'écoulement (ci-dessous).



Champ de vitesse au voisinage du cylindre, obtenu par PIV (Particle Image Velocimetry).

© F. Lachaussée