

Connaissances de base

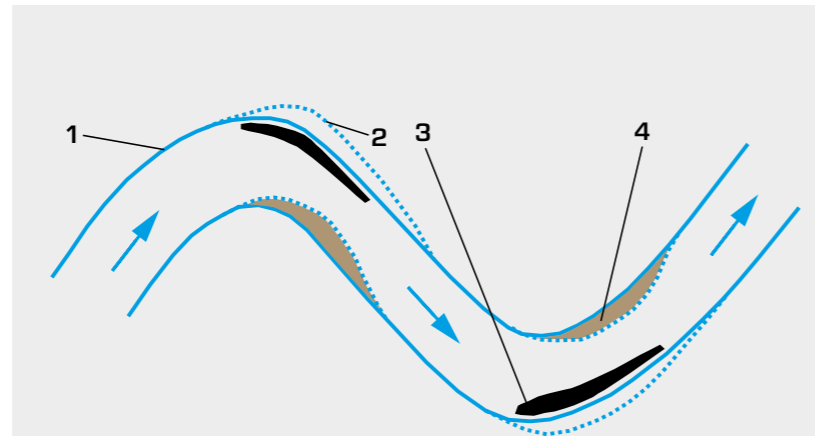
Principes de base du transport des sédiments

Les écoulements dans les rivières, canaux et dans les zones côtières sont souvent accompagnés d'un transport des sédiments. Le transport des sédiments est composé du **transport des sédiments en suspension** et du **transport par charriage**.

Le transport par charriage a lieu dans la zone proche du lit et est donc un facteur très important dans la mise en forme du lit de rivière. Dans les eaux courantes naturelles, érosion et processus de sédimentation alternent en permanence et caractérisent le régime de charriage du tronçon de cours d'eau.

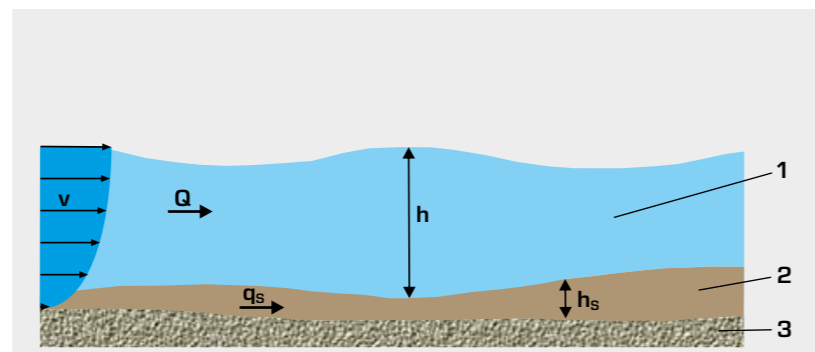
Le transport par charriage constitue la composante de référence du comportement d'écoulement dans des canaux. Des sédiments qui se déposent (atterrissement) ou sont transportés (érosion ou formation d'affouillements) peuvent par exemple modifier la section d'écoulement ou les lignes d'eau. Le transport des sédiments entraîne également une modification de la structure du lit (formation de rides ou de dunes, modification de la rugosité).

Les sédiments transportés comme des matières en suspension ont un rôle dans l'équilibre de transport uniquement lorsqu'ils se déposent et participent ainsi à l'atterrissement, comme c'est le cas par exemple dans les cours d'eaux très lents ou stagnants.



Rivière (vue du dessus)

1 lit du cours d'eau original, 2 lit du cours d'eau modifié par le transport des sédiments à un moment ultérieur, 3 affouillement ou érosion, 4 atterrissement



Rivière (vue en coupe)

1 eau, 2 sédiments mobiles, 3 fond fixe;
v vitesse d'écoulement, Q débit,
q_s capacité de transport des sédiments,
h profondeur de l'écoulement,
h_s épaisseur de la couche de sédiments

Pour évaluer le comportement d'écoulement dans un canal, en cas d'écoulement normal, il faut, en plus des équations déjà mentionnées de conservation de l'énergie, conservation de l'impulsion et conservation de la masse, considérer aussi l'équilibre de transport au volume de contrôle – la quantité de sédiments qui quitte le volume de contrôle est-elle la même que celle qui revient l'alimenter? Les formules de transport sont des formules empiriques, telles que celle de Meyer-Peter & Müller.

Les bancs d'essai de GUNT sur cette thématique traitent principalement du transport par charriage.

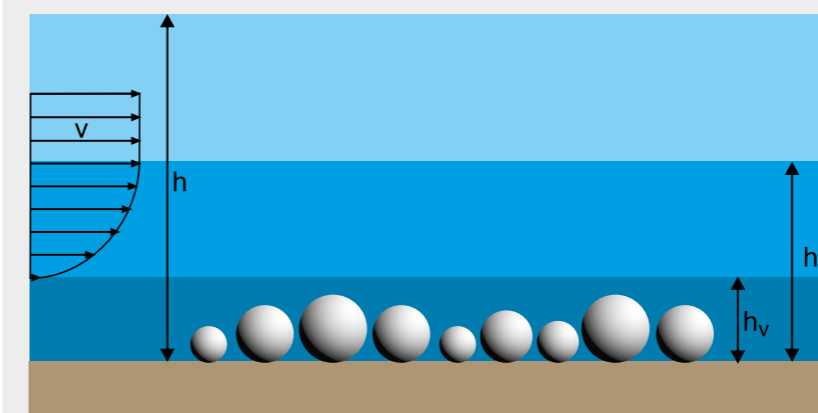
Début du mouvement des sédiments

Les grains de sédiment se trouvent au sol se déplacent uniquement lorsque la contrainte critique de cisaillement au sol est dépassée. On distingue alors trois possibilités:

- dépassement fréquent ou permanent: **formation de rides** ou **de dunes** sur le fond
- dépassement uniquement en cas d'événements extrêmes tels que tempête ou crue: modification brusque du fond
- pas de dépassement: dépôt des matières en suspension, il est possible que le fond s'envase à moyen terme.

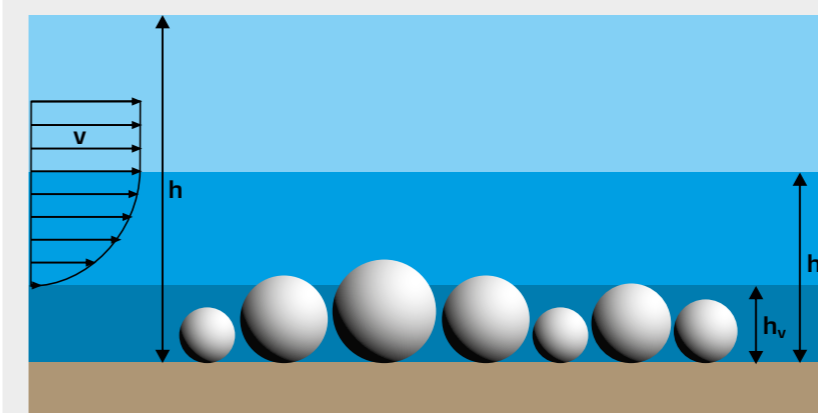
Normalement, les sédiments sont constitués de grains de tailles différentes. Les grains les plus grands sont plus fortement soumis à l'écoulement et retiennent des forces d'écoulement plus élevées que les grains de petite taille. Les grains de petite taille peuvent être masqués par les grains de grande taille (effet de Hiding) et commencent à se mouvoir à des forces d'écoulement plus élevées que les grains qui ne sont pas masqués.

Structure des couches mouvantes dans les eaux courantes



Limite hydraulique lisse

h profondeur de l'écoulement, h_b épaisseur de la couche limite, h_v épaisseur de la couche visqueuse



Limite hydraulique rugueuse

h profondeur de l'écoulement, h_b épaisseur de la couche limite, h_v épaisseur de la couche visqueuse

La vitesse d'écoulement de l'eau s'approche de zéro à proximité du fond du canal. Cette zone est appelée **couche limite**. La **sous-couche visqueuse** se trouve juste au-dessus du fond du canal et est très fine. La formation de la sous-couche visqueuse dépend des caractéristiques de surface du fond du canal. On parle de limite hydraulique lisse lorsque les éléments de rugosité tels que les grains de sédiment se trouvent intégralement à l'intérieur de la sous-couche. Dès lors que les grains de sédiment dépassent de la sous-couche, on parle de limite hydraulique rugueuse.

La limite hydraulique lisse (smooth boundary) entre la couche de sédiments et l'écoulement se forme lorsque les vitesses d'écoulement sont faibles (sous-couche visqueuse fine) et/ou lorsque les diamètres de grain des sédiments sont de petite taille. En cas de diamètres de grain élevés (>0,6mm) et/ou de vitesses d'écoulement élevées (couche visqueuse épaisse), on parle de limite hydraulique rugueuse (rough boundary).

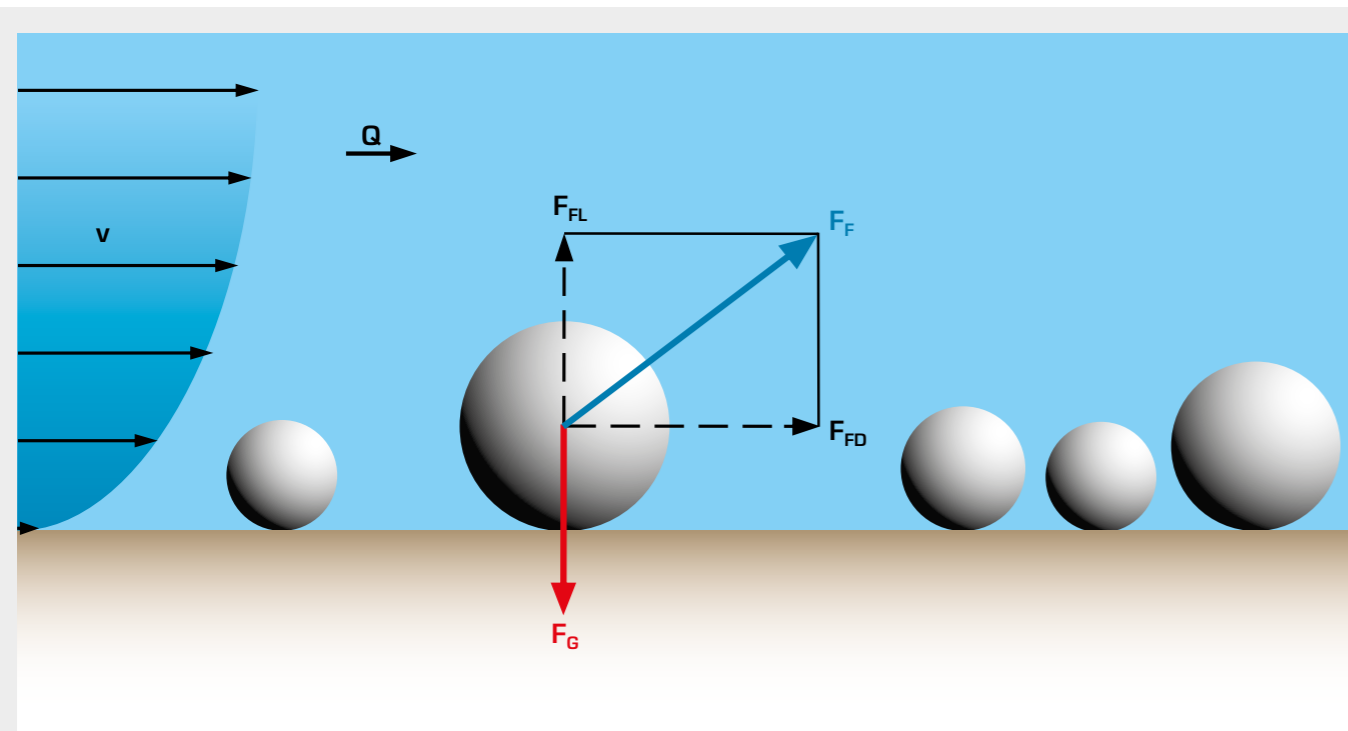
Connaissances de base

Principes de base du transport des sédiments

Types de transport des sédiments

Des forces différentes agissent sur un grain de sédiment à l'intérieur d'un écoulement. Le type de transport des sédiments dépend de la taille, de la masse et de la forme du grain ainsi que

de la force d'écoulement en action. Toutes les forces pertinentes figurent sur l'illustration ci-dessous:



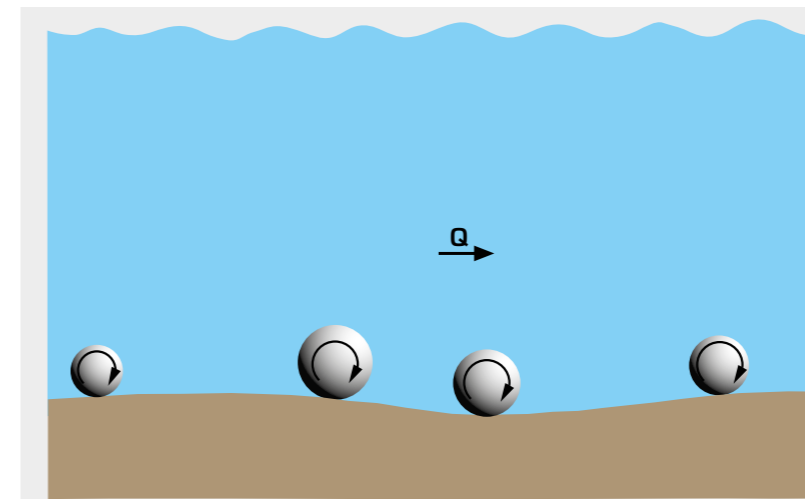
Forces au niveau du grain de sédiment dans le fond du canal

v vitesse d'écoulement, Q débit, F_G poids, F_F force d'écoulement, F_{FL} portance (lift), F_{FD} traînée (drag)

La force d'écoulement F_F est la force qui résulte de la portance s'exerçant à la verticale F_{FL} et de la traînée qui agit à l'horizontale F_{FD} . Pour que le grain de sédiment quitte le fond du canal (pour la saltation ou comme matière en suspension), il faut que la portance soit supérieure au poids qui lui est opposé F_G du grain de sédiment.

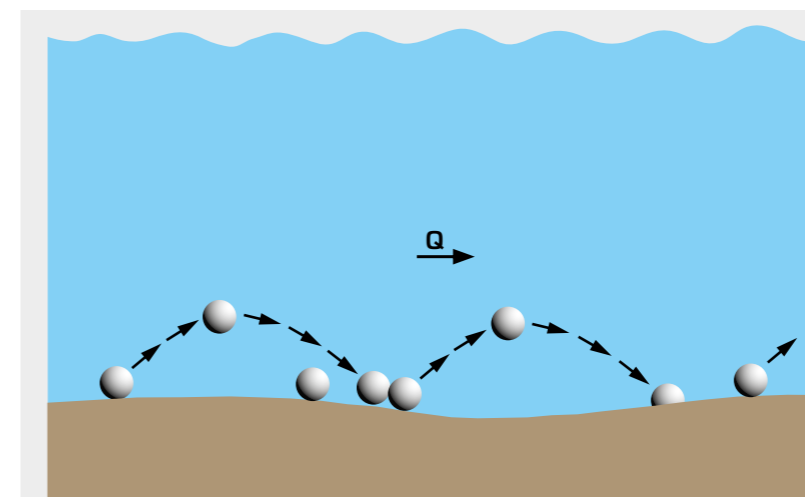
Sur les petits grains, la force d'écoulement en action est plus faible que celle qui s'exerce sur les grains plus grands en raison de la répartition de la vitesse d'écoulement v entre le fond du canal et la surface de l'eau. Mais sur le grain plus grand, le poids F_G est supérieur et empêche le transport des sédiments en suspension.

Les grains de grande taille (les pierres par exemple) roulent et glissent sur le fond alors que les petits grains de sable deviennent des matières en suspension. Les grains de sédiment plus grands que le sable (gravier par exemple) peuvent également être soumis à la saltation.



Roulement (rolling)

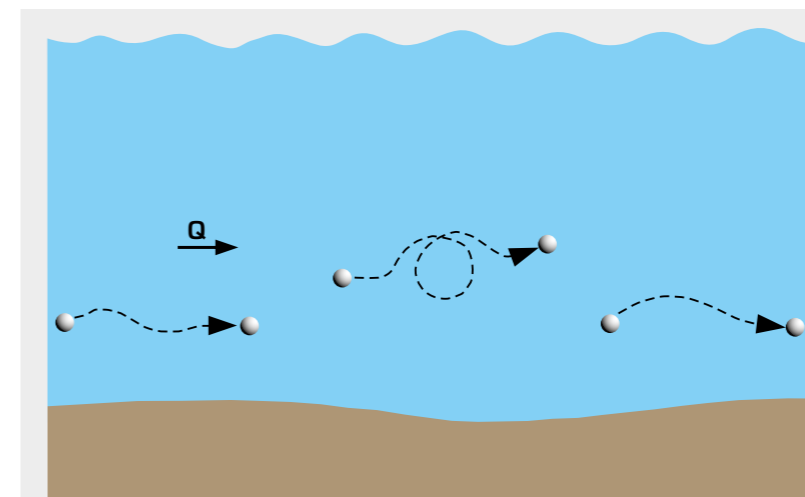
Le sédiment reste en contact permanent avec le fond. Normalement les grands grains de sédiment (comme les pierres) roulent.



Saltation

Le grain de sédiment, par exemple un petit caillou, est arraché du fond par l'écoulement et quitte brièvement le sol. L'écoulement continue de l'entraîner jusqu'à ce qu'il se dépose à nouveau. C'est comme si le grain sautait.

Le charriage est un processus de déplacement des matières solides durant lequel elles restent en contact avec le fond. Les principaux facteurs sont: ■ débit ■ pente ■ structure du lit ■ solides disponibles



Transport des sédiments en suspension

Les matières en suspension sont des matières solides qui sont en suspension dans l'eau et n'ont aucun contact avec le fond.

Les principaux facteurs sont:

- la vitesse de sédimentation (diamètre de grain, forme de grain, densité de grain, densité de l'eau)
- les paramètres d'écoulement (distribution de la vitesse dans le canal, turbulences)

Connaissances de base

Principes de base du transport des sédiments

Corps de transport



Les processus causés par le vent dans le désert sont comparables aux processus se déroulant dans les eaux courantes.

Dès que la vitesse d'écoulement passe au-dessus de la vitesse critique à laquelle les sédiments se mettent en mouvement, des irrégularités apparaissent sur le fond du canal, que l'on appelle les **corps de transport**. Ces irrégularités peuvent atteindre une hauteur égale à environ un tiers de la profondeur de l'écoulement. On distingue principalement trois formes de base du corps de transport: **les rides, les dunes et les antidunes**.

Les **rides de courant** apparaissent sous l'effet de processus se déroulant dans la couche limite, si bien que la profondeur minimale de l'écoulement est égale à environ trois fois la hauteur des rides. Le diamètre maximum des grains de sable permettant l'apparition de rides est de 0,6mm environ. Les rides ont une hauteur moyenne de 3...5cm et ont une longueur de vague de 4...60cm. Elles sont si petites que leur influence sur l'écoulement n'atteint pas sa surface.

Les **dunes** sont des rides de grande taille et sont similaires à des seuils de grande taille souvent réguliers. Leur hauteur dépend de la profondeur de l'écoulement. Elles influencent également l'écoulement jusqu'à sa surface. Les rides et les dunes peuvent se superposer.

Les rides et les dunes se déplacent dans la direction de l'écoulement, les **anti-dunes**, plus rares, se déplaçant elles dans la direction contraire à l'écoulement. Les antidunes apparaissent lorsque l'écoulement est supercritique et dessinent des formes de lit ondulées.

Types de rides

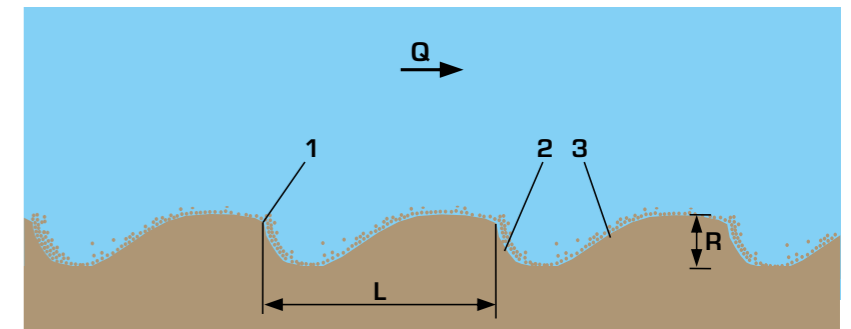
On distingue les **rides de courant** (explication sur cette page) et les **rides de vagues**, qui se forment sous l'effet des ondes de surface de l'eau dans les eaux peu profondes. Des rides asymétriques se forment par exemple lorsqu'un écoulement se superpose à des ondes de surface.

Formation et mouvement des rides de courant

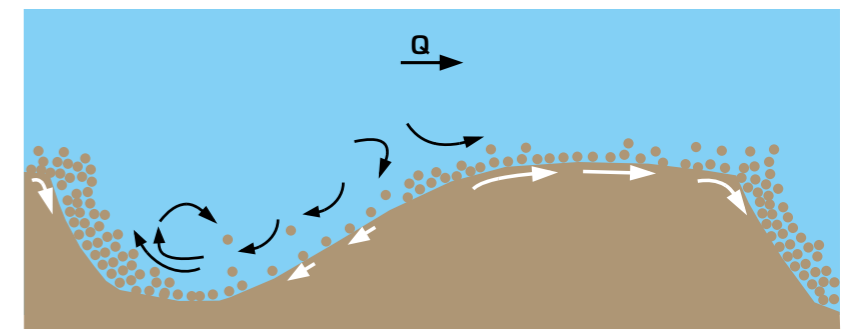
Lorsque la vitesse d'écoulement critique nécessaire au mouvement du sable est atteinte, les grains commencent à se mouvoir. Ils forment un Cluster (colline). Les collines ont le même effet que les irrégularités à la surface des sédiments. Ces irrégularités ont une épaisseur de seulement quelques grains et influencent l'écoulement dans la couche limite. Les lignes de courant sont plus proches les unes des autres au sommet d'une colline, la vitesse d'écoulement est ici plus élevée (**effet Bernoulli**; voir illustration: érosion dans le creux). Du fait de l'augmentation de la vitesse d'écoulement, il est possible que d'autres grains roulent du côté soumis à l'écoulement ou qu'ils sautent et s'accumulent au sommet, de la crête. Lorsqu'une trop grande quantité de grains se sont amassés, la position devient instable, ils glissent jusqu'en bas de la colline, du côté à l'abri de l'écoulement. Le côté à l'abri de l'écoulement a une pente plus raide que le côté soumis à l'écoulement.

Sur la crête de la colline, la ligne de courant se trouvant à la surface du sable, se détache de cette surface et revient plus tard la percuter (voir illustration: apparition de contre-courants du côté à l'abri de l'écoulement). En dessous de cette ligne de courant se trouve ce qu'on appelle la zone de séparation (separation zone). Il est possible qu'un vortex de séparation se forme dans cette zone, provoquant ainsi un petit contre-courant. On observe en plus des turbulences et de l'érosion, qui provoquent la formation ou l'enfoncement des vallées entre les rides. Ces vallées sont appelées creux. Une partie des grains érodés se dépose au pied du côté à l'abri de l'écoulement, et les autres sont emportés par le fluide et / ou se déposent sur le côté soumis à l'écoulement.

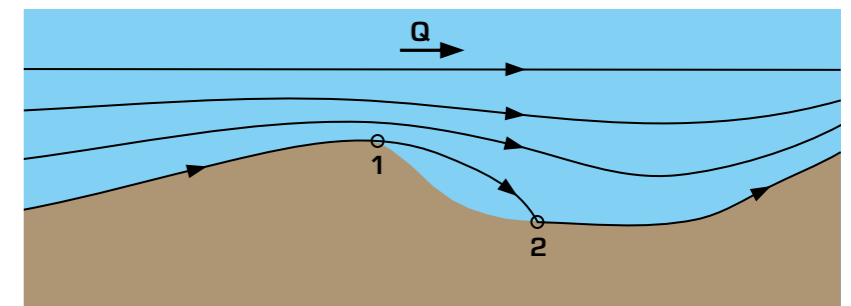
Les grains de sable situés au sommet de la couche de sédiments continuent à être transportés en permanence, si bien que les rides se déplacent dans la direction de l'écoulement et semblent de ce fait mobiles.



1 crête de la ride, 2 côté à l'abri de l'écoulement, 3 côté soumis à l'écoulement de la ride; L longueur de vague, R hauteur de ride

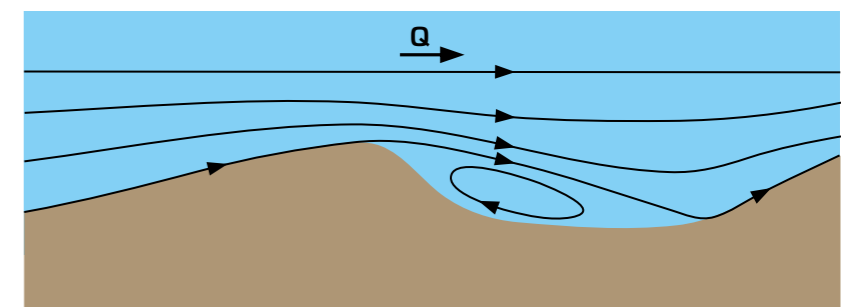


Flèches noires turbulences dans l'eau, flèches blanches migration du sable



Érosion dans le creux

1 décrochage de la ligne de courant sur la crête, 2 point d'impact; lignes noires lignes de courant



Apparition de contre-courants du côté à l'abri de l'écoulement zone de détachement avec tourbillons

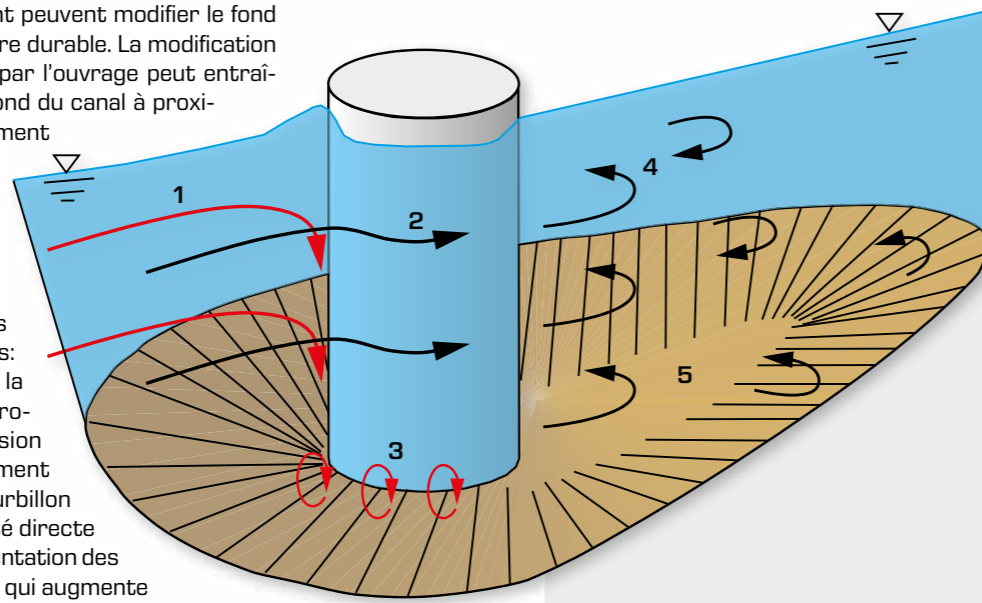
Connaissances de base

Principes de base du transport des sédiments

Transport des sédiments sur des piles de pont

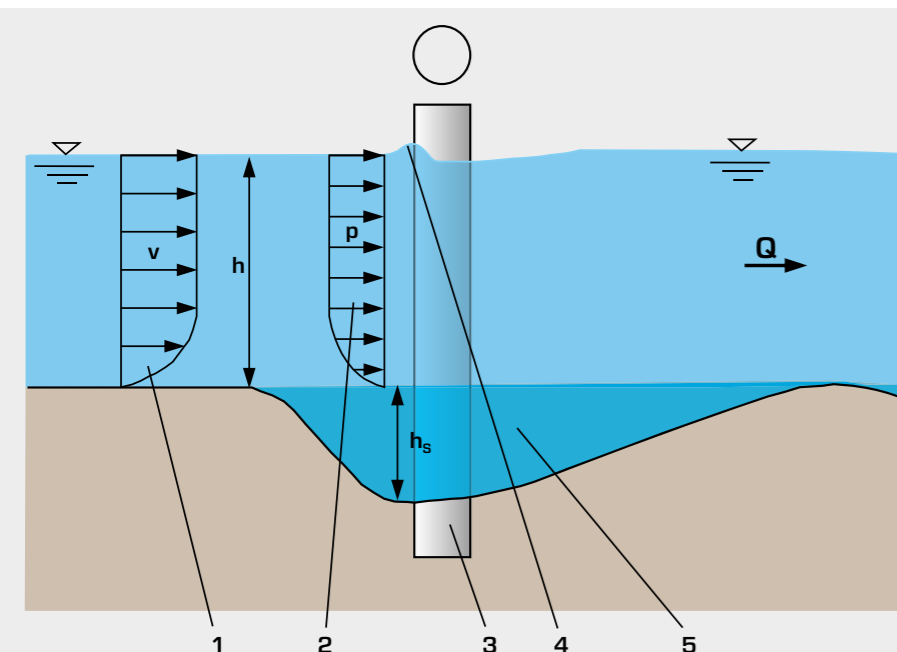
Les ouvrages tels que les piles de pont peuvent modifier le fond d'un canal d'eaux courantes de manière durable. La modification des conditions d'écoulement causée par l'ouvrage peut entraîner la formation d'affouillements au fond du canal à proximité directe de l'ouvrage. Un affouillement peut déjà apparaître lorsqu'il n'y a pas de véritable transport des sédiments dans les eaux courantes. On parle dans ce cas d'**affouillement en eau claire** (clear-water scour).

La formation d'affouillements sur les ouvrages a deux causes principales: ce qu'on appelle l'affouillement dû à la contraction et les phénomènes d'érosions locaux. Dans le cas de l'érosion locale, l'écoulement est dévié localement par l'ouvrage. Des systèmes de tourbillon très turbulents se forment à proximité directe de l'ouvrage, qui entraînent une augmentation des vitesses locales (voir illustrations). Ce qui augmente le taux d'érosion des sédiments. Dans le cas de l'affouillement dû à la contraction, la réduction de la section d'écoulement par l'ouvrage (par exemple des piles de pont) entraîne une augmentation des vitesses d'écoulement. Ces vitesses d'écoulement plus élevées induisent une augmentation des contraintes de cisaillement au sol et donc une augmentation de la capacité de transport. L'érosion au pied ou au niveau de la fondation de la pile peut avoir des conséquences fatales entraînant dans certains cas l'effondrement de l'ouvrage. C'est pourquoi il est important de bien comprendre les mécanismes de la formation d'affouillements afin d'être en mesure d'estimer la profondeur prévisionnelle d'affouillement et de prendre les mesures qui s'imposent.



Formation d'affouillements en eau claire sur une pile cylindrique

- 1 écoulement descendant,
- 2 écoulement autour de la pile,
- 3 tourbillon en fer à cheval,
- 4 tourbillon de sillage,
- 5 affouillement



Formation d'affouillement en eau claire (vue latérale)

- 1 distribution de la vitesse de l'écoulement,
- 2 distribution de la pression,
- 3 pile cylindrique,
- 4 retenue à piles,
- 5 affouillement;
- h profondeur de l'écoulement,
- h_s profondeur d'affouillement,
- Q débit

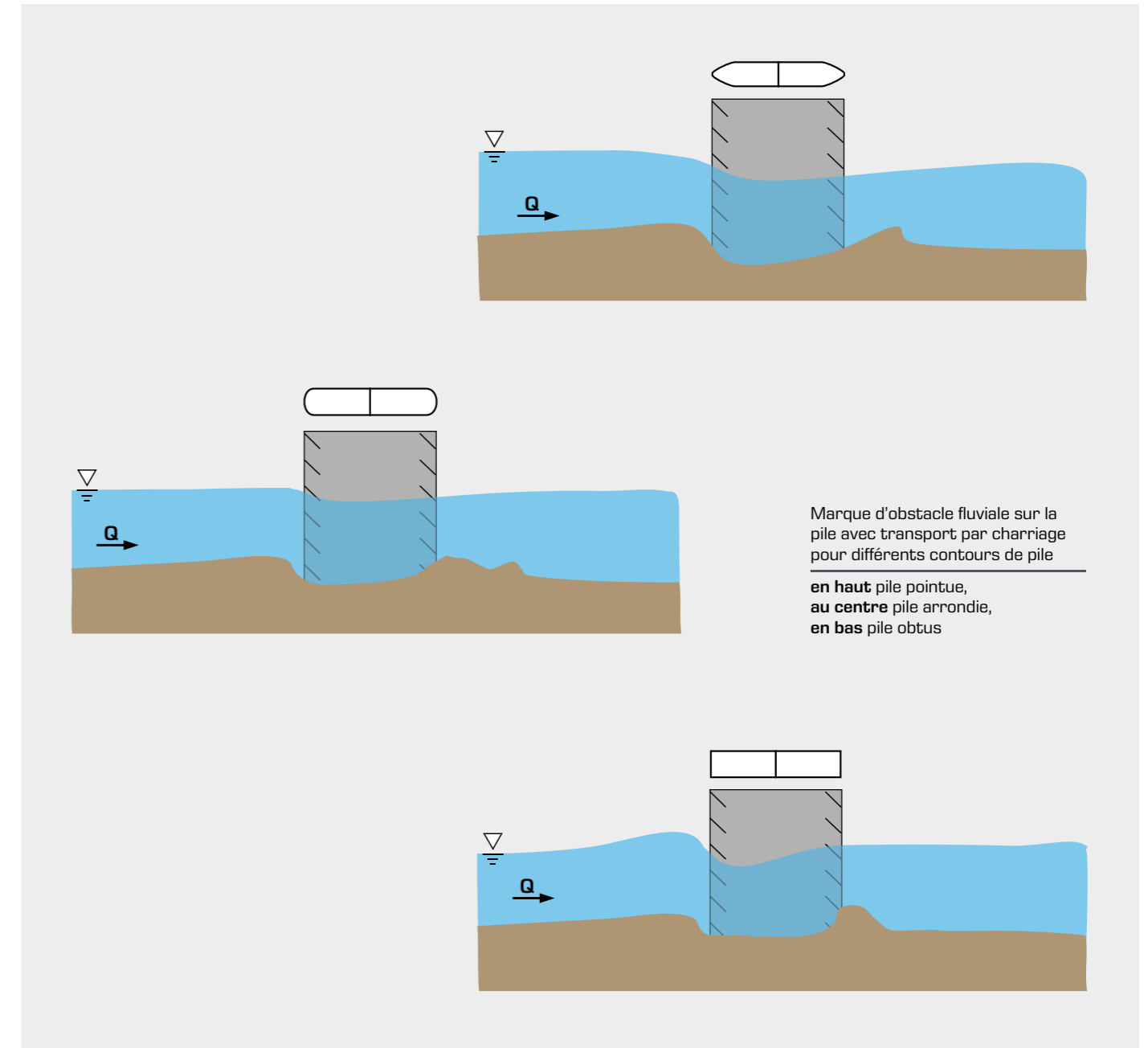
Lors de la formation d'affouillements, deux systèmes de tourbillon se forment, qui sont largement indépendants l'un de l'autre: le **système de tourbillon en fer à cheval** et le **système de tourbillon de sillage** (voir illustration: formation d'affouillements en eau claire sur une pile cylindrique). Le système de tourbillon en fer à cheval est le système de référence dans la formation d'affouillements. Les tourbillons en fer à cheval se forment sous l'effet de l'écoulement descendant du côté de l'ouvrage soumis à l'écoulement. L'écoulement descendant se forme en raison d'une baisse de pression (voir flèche rouge dans l'illustration du haut et distribution de la pression dans la vue latérale ci-dessous). Les tourbillons de sillage se forment lors du décollement de la couche limite sur les côtés du cylindre contourné par l'écoulement (flèche noire dans l'illustration du haut).

Les piles cylindriques présentent l'affouillement (en eau claire) le plus important du côté soumis à l'écoulement, tandis que pour les piles rectangulaires, la formation d'affouillements est la plus élevée sur les côtés.

Marque d'obstacle fluviale

L'atterrissement, ou banc alluvial, qui apparaît après l'obstacle est également un élément important dans la formation d'affouillements. Les deux phénomènes sont regroupés sous la dénomination de marque d'obstacle fluviale.

Dans les illustrations ci-dessous, on voit la marque d'obstacle fluviale sur la pile, lorsqu'un transport par charriage a déjà lieu en amont dans les eaux courantes.



Marque d'obstacle fluviale sur la pile avec transport par charriage pour différents contours de pile

- en haut: pile pointue,
au centre: pile arrondie,
en bas: pile obtus