

Fluvial ou torrentiel ?

Selon que le débit d'un cours d'eau est fort ou faible, les irrégularités du lit modèlent différemment la profondeur de l'eau et sa vitesse.

O rage d'été. En quelques heures, la paisible rivière qui serpente au fond de la gorge s'est transformée en un torrent impétueux. Le kayak qui s'y est aventuré est ballotté en tous sens. Ses deux occupants, sportifs et néanmoins curieux, s'interrogent tout en payant : pourquoi cette transition d'un écoulement de type fluvial à un écoulement torrentiel ? Simple question de débit d'eau qui augmente ? Le phénomène est plus subtil qu'il n'y paraît, et nos deux kayakistes devront éviter de se noyer dans les lois de l'hydraulique.

Tout d'abord, pourquoi une rivière coule-t-elle ? À cause de la gravité. L'eau glisse sur le lit incliné du cours d'eau. Autrement dit, la force motrice est la projection du poids de l'eau le long de la pente. Pour un fleuve tel que la Seine, la pente est très faible. La Seine descend de 471 mètres sur une longueur de 776 kilomètres, d'où une pente (tangente de l'angle) moyenne de 0,6 millième : ici, la force motrice agissant sur une tonne d'eau correspond à un poids de 600 grammes. L'eau n'accé-

lère cependant pas continûment. Elle garde une vitesse constante, car la force motrice est contrebalancée par les frottements sur les parois du cours d'eau – surtout le fond du lit lorsque le cours d'eau est bien plus large que profond, ce que l'on supposera dans la suite. Pour des parois réelles, hétérogènes et rugueuses, l'écoulement est turbulent à leur proximité, et la force de frottement est alors proportionnelle au carré de la vitesse moyenne de l'écoulement de l'eau.

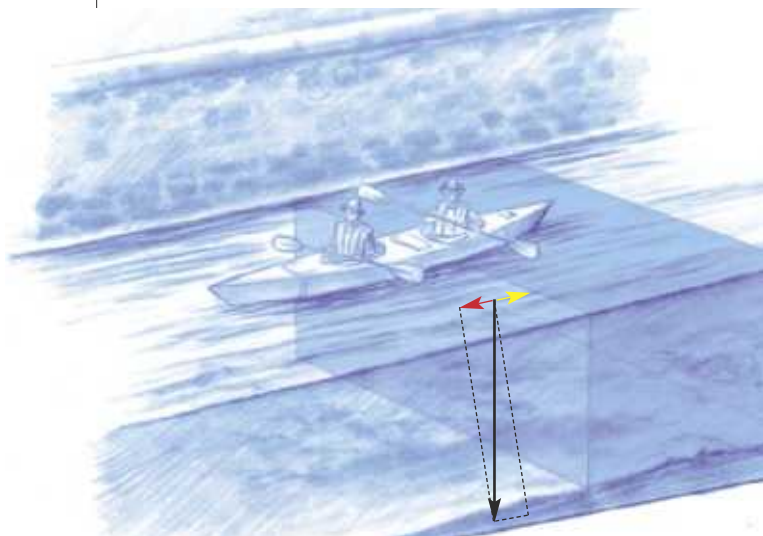
Débit, vitesse et tirant d'eau

Comment varie la vitesse avec la profondeur d'eau ? Pour le savoir, on considère une tranche du fleuve et l'on impose que son poids moteur (proportionnel à l'aire de la section (largeur $\times$ profondeur) du fleuve et à la pente) soit égal, en régime permanent, à la force de frottement (proportionnelle au carré de la vitesse et à la largeur du cours d'eau). On trouve ainsi que la vitesse est proportionnelle à la racine carrée du produit de la pente et du tirant d'eau (la profondeur d'eau). Cette formule, énoncée par l'ingénieur français Antoine Chézy en 1775, a été améliorée en 1923 pour prendre en compte le fait que la force de frottement dépend de la profondeur ; la puissance à laquelle la profondeur intervient dans l'expression de la vitesse est alors $2/3$ et non $1/2$.

Le débit étant égal au produit de la vitesse par la section, on en déduit que le tirant d'eau croît comme la puissance $3/5$ du débit, et que la vitesse croît comme la puissance $2/5$ du débit. Autrement dit, quand le débit augmente, le tirant d'eau et la vitesse augmentent tous deux.

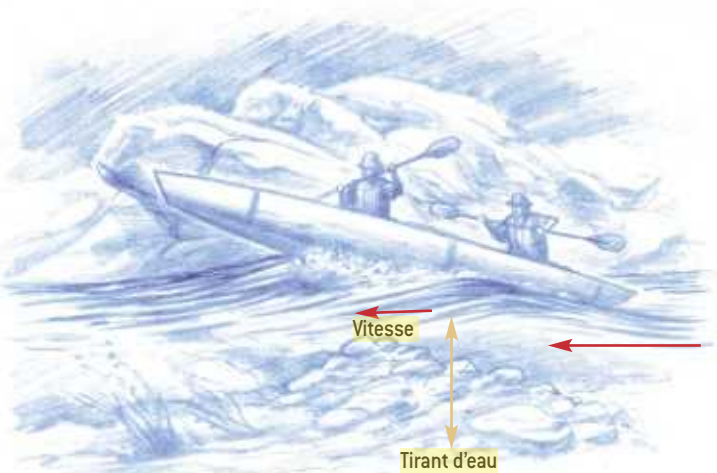
En pratique, le débit est fixé par le volume des précipitations et par l'étendue du bassin fluvial. Le tirant d'eau et la vitesse du fleuve s'ajustent en conséquence. Si le débit imposé par les précipitations excède le débit correspondant à un tirant d'eau égal à la profondeur du lit, c'est l'inondation. Dans le cas de la Seine, le débit peut varier d'environ 80 mètres cubes par seconde en période de fort étiage à 2600 mètres cubes par seconde en cas de crue exceptionnelle ; le tirant d'eau varie donc d'un facteur huit.

Qu'advient-il du tirant d'eau et de la vitesse d'écoulement lorsque le cours d'eau est perturbé, par exemple par la présence d'une bosse au fond du lit du fleuve ? Suivons une tranche d'eau dans sa progression lorsqu'elle franchit l'obs-



Dessins de Bruno Vacaro

1. Chaque tranche d'eau s'écoule sous l'effet de son propre poids (en noir), en raison de l'inclinaison du lit du cours d'eau. À la force motrice (en rouge) due à la gravité s'oppose une force de frottement (en jaune) due aux aspérités du fond et des parois latérales du lit. En régime permanent, ces deux forces sont égales et impliquent que quand le débit augmente, la vitesse d'écoulement et le tirant d'eau augmentent tous deux.



2. Lorsque l'écoulement est rapide, la présence d'une bosse dans le fond du lit a pour effet de diminuer la vitesse du courant à cet endroit, de la même façon qu'un cycliste en roue libre ralentit en montant une pente. Le débit étant conservé, le tirant d'eau augmente.

tacle. Si l'obstacle est petit, la dissipation d'énergie est négligeable et l'énergie de la tranche d'eau peut être considérée comme constante. C'est aussi le cas du débit, car la quantité de matière se conserve de l'amont à l'aval.

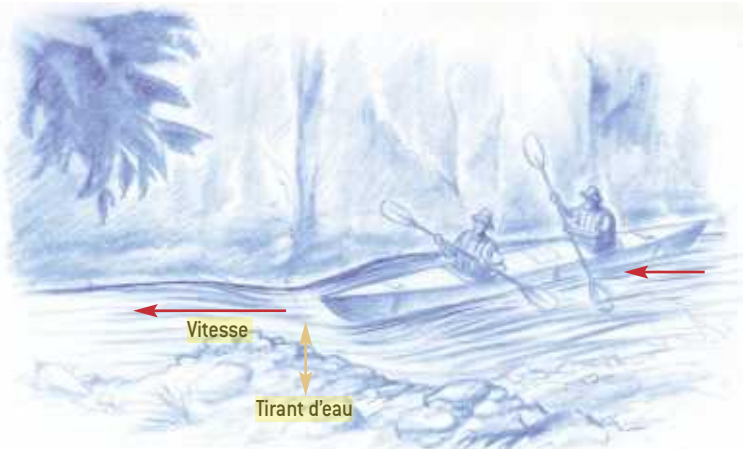
Deux cas extrêmes éclairent les comportements possibles de l'eau confrontée à un obstacle. Considérons d'abord un torrent, où l'écoulement est rapide. Tout comme un cycliste franchissant une bosse en roue libre, la vitesse de l'eau va diminuer : l'énergie cinétique est convertie en énergie potentielle de gravité afin de surmonter l'obstacle. La conservation du débit entraîne une augmentation de la profondeur (en fait, l'épaisseur) d'eau.

Un équivalent du nombre de Mach

Pour une même bosse, plus la vitesse d'écoulement est faible, plus le ralentissement est important : il en est donc de même de la variation du tirant d'eau et, par suite, de l'énergie nécessaire au franchissement de l'obstacle. Il faut en effet « payer » l'élévation du centre de gravité de la tranche d'eau, et cette élévation s'accroît quand la vitesse diminue.

Il arrive un moment où la vitesse en amont est trop faible pour que l'énergie cinétique de la tranche d'eau compense le coût en énergie potentielle. Le comportement de l'eau change alors du tout au tout. Puisqu'il n'est pas possible de transformer assez d'énergie cinétique en énergie potentielle, c'est le contraire qui se passe. Au niveau de la bosse, le tirant d'eau diminue ; le centre de gravité de la tranche d'eau s'abaisse et la diminution d'énergie potentielle est récupérée sous forme d'énergie cinétique, laquelle augmente. En conséquence, la vitesse de l'écoulement s'accroît.

On retrouve ces comportements lorsque le cours d'eau est rétréci, soit naturellement, soit par la présence des arches d'un pont : si l'écoulement est rapide en amont, le tirant



3. Lorsque l'écoulement est lent, l'énergie cinétique n'est pas suffisante pour que l'eau s'élève complètement au-dessus de l'obstacle. Au lieu de cela, le tirant d'eau diminue à l'endroit de la bosse, ce qui crée un creux à la surface de l'eau. En revanche, l'écoulement y est accéléré.

d'eau va augmenter et la vitesse diminuer – c'est le régime torrentiel. Dans le cas contraire, le tirant d'eau diminue et la vitesse de l'écoulement s'accroît – c'est le régime fluvial.

Comment déterminer si un cours d'eau a le comportement d'un fleuve ou celui d'un torrent ? En faisant le rapport de l'énergie cinétique à l'énergie potentielle de pesanteur moyenne associée au tirant d'eau. La racine carrée de ce rapport d'énergies, nommée nombre de Froude, est égale à la vitesse de l'écoulement divisée par la racine carrée du produit du tirant d'eau par l'accélération de la pesanteur. Ce diviseur est aussi la vitesse de propagation des vagues dans l'eau. Le nombre de Froude est donc l'équivalent hydraulique du nombre de Mach pour les écoulements de gaz. Si la vitesse de l'écoulement est plus faible que la vitesse des vagues, le nombre de Froude est inférieur à un et le régime de l'écoulement est fluvial. Pour une pente plus forte, ou un débit plus important, le nombre de Froude peut dépasser l'unité : c'est l'analogue exact de la transition entre un régime subsonique et un régime supersonique dans les gaz.

L'écoulement dans un caniveau au fond irrégulier illustre cela. En régime fluvial, la surface est à peine ridée. En régime torrentiel, en revanche, il apparaît un sillage – de même nature que le sillage sonore des avions supersoniques. Les vagues-lettes créées par l'obstacle se propagent et sont emportées par le courant, ce qui dessine des lignes diagonales dans l'écoulement ; ces structures sont analogues au cône de Mach créé dans l'air par les avions qui dépassent le mur du son.

W. H. GRAF et M. S. ALTINAKAR, *Hydraulique fluviale*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2000.

Blog des auteurs : <http://faustroll.free.fr/blog/>