

## transport solide et morphologie fluviale

### ◆ transport solide

origine des matériaux  
mécanismes de transport:  
charriage et suspension

### ◆ analyse filaire

débit, pente, granulométrie  
le profil d'équilibre

### ◆ la continuité et sa rupture : quelques impacts

### ◆ les outils

#### Quels sont les enjeux ?

*crues et inondations*  
*stabilité des terrains, des ouvrages*  
*Qualité des milieux*  
*Matériaux*  
*hydroélectricité*  
*navigation*  
*hauteur des nappes alluviales*  
*Alimentation des aquifères*  
*vecteur de pollution*

...

la Loire au bec d'Allier, doc DIREN Centre



Si une rivière déborde, s'il y a un risque inondation, c'est finalement parce que le lit est insuffisant pour transporter le débit arrivant de l'amont. Pourquoi la rivière creuse-t-elle parfois un lit qui nous semble surdimensionné en conditions habituelles mais qui permet de passer les crues ? pourquoi certaines rivières ont-elle un lit qui est insuffisant même pour les petites crues ? On se pose ici les questions sur ce lit : sa forme, sa capacité, ses propriétés et son évolution, en particulier sous l'effet des aménagements.

Les enjeux ne se limitent pas seulement au risque inondation

## bibliographie

- ◆ « Guide méthodologique de gestion du transport solide et des atterrissements », B.Couvert et al., SOGREAH  
Les Etudes des Agences de l'Eau n°65 – 1999  
<http://www.km-dev.com/eaufrance/francais/etudes/pdf/etude65.pdf>
- ◆ Malavoi J.-R. et Bravard J.-P., 2010, Éléments d'hydromorphologie fluviale. ONEMA  
<http://www.onema.fr/hydromorphologie-fluviale>
- ◆ Malavoi J.-R. et al., 2011- Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière. ONEMA  
<http://www.onema.fr/Elements-de-connaissance-transport-solide>
- ◆ Kondolf M.G. et Piégay H., 2003, Tools in fluvial geomorphology. J. Wiley and Sons, Chichester, Royaume Uni.
- ◆ Graf, Altinakar, 2000, Ecoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple. Presse Polytechniques Universitaires Romandes
- ◆ Meunier, M., 1992, Eléments d'hydraulique torrentielle, CEMAGREF éd.
- ◆ Degoutte, G., 2012, Diagnostic, aménagement et gestion des rivières – hydraulique et morphologies fluviales appliquées. Tec & Doc, Lavoisier.

## origine des matériaux

le bassin de l'Arvan (doc.M.Caplain)

### ◆ érosion des versants

- ❖ « badlands »
- ❖ déforestation



La rivière transporte de l'eau, mais aussi une certaine charge solide. D'où vient cette charge solide ?

## origine des matériaux



un kori au Niger

### ◆ érosion des versants

même en plaine



la Marque canalisée (Nord)

La rivière transporte de l'eau, mais aussi une certaine charge solide. D'où vient cette charge solide ?

## origine des matériaux

### ◆ érosion des versants

- ❖ déstabilisation
- ❖ ( et re-stabilisation)

torrent de l'Ébron



Expliquer les mécanismes de fourniture sédimentaires sur la photo de gauche et les dispositifs de stabilisation du lit sur la photo de droite.

## origine des matériaux

### ◆ les torrents

une alimentation  
discontinue

confluence Domeynon/Isère, août 2005

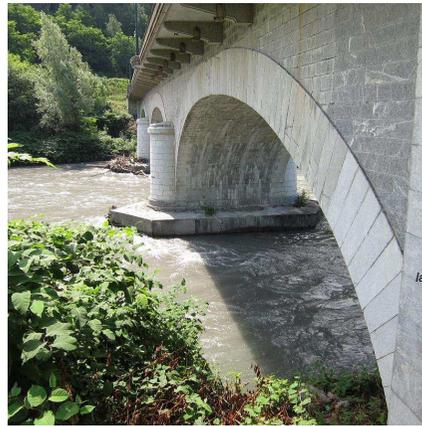


Confluence R. de Sauze/Ubaye

La rivière transporte de l'eau, mais aussi une certaine charge solide. D'où vient cette charge solide ?

## origine des matériaux

- ◆ **le lit : le fond et les berges**  
érosion et dépôt  
un processus de substitution si équilibre



la Varezze (doc. SAFEGE)

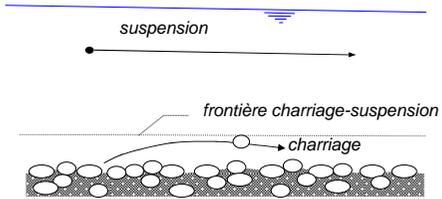
Pont Albertin sur l'Isère – Albertville



La rivière transporte de l'eau, mais aussi une certaine charge solide. D'où vient cette charge solide ?

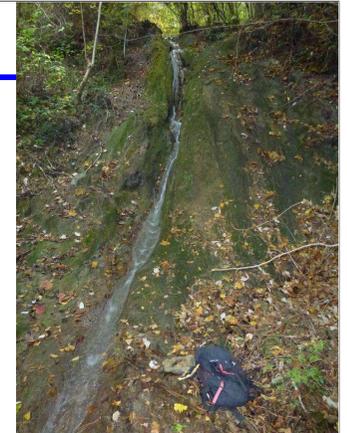
## mécanismes du transport

### agitation turbulente, frottement, poids



1. en amont : charriage hyperconcentré, laves et boues
2. le transport de fond: charriage, roulage et saltation
3. suspension
4. (solution)

Ruisseau au Murier – SMH -  
(doc. Thomas Ruales)



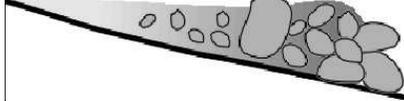
Cette charge solide se déplace sous l'action de différentes forces. On peut distinguer différents mécanismes de transport. Ces mécanismes sont caractéristiques des différents types de lits de rivière. Ces différents types seront évidemment conditionnés par la pente (qui détermine les forces hydrodynamiques) et par la taille des sédiments (qui détermine la capacité de mobilité). Pour simplifier, on va détailler 4 mécanismes et 4 typologies; mais bien entendu la transition est continue et plusieurs mécanismes peuvent co-exister ou alterner suivant les conditions.

## différents modes de transport : en amont..., charriage, suspension

## 1. laves torrentielles, charriage hyperconcentré

- ❖ écoulement liquide modifié par la présence de matériaux fortes concentrations, viscosité prépondérante écoulement par bouffées, arrêt en masse
- ❖ mélange partiel biphasique granulaire
  - ❖ mélange total boues
  - ❖ fortes pentes torrents

queue de lave    corps de lave    bourrelet frontal



enregistrement à la station expérimentale d'Illgraben (Vs)  
WSL, Swiss Federal Research Institute for Forest, Snow and Landscape, Birmensdorf



torrent de Faucon, Barcelonnette, août 2003

Type 1 : Tout en amont et dans les fortes pentes, l'écoulement d'un mélange plus ou moins homogène. Les apports sont violents, relativement rares. Ils se déposent à l'exutoire des torrents en formant des amas qui sont ensuite repris progressivement par la rivière.

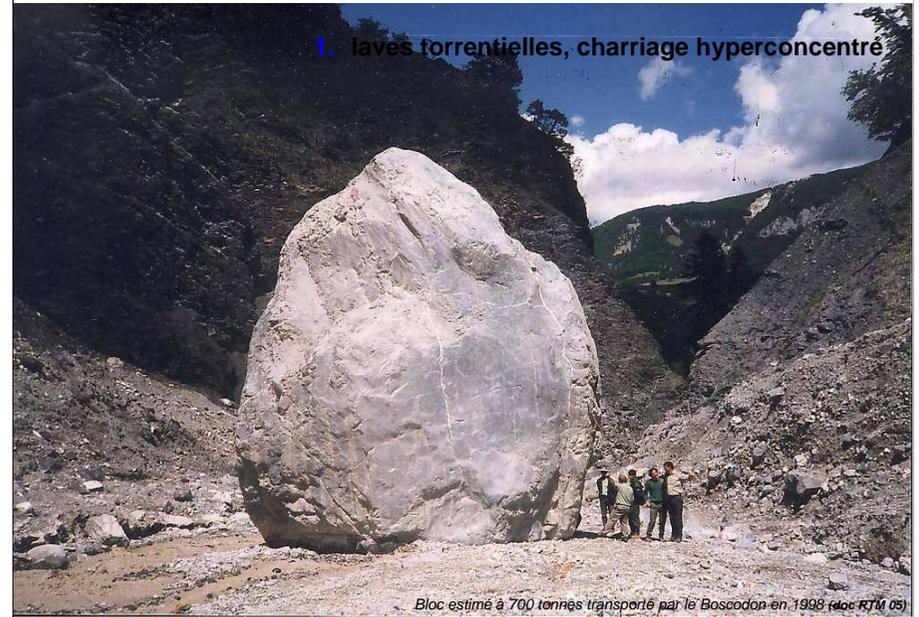
D'autres vidéos de la station suisse ici <[http://www.wsl.ch/fe/lms/prozesse/murgang/videos/index\\_EN](http://www.wsl.ch/fe/lms/prozesse/murgang/videos/index_EN)>

## bibliographie:

Rhéologie des boues et laves torrentielles - Étude de dispersions et suspensions concentrées - Philippe Coussot - CEMAGREF - Collection Etudes Montagne - 1992  
Meunier, M., 1992, Eléments d'hydraulique torrentielle, CEMAGREF éd  
Vincent Kouliniski/ETRM <<http://etrm.perso.libertysurf.fr/index.htm#d%C3%A9but>>

## différents modes de transport : en amont..., charriage, suspension

## 1. laves torrentielles, charriage hyperconcentré



Bloc estimé à 700 tonnes transporté par le Boscodon en 1998 (doc RTM 05)

Type 1 : Tout en amont et dans les fortes pentes, l'écoulement d'un mélange plus ou moins homogène. Les apports sont violents, relativement rares. Ils se déposent à l'exutoire des torrents en formant des amas qui sont ensuite repris progressivement par la rivière.

D'autres vidéos de la station suisse ici <[http://www.wsl.ch/fe/lms/prozesse/murgang/videos/index\\_EN](http://www.wsl.ch/fe/lms/prozesse/murgang/videos/index_EN)>

## bibliographie:

Rhéologie des boues et laves torrentielles - Étude de dispersions et suspensions concentrées - Philippe Coussot - CEMAGREF - Collection Etudes Montagne - 1992  
Meunier, M., 1992, Eléments d'hydraulique torrentielle, CEMAGREF éd  
Vincent Kouliniski/ETRM <<http://etrm.perso.libertysurf.fr/index.htm#d%C3%A9but>>



lave torrentielle : le Manival

Comme c'est la gravité qui est le moteur de ces écoulements, ils s'arrêteront quand la pente devient plus faible.  
 Pour se protéger des ces écoulement ravageurs de laves, on doit parfois les arrêter à l'amont des zones sensibles en créant une rupture de pente. Ce type d'ouvrage doit être nettoyé après chaque « crue solide ».  
 Ici le barrage filtrant du Manival. Un écoulement peu chargé en matières solides s'écoulera à travers les pertuis. Un écoulement très chargé sera ralenti et les matériaux se déposeront. La cascade de seuil en aval est destinée à protéger de l'érosion un chenal rectiligne globalement déficitaire en sédiments.

Transport solide et morphologie fluviale / PSTE4128 / 12 Philippe Belleudy – 11-2012

### Les différents modes de transport (charriage, suspension, solution, laves torrentielles)

---

◆ **Charriage, roulage et saltation**

chasse de l'Arc en Maurienne – juin 2011

**transport sur le fond d'un matériau non cohésif**

- ❖ à proximité du fond, les matériaux du fond
- ❖ un phénomène à seuil: « contrainte critique »

Type 2 : C'est celui qui occupe le plus les ingénieurs parce que c'est le plus « morphogène ». Et donc les impacts seront les plus forts en cas de déséquilibre.  
 Ce transport ne se produit que si le débit est suffisant (les forces d'entraînement doivent être supérieures aux forces de stabilité).

**correction du TD : contrainte seuil de début d'entraînement**

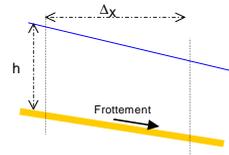
◆ **aspect macroscopique**

- ❖ perte de charge = (dissipation turbulente) + frottement sur le fond (et les parois)
- ❖ force de frottement

$$\text{Frottement} = \rho g [hb \Delta x] S_f$$

- ❖ contrainte

$$\tau = \frac{\text{Frott.}}{b \Delta x} = \rho g h S_f$$



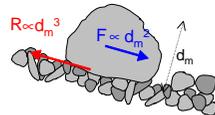
◆ **aspect microscopique**

- ❖ force exercée sur un 'grain'

$$F = \tau \alpha_1 d_m^2 = \rho g h S_f \alpha_1 d_m^2$$

- ❖ résistance au frottement

$$R = (P - A) C_f = (\rho_s - \rho) \alpha_2 d_m^3 C_f$$



**correction du TD : contrainte seuil de début d'entraînement**

◆ **condition d'entraînement**

- ❖ si la force exercée est supérieure à la résistance

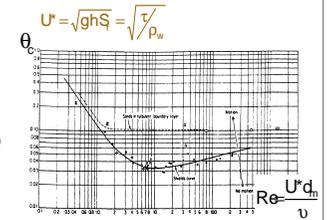
$$F = \rho g h S_f \alpha_1 d_m^2 > R = (\rho_s - \rho) \alpha_2 d_m^3 C_f$$

- ❖ on définit le frottement adimensionnel

$$\theta = \frac{h S_f}{\frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} d_m} > \theta_c = \frac{\alpha_2 C_f}{\alpha_1}$$

◆ **diagramme de Shields (1936, expérimental)**

- ❖ vitesse de frottement
- ❖ en abscisse : nombre de Reynolds de grain (frottement/viscosité)
- ❖ en ordonnée : contrainte critique adimensionnelle  $\theta_c(\text{seuil})$



## Les différents modes de transport (charriage, suspension, solution, laves torrentielles)

### ◆ Charriage, roulage et saltation

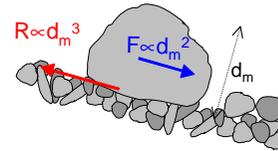


chasse de l'Arc en Maurienne – juin 2011

#### transport sur le fond d'un matériau non cohésif

- ❖ à proximité du fond, les matériaux du fond
- ❖ un phénomène à seuil: « contrainte critique »
- ❖ débit critique de début de transport, pente critique, diamètre critique

$$\theta = \frac{hS_f}{\frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} d_m} > \theta_c = 0.047$$



Rhin supérieur (doc. Martin Jaeggi)



#### ❖ ordres de grandeur:

$l = 100d$

Gs en kg/s

un grain de Loire: 10m/jour

migration des bancs du Rhin:

150m/an en moyenne / substitution

Type 2 : C'est celui qui occupe le plus les ingénieurs parce que c'est le plus « morphogène ». Et donc les impacts seront les plus forts en cas de déséquilibre.

Ce transport ne se produit que si le débit est suffisant (les forces d'entraînement doivent être supérieures aux forces de stabilité).

## charriage : style morphologique type : la rivière torrentielle

- ◆ graviers et galets
- ◆ un ou plusieurs bras vifs
- ◆ bancs de gravier recouverts en crue
- ◆ seuils (matériaux alluvionnaires) et mouilles

$$0.0015 < S_p < 0.63$$

$$F_R < 1 \text{ sauf aux bas débits sur les seuils}$$



la Bléone au Chaffaut (doc. G. Degoutte)

Ces rivières torrentielles entretiennent lit large, qui n'est utilisé totalement qu'au moment des crues. Des chenaux où l'écoulement est gouverné par des déversements sur des « seuils ».

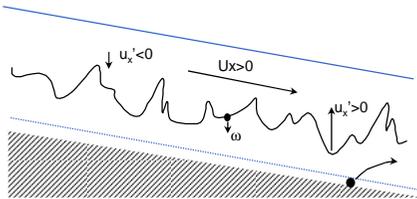
Questions (mais je n'ai pas la réponse) : à quoi ressemble le fond de la rivière au moment de la crue ? Les tresses après la crue sont-elles les mêmes que les tresses avant la crue ?

On verra plus loin le « jeu » des différentes tailles des matériaux du lit.

### Les différents modes de transport (laves torrentielles, charriage, **suspension**, solution)

#### 3. Suspension

❖ dans la veine fluide

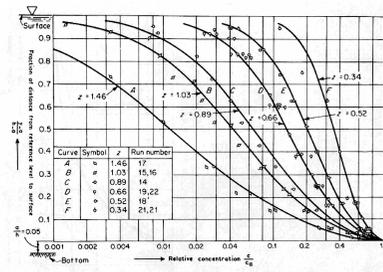


Isère, Pont de Brignoud, 14/01/2004

❖ actions: gravitation/turbulence

$$Z = \frac{\omega}{0.4U^*} : \text{nombre de Schmidt - Rouse}$$

$$U^* = \sqrt{ghS_i}$$



La particule dans l'écoulement est soumise à plusieurs forces, et en particulier: à son poids, à des forces d'entraînement du fluide: en moyenne vers l'aval, mais aussi avec des fluctuations dues à l'agitation turbulente. On montre que, en régime permanent, il en résulte une répartition stable de la concentration en fonction de la profondeur. Grande concentration près du fond et faible concentration en surface: mais la répartition est d'autant plus homogène que l'action de la pesanteur est faible (comparé aux autres forces), c'est-à-dire quand les particules sont de petite taille.

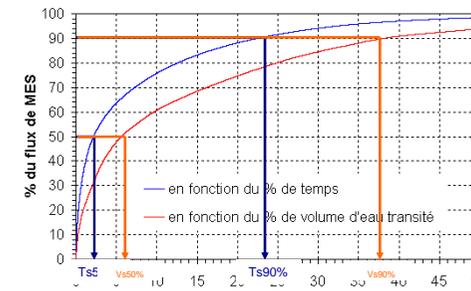
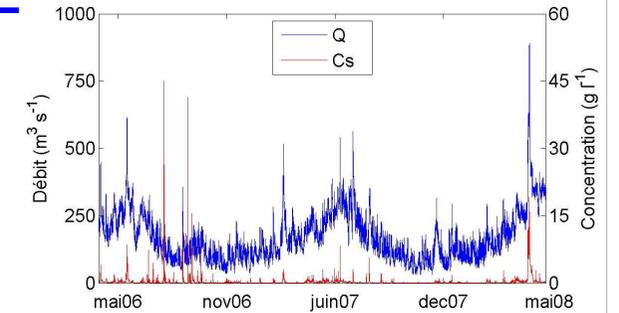
Ces matières « en suspension » se déplacent vers l'aval avec une vitesse moyenne qui est celle du courant. Les quantités transportées peuvent être très importantes.

### Les différents modes de transport (laves torrentielles, charriage, **suspension**, solution)

#### 3. Suspension

◆ **sédiments fins**

- ❖ production sur les versants
- ❖ transfert direct en suspension
- ❖ « wash-load »



↑ chronique du débit et de la concentration en suspension, station Isère campus

← distribution temporelle des apports en MES

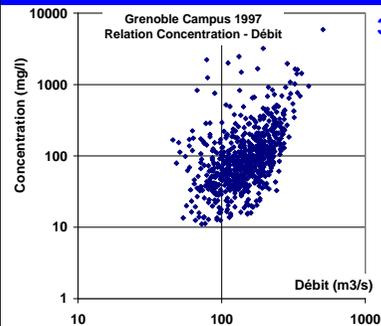
thèse Vincent MANO – 2008



Les sédiments fins suivent le rythme de production des versants. A l'échelle d'un BV comme celui de l'Isère à Grenoble, la corrélation avec le débit des crues est faible parce que les fortes concentrations peuvent provenir d'un apport très violent d'un petit BV comme c'est par exemple le cas pour la crue de la Valoirette en juillet 2006. Les données de la figure sont acquises avec un intervalle de temps de 1h qui permet de suivre les variations très brusques des apports. La figure en bas à gauche montre que 50% (resp. 90%) du flux de MES transite en moins de 3% (resp. 24%) du temps. Elle montre aussi que 50% (resp. 90%) de ce même flux de MES est porté par 6% (resp. 38%) du flux liquide.

bibliographie : Mano, V. (2008). Processus fondamentaux conditionnant les apports de sédiments fins dans les retenues – Optimisation des méthodes de mesure et modélisation statistique. Thèse Université de Grenoble, <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00365349/fr/> Mano, V.; Némery, J.; Belleudy, P.; Poirel, A. (2008). One year of Suspended Particle Matter (SPM) and carbon fluxes on an Alpine river: l'Isère - La Houille Blanche, n°5, pp.64-66

## Les différents modes de transport (laves torrentielles, charriage, **suspension**, solution)



### 3. Suspension

- ❖ moindre dépendance / débit et fond
- ❖ vitesse de propagation : celle du courant
- ❖ les différents modes de transport peuvent coexister
  - des phénomènes continus
  - un comportement différent selon les granulométries

#### ◆ quelques ordres de grandeur :

- ❖ concentration Isère 5 g/l, Colorado : 100 g/l, Fleuve Jaune : amont : 1600 g/l aval 300 g/l (lave ?)
- ❖ Flux annuels (Némery et al.-2006)
  - Loire/Seine 3-15 Tkm<sup>-2</sup>y<sup>-1</sup>
  - Isère 200-1000 Tkm<sup>-2</sup>y<sup>-1</sup>
  - extrême (Asie du sud, océanie) >10000 Tkm<sup>-2</sup>y<sup>-1</sup>

la Durance en crue : charriage et suspension (doc.Ph.Lefort)



Les matériaux transportés en suspension sont en général apportés « depuis l'amont » et sont transportés rapidement vers l'aval. A l'échelle d'un BV comme celui de l'Isère à Grenoble, la corrélation avec le débit des crues est faible parce que les fortes concentrations peuvent provenir d'un apport très violent d'un petit BV comme c'est par exemple le cas pour la crue de la Valoïrette en juillet 2006. Les données de la figure sont acquises avec un intervalle de temps de 1h qui permet de suivre les variations très brusques des apports.

exemple: la Durance, crue de nov. 1994 (Ph. Lefort).

Le transport en suspension, très intense, n'échange pas avec le fond. les matières en suspension (MES) ne font que passer. Le « wash-load » dans la littérature anglo-saxonne.

## Les différents modes de transport (laves torrentielles, charriage, **suspension**, solution)

Barrage du Jotty (haute-Savoie, doc EDF) →

les dépôts sableux du barrage de Saint-Egrève  
↓ 28 mai 2008



Bien entendu si la concentration arrivant de l'amont est supérieure à ce que peut transporter l'écoulement, les particules ont tendance à décanter.

En haut : La retenue du barrage de l'Escale est en grande partie comblée par les dépôts limoneux vers Montmélian, vu vers l'aval. Les anciens bancs alternés sont figés par la végétation (voir plus loin...). Le banc vif au premier plan aide à la remobilisation du banc végétalisé immédiatement en aval.

En bas : à l'occasion de la crue de 2008, l'effacement du barrage de St Egrève permet d'observer les dépôts sableux consolidés qui encombrèrent la retenue en RG.

**suspension :**  
**style morphologique type : la rivière de plaine**

◆ **seuils et mouilles**

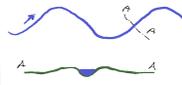
- ❖ vallée en toit

$$S_0 < 0.002$$

$$F_R < 1$$

◆ **importance de la végétation**

- ❖ stabilisation des berges
- ❖ limitation de la capacité
- ❖ embâcles



la Meuse : lit profond, symétrique  
 le transport en suspension joue un rôle  
 dans la formation et la résistance des berges

◆ **parfois le résultat d'une transformation**

- ❖ exemple: VAR (voir plus loin : « cinétiques »)



Fourques 07 12 2003  
 SPOT 4 © Cnes 2003 - Distribution Spot Image



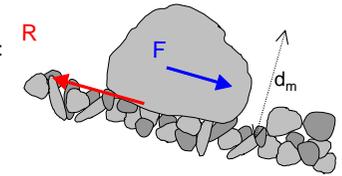
Fourques 24 12 2003

Le transport des matières les plus fines est le seul possible dans les rivières de plaine : charriage ou suspension quand les conditions sont suffisamment agitées. Le transport est beaucoup moins intense que par charriage, avec surtout peu d'interactions avec le fond. Ce type de transport est beaucoup moins morphogène (et les problèmes morphologiques beaucoup moins aigus). Vallée en toit : au moment de la crue, la rivière chargée de MES déborde. Mais les conditions de transport en suspension ne sont pas suffisantes dès le débordement et la charge sédimentaire se dépose à proximité immédiate de la berge. La rivière construite à la longue un « bourrelet de berge » plus élevé que la plaine alluviale plus en retrait. Exemple de la Marque : Les particules fines fixent les polluants et les problématiques concernent plus particulièrement des questions relative à la qualité des cours d'eau avec souvent la gestion de pollutions héritées.

**les différents modes de transport**

◆ **il existe des formules empiriques**

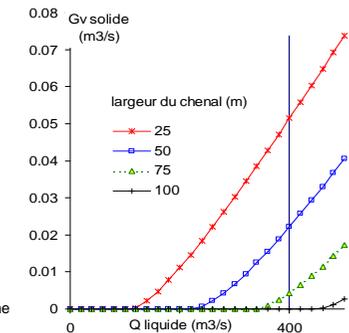
- ❖ à choisir en fonction du type de transport
- ❖ exemple charriage: Meyer-Peter et Müller (1948) : seuil de début de transport



$$G_v = 8b \sqrt{g \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) d_m^3 (\theta - \theta_c)^{3/2}}$$

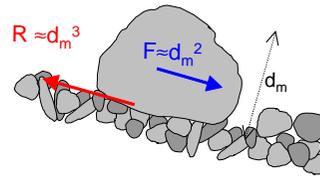
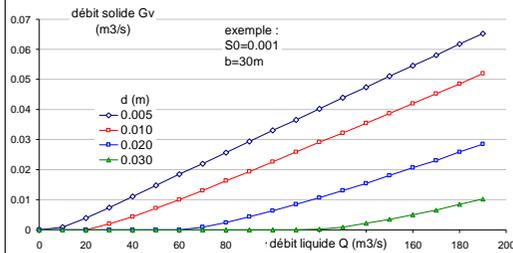
$$\theta = \frac{h S_f}{\left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) d_m}$$

exemple  
 S0= ...  
 d= ...  
 hypothèse de régime uniforme



Les ingénieurs ont établi des formules empiriques pour relier le transport solide aux conditions hydrodynamiques d'entraînement. Ces formules ont été dans la plupart des cas établies à partir d'essais de laboratoire. Leur validité est limitée aux conditions de cette expérimentation. Certaines d'entre elles ont été progressivement adoptées et « apprivoisées » pour les conditions de terrain où elles donnent des évaluations du débit solide. Il faut cependant considérer: la diversité des conditions (pente, taille des matériaux, type de transport) qui a demandé la mise au point de multiples formules ; chacune est adaptée à une gamme particulière. le paramétrage (pourquoi 8 dans la formule ci-dessus ?) la complexité des conditions naturelles. La formule de MPM est une des plus populaires. Elle traduit le seuil de début de transport qui un phénomène fondamental du transport par charriage : le transport n'a lieu que si la contrainte est suffisante. La figure en bas à droite combine la formule MPM et la relation d'écoulement uniforme pour faire une hypothèse sur les conditions de transport. Le débit solide n'apparaît qu'à partir d'une valeur critique du débit liquide. Ce débit critique est d'autant plus élevé que la largeur du chenal est grande.

### capacité de transport, granulométrie et pente



#### ♦ tri granulométrique

- ❖ pour le même débit, le transport des matériaux fins reste possible quand la pente décroît
- ❖ dans des conditions données, le transport n'est possible que si  $d < d_c$



la Durance au barrage de l'Escal (Château-Arnoux)

Toujours avec les mêmes formules/hypothèses (MPM + écoulement uniforme), on trace la relation débit solide/débit liquide pour différentes tailles de galets : les plus petits sont transportés plus facilement que les plus grossiers. A l'arrivée dans un barrage (où la capacité de transport diminue progressivement du fait de l'approfondissement, attention ce n'est pas du régime uniforme), les matériaux transportés par la rivière en amont se déposent de manière progressive : les gros dès l'entrée de la retenue, puis les moyens... Les sédiments très fins en suspension finissent par décanter dans les endroits de la retenue où les conditions d'entraînement sont très faibles. La photo montre la sédimentation de fines dans un barrage de la Durance qui a fortement réduit le volume de la retenue.

### capacité de transport : pavages

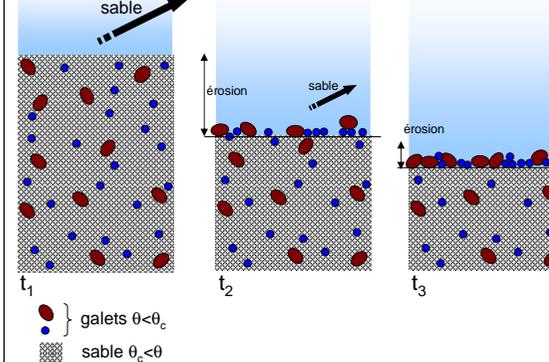
#### ♦ pavage dynamique

- ❖ aux débits intermédiaires, les fins sont mieux transportés
- ❖ la granulométrie en surface est généralement + grossière que la granulométrie transportée et que la granulométrie du lit



banc pavé de l'Allier, doc. G.Degoutte

#### ♦ pavage statique



l'Isère à Brignoud

A observer sur un banc de galets dans le lit d'une rivière. La photo du milieu montre le fond du lit de l'Isère en étiage. On remarque le tuilage des galets qui ont adopté une disposition qui offre le maximum de résistance. Ce tuilage se retrouve dans les poudingues des lits fossiles.

## capacité de transport : pavages



Exemple : le lit fossile du Drac au pont de Ponsonnas.

Exemple : le lit fossile du Drac au pont de Ponsonnas.

## tri granulométrique dans la section

- ◆ la variabilité granulométrique (et morphologique) dans le lit est une conséquence de la variabilité (temps et espace) des conditions de transport



↑ lit 'fossile' de la Claduègne

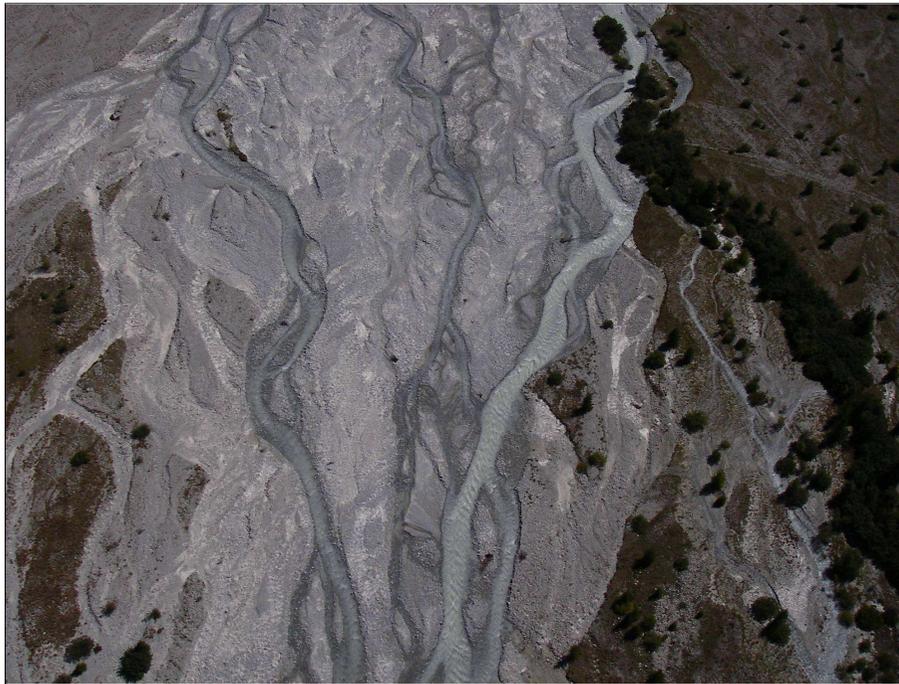
le Drac à Chabottes →



Diversité des tailles, diversité des conditions d'écoulement dans la section, diversité des conditions de débit : c'est pour cette raison que les rivières sont belles !

On voit aussi sur cette photo la compétition entre le transport/la mobilité des sédiments et la végétation qui protège du transport mais qui ne peut se fixer que si les conditions sont suffisamment « tranquilles » pendant quelques années.

La petite photo à gauche est une « coupe » faite par la Claduègne (BV de l'Ardèche) dans une terrasse alluviale. Celle-ci témoigne de la divagation de la rivière au cours des siècles avec des alternances de galets (lit actif) et de sédiments fins (limons déposés par les crues dans le lit majeur).



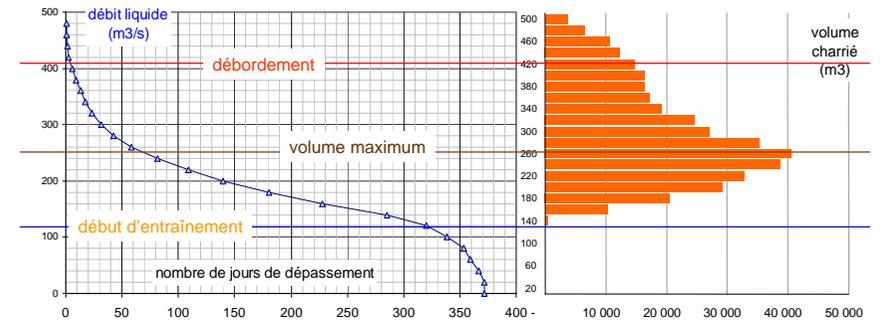
Le Pré de Madame Carle (Torrent de Saint-Pierre à Vallouise)

## variabilité annuelle du transport solide

### ◆ Suspension

- ◆ dépend des conditions de production sur le BV
- ◆ reprise de matériaux stockés dans le lit

### ◆ Charriage



*existe-t-il un débit morphogène ?*

Les flux solides varient dans l'année.

Les flux en suspension dépendent surtout des conditions de production. Voir la figure sur la diapo n°10.

Les flux par charriage les plus importants sont l'effet des crues moyennes : les basses et moyennes eaux, fréquentes, ne transportent rien. Les grandes crues transportent beaucoup mais elles sont rares.

Les ingénieurs ont longtemps utilisé cette notion (un peu simpliste) de débit le « plus efficace » pour calculer les impacts des aménagements.

A partir de la courbe des débits classés et de la relation débit solide / débit liquide, on peut calculer un flux sédimentaire annuel total et faire des bilans sédimentaires indispensables à tout diagnostic.

### variabilité (pluri-) annuelle du transport solide



au pont du Gard (sept.2002) (doc. Cl.Burtin, <http://www.inondations-gard.com>)

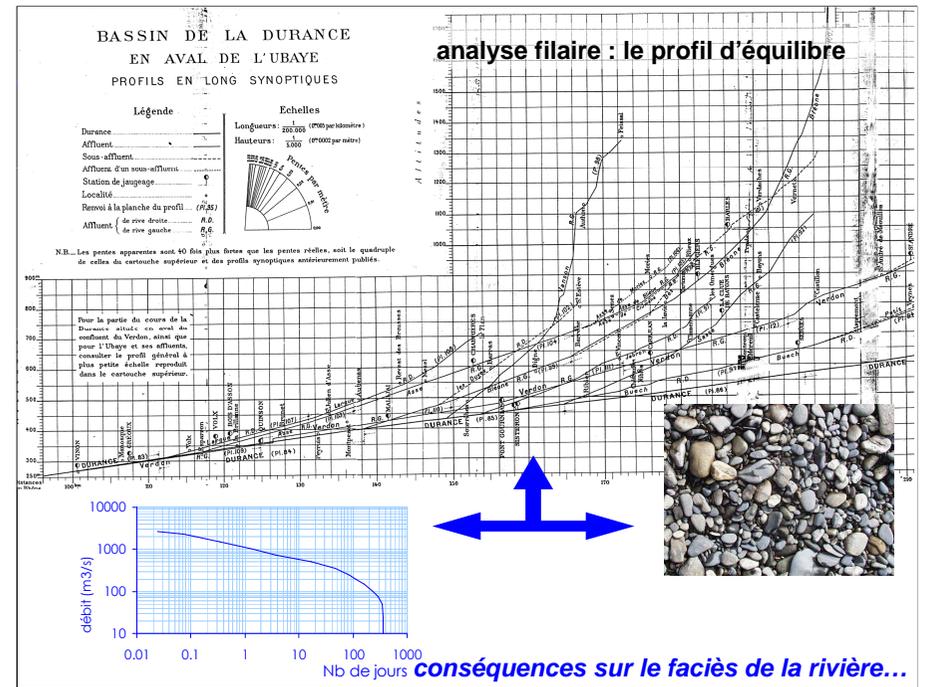
- ◆ les extrêmes bouleversent
- ◆ les petites crues façonnent



avril 2011

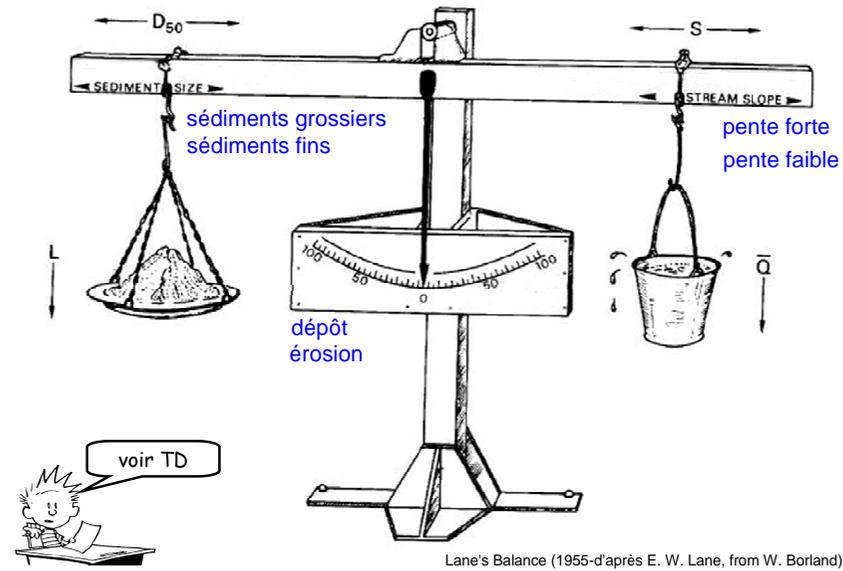
La notion de débit morphogène est pratique mais évidemment simpliste. Par exemple une très grosse crue peut remettre en jeu une partie du stock sédimentaire de la rivière dont le lit va transporter bien plus pendant les années suivantes. Ce lit va ensuite lentement se cicatriser jusqu'à la crue suivante.

La crue annuelle va aussi progressivement nettoyer les apports solides apportés de manière très brutale par les torrents affluents.

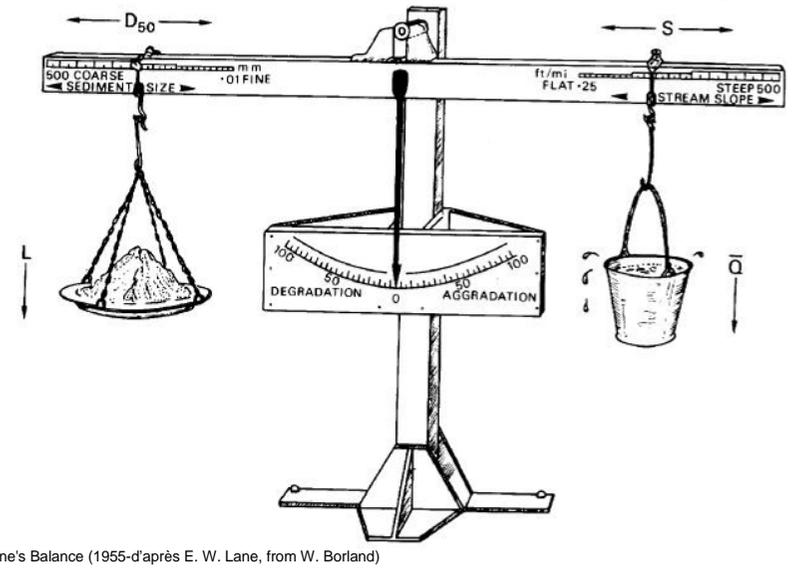


La décroissance de la pente provoque un dépôt progressif des sédiments les plus grossiers. Ce dépôt et l'abrasion sont responsables du tri longitudinal (mais il est parfois difficile de distinguer la contribution respective de chacun des phénomènes). Les apports de sédiments fins (en suspension généralement) transitent facilement vers l'aval. Compte tenu de la décroissance et du dépôt progressif des sédiments grossiers, ces sédiments fins prennent une grande importance et modifient progressivement le faciès de la rivière.

### le profil d'équilibre / la continuité et sa rupture



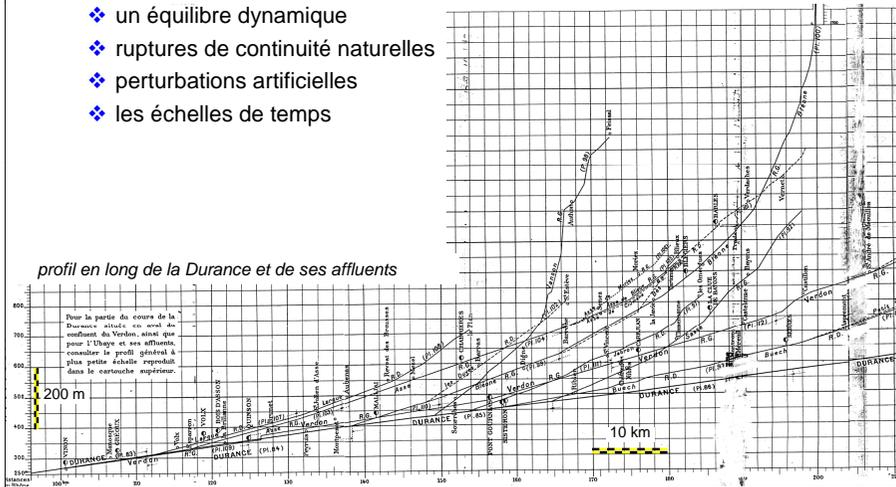
### le profil d'équilibre / la continuité et sa rupture



## la continuité sédimentaire et sa rupture

### ◆ qu'est-ce que "l'équilibre morphologique" du lit d'une rivière?

- ❖ une règle
- ❖ un équilibre dynamique
- ❖ ruptures de continuité naturelles
- ❖ perturbations artificielles
- ❖ les échelles de temps



La « règle » implique et traduit une continuité sédimentaire de l'amont vers l'aval  
 Les effets de l'abrasion s'ajoutent mais sont difficiles à distinguer

remarque méthodologique

talweg ou ligne d'eau ?

les profils des « Forces hydrauliques » constituent un témoin de l'état des rivières avant les « grandes perturbations » du XXème siècle.

Attention, on réfléchit ici sur des échelles de temps historiques. Mais les phénomènes se télescopent avec des mécanismes à l'échelle de temps géologique. Remarquer par exemple des points durs sur certains profils.

## la continuité et sa rupture

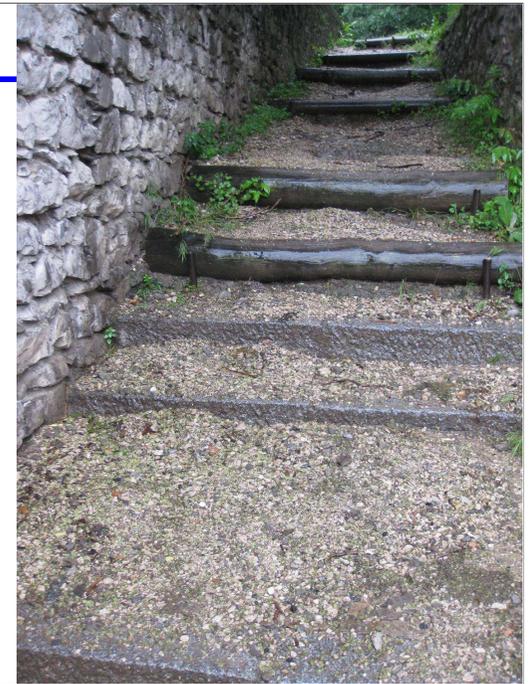
**La règle: « la rivière tend vers une pente qui assure le transport vers l'aval des matériaux solides provenant de l'amont »**

### ◆ dépôt

- ❖ la capacité de transport est localement plus faible que le flux amont

$$\frac{dG}{dx} < 0 \quad \begin{array}{l} \text{dépôt progressif} \\ \text{dépôt régressif} \end{array}$$

- la pente augmente
- la capacité de transport augmente localement



## la continuité et sa rupture

**La règle: « la rivière tend vers une pente qui assure le transport vers l'aval des matériaux solides provenant de l'amont »**

### ◆ dépôt

- ❖ la capacité de transport est localement plus faible que le flux amont

$$\frac{dG}{dx} < 0$$

dépôt progressif  
dépôt régressif

- la pente augmente
- la capacité de transport augmente localement



micro centrale sur le Var à Colomars

### ◆ érosion

- ❖ la capacité de transport est localement plus forte que le flux venant de l'amont
- le fond et les berges fournissent les matériaux

$$\frac{dG}{dx} > 0$$

érosion progressive  
érosion régressive

- la pente diminue
- la capacité de transport diminue



Sur la photo, un des seuils construits sur le Var (voir plus loin). Le retour d'un certain flux solide a entraîné une augmentation des pentes/ la remontée du fond en aval du seuil. Le dénivelé n'est plus que de quelques décimètres. La micro-centrale (le bâtiment au fond) qui avait été construite pour exploiter une chute de plusieurs mètres est maintenant inutile.

## la continuité et sa rupture

◆ Une rupture de continuité s'accompagne de phénomènes d'érosion/dépôt

- ❖ du fond
- ❖ des berges

◆ les paramètres d'ajustement

- ❖ pente
- ❖ largeur
- ❖ sinuosité



le Buech en amont de la Méouge (mars 2001)  
après deux crues hivernales



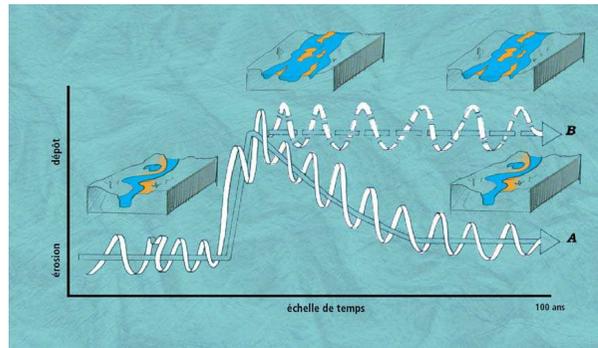
Une rupture de continuité sédimentaire s'accompagne de phénomènes d'érosion/dépôt. Le flux solide provenant de l'amont, s'il n'est pas transporté vers l'aval, se déposera dans le lit. Inversement, une augmentation de la capacité de transport vers l'aval se fera au détriment de lit (et des berges) de la rivière.

## la continuité et sa rupture

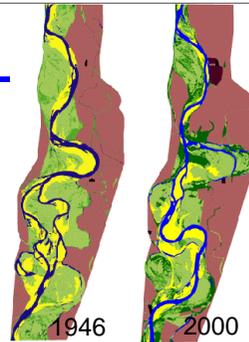
### ◆ mobilité n'implique pas déséquilibre !

### ◆ 2 phénomènes distincts

- ❖ 1. la respiration : variabilité des apports solides, variabilité hydrologique



différents rythmes / basculement temporaire ou durable (Malavoi 2010, d'après Sear, 1996)



exemple : divagations du lit de l'Allier à Châtel-de-Neuvre (doc. J.L.Peiry, St.Petit, UBP Clermont-Fd.)

- ❖ 2. l'évolution à long terme : altération du profil, changement de style

La capacité de transport varie dans le temps, comme le débit de la rivière. Les apports solides (qui proviennent des versants et des affluents) ne sont pas continus non plus.

On observera donc deux phénomènes qui se complètent :

une variabilité à court et moyen terme qui répond à la variabilité de la capacité de transport et à la discontinuité des apports solides. Cette variabilité se traduit par une 'respiration' du lit.

une tendance à plus long terme qui forme le profil général du cours d'eau. Ce profil est le bilan moyen (sur plusieurs dizaines d'années) des variations à court et moyen terme. Il traduit l'adaptation du cours d'eau aux conditions de transport solide.

Ces deux phénomènes traduisent la continuité sédimentaire et sa rupture. Nous avons déjà illustré la variabilité à court terme, nous nous attacherons essentiellement par la suite au deuxième phénomène, c'est à dire à la description des différents facteurs de discontinuité à long terme.

## la continuité et sa rupture

### ◆ Les discontinuités d'origine naturelle

1. rupture du profil en long
2. confluent
3. coupure de boucle

### ◆ Les discontinuités qui sont la conséquence d'un aménagement

- interruption du transit
- modification de la largeur du lit
- extractions profondes
- seuil en rivière
- modification du régime hydrologique

**La discontinuité sédimentaire est directement couplée avec une variabilité du trio (pente, granulométrie, écoulement)**

**« La rivière tend vers une pente qui assure le transport vers l'aval des matériaux solides provenant de l'amont »**

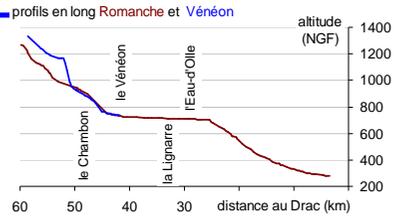
La discontinuité sédimentaire à long terme a dans certains cas des origines naturelles, elle a le plus souvent des origines artificielles liées aux activités humaines et aux aménagements.

Comme la continuité, cette discontinuité sédimentaire est directement couplée aux facteurs principaux qui déterminent le transport solide : la pente, la granulométrie des matériaux du fond, l'hydraulicité.

Par l'érosion ou l'engrèvement, la rivière va modifier sa pente pour mettre en conformité le transport solide local avec les apports liquide et solide (quantité et granulométrie) arrivant de l'amont.

### 1. rupture naturelle du profil en long

#### ◆ exemple 1 : la plaine de Bourg d'Oisans



la plaine de Bourg-d'Oisans vers l'amont

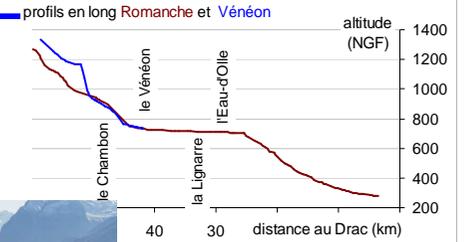


la plaine de Bourg-d'Oisans vers l'aval

Le verrou des gorges de la Romanche a permis le comblement de l'ombilic glaciaire et la formation de la plaine de Bourg-d'Oisans. La Romanche est canalisée pour profiter des riches terres déposées en particulier par le lac de Saint-Antoine au 13eme siècle.

### 1. rupture naturelle du profil en long

#### ◆ exemple 1 : la plaine de Bourg d'Oisans



la plaine de Bourg-d'Oisans vers l'amont



Vénéon: la plage des Buclets

La charge solide importante générée sur les versants est transportée par la Romanche et le Vénéon jusqu'à l'entrée de la plaine. Si l'endiguement de la Romanche permet un certain transit vers la Romanche aval, la plus grande partie de cette charge solide se dépose brutalement à l'entrée de la plaine sur la plage des Buclets.

Ce dépôt entretient donc la discontinuité du profil ; la rupture du transit est donc durable.

En l'absence d'aménagement aval, le transit seul des sédiments fins génère un autre style morphologique dans le lit.

# 1. rupture naturelle du profil en long

## ◆ exemple 2 : blocage par un affluent aval : Drac-Isère



carte de Cassini (doc : <http://gallica.bnf.fr>)

Ce type de situation peut provenir aussi du blocage provoqué par un affluent aval dont la charge sédimentaire est importante et qui provoque un "remous solide" dans la rivière principale. Celle-ci n'arrive pas à conduire les matériaux grossiers jusqu'à la confluence.

Confluence Isère-Drac

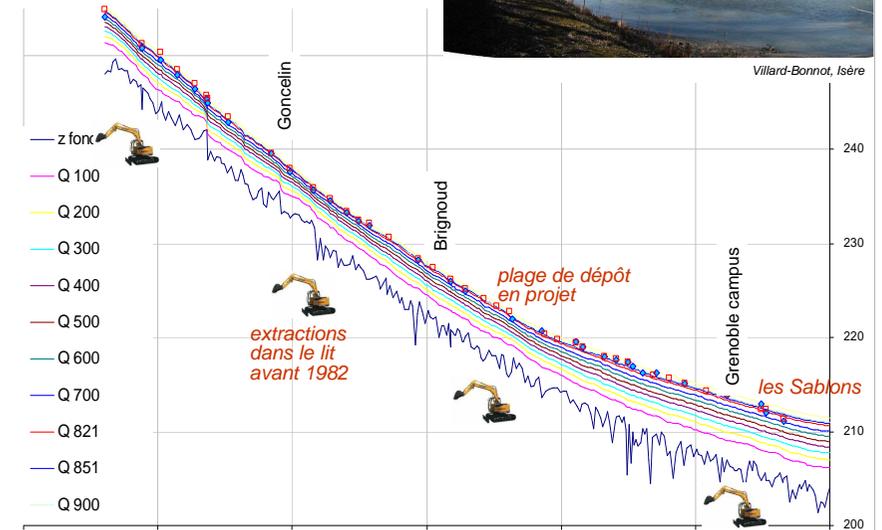
Les apports volumineux du Drac (avant perturbations) se sont déposés à la confluence. Ces dépôts diminuent la pente de l'Isère à l'amont de Grenoble : développement de méandres + dépôt des sédiments les plus fins.

# 1. rupture naturelle du profil en long

## ◆ exemple 2 ... Drac-Isère



Villard-Bonnot, Isère



Ce type de situation peut provenir aussi du blocage provoqué par un affluent aval dont la charge sédimentaire est importante et qui provoque un "remous solide" dans la rivière principale. Celle-ci n'arrive pas à conduire les matériaux grossiers jusqu'à la confluence.

Confluence Isère-Drac

Les apports volumineux du Drac (avant perturbations) se sont déposés à la confluence. Ces dépôts diminuent la pente de l'Isère à l'amont de Grenoble : développement de méandres + dépôt des sédiments les plus fins.

## 2. confluent

### ◆ exemple : Danube et Isar en Bavière



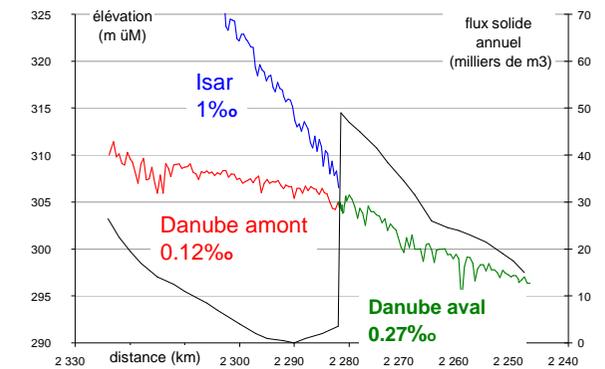
### ◆ nécessairement un point de continuité du transport

$$\int_{\text{année}} G_{\text{Danube amont}} dt + \int_{\text{année}} G_{\text{Isar}} dt = \int_{\text{année}} G_{\text{Danube aval}} dt$$

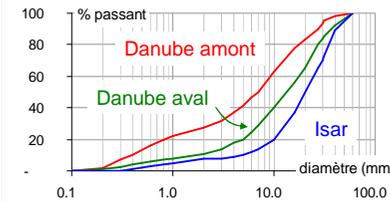
Le confluent lui-même est nécessairement un point de continuité du transport. La pente et la largeur du cours d'eau en aval du confluent s'adaptent pour répondre à l'addition des régimes liquide et solide des deux cours d'eau affluents.

## origine naturelle : Le confluent (exemple Danube et Isar)

- ◆ nécessairement un point de continuité du transport
- ◆ adaptation de la pente, de la largeur au régimes liquide et solide des affluents



le Danube et l'Isar en Bavière (données BAW)



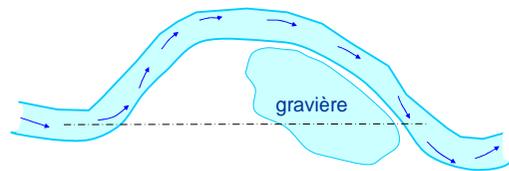
- ◆ respiration éventuellement
  - ❖ variabilité des apports

Par exemple le profil en long du Danube en Bavière est fortement perturbé par les apports solides de l'Isar qui descend des Alpes bavaroises (en moyenne 50 103m3/an). La granulométrie en aval du confluent est plus grossière qu'à l'amont et le fleuve au cours des siècles a construit une pente plus importante à l'aval du confluent pour assurer le transport des matériaux provenant de l'amont. L'équilibre n'est-il pas encore atteint ? ou bien est-il perturbé par les aménagements du Danube ? On constate sur le profil en long du flux solide annuel que le Danube, en amont et en aval de la confluence, continue à accumuler les sédiments provenant de l'amont et de l'Isar.

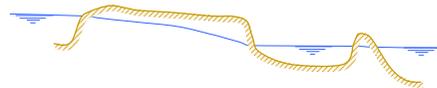
Le seul phénomène particulier que l'on pourra observer à la confluence sera parfois une respiration due à une différence de régime hydrologique des deux rivières. Par exemple ici l'Isar apporte ses sédiments au cours des crues de fonte nivale. Au printemps, ces sédiments se déposent au confluent et ne sont repris par les crues du Danube (de régime pluvial) qu'à l'automne. La formation et la disparition d'un banc de dépôt de ces sédiments modifie de façon régulière la configuration de la confluence.

discontinuités d'origine naturelle ou artificielle : **3 . coupure de boucle**

◆ **exemple 1 : mécanisme de capture d'une gravière en lit majeur**

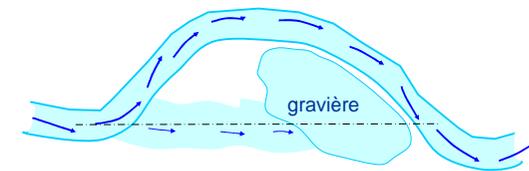


profil en long

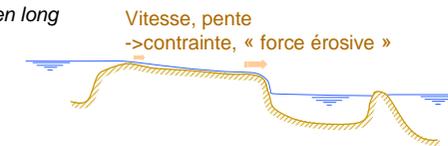


discontinuités d'origine naturelle ou artificielle : **3 . coupure de boucle**

◆ **exemple 1 : mécanisme de capture d'une gravière en lit majeur**



profil en long

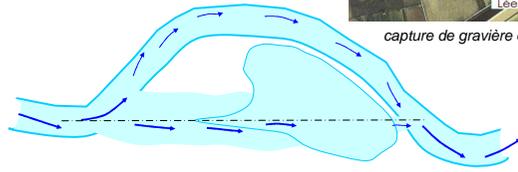


discontinuités d'origine naturelle o

◆ exemple 1 : mécanisme de c

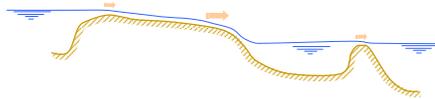


capture de gravière en lit majeur (la Durance à la Roque-d'Anthéron)



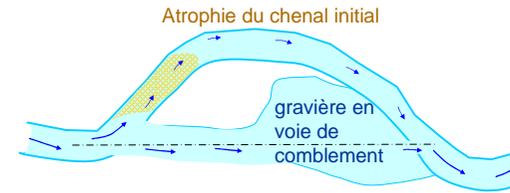
profil en long

« griffe » d'érosion



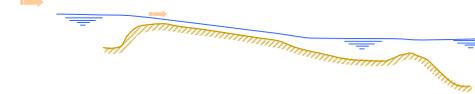
discontinuités d'origine naturelle ou artificielle : 3 . coupure de boucle

◆ exemple 1 : mécanisme de capture d'une gravière en lit majeur



profil en long

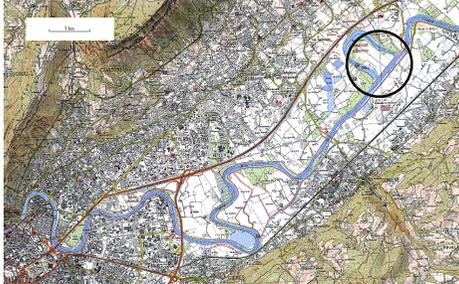
Erosion régressive à l'amont



- ◆ en amont : augmentation de la pente → érosion régressive
- ◆ dans la souille : arrêt des matériaux
- ◆ en aval : déficit → érosion progressive
- ◆ éloignement + protection

discontinuités d'origine naturelle ou artificielle : **3 . coupure de boucle**

◆ **exemple 2 : la coupure de Bois-Français (Isère)**



◆ **1949**

- ❖ autocurage d'un lit qui s'engrave : inondation, assainissement
- ❖ inconvénients : nécessité de dragage à l'aval
- ❖ opposition ville Grenoble

◆ **1964**

- ❖ fournir des matériaux
- ❖ présenté en 1968 comme un aménagement de protection



coupure de Bois-Français (août 1967)

Les méandres de l'Isère à l'amont de Grenoble ont fait l'objet de projets successifs contradictoires et intéressés. Voir le rapport de recherche RIZéRILi <[http://www.rdrisques.org/projets/rizerili/bib/intermediaire/RIZeRILi\\_LTHE.pdf/download](http://www.rdrisques.org/projets/rizerili/bib/intermediaire/RIZeRILi_LTHE.pdf/download)> La coupure de Bois-Français a provoqué localement une augmentation de la pente. Donc une érosion accrue qui se propage vers l'amont (érosion régressive) et un afflux de matériaux vers l'aval.

**la continuité et sa rupture**

◆ **Les discontinuités d'origine naturelle**

- ❖ rupture du profil en long
- ❖ confluent
- ❖ coupure de boucle

◆ **Les discontinuités qui sont la conséquence d'un aménagement**

1. interruption du transit
2. modification de la largeur du lit
3. extractions profondes
4. seuil en rivière
5. modification du régime hydrologique

***La discontinuité sédimentaire est directement couplée avec une variabilité du trio (pente, granulométrie, écoulement)***

***« La rivière tend vers une pente qui assure le transport vers l'aval des matériaux solides provenant de l'amont »***

La discontinuité sédimentaire à long terme a dans certains cas des origines naturelles, elle a le plus souvent des origines artificielles liées aux activités humaines et aux aménagements.

Comme la continuité, cette discontinuité sédimentaire est directement couplée aux facteurs principaux qui déterminent le transport solide : la pente, la granulométrie des matériaux du fond, l'hydraulicité.

Par l'érosion ou l'engrèvement, la rivière va modifier sa pente pour mettre en conformité le transport solide local avec les apports liquide et solide (quantité et granulométrie) arrivant de l'amont.

conséquence d'un aménagement : **l'interruption du transit** 1/3◆ **en amont**

- ❖ interruption du transit par charriage
- ❖ les matériaux fins arrivent jusqu'au barrage
  - envasement de la retenue : les gros à l'amont, les fins à l'aval
  - transit des fins vers les ouvrages dans le cas d'une

la Durance au barrage de l'Escale (Château-Arnoux)



Une retenue provoque en général une interruption du transit par charriage. Les matériaux fins arrivent jusqu'au barrage. La capacité du barrage de l'Escale sur la Durance est fortement réduite par ces dépôts. Dans le cas où le barrage dérive une partie du débit, la charge en suspension va pénétrer dans les ouvrages à l'aval de la dérivation (par exemple le canal d'amenée de l'usine et les turbines).

conséquence d'un aménagement : **1. interruption du transit** 2/3◆ **exemple 1 : ruisseau de Donnières**

*en amont : seuils de correction torrentielle sur le ruisseau des Fraches (Trièves)*



*en aval : le ruisseau de Donnières (Trièves) doc. Ph. Lefort*



Régulation des apports à l'amont et déficit sédimentaire à l'aval.

conséquence d'un aménagement : **1. interruption du transit** 2/3

◆ **exemple 2 : le Rhin au barrage d'Iffezheim**

- ❖ recharge artificielle 200 000 m<sup>3</sup>/an depuis 1978...

le barrage d'Iffezheim  
doc. Google Earth



Geschiebezugabe, Kontrollmessung

péniche de recharge sédimentaire  
doc. BAW

Image © 2007 AeroWest  
© 2007 Cnes/Spot Image

Un bel exemple de développement non durable. Les apports artificiels ont pour objectif de prévenir l'enfoncement excessif du lit à l'aval du dernier barrage sur le Rhin. La recharge artificielle évite les dysfonctionnement de l'écluse.

conséquence d'un aménagement : **l'interruption du transit** 3/4

◆ **en cas de destruction de la couche alluviale**

découvrement du substratum

exemple 1 : l'Ebron à Treminis :

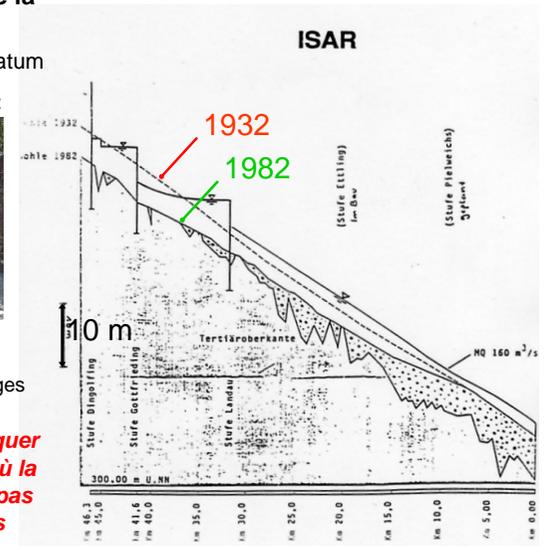


doc. Ph. Lefort

exemple 2 : l'Isar en Bavière :

interruption du transit par ouvrages en amont

**suspecter et expliquer toute situation où la rivière ne coule pas sur ses alluvions**



Parfois la couverture alluviale est très mince. Sa destruction peut découvrir un substratum différent. Bien plus tendre dans ces exemple, mais aussi dans d'autres cas bien plus solide (bedrock).

... aménagement : **la modification de la largeur du lit**

◆ **généralement : érosion ou un exhaussement**

- ❖ retour vers un équilibre

*altération temporaire du débit solide des sédiments grossiers*

- ❖ impacts sur la nappe : exemple Strasbourg
- ❖ même pente dans une rivière torrentielle
- ❖ **pas de rupture du transit à long terme**

le Var en amont de Puget-Théniers



La modification artificielle de la largeur du lit entraîne généralement une discontinuité du transport des matériaux grossiers, et donc l'apparition d'érosion (rétrécissement) ou de dépôts (élargissement). Le rétablissement de l'équilibre (continuité du transit) nécessite généralement une variation de la pente. Celle-ci peut être réelle si le tronçon perturbé est long : basculement du profil, méandrage. Si le rétrécissement (resp. l'élargissement) est limité en longueur, l'abaissement de la pente (motrice) se traduit par une variation locale de la cote du fond. (exemple : les voies sur berges et leur conséquence sur la stabilité des piles de pont).

Pour les rivières torrentielles cependant, la pente restera constante si la modification permet encore une adaptation de la rivière dans son nouveau confinement (comme pour le Var entre Entrevaux et Puget-Théniers).

La continuité solide n'est donc pas durablement altérée par ce type d'aménagement. Des exceptions importantes sont cependant à noter :

l'aménagement modifie notablement le débit de début d'entraînement ;

l'aménagement modifie les conditions de débordement (et donc perturbe localement le régime hydrologique du lit actif).

Le rétablissement des conditions d'équilibre entraîne alors une altération du débit solide des sédiments grossiers.

L'espace de liberté:

La rivière est-elle capable de l'occuper ?

conséquence d'un aménagement : **les extractions profondes**

*rupture de transit équivalente à celle d'une retenue (barrage)*

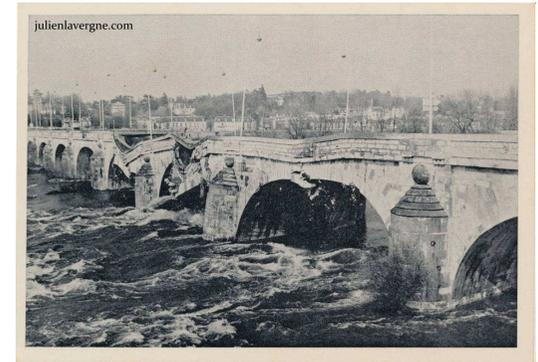
◆ **en amont : augmentation de la pente**

- ❖ érosion régressive
- ❖ éventuellement mise à nu du substratum
- ❖ impact sur la nappe. exemple Var

◆ **dans la souille : arrêt des sédiments**

◆ **en aval : déficit**

- ❖ transformation du style morphologique
- ❖ érosion progressive



Le pont Wilson à Tours (1978)

Les extractions profondes provoquent une rupture comparable à celles de la retenue à son aval. En amont de la zone où sont réalisées ces extractions, on remarquera une augmentation de la pente et donc le déclenchement d'un processus d'érosion régressive : le transit sédimentaire croît ; mais ces matériaux seront arrêtés peu après dans la souille d'extraction.

conséquence d'un aménagement : **les extractions profondes**

◆ Le pont de Mollettes sur l'Isère



1873 - doc. gallica.bnf.fr / ENPC



env. 1980 - doc. B. Lefevre

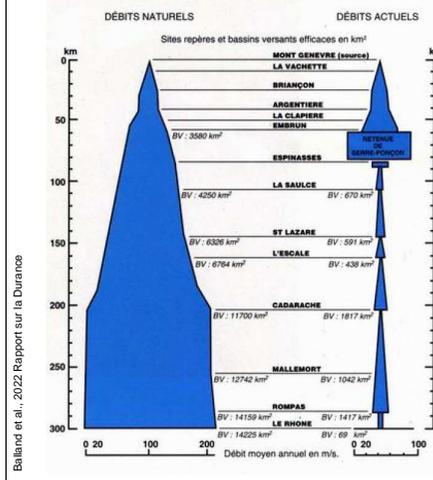
[http://rdb.eaurmc.fr/sdage/documents/A12\\_2.pdf](http://rdb.eaurmc.fr/sdage/documents/A12_2.pdf)



... aménagement : **La modification du régime hydrologique**

◆ la Durance à Mallemort

**LA DURANCE D'HIER ET D'AUJOURD'HUI**  
LE DÉBIT MOYEN ANNUEL DE LA SOURCE AU CONFLUENT



Baillet et al., 2022 Rapport sur la Durance



1958 (doc. étude interagences 65)



la Brillanne (doc. smavd)

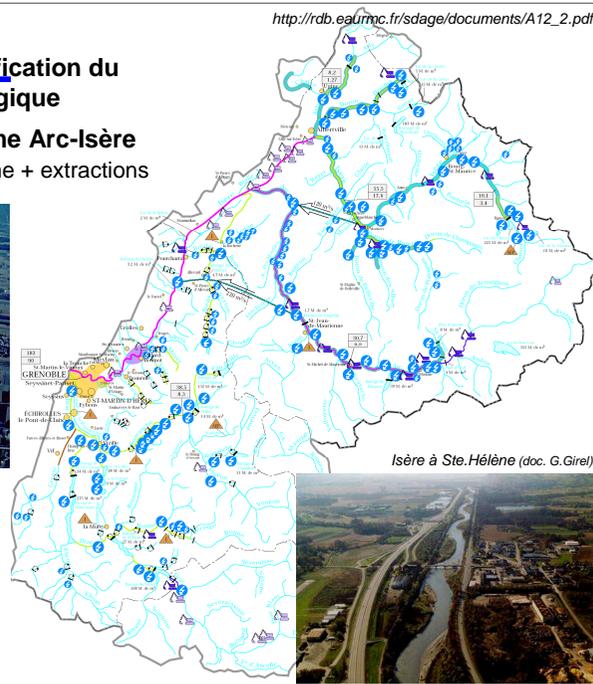
La modification du régime hydrologique, par des ouvrages en amont qui régulent les crues ou par des ouvrages de dérivation/restitution, ne modifie pas le flux solide, bien que le transit puisse être altéré par les ouvrages eux-mêmes. Les conséquences seront donc celles qui résultent de l'établissement d'une nouvelle condition d'équilibre. La rivière à l'aval du point perturbé va adapter sa géométrie pour retrouver une capacité de transport compatible avec le nouveau régime hydrologique, c'est à dire avec un bilan sédimentaire nul à l'échelle de l'année. Bien entendu, comme pour toutes les autres perturbations, les dépôts ou emprunts de matériaux se feront par incision ou élévation du fond moyen mais aussi éventuellement au détriment des berges. Il en résultera en conséquence une altération de la continuité du flux sédimentaire pendant plusieurs années ou dizaines d'années éventuellement

### ... aménagement : modification du régime hydrologique

#### ◆ exemple 2 : le système Arc-Isère modification du régime + extractions



Rhin supérieur (doc. Martin Jaeggi)



Isère à Ste.Héléne (doc. G.Girel)

Comparer les bancs alternés sur ces deux rivières aux caractéristiques identiques au départ.

### la continuité sédimentaire et sa rupture : enlèvement des bancs

#### ◆ déficit en matériaux grossiers

- ❖ incision du lit
- ❖ peu de renouvellement des matériaux
- ❖ bancs perchés

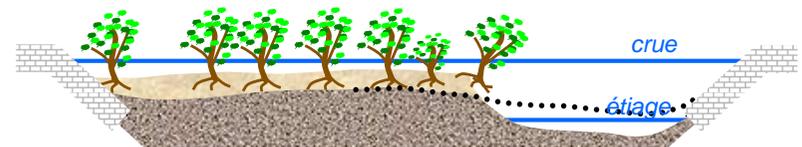
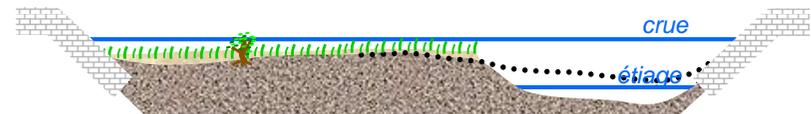
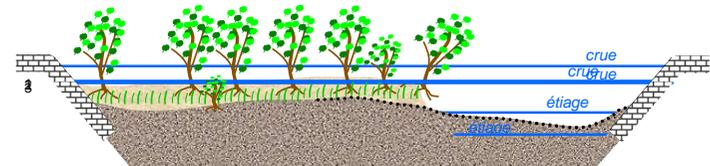
1 état non perturbé  
grande capacité en crue

#### ◆ apport continu de fins

- ❖ peignage par la végétation

2 incision du lit  
végétalisation des bancs

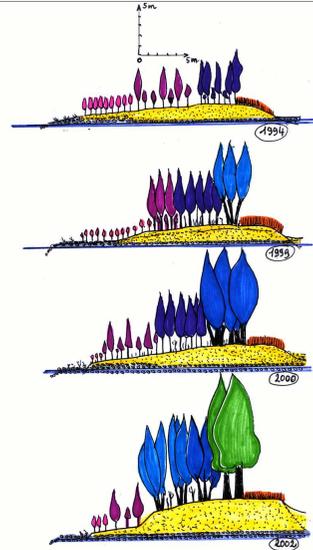
3 enlèvement progressif  
capacité réduite en crue  
concentration de l'écoulement



### la continuité sédimentaire et sa rupture

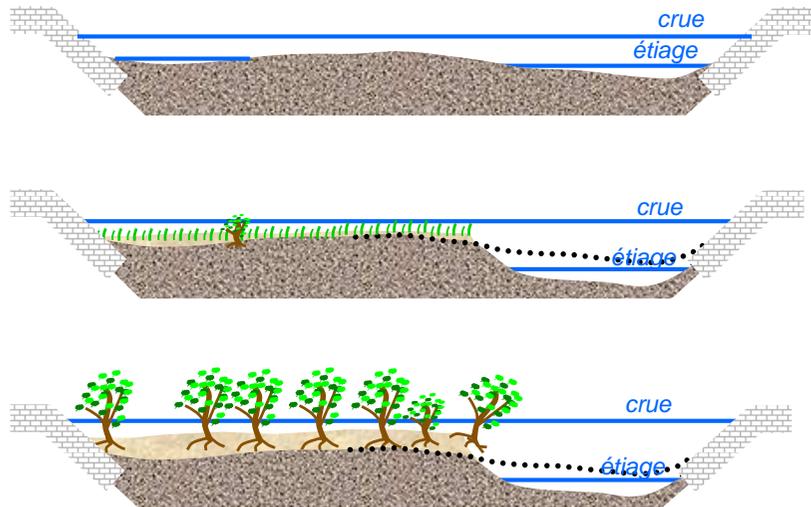
- ◆ déficit en matériaux grossiers
  - ❖ incision du lit
  - ❖ peu de renouvellement des matériaux
  - ❖ bancs perchés
- ◆ apport continu de fins
  - ❖ peignage par la végétation

île de Brignoud, Isère, mars 1999



évolution de la végétation sur l'île de Brignoud, Isère, doc. J. Girlet

ÎLE de BRIGNOUD (Isère)  
Sédimentation and plant succession 1994-2002  
(Transect # 7, point + 50 m.)



### la continuité sédimentaire et sa rupture : enlèvement des bancs



île de Brignoud, Isère, 22/03/01



île de Brignoud, Isère, 24/03/01

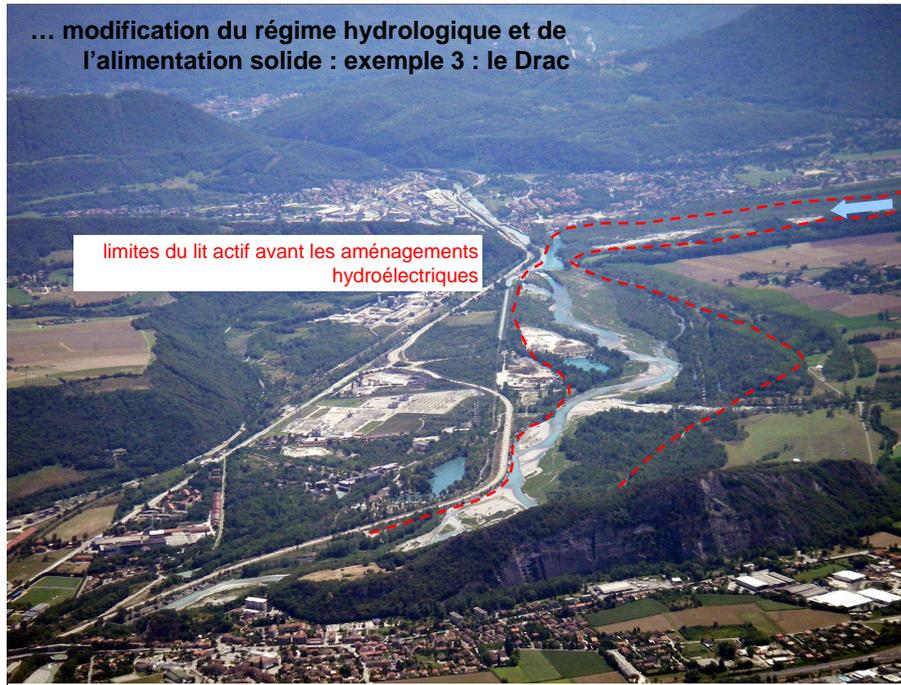
Les phénomènes observés sur de nombreux cours d'eau où le transit sédimentaire de la charge de fond a été fortement diminué est le suivant :  
 enfoncement (« incision ») du lit actif,  
 moindre submersion et remaniement du matériau des bancs,  
 végétalisation de ces bancs,  
 peignage de la charge en suspension lors des crues importantes.

La discontinuité sédimentaire de la charge de fond provoque donc à terme une certaine discontinuité des sédiments fins en suspension.

La photo montre les dépôts de limons sur l'île de Brignoud dans le Grésivaudan au cours de la crue du 22 mars 2001. Ces dépôts qui peuvent atteindre 1m d'épaisseur par endroit seront rapidement fixés par la végétation arbustive.

Les enjeux liés à ce processus sont la diminution de la capacité d'écoulement en crue et dans une certaine mesure l'aggravation des risques d'embâcles.

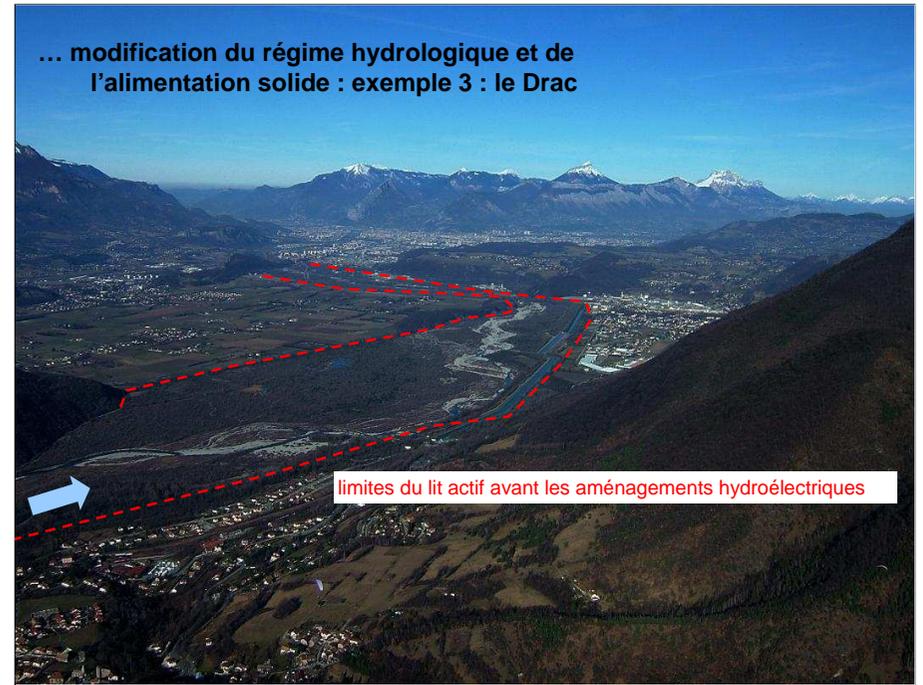
... modification du régime hydrologique et de l'alimentation solide : exemple 3 : le Drac



limites du lit actif avant les aménagements hydroélectriques

Le lit du Drac s'est atrophie à l'aval des ouvrages hydroélectriques : (1) plus de crues moyennes, voir le cours sur les régimes hydrologiques, (2) déficit sédimentaire : plus d'apports solides et extractions massives. Que se passera-t-il à l'occasion d'une crue très importante qui fera fonctionner les déversoirs de crue des ouvrages ?

... modification du régime hydrologique et de l'alimentation solide : exemple 3 : le Drac



limites du lit actif avant les aménagements hydroélectriques

Le lit du Drac s'est atrophie à l'aval des ouvrages hydroélectriques : (1) plus de crues moyennes, voir le cours sur les régimes hydrologiques, (2) déficit sédimentaire : plus d'apports solides et extractions massives. Que se passera-t-il à l'occasion d'une crue très importante qui fera fonctionner les déversoirs de crue des ouvrages ?

## à propos de la végétation

### ◆ Un facteur de risque

- ❖ réduction de la section et de la capacité → hausse du niveau en crue
- ❖ célérité de propagation des crues ?
- ❖ risque d'embâcles

### ◆ Un paramètre du fonctionnement de la rivière

- ❖ la rivière n'est pas qu'un tuyau pour évacuer les ruissellements ou une machine à fabriquer de l'énergie
- ❖ hydrologie, mécanique des fluides, biologiste, sociologues...
- ❖ il ne suffit pas d'être hydrologue, ingénieur, mécanicien, ...

Embâcle au pont de la Treille sur le Gers à Auch (crue de 1977) photo DDE



source : [http://www.aquadoc.fr/article.php3?id\\_article=292](http://www.aquadoc.fr/article.php3?id_article=292)

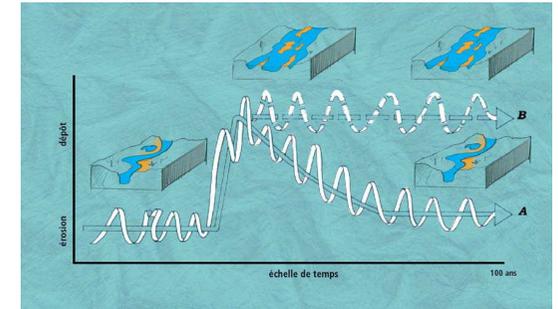
## à quel rythme ?

### ◆ dépend du flux solide

court terme	10 ans	2 à 3 ans de forte hydraulité
moyen terme	30 à 50 ans	échelle de temps d'une politique globale
long terme	100 ans et plus	

### ◆ exemples:

- ❖ Isère : 50 cm de hausse des lignes d'eau de crue entre 1995 et 2000
- ❖ Drac : évolution accélérée à partir de 1960
- ❖ Var : établissement d'un nouvel équilibre irréversible ?



Il est indispensable de faire un bilan des apports avant tout aménagement. Il faut évaluer les impacts sur ce bilan sur plusieurs années (et donc suffisamment de crues morphogènes). Prendre en compte aussi les crues exceptionnelles qui remettent en fonctionnement du stock « gelé » (exemples Gard, Vozz) et les risques d'une succession d'années « sèches » qui permettront au contraire le développement d'une végétation protectrice (exemple Loire).

Philippe Belleudy – 11-2012

**le Var**

des apports sédimentaires puissants

◆ 1967 : exploitation « forcenée » :

→ lit unique





doc. Nice-Matin

Exemple pour illustrer les réactions de la rivière et ses échelles de temps. La croix jaune pointe le même lieu.

Philippe Belleudy – 11-2012

**le Var**

des apports sédimentaires puissants

◆ 1967 : exploitation « forcenée » :

→ lit unique

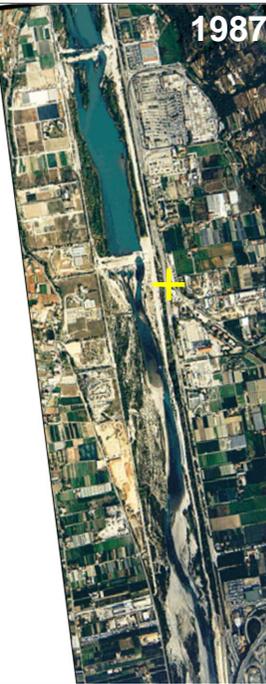
◆ 1970 : cascade de seuils de protection

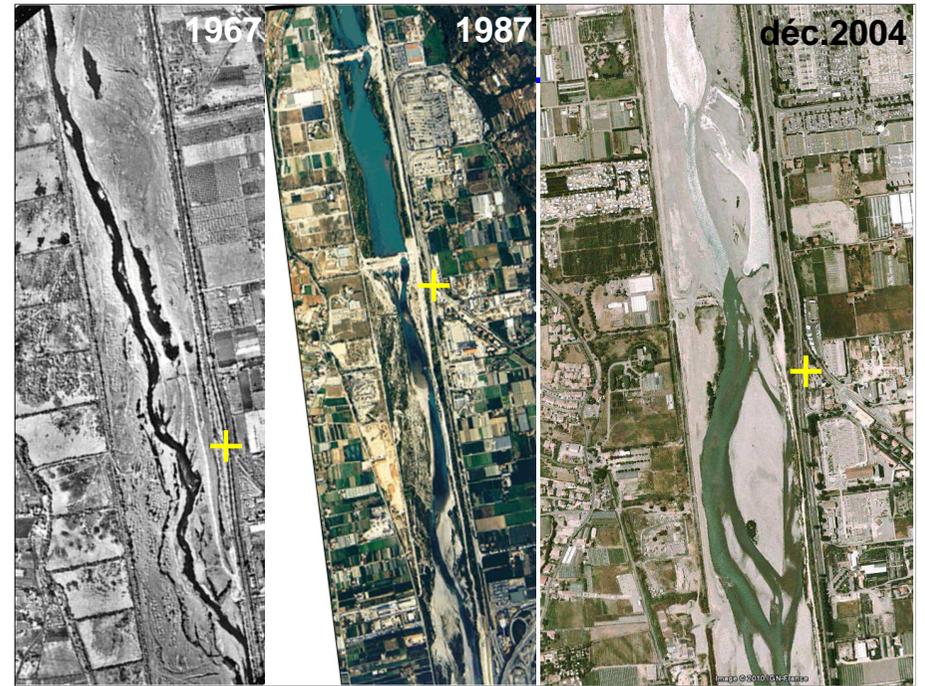
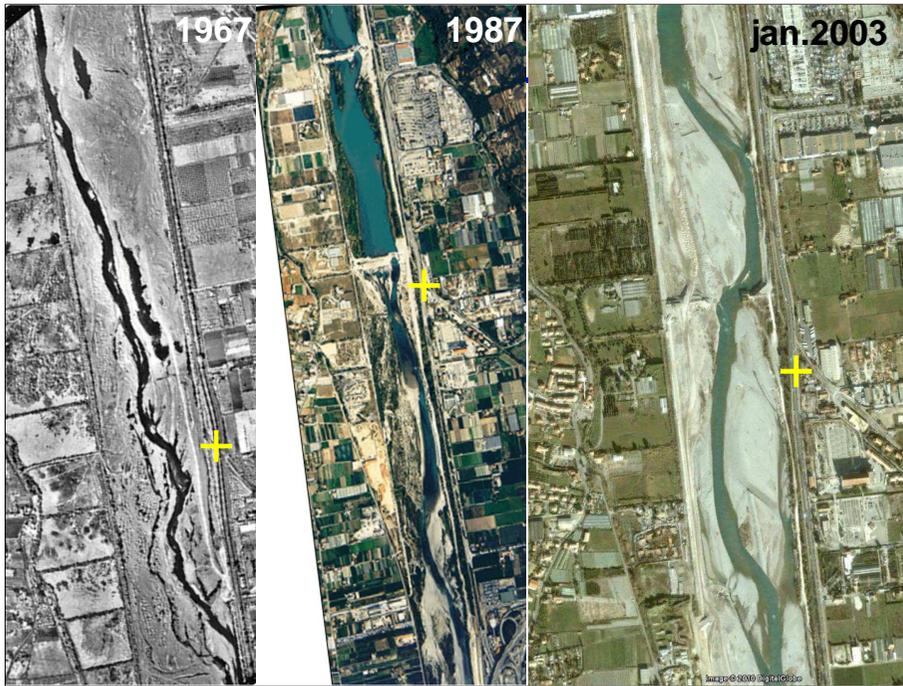
→ une rivière « de plaine »

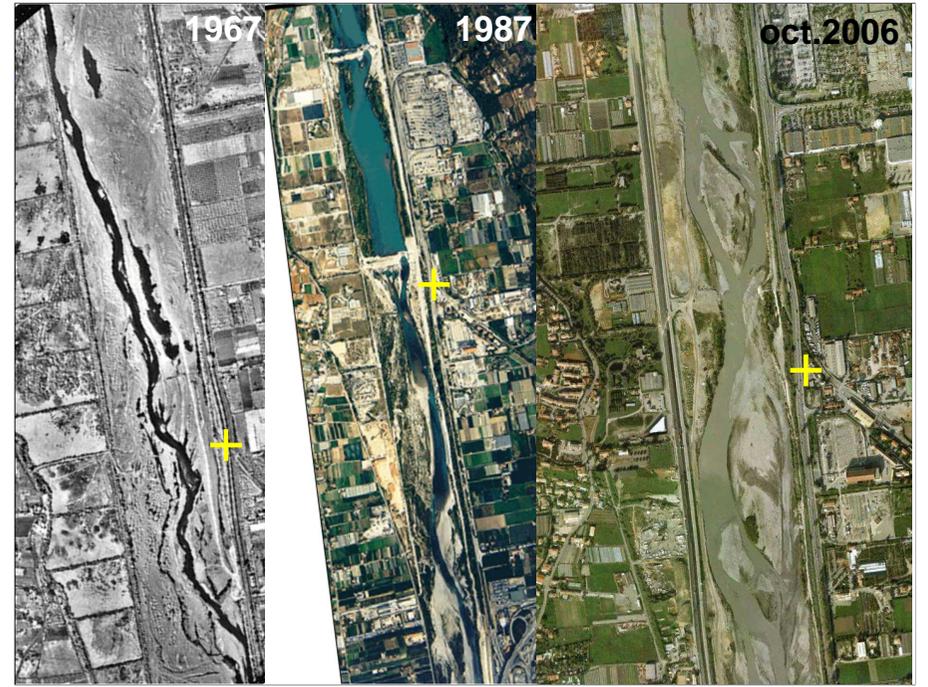
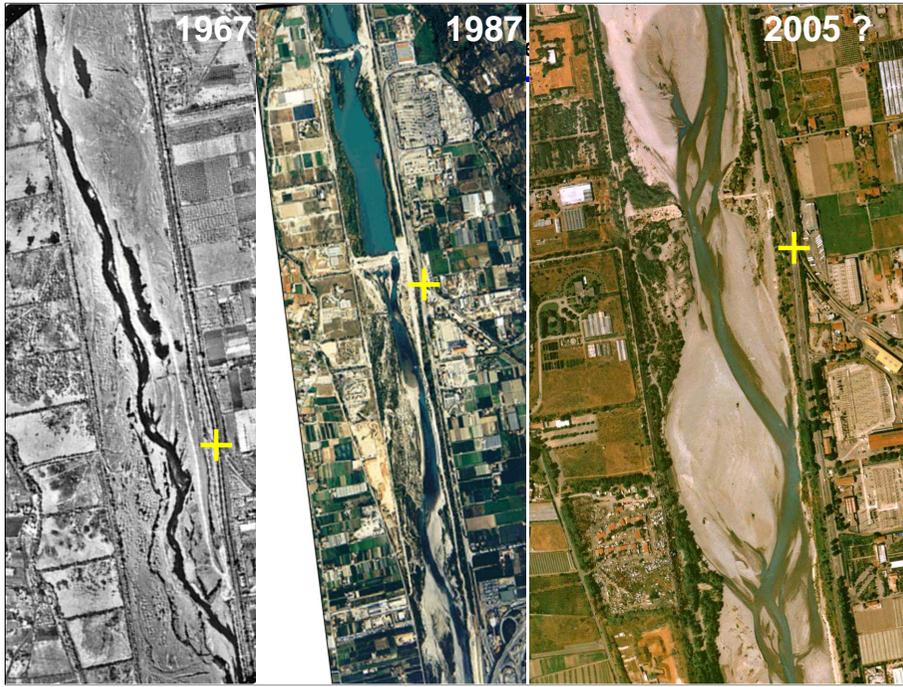
◆ 1995 : crue centennale

→ destruction des seuils aval

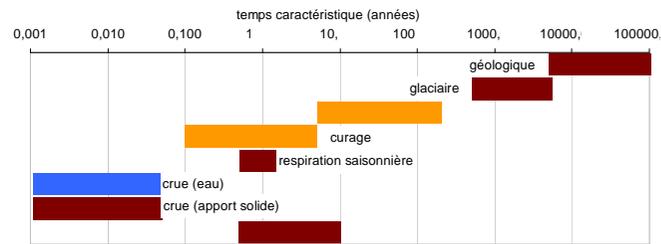
→ retour vers un lit tressé





## La perception des phénomènes



### ◆ urgence et rapidité de l'onde de crue

- ❖ perception aiguë
- ❖ forte mobilisation
- ❖ décisions et réglementation en conséquence
  - ➔ règle du zéro impact
  - ➔ relation amont-aval relativement nouvelle

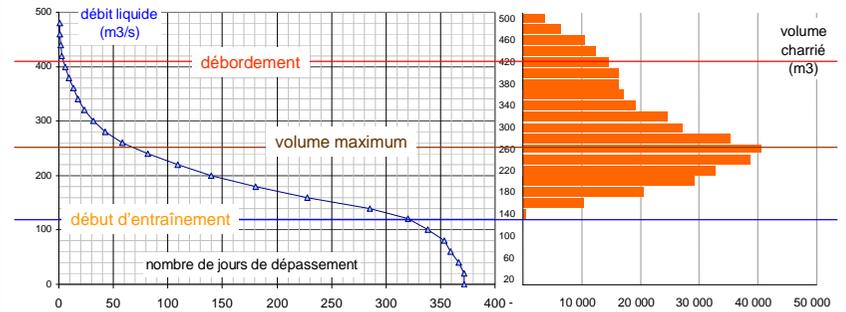
### ◆ faible perception du phénomène sédimentaire

- ❖ un obstacle pour la propagation de la crue
  - ➔ végétation
  - ➔ atterrissements (réduction de la section) ➔ **actions qui règlent le court-terme**
- ❖ torrents, rivières torrentielles, plaine
  - ➔ **en contradiction parfois avec le but recherché**
- ❖ perception locale
  - ➔ **relation amont-aval souvent négligée**
  - ➔ **rupture de continuité**

Les rythmes d'évolution des lits fluviaux sont très rapides (comparés aux échelles de temps géologiques), mais bien plus lents que les crues elles mêmes ou que les temps caractéristiques des décisions politiques. Ce qui entraîne souvent des décisions et des aménagements néfastes à l'échelle de plusieurs décennies. Néfaste aussi pour la protection contre le risque inondation.

## les outils : 1. bilan sédimentaire

### ◆ évaluation du transit annuel dans une section



Dans une section donnée, ce calcul doit éventuellement considérer de façon distincte les différentes parties du lit.

Régime uniforme ou remous ?

## les outils : 2. modèle analogique

### ◆ des lois de similitude complexes

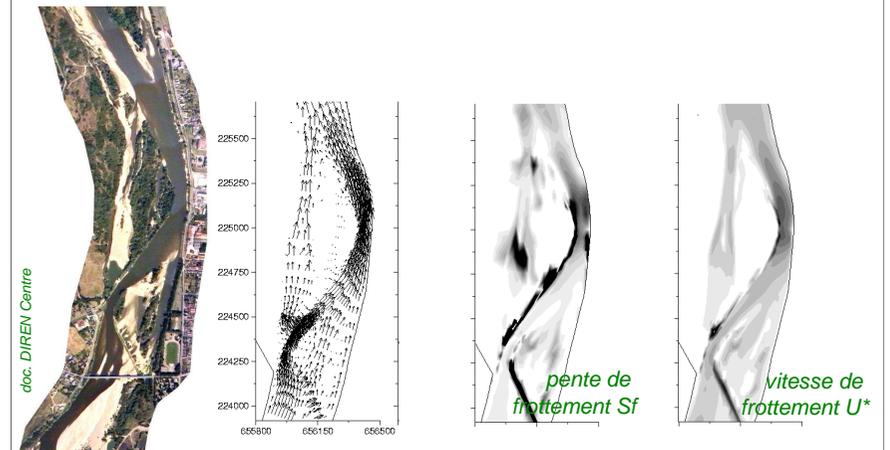
- ❖ imposent en particulier un matériau moins dense



aménagement du torrent du Tour aux Posettes

## les outils : 2. modèle numérique d'écoulement

### ◆ exemple : écoulement permanent + expertise

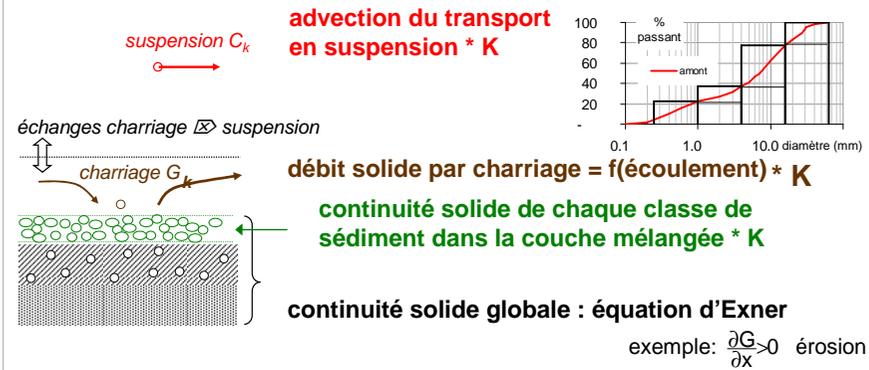


Givry,  $Q=1920 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , calculs avec TELEMAC-2D

les outils : 3. modèle numérique déterministe

- ◆ un assemblage plus ou moins cohérent de modèles élémentaires
- ◆ une schématisation nécessaire
- ◆ valider et caler ?

écoulement unidimensionnel : 2 équations BSV



les outils : 3. modèle numérique déterministe

- ◆ un assemblage plus ou moins cohérent de modèles élémentaires
- ◆ une schématisation nécessaire
- ◆ valider et caler ?
- ◆ exemple 1 : navigation sur le Danube

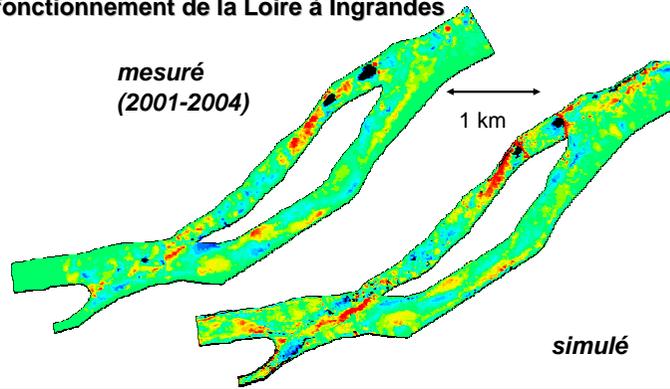


les outils : 3. modèle numérique déterministe



◆ exemple 2 : fonctionnement de la Loire à Ingrandes

évolution (m)



les outils : 4. mesurer !

compréhension des processus  
calage des modèles

- ◆ flux : charriage, suspension
- ◆ granulométrie
- ◆ déplacements

