Centre d'Ingénierie hydraulique

ÉCHANTILLONNAGE ET MESURES GRANULOMÉTRIQUES DES SÉDIMENTS GROSSIERS : OBJECTIFS, MÉTHODES ET CONTRAINTES

Aurélie ANDRE, Jean-René MALAVOI, Eric VALETTE

2021

Copyright EDF – 2022. Ce document est la propriété d'EDF.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

Résumé

L'objectif de cette note est de décrire précisément les méthodologies à mettre en œuvre sur le terrain pour mesurer la granulométrie des sédiments grossiers. Les mesures granulométriques sont nécessaires notamment en données d'entrée pour les formules de calcul de transport solide.

Les différentes contraintes et questionnements que peut rencontrer l'opérateur sur le terrain sont abordés.

Cette note est issue du référentiel technique du Centre d'Ingénierie Hydraulique d'EDF

Ont collaboré à la rédaction de cette note :

Aurélie ANDRE

Jean-René MALAVOI

Eric VALETTE

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION : POURQUOI DECRIRE LES CARACTERISTIQUES DES SEDIMENTS GROSSIERS DANS LES COURS D'EAU ? 5

2. DIFFICULTES RENCONTREES 6

2.1 VARIABILITE SPATIALE DES SEDIMENTS DEPOSES 6

2.1.1 Dépôts monogéniques 6

2.1.2 Dépôts polygéniques 6

2.1.2.1 Que sont des dépôts polygéniques 6

2.1.2.2 Une bonne synthèse de la problématique : Mosley et Tindale 1985 [1] 8

2.2 VARIABILITE VERTICALE DES SEDIMENTS DEPOSES 9

2.2.1 Distinction couche/sous-couche : l'armure et le pavage 9

2.2.1.1 L'armure 10

2.2.1.2 Le pavage 11

2.2.2 Variabilité verticale, au sein même de la sous-couche 11

2.2.3 Quelle couche mesurer : la couche d'armure ou la (les) sous-couche ? 12

2.3 MOBILITE DES PARTICULES 12

2.3.1 Evaluer la mobilité des alluvions 15

2.3.1.1 Profil en long des macroformes 15

2.3.1.2 Tuilage des particules 16

2.3.2 Evaluer la fréquence de mobilité 17

2.3.2.1 Par la présence/absence de végétation pionnière 17

2.3.2.2 Par la présence/absence d'un biofilm 19

2.4 QUESTIONNEMENTS METHODOLOGIQUES 20

2.4.1 Le charriage sur les rivières « non alluviales » 20

2.4.2 Quid de la granulométrie submergée ? 21

2.4.3 La fraction sableuse en charriage…dans une rivière à gravier 22

3. METHODOLOGIES PROPOSEES POUR LA MESURE GRANULOMETRIQUE 23

3.1 CHOIX DES TRONÇONS REPRESENTATIFS ET DES STATIONS/SITES DE MESURE 23

3.2 CHOIX DES METHODES DE MESURE 24

3.3 METHODE WOLMAN 25

3.3.1 Définition de la méthode 25

3.3.2 Mise en œuvre pratique sur le terrain 25

3.3.3 Dépouillement 28

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

3.4 GRANULOMETRIE PAR PRISES DE VUE 29
3.4.1 Définition de la méthode 29
3.4.2 Mise en œuvre pratique sur le terrain 29
3.4.3 Dépouillement 31
3.4.3.1 Logiciel BASEGRAIN 31
3.4.3.1.1 Présentation du logiciel 31
3.4.3.1.2 Résultats obtenus 31
3.4.3.2 Méthode de comptage manuel 32
3.5 PRELEVEMENT DANS LA MASSE 33
3.5.1 Définition de la méthode 33
3.5.2 Volume de sédiment à prélever 34
3.5.3 Tamisage et pesée 34
3.6 INCERTITUDES 36
4. BIBLIOGRAPHIE 38
ANNEXE 1 : UTILISATION DU LOGICIEL IMAGEJ 39

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

1. INTRODUCTION : POURQUOI DECRIRE LES CARACTERISTIQUES DES SEDIMENTS GROSSIERS DANS LES COURS D'EAU ?

La description des sédiments grossiers déposés dans les cours d'eau peut répondre à divers objectifs :

- **Caractérisation « typologique »** : Il s'agit de caractériser un type de cours d'eau par différents paramètres dont sa granulométrie. S'il existe une dichotomie classique dans la littérature, qui différencie les rivières à sable (*sand bed rivers*) et les rivières à graviers (*gravel bed rivers*), celle-ci ne traduit pas complètement la diversité des cas, notamment pour les rivières « à graviers ». Une typologie plus fine peut aider à améliorer la transférabilité de données, de méthodes, de types de processus etc. Une méthode consiste à caractériser la granulométrie dominante d'un type de faciès d'écoulement présent sur la plupart des cours d'eau : le radier (*riffle*). C'est un faciès de sédimentation grossière, souvent positionné dans les zones de divergence de l'écoulement (ex : au point d'inflexion entre deux sinuosités de phase opposée). La caractérisation se fait en utilisant la classification granulométrique de Wentworth et en décrivant la fraction la plus grossière des radiers sur un ou plusieurs sites le long d'un tronçon homogène de rivière : on trouve par exemple des radiers à blocs sur la Loire amont dans le Massif Central, et des radiers à graviers sur la Loire aval.
- **Caractérisation des "habitats", aquatiques ou rivulaires :** pour divers éléments des biocénoses fluviatiles, de nombreuses espèces de poissons et d'invertébrés notamment, les substrats alluviaux sont des habitats majeurs, que ce soit pour s'y abriter, s'y nourrir ou s'y reproduire. Il est alors intéressant de décrire ces habitats. La méthode de description de la granulométrie de surface utilisée dans le protocole EVHA est particulièrement simple et efficace pour ce type d'approche.
- **Caractérisation du transport solide par charriage : c'est l'objet de cette note.**
  Il s'agit de déterminer les caractéristiques des sédiments déposés dans un cours d'eau pour en déduire, en introduisant ces caractéristiques dans des formules ou des modèles numériques de transport solide, la capacité de charriage du cours d'eau. La plupart de ces formules utilisent un ou plusieurs « diamètres caractéristiques » (le plus souvent le diamètre médian (D50), ou le diamètre moyen (Dm)), déterminés sur des zones du lit mineur « représentatives » du transport solide par charriage dans le cours d'eau concerné.

L'objectif de cette note est donc d'aider à répondre aux questions suivantes :

- Pourquoi échantillonner ?
- Quoi échantillonner ?
- Où échantillonner ?
- Comment échantillonner ?
- À quel moment échantillonner ?
- À quelle fréquence échantillonner ?

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

2. DIFFICULTES RENCONTREES

Un certain nombre de difficultés sont rencontrées lors des mesures de terrain visant à caractériser la granulométrie des sédiments transportés par charriage. Il s'agit principalement de la grande variabilité spatiale des dépôts sédimentaires, y compris à l'échelle d'une « station » représentative de petite dimension et de leur variabilité verticale. Une difficulté importante est aussi d'évaluer si les sédiments que l'on observe font bien partie du charriage ou s'ils ne sont pas mobiles.

2.1 VARIABILITE SPATIALE DES SEDIMENTS DEPOSES

2.1.1 Dépôts monogéniques

Les sédiments en transit par charriage ne se déposent pas uniformément dans l'emprise du lit mineur, y compris ceux transporté par un **même évènement de crue** (on parle de **dépôts monogéniques**). En effet selon les caractéristiques de l'écoulement dans le lit (notamment les vitesses locales et les phénomènes de turbulence), les processus de dépôt seront différenciés et l'observateur sur site se trouvera souvent en présence de zones granulométriques parfois très différentes. Théoriquement, on trouvera les sédiments les plus grossiers dans le talweg, puis des dépôts de granulométrie décroissante en allant du talweg vers les rives, jusqu'à la corde des bancs alluviaux quand il en existe. On pourra même trouver des sables et des limons sur les parties les plus hautes des bancs.

ATTENTION : ce gradient granulométrique décroissant du lit talweg vers les marges du lit actif n'est valable que pour les dépôts monogéniques. Les dépôts polygéniques peuvent même montrer un gradient inverse…voir plus loin.

2.1.2 Dépôts polygéniques

2.1.2.1 Que sont des dépôts polygéniques

A cette diversité de conditions d'écoulement pour un même évènement s'ajoute l'histoire hydrologique, récente ou plus ancienne, du cours d'eau, qui peut se traduire, dans l'emprise du lit mineur, par des **dépôts polygéniques** reflétant, selon les secteurs, plusieurs évènements de crue de débit et/ou durée différents. L'opérateur sera alors confronté à une diversité spatiale encore plus grande des caractéristiques granulométriques des dépôts.

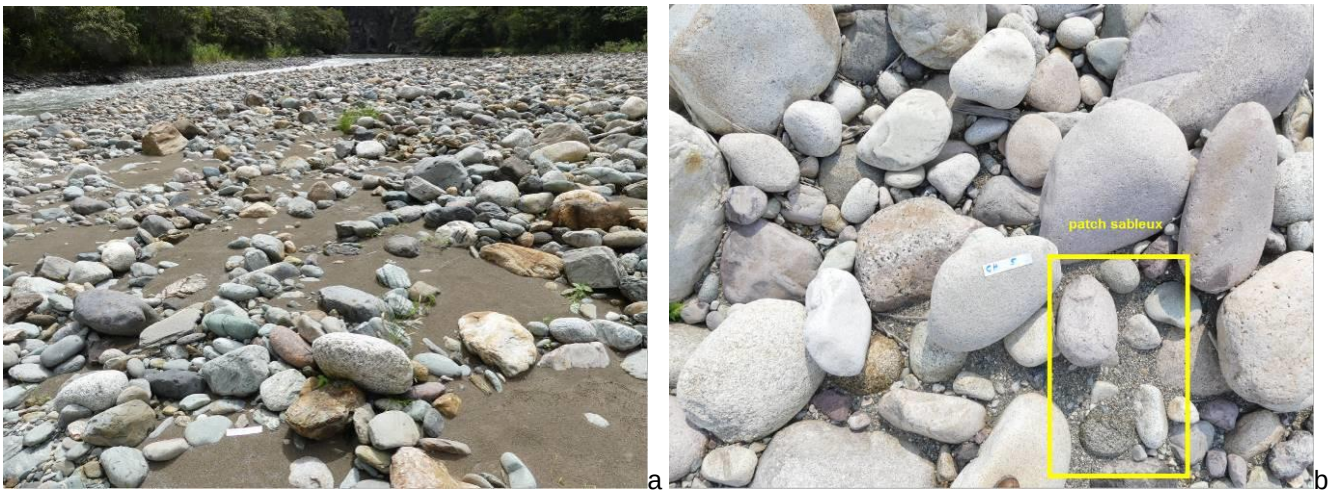
Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

*Figure 1 : (a), (b) et (c) exemple de **dépôts polygéniques « simples »** (générés par des crues différentes mais assez proches en termes de débit). La photo (c) montre néanmoins le charriage d'une petite dune sableuse sur un banc plus grossier. La photo (d) montre un **dépôt polygénique plus complexe** sur un banc de la Loire amont avec des dépôts très grossiers « perchés », très éloignés du lit actif, qui témoignent d'une crue rare et puissante alors que la partie la plus proche du talweg présente une granulométrie beaucoup plus petite, reflétant un transport solide plus proche de la moyenne.*

On observe aussi très souvent, y compris sur des bancs alluviaux globalement très grossiers, des dépôts sédimentaires fins (limons, sables) qui reflètent généralement des épisodes de débits suffisamment élevés pour transporter/déposer ces fractions fines sans pour autant mobiliser la fraction grossière superficielle. Ce sont généralement des dépôts de suspension (ils ne présentent pas de forme de charriage de type dune, comme sur la *Figure 1*c) et peuvent être assez étendus (on parle alors de **placages**) ou très localisés (**patchs**). Ces placages et patchs peuvent aussi se former en fin de crue, lorsque l'écoulement transporte encore en suspension ces fractions sablo-limoneuses.

Comme les fractions très grossières non mobiles (voir plus loin), ces sédiments fins ne doivent a priori pas être intégrés dans les courbes granulométriques « types » de charriage du cours d'eau étudié.

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation



a b

Figure 2 : exemples de dépôts sableux sur un banc globalement très grossier (a) grands placages, (b) petits patchs localisés. Les deux ne reflètent pas la granulométrie en charriage mais un ou des épisodes de transport solide de faible intensité, ou une fin de crue, avec un transport essentiellement en suspension

2.1.2.2 Une bonne synthèse de la problématique : Mosley et Tindale 1985 [1]

Ces deux auteurs ont voulu démontrer la difficulté de décrire et comprendre la granulométrie d'une station représentative d'environ 700 m de long et 350 m de large sur la rivière Ashley, un cours d'eau en tresses de Nouvelle Zélande (module 250 m^3/s). La couche superficielle des alluvions en transit a été échantillonnée (WOLMAN) dans **141 zones de granulométrie homogène** le long de sept sections transversales, et des échantillons de 30 kg dans la masse ont été prélevés au hasard en 86 points le long des mêmes sections transversales. Sur un des points, un seul échantillon de 854 kg composé de 28 sous-échantillons a également été collecté.

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

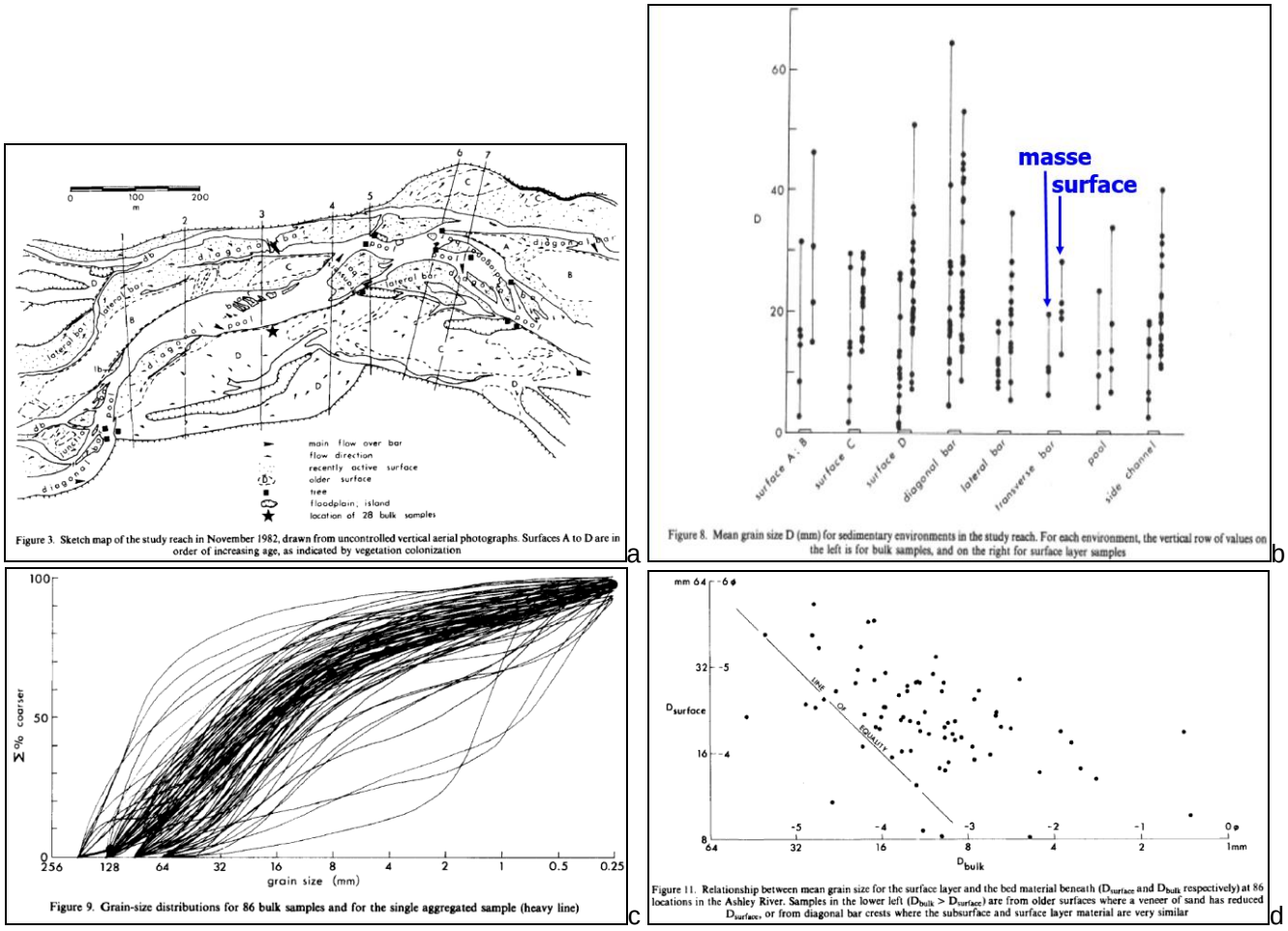


Figure 3. Sketch map of the study reach in November 1982, drawn from uncontrolled vertical aerial photographs. Surfaces A to D are in order of increasing age, as indicated by vegetation colonization

Figure 8. Mean grain size D (mm) for sedimentary environments in the study reach. For each environment, the vertical row of values on the left is for bulk samples, and on the right for surface layer samples

Figure 9. Grain-size distributions for 86 bulk samples and for the single aggregated sample (heavy line)

Figure 11. Relationship between mean grain size for the surface layer and the bed material beneath ($D_{surface}$ and D_{bulk} respectively) at 86 locations in the Ashley River. Samples in the lower left ($D_{bulk} > D_{surface}$) are from older surfaces where a veneer of sand has reduced $D_{surface}$, or from diagonal bar crests where the subsurface and surface layer material are very similar

Figure 3 : figures extraites de Mosley et Tindale (1985) [1] a) vue en plan de la station, b) Dm pour différents types d'unités géomorphologiques (à gauche dans la masse, à droite en surface), c) les courbes granulométriques des 86 échantillons dans la masse et d) relation entre le Dm dans la masse (abscisse) et le Dm de surface (ordonnée).

Sans entrer dans le détail de l'article, il s'agit juste ici de montrer l'extrême variabilité spatiale des dépôts ainsi que leur forte variabilité verticale. Pourtant, l'ensemble de la surface de la station, y compris les parties les plus anciennes plus ou moins végétalisées, ont **moins de 5 ans**. Les auteurs constatent aussi qu'il n'existe qu'une relation très faible entre les tailles moyennes des grains pour les échantillons de surface et de subsurface aux mêmes endroits (*Figure 3*d). Une valeur de D50 pour la couche superficielle de 16 mm, par exemple, est associée à une gamme de valeurs de D50 pour les échantillons dans la masse de 3 à 18 mm, nous y reviendrons plus loin.

2.2 VARIABILITE VERTICALE DES SEDIMENTS DEPOSES

2.2.1 Distinction couche/sous-couche : l'armure et le pavage

De nombreux auteurs anglo-saxons ont depuis longtemps introduit le concept de stratification d'un lit fluvial mobile. Ils y distinguent une **surface armurée** (avec de nombreuses manières de la nommer : armour layer, armouring, armoured bed, etc.) et une couche sous-jacente la **sous-couche** (subsurface). Ils distinguent généralement cette couche armurée du **pavage** (qu'ils nomment bed pavement, paved bed, etc.). La plupart des chercheurs, malgré quelques différences d'ordre terminologique, semblent d'accord aujourd'hui sur les mécanismes de formation de l'armure et du pavage : les alluvions des rivières sont généralement composées d'un matériel de granulométrie non

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

uniforme, souvent très étendue. Quand ces sédiments sont soumis à certaines gammes de vitesses de courant, les éléments fins à moyens sont mis en mouvement et évacués vers l'aval tandis que les plus gros restent en place. Si cette ségrégation des particules dure assez longtemps, cela aboutit à la concentration d'éléments grossiers à la surface du lit. Cette accumulation stable et protégeant temporairement les couches sous-jacentes est appelée **armure**. Poussé à l'extrême, le même processus aboutit à un **pavage**, d'une stabilité beaucoup plus durable. Les définitions suivantes sont celles proposées par Bray et Church (1980) [2].

2.2.1.1 L'armure

L'armure peut être définie comme une couche de surface grossière, résultat de l'exportation des éléments fins pendant et après chaque période de mouvement de tout ou partie de l'éventail granulométrique disponible au transport. Elle est donc remaniée par des phases épisodiques de transport de charge de fond au cours desquelles toutes les classes granulométriques sont actives. Pour la plupart des auteurs, le remaniement de cette couche de surface est un évènement fréquent, qui se produit au moins quelques jours par an. D'autres auteurs indiquent que le débit critique de remaniement de l'armure est celui de la crue de fréquence annuelle ou biennale. En fait, il est probable que les conditions soient très variables d'un cours d'eau à un autre mais il semble communément admis que la rupture de l'armure est un événement fréquent.

a

b

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

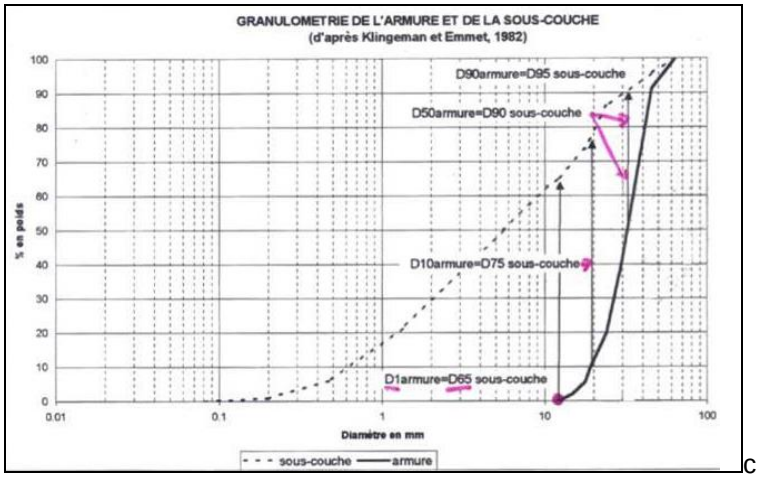


Figure 4 : (a) vue d'en plan d'une couche d'armure et de sa sous-couche (le rectangle jaune montre une particule « repère »). (b) coupe dans un banc alluvial montrant l'armure et sa sous-couche. (c) exemple de courbe granulométrique d'une couche d'armure et de sa sous-couche. Source Klingeman et Emmet, 1982

2.2.1.2 Le pavage

Les particules constituant la surface des lits pavés ne sont mises en mouvement que lors d'épisodes hydrologiques exceptionnels (très fortes crues) si toutefois elles sont encore susceptibles d'être mobilisées par le régime hydrologique actuel. Il s'agit du même processus ségrégatif que pour l'armure mais il est plus accentué en raison de conjonctures particulières, notamment l'absence de renouvellement de la charge fond du fait de sa réduction naturelle (stabilisation des versants) ou artificielle (barrage piégeant).

2.2.2 Variabilité verticale, au sein même de la sous-couche

En plus de la dichotomie couche/sous-couche, toujours très marquées sur les rivières à graviers, beaucoup moins sur les rivières à sable, la plupart des formes alluviales que l'on observe en rivière sont polygéniques, c'est à dire qu'elles ont été créées par des crues successives. L'analyse de leur granulométrie en profondeur révèle la forte variabilité des granulométries charriées en fonction des évènements hydrologiques.

L'exemple ci-dessous montre le cas d'une dune sableuse en progradation sur la Loire aval. On y observe une couche de surface beaucoup plus fine que sa première sous-couche (pas d'armure : 0.6 mm contre 2 juste en dessous), puis une grande diversité d'épaisseur et de granulométrie des strates sous-jacentes que nous avons mesurées jusqu'à 1.6 m de profondeur. NB : les deux strates les plus profondes : 110-130cm puis 130-160 cm présentent les deux courbes granulométriques extrêmes de ce site (D50 = 0.35mm et 4mm).

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

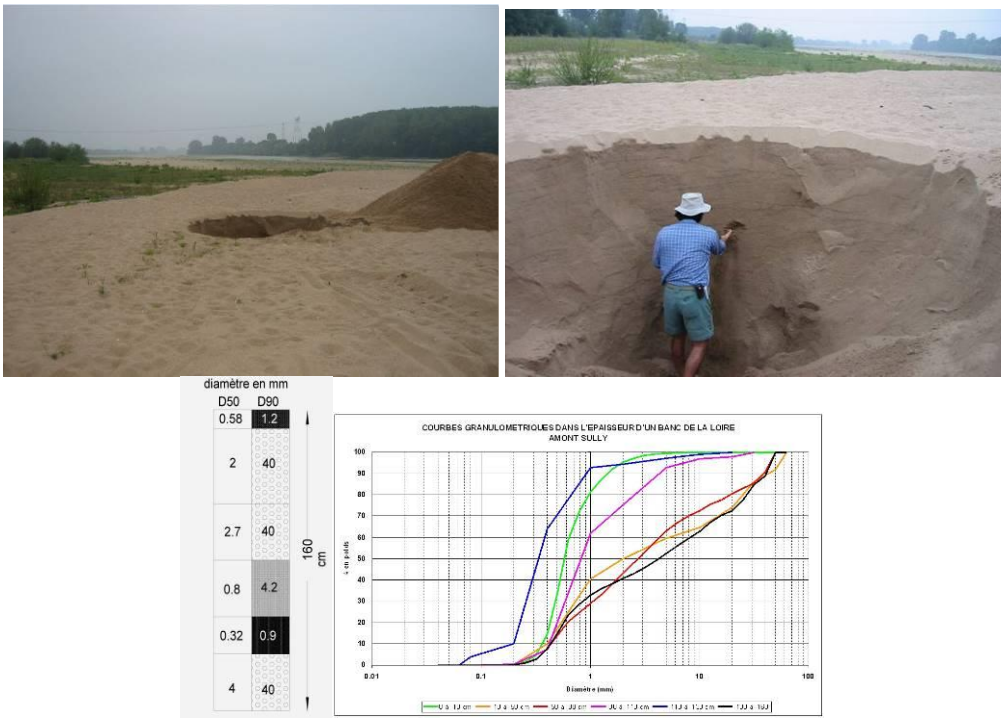


Figure 5 : exemple de forte variabilité verticale des granulométries charriées au sein d'une même dune récente de la Loire aval

2.2.3 Quelle couche mesurer : la couche d'armure ou la (les) sous-couche ?

Les équations de Recking 2013 [9]0 et Lefort 2014 [10], construites à partir de jeux de données incorporant des grandeurs moyennées du terrain (pour la granulométrie, la topographie, l'hydraulique) contournent les biais liés à la granulométrie et aux non-linéarités *(source A. Recking ; discussions techniques EDF-CIH/Recking 2021).*

En fait, ces formules ont été établies à partir d'un jeu conséquent de données de terrain et notamment de mesures granulométriques de surface. Il y a sur l'ensemble des rivières à graviers une couche de surface de granulométrie plus grossière que les couches inférieures. Le biais entre granulométrie de surface et de subsurface est ainsi intégré dans les formules. Il faut s'attendre pour les mesures de granulométrie dans la masse, à des valeurs de charriage surestimées. Il est donc préférable de réaliser des mesures granulométriques de surface (couche d'armure) si l'objectif est d'utiliser les formules de calcul de la capacité de transport, notamment Recking et Lefort.

2.3 MOBILITE DES PARTICULES

Comme nous venons de le voir, il arrive fréquemment que l'on trouve sur un même site d'échantillonnage « représentatif » de la rivière, des zones granulométriques très variées mais qui représentent néanmoins des granulométries transportées pour des évènements hydrologiques de plus ou moins forte intensité.

Il arrive aussi que l'on y rencontre des **granulométries qui ne sont a priori pas mobilisables**, parce que dépassant la « compétence » de l'écoulement, c'est-à-dire sa capacité à mettre en mouvement puis à déplacer une particule d'une certaine taille.

Ainsi, en rivière de montagne notamment, on peut trouver des blocs pluri-décimétriques, voire métriques, dans le lit mineur des rivières. Ils ne font pas partie pour autant de la granulométrie charriée régulièrement par le cours d'eau. Ils peuvent provenir soit d'éboulements de versants proches, soit d'érosion de terrasses fluvioglaciaires ou de moraines en bordure de lit mineur (où ces granulométries sont fréquentes), soit d'apports plus récents de laves

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

torrentielles, soit encore de l'érosion de protections de berges en enrochement (ils sont alors souvent très anguleux et faciles à identifier). Il arrive aussi que, sur certaines rivières, l'incision récente des lits fasse réapparaitre en surface des granulométries très grossières datant d'une période ou l'activité fluviale était notablement plus forte, comme à la fin de la dernière période glaciaire par exemple (fonte tardiglaciaire). On trouve ainsi parfois des blocs fluvioglaciaires dans les lits mineurs de rivières de piémont, qui ne font pas partie des fractions mobilisables par les rivières actuelles.

a

b

Figure 6 : (a) apports d'éboulis non mobilisables par le cours d'eau lui-même. (b) a priori les blocs marqués en rouge sont probablement issus d'éboulis de versant et ne sont jamais, ou très rarement et très localement, mis en mouvement. Ils ne font pas partie de la « charge solide » du cours d'eau.

Les mesures de type WOLMAN ou autres méthodes (voir §3), qui seront mises en œuvre pour construire la courbe granulométrique « type » des sédiments charriés devront a priori **exclure ces éléments**.

La difficulté, notamment sur les rivières à forte énergie, est alors de faire la part entre les **fractions granulométriques « mobilisables** » (celles qui vont permettre d'évaluer les caractéristiques du transport par charriage sur le cours d'eau étudié), et celles qui ne le sont pas du tout ou trop peu fréquemment et trop localement pour être comptabilisée dans le « charriage moyen ».

On voit sur la figure ci-dessous, que s'il est potentiellement intéressant de décrire les nombreux blocs présents à la surface du banc si l'objectif des mesures est de caractériser un habitat (objectif habitat), il ne faut pas les considérer pour l'établissement d'une courbe granulométrique « type » des sédiments transportés. On a ici affaire à un dépôt manifestement polygénique avec des reliques d'une forte crue (peut être très ancienne), ayant transporté ces blocs et une granulométrie graveleuse beaucoup plus petite reflétant probablement le charriage de la dernière crue.

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

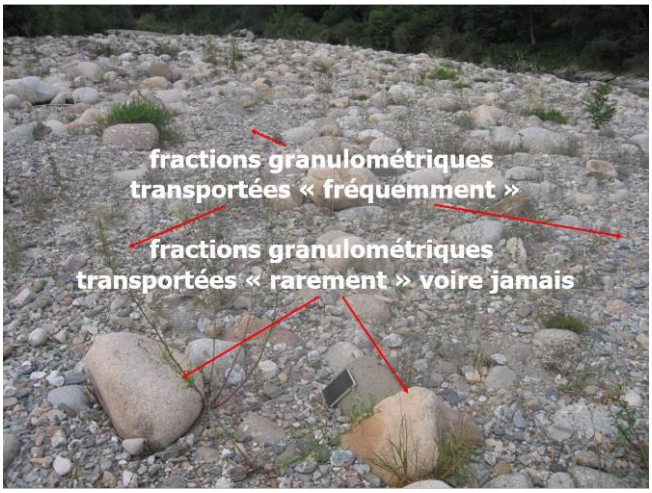


Figure 7 : exemple de fractions granulométriques qui sont manifestement non ou très peu fréquemment mobiles

Figure 8 : seuls les très gros blocs marqués d'une croix rouge sont a priori à exclure d'une courbe granulométrique « type » de charriage sur cette rivière, même s'ils peuvent occasionnellement être mobilisés et bouger légèrement.

Les blocs non transportés par charriage sont généralement plus anguleux et moins polis que les blocs qui sont charriés régulièrement.

IMPORTANT : il faut dissocier la **« non mobilité »** probable ou certaine liée au diamètre de la particule (compétence) et la **fréquence de mobilité**. Ainsi, des particules très grossières telles que celles que l'on voit sur la *Figure 1*d sont bien mobilisables, mais seulement pour des débits de crue rare qui atteignent leurs vitesses critiques de mise en mouvement, y compris sur le sommet de banc. Il est toutefois très difficile (voir impossible) sur le terrain de savoir à quelle période de retour correspond la granulométrie observée ; à moins que la campagne de terrain soit réalisée juste après une crue exceptionnelle. Les photos *Figure 9* et *Figure 10* montrent la mobilité de sédiments de taille importante suite à une crue exceptionnelle.

Ces sédiments de taille importante ne devront être intégrés dans la courbe granulométrique que si l'on cherche à caractériser le transport lors de cette crue exceptionnelle.

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

Figure 9 : Crue de la Vésubie en 2020

Figure 10 : Crue du torrent du Bastan en 2013 (source : internet

En général, les calculs sont réalisés sur une chronique de débit de plusieurs dizaines d'années qui n'inclue pas nécessairement d'évènements exceptionnels. Toutefois, pour la majorité des rivières, la part principale du transport se fait pour les crues morphogènes (environ Q1 ou Q2) qui compensent largement leurs faibles volumes transportés par une fréquence importante.

2.3.1 Evaluer la mobilité des alluvions

2.3.1.1 Profil en long des macroformes

La mobilité des macroformes fluviales (les bancs alluviaux principalement, mais aussi les faciès d'écoulement) est l'une des caractéristiques des cours d'eau à dynamique active et à transport de fond (bedload) élevé. Cette mobilité est donc un premier indicateur de la mobilité probable des particules qui les composent.

Les bancs mobiles sont généralement caractérisés par un profil en long triangulaire, ressemblant à une **dune**, avec une très courte zone à pente forte à l'aval (front de progradation ou face « d'avalanche »)) et une longue **contre pente à faible inclinaison vers l'amont**.

NB : cela est flagrant sur les rivières à « fort » transport solide mais moins marqué sur les rivières où celui-ci est plus modeste. En ce sens, la forme en dune des bancs est un premier indicateur qualitatif de l'intensité du charriage sur le cours d'eau.

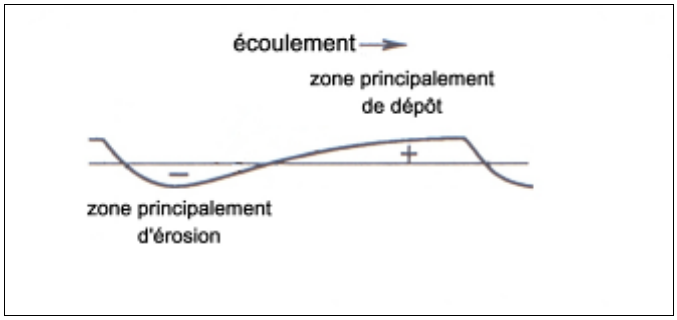


Figure 11 : profil en long "classique" d'un banc alluvial mobile

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

a

b

c

Figure 12:exemples de formes alluviales actives et mobiles (a) sur l'Ain aval, (b) le Doubs aval, (c) l'Ardèche

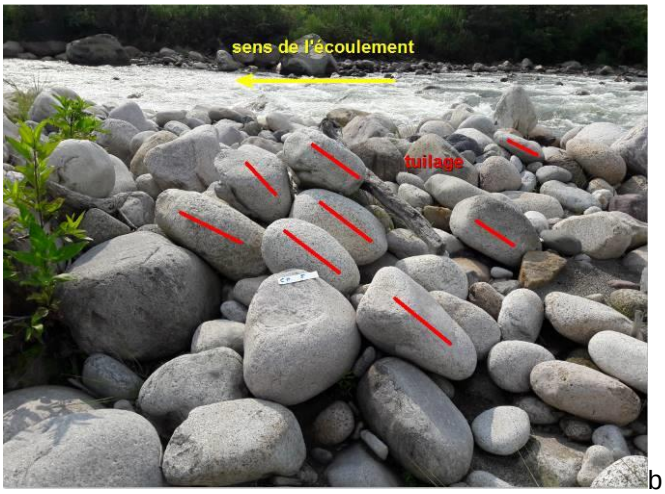
2.3.1.2 Tuilage des particules

Un indicateur intéressant de mobilité des particules composant ces macroformes alluviales, est la présence d'un **tuilage des sédiments**. Lorsque les éléments sont tuilés, c'est-à-dire disposés les uns sur les autres dans le sens de l'écoulement, avec leur grand axe généralement perpendiculaire à l'écoulement de dépôt, on peut considérer qu'ils sont a priori mobiles (voir figures ci-dessous).

ATTENTION : Inversement, **l'absence de tuilage ne signifie pas que les particules ne sont pas mobiles**. En effet, toutes les particules ne s'agencent pas systématiquement en tuiles. Ce mode d'imbrication dépend beaucoup de la forme, donc de la lithologie d'origine des particules. Les particules plutôt plates et allongées (provenant de certaines formations calcaires notamment) se tuilent très facilement alors que les sédiments d'origine granitique ou basaltique, de forme plus arrondie, se tuileront moins facilement et auront tendance, même mobiles, à s'agencer plutôt « à plat ».

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

a



b

c

d

Figure 13 : (a) tuilage sur la Durance (grand axe du carnet = 15 cm) et (b) Dansles cours d'eau à très forte énergie, même les granulométries les plus grossières (échelle = 15 cm) sont mobiles. (c) les blocs plurimétriques visibles en rive gauche sont mobiles lors des crues cycloniques (Réunion, rivière de l'Est). (d) particules mobiles mais non, ou très faiblement tuilées.

2.3.2 Evaluer la fréquence de mobilité

2.3.2.1 Par la présence/absence de végétation pionnière

Les formes alluviales « fraiches », ou tout au moins celles dont la couche superficielle (armure + une partie de la sous-couche) est fréquemment remaniée, sont généralement non végétalisées ou recouverte de quelques individus d'une végétation pionnière (herbacées ou jeunes stades d'arbustes), dont l'âge correspond sensiblement à la date du dernier évènement hydrologique « morphogène » à cet endroit.

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

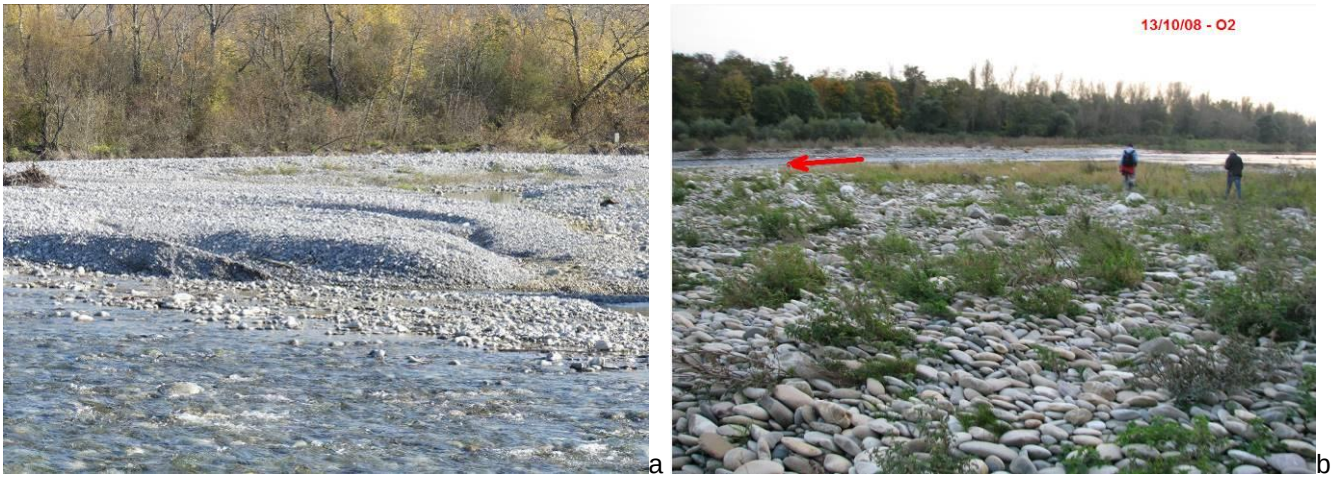


Figure 14 : (a) banc mobile « frais » absolument non végétalisé, (b) banc mobile mais déjà en partie végétalisé.

Si l'absence de végétation sur une macroforme indique probablement une mobilité fréquente, ou au moins récente, la présence de végétaux épars n'indique pas nécessairement une absence ou une faible fréquence de mobilité.

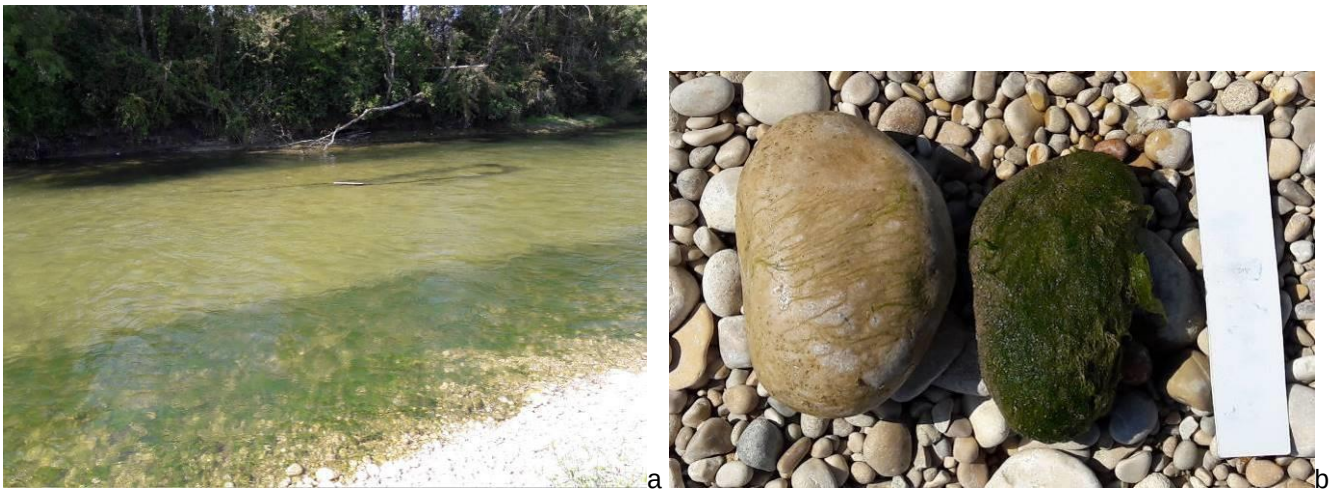
ATTENTION : la végétation alluviale pousse très vite (figure ci-dessous). Ce sont des espèces pionnières herbacées ou arbustives, qui sont capable de coloniser, et stabiliser durablement, un banc alluvial mobile en 2-3 ans. Seule une crue très forte, ou une érosion latérale de ce banc, sera à nouveau capable de mobiliser les alluvions qui le composent.

Figure 15 : un banc alluvial actif sur l'Ain. 4 ans séparent les deux photos. (a) aout 2013, (b) octobre 2017

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

2.3.2.2 Par la présence/absence d'un biofilm

La couche alluviale (armure et sous-couche, voir 2.2.1) n'est pas mobilisée à chaque évènement (figure ci-dessous). Un indicateur biologique, le biofilm (comprenant le périphyton) peut permettre d'évaluer la mobilité récente d'une couche d'armure (ou l'absence de mobilité d'une couche de pavage, voir plus loin).



a b

Figure 16 : mobilité différenciée des particules de l'armure après une petite crue en fonction de leur position dans le chenal. On distingue bien la partie du chenal qui a été mobilisée (blanche) et celle qui n'a pas bougé (recouverte de périphyton). À droite 2 galets de même taille prélevés dans les deux zones (échelle 15 cm).

a b

Figure 17 : (a) (b zoom) exemple de pavage sur le Vieux Rhin indiqué par la présence d'une croûte de biofilm ancienne et l'absence de tuilage alors que d'autres bancs en présentent dans le même secteur.

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

2.4 QUESTIONNEMENTS METHODOLOGIQUES

2.4.1 Le charriage sur les rivières « non alluviales »

Certaines rivières présentent un lit moyen/mineur dans lequel le substrat alluvial n'est pas dominant. Il s'agit soit de rivières coulant directement sur le substratum rocheux, soit de rivières coulant dans des chaos rocheux formant des rapides et des cascades. Pourtant le charriage alluvial peut parfois y présenter des volumes importants.

Quand ils existent, les dépôts alluviaux se présentent souvent sous la forme de patchs de petite à moyenne dimension, dans des conditions d'écoulement particulières (abris hydrauliques derrière des blocs, sur les marges du talweg, etc.).

L'objectif de la mesure granulométrique dans la présente note est bien la caractérisation du transport solide par charriage (cf. § 1) et ainsi son utilisation dans les formules de calcul du transport solide par charriage. Ces formules sont basées sur le concept de capacité de transport à l'équilibre. C'est-à-dire qu'il y ait un lien direct entre la pente du cours d'eau, l'hydrologie et les apports solides.

Dans les rivières non alluviales, la pente n'est pas en équilibre avec les apports solides et l'hydrologie mais le fond est tenu par des gros blocs, des affleurements rocheux ou un pavage.

Figure 18 : exemple de cours d'eau en gorges à faciès rapides/cascades/chenaux lentiques dominants. Peu de charge de fond visible, si ce n'est sous forme de patchs localisés.

Pour caractériser le charriage, il est nécessaire de trouver des zones en équilibre (en amont ou en aval d'une zone de gorge, au niveau d'un replat, etc.). Si les zones en équilibre sont complètement absentes, le calcul de capacité de transport ne pourra fournir qu'un volume maximum, souvent très éloigné du transport réel qui est alors limité non plus par la capacité de transport de la rivière mais par les apports solides en matériaux grossiers.

Il peut être préférable pour ce type de rivière de faire appel à des méthodes alternatives.

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

2.4.2 Quid de la granulométrie submergée ?

Lors des campagnes de terrain, nous sommes généralement amenés à échantillonner les parties exondées du lit mineur. Or il est assez probable que la granulométrie présente dans le talweg soit a priori plus grossière que celle visible sur les macroformes exondées car c'est dans le talweg que les vitesses sont généralement les plus élevées. C'est par exemple nettement le cas sur le Rhône en aval de Lyon (figure ci-dessous).

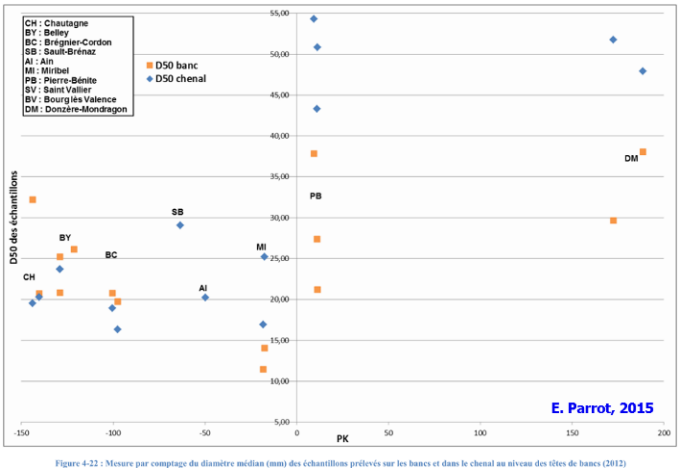


Figure 4-22 : Mesure par comptage du diamètre médian (mm) des échantillons prélevés sur les bancs et dans le chenal au niveau des têtes de bancs (2012)

*Figure 19 : exemple d'écart entre la granulométrie des bancs exondés et la granulométrie du chenal en eau (Parrot, 2015) [3]*0

On peut recueillir ces informations au moyen de dragues tractée en fond de lit mineur ou à l'aide de photos subaquatiques (cf. *Figure 20*). Notons que dans le premier cas, on draguera principalement la couche d'armure mais aussi une partie de la sous-couche alors que dans le second cas, comme pour les méthodes surfaciques « classiques » de type WOLMAN (voir plus loin), on n'échantillonnera que la couche d'armure.

a b c

Figure 20 : a) exemple de drague. b) exemple d'appareil de prise de vue granulométrique subaquatique. Le Camfish est un saumon sur lequel l'appareil photographique est en position ventrale et permet des prises de vues du fond. Deux phares LED de plongée et un système de pointage laser permettant de reconstruire une échelle visuelle métrique sur les images obtenues complète le dispositif photographique. c) exemple de prise de vue. On distingue les 4 points rouges des lasers [4].

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

2.4.3 La fraction sableuse en charriage…dans une rivière à gravier

Le sable est transporté par charriage ou suspension et ce mode de transport dépend du débit et de la granulométrie du sable. La proportion de sable transporté par charriage et suspension varie donc dans l'espace et dans le temps.

Lors de la réalisation des analyses granulométriques présentées ici, on cherche à caractériser le transport solide par charriage ; seule la fraction sableuse transportée par charriage doit donc être intégrée. Mais, il est souvent difficile de faire la part des choses.

En effet, lors de la réalisation des mesures Wolman, les bancs peuvent avoir été lessivés suite à la dernière crue, ce qui aurait tendance à enlever les particules de sables ; à contrario, ils peuvent avoir subi des dépôts de sédiments sableux. Ces dépôts se sont de toute façon effectués avec un certain tri granulométrique. La mesure de la granulométrie de surface visible sur les bancs comporte ainsi une large part d'incertitude.

Les préleveurs type Helley Smith prélèvent des sédiments jusqu'à une certaine granulométrie fonction du filet utilisé. Les mesures obtenues contiennent une part de sable plus importante qu'une mesure type Wolman. De la même manière, on a vu que les sédiments prélevés lors des granulométries dans la masse ont une granulométrie moyenne plus faible que la couche de surface. Il est donc clair que la granulométrie obtenue par Wolman et via les autres méthodes ne donnera pas le même résultat.

Toutefois, les formules de calcul de capacité de transport communément utilisées (notamment Recking et Lefort) sont calées sur des mesures en surface, cf. § 2.2.3. Si on dispose de données granulométriques issues de mesures autres qu'en surface, elles ne seront pas toujours valables pour utiliser ces formules.

En pratique, on intègrera le sable en comptant les particules de diamètre inférieur à 0.5 cm dans une classe (cf. § § 3.3.2), mais lors du choix du site de mesure, on évitera les zones de dépôt sableux (cf. Figure 2). La multiplication des sites de mesures permet d'éviter la sur ou la sous-représentation de la partie sableuse lors des mesures de surface.

La prise en compte des particules de diamètre inférieures à 0.5 cm est nécessaire pour éviter de décaler la courbe granulométrique (si on enlève la fraction sableuse transportée par charriage, le dm ou le d50 déterminé est alors plus gros que le dm ou D50 réel). **Par contre, cette méthode ne permet pas de déterminer le volume de la fraction sableuse transportée par la rivière car la majeure partie du sable est transporté par suspension, notamment en crue**. La prise en compte de cette fraction sableuse n'est pas l'objet de la présente note.

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

3. METHODOLOGIES PROPOSEES POUR LA MESURE GRANULOMETRIQUE

La mesure granulométrique a ici pour objectif de déterminer une des données de base pour l'utilisation des formules de transport solide, il faut donc essayer de caractériser les éléments du lit, les plus représentatifs possibles d'un transport moyen de la rivière, sauf cas particuliers (détermination du débit de rupture de la couche d'armure par exemple). Ce transport moyen de la rivière correspond aux crues morphogènes donc généralement aux sédiments transportés pour les crues de période de retour 1 à 2 ans, cf. § 2.3.

Cette mesure concerne les matériaux transportés par charriage sur le fond (bedload) et exclu donc les matériaux transportés en suspension (washload). Ces derniers (les fines et une partie des sables) sont peu présents dans le lit mineur des rivières (hors retenue). Les matériaux transportés en charriage concernent donc les matériaux du lit : sables, graviers et galets. Les sables sont complexes à prendre en compte car ils peuvent être transportés soit par charriage, soit par suspension.

Pour bien comprendre le lien entre granulométrie, morphologie de la rivière, débit et pente, on peut se référer aux guides et ouvrages techniques : [10], [15], [16], [17], [18].

3.1 CHOIX DES TRONÇONS REPRESENTATIFS ET DES STATIONS/SITES DE MESURE

La mesure granulométrique sera réalisée dans des secteurs de la rivière où **le lit est en équilibre avec le transport solide** ce qui exclut les zones à forte pente (type gorges), où la granulométrie résiduelle est bien supérieure à la granulométrie moyenne transportée. Les secteurs en tresses sont plutôt des zones de dépôt où les apports sont en excès par rapport à la capacité de transport de la rivière, toutefois le dépôt y est généralement représentatif des apports granulométriques amont ; on pourra donc y réaliser des mesures granulométriques.

Il sera nécessaire de choisir des bancs actifs, c'est-à-dire composés de sédiments mobiles :

- Ils seront généralement peu perchés par rapport au lit vif et à proximité de celui-ci ;
- Les cailloux qui le composent sont en général de taille moyenne ; parfois tuilés (cf. 2.3.1.2) ;
- On évitera donc les secteurs pavés (cf. § 2.2) car la granulométrie y est plus élevée que la granulométrie transportée ; sauf si justement on cherche à caractériser le débit de destruction de la couche de pavage ;
- On cherchera l'absence de végétation (cf. § 2.3.2.1), de biofilm (cf. § 2.3.2.2), de sédiments grossiers enchâssés dans une gangue de limons (cf. *Figure 21*).

Il faut exclure tous les secteurs qui pourraient entraîner un biais dans la mesure :

- Présence d'un ouvrage hydroélectrique (queue de retenue, aval d'une dérivation, etc.) ;
- Aval immédiat d'un affluent majeur ou d'un cône de déjection ;
- Aval immédiat d'un versant actif apportant des matériaux (les matériaux sont facilement reconnaissables car plus anguleux que ceux transportés par la rivière) ;
- Secteur fortement rétrécit.
- Pour les apports brusques de sédiments (affluent, versant, érosion de berge importante), on se placera à une distance suffisamment grande pour que ces éléments (en général différents de ceux de la rivière) ne soient plus visibles.

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

Ces secteurs sont à éviter lors d'un calcul global du transport solide d'un tronçon de rivière sauf si on souhaite caractériser l'influence d'une discontinuité dans le transport sédimentaire.

Sédiments mobiles

Sédiments peu mobiles enchâssés dans les sédiments fins

Figure 21. Illustration de différences entre sédiments mobiles et peu mobiles

On aura tout intérêt à multiplier les sites de mesures.

Un premier travail couplé sur le profil en long et les photos aériennes permettra de sélectionner des secteurs de mesures (bancs semblant actifs et secteur en équilibre). Le choix précis du site de mesure ne pouvant se faire que sur le terrain grâce à l'expérience de l'opérateur et en fonction des accès possibles : bancs parfois non accessibles car nécessitant de traverser un bras en eau. La campagne de mesures sera réalisée à l'étiage de manière à favoriser l'accès au lit et à limiter la submersion des bancs.

3.2 CHOIX DES METHODES DE MESURE

Il existe 2 types de mesures pour caractériser la granulométrie des sédiments grossiers :

- mesures en surface (Wolman, cf. [6] ou prise de vue)
- prélèvement dans la masse et tamisage/pesée.

La seconde parait plus représentative de la granulométrie transportée par la rivière puisque permettant de caractériser la granulométrie de subsurface. Toutefois, elle est largement plus onéreuse car les volumes à prélever pour des sédiments grossiers sont importants. Par ailleurs, la majorité des formules de transport et notamment celles de Recking et de Lefort ont été calées principalement sur des mesures de surface.

Les mesures de surface ont l'avantage d'être simples et rapides à mettre en œuvre, il est donc possible de multiplier les mesures. La principale variabilité dans les résultats obtenus concerne le choix des sites de mesures et non pas l'opérateur.

La méthode par prise de vue verticale est extrêmement rapide sur le terrain mais nécessite un traitement ultérieur au bureau. Par ailleurs, elle peut entrainer un biais systématique dans le choix des zones à photographier. La méthode de Wolman du fait de l'étendue de la mesure limite le biais de choix du site. Il est donc préconisé lors de la réalisation des prises de vues soit de réaliser dans le même secteur un comptage par Wolman ou à minima (notamment si l'opérateur est peu expérimenté ou en cas de sous-traitance) de prendre une série continue de

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

clichés le long du banc permettant de choisir ultérieurement ou de moyenner les résultats. Dans tous les cas, il sera réalisé des photos de contexte (cf. *Figure 29*), on prendra le banc entier avec le décamètre déployé pour un Wolman ou le second opérateur en train de prendre la photo (pour la méthode par prises de vue).

Une vue aérienne par drone de l'ensemble du banc peut être très intéressante en complément d'une granulométrie par prise de vue. Des travaux sont en cours pour réaliser directement des granulométries automatiques après un survol drone à basse altitude (MORTL C. et al (2022) [5])

3.3 METHODE WOLMAN

3.3.1 Définition de la méthode

WOLMAN (1954) [6] a proposé la méthode suivante de prélèvement en surface :

1. Mise en place sur le sol d'un élément de référence (chaîne d'arpenteur, décamètre, etc.).

2. Prélèvement de tous les cailloux qui se trouvent sous les graduations correspondant à un pas d'espace prédéfini, cf. § 3.3.2.

3. Mesure du diamètre intermédiaire du caillou.

4. La fréquence utilisée est ensuite une fréquence en nombre, un élément étant compté autant de fois (si cela arrive) qu'il apparaît sous les graduations.

L'équivalence avec la méthode des tamis a été étudiée par CAO (1985) [7] qui a mesuré la granulométrie de matériau de laboratoire avec la méthode de WOLMAN et par MEUNIER &CARION (1987) [8] qui ont basé leur étude sur des mesures de terrain et des considérations topologiques. Il apparaît une très bonne concordance des deux méthodes.

Cette démarche est bien adaptée au cas des rivières torrentielles, car elle nécessite un appareillage très simple et permet de traiter des éléments de grande taille. Il est possible aussi d'effectuer un prélèvement des matériaux suivant une grille, pour couvrir une zone peu étendue (NB : non conseillé car plus lourd à mettre en œuvre et plus sujet au biais du choix de site comme la prise de vue). ***La règle la plus importante est d'effectuer un prélèvement réellement aléatoire en évitant tout choix subjectif.*** (Source Lefort-Koulinski, cf. [10]).

3.3.2 Mise en œuvre pratique sur le terrain

Le levé nécessite environ 15 à 20 minutes par transect à 2 opérateurs.

En détail, l'opérateur va choisir un site, préférentiellement près du lit vif, sur un banc actif, peu perché (cf. § 3.1) et suffisamment étendu. Il va tendre linéairement un décamètre ruban (10 ou 20 mètres de long) parallèlement au banc et à l'écoulement. Il n'y a pas forcément consensus sur le placement du décamètre, certains préférant mesurer des transects perpendiculairement à l'écoulement. Toutefois, pour éviter la présence de zones immergées, de secteurs perchés et pour éviter de traverser l'écoulement, nous déconseillons ce choix.

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

Durance

Arc

Figure 22. Mise en place d'un décamètre pour la méthode Wolman

Il est nécessaire de mesurer une centaine de particules par site. Le pas de mesure doit être supérieur au d90 de l'échantillon. Il sera privilégié un espacement de 20 cm donc une mesure sur 20 m pour obtenir 100 échantillons. Si le banc est court et la granulométrie suffisamment réduite, il est possible de faire une mesure tous les 10 cm (sur une longueur de 10 m). Si l'échantillonnage tombe 2 fois sur la même particule, il faut la compter 2 fois.

Tous les pas de mesure (10 ou 20 cm), l'opérateur 1 regarde la particule présente sous la graduation. Il est impératif, pour éviter tout biais, de mesurer la particule située exactement à la verticale sous la graduation. Cette particule est soit du sable, soit une particule mesurable (diamètre supérieur à 0.5 cm). Si elle est mesurable elle sera prélevée ou mesurée in-situ si elle est trop grosse ou partiellement enfouie. La mesure se fait selon l'axe intermédiaire b. Il faut imaginer qu'on cherche la mesure de la maille du tamis à travers laquelle la particule passerait. Cette mesure peut se faire soit à l'aide d'un pied à coulisse (mais il n'est pas nécessaire d'être précis), d'un réglet ou d'un gabarit.

NB : Le gabarit a l'avantage d'être très rapide mais il ne comprend en général qu'une dizaine de classes, c'est la limite acceptable si la granulométrie couvre toutes les classes ; toutefois si la granulométrie ne couvre que quelques classes, la courbe granulométrique obtenue ne sera composée que de quelques créneaux. Il est alors nécessaire de réaliser les mesures via une autre méthode (pied à coulisses ou réglet). La classification proposée Figure 26 est plus détaillée que les classes du gabarit (Figure 24) ; cette classification est en générale suffisamment détaillée.

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

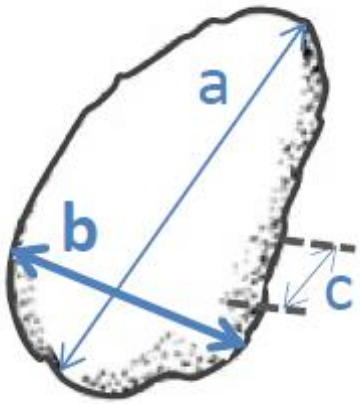


Figure 23. Mesure du diamètre b. Source : Oldrich Navratil, cf. [11]

Figure 24. Gabarit de mesure

L'opérateur 1 annonce la mesure à l'opérateur 2. Puis il avance à la graduation suivante, etc.

L'opérateur 2 prend note sur une feuille de terrain comprenant des classes de mesures. Plusieurs classifications sont possibles :

Size Class (mm)	Count	Count	Frequency (%)	Cumulative % Finer
>=256	𝍸 ||	7	7	100
<256	𝍸 𝍸 |	11	11	93
<180	𝍸 𝍸 𝍸 |	16	16	82
<128	𝍸 𝍸 𝍸	15	15	66
<90	𝍸 𝍸	10	10	51
<64	𝍸 𝍸 |	11	11	41
<45	𝍸 |||	8	8	30
<32	𝍸 ||	7	7	22
<22.6	||	2	2	15
<16	|||	3	3	13
<11.3	||	2	2	10
<8	|	1	1	8
<5.6		0	0	7
<4	𝍸 ||	7	7	7
	Totals:	100	100	

Figure 25. Classification pour la méthode Wolman. Source : Stream barrier Removal Monitoring guide, [12]

d (cm)	Nombre
<0.5	
<1	
<2	
<3	
<4	
<5	
<6	
<7	
<8	
<10	
<12	
<15	
<20	
<25	
<30	
<35	
<40	
<50	
>50	
Total	

Figure 26. Classification pour la méthode Wolman (à privilégier)

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

Nous préconisons plutôt la classification 2, plus facile pour la communication entre les 2 opérateurs. Il n'est donc pas nécessaire de mesurer très précisément le diamètre b de la particule mais de pouvoir le ranger dans une classe. Si la particule a un axe b de dimension inférieure à 5mm (petits graviers et sable), il ne sera pas mesuré mais identifié dans la classe inférieure à 0.5 cm.

Sur le terrain, il est préférable de sommer le nombre de particules, pour vérifier que l'on est proche de 100.

NB : il est possible également de noter la dimension (au centimètre près) des particules plutôt que de remplir des classes de manière à ne pas obtenir une courbe granulométrique avec des créneaux. Le temps de mesure est alors plus long et il faut disposer d'un téléphone ou d'une tablette pour éviter toute erreur ultérieure de transcription.

3.3.3 Dépouillement

Le dépouillement consiste à déterminer le pourcentage de chaque classe, c'est-à-dire le nombre de particules de la classe divisé par le nombre total de particules. Il est ensuite possible de tracer pour chaque levé la courbe granulométrique, c'est-à-dire le pourcentage au non dépassement en fonction du diamètre. La détermination des diamètres de référence (d16, d30, d50, d84, d90, etc.) se fait graphiquement ou par calcul en interpolant la courbe obtenue.

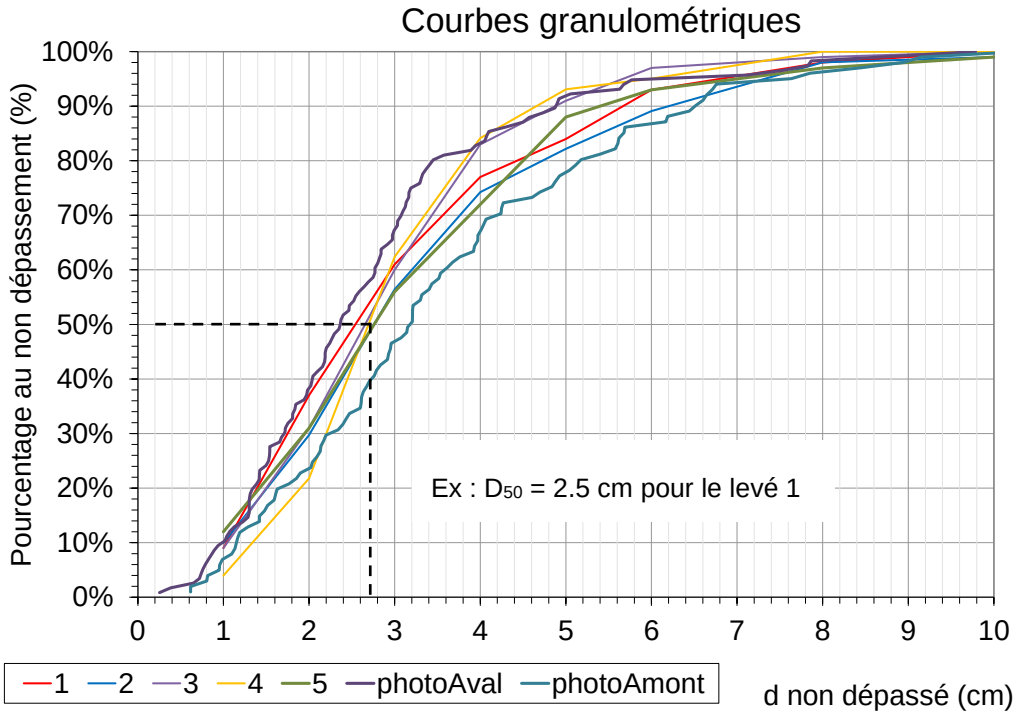


Figure 27. Exemple de courbe granulométrique

La valeur du diamètre moyen se calcule avec la formule suivante :

Dm = moyenne (FréqC*DmoyC)

Avec :

- freqC : fréquence de la classe ;
- DmoyC : diamètre moyen de la classe.

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

3.4 GRANULOMETRIE PAR PRISES DE VUE

3.4.1 Définition de la méthode

La méthode consiste à réaliser des prises de vue verticale des bancs de cailloux. Ces photos sont ensuite traitées soit par comptage manuel, soit via le logiciel BASEGRAIN pour définir la courbe granulométrique.

La méthode est très rapide sur le terrain mais assez laborieuse à dépouiller. Elle peut être réalisée en complément de mesures Wolman.

3.4.2 Mise en œuvre pratique sur le terrain

Le choix du banc de cailloux se fera suivant la méthodologie décrite au § 3.1. Il est important de noter que comme le linéaire couvert est plus court qu'avec la méthode de Wolman, il est plus fréquent d'avoir un biais dans le choix des sites de mesures. Il sera donc nécessaire soit de réaliser un Wolman en plus des prises de vue, soit de prendre une série de clichés en parallèle de la rivière, cf. *Figure 28*.

Figure 28. 10 clichés successifs pour le secteur

Il est également nécessaire que chaque photo précise de banc (ou la première et la dernière si on est sur une série de clichés) soit accompagnée d'une photo générale permettant de comprendre où est ce banc de cailloux par rapport à la rivière, cf. *Figure 29*.

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

Prise de vue verticale

Photo générale

Figure 29. Exemples de prises de vue pour granulométrie

Il est nécessaire de respecter les règles suivantes lors de la prise de vue :

- Les photographies n'ont pas besoin d'être prises à très haute résolution.
- Il faut viser de prendre une photo qui couvre environ 1.25*1 m avec pour objectif d'avoir plus d'une centaine de cailloux sur la photo.
- Les photos seront prises à la verticale, à bout de bras (cf. *Figure 31*). Il faut éviter que les pieds du photographe soient visibles.
- Une règle graduée sera positionnée sur un bord de la photo – plus cette règle est longue (1m) mieux c'est.
- Il faut éviter toute ombre sur la photo (du photographe ou des cailloux)
- La photo doit être localisée au GPS

Figure 30 : Exemple de prises de vue pour granulométrie

Figure 31 : Méthode de prise de vue

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

3.4.3 Dépouillement

Quel que soit la méthode de dépouillement, un premier tri sera réalisé pour sélectionner les photos les plus adaptées et supprimer les photos non exploitables : floues, avec des gouttes d'eau, avec des ombres, etc.

3.4.3.1 Logiciel BASEGRAIN

3.4.3.1.1 Présentation du logiciel

Des méthodes de granulométrie se basent sur le traitement informatique automatisé des images. De nombreuses équipes de recherche développent leurs outils, fournissant ainsi à la communauté scientifique des outils plus ou moins aboutis, on peut citer notamment les travaux sur ce sujet de l'équipe d'Hervé Piégay (UMR5600, ENS-Lyon).

Il existe différents logiciels téléchargeables sur internet : BASEGRAIN et SEDIMETRICS DIGITAL GRAVELOMETER.

Le temps de traitement informatique pour chaque photo est estimé à une dizaine de minutes. Dans certains cas un post–traitement manuel des résultats peut être nécessaire, ce qui requiert du temps de traitement supplémentaire.

BASEGRAIN a été développé à la division de génie fluvial du Laboratoire d'hydraulique, d'hydrologie et de glaciologie (VAW) de l'Institut fédéral suisse de technologie (ETH) de Zurich (Detert, 2013) [13]0, sur la base de premiers développements réalisés à l'université de Loughborough. Le logiciel et sa documentation peuvent être téléchargés gratuitement à l'adresse suivante :

https://basement.ethz.ch/download/tools/basegrain.html

3.4.3.1.2 Résultats obtenus

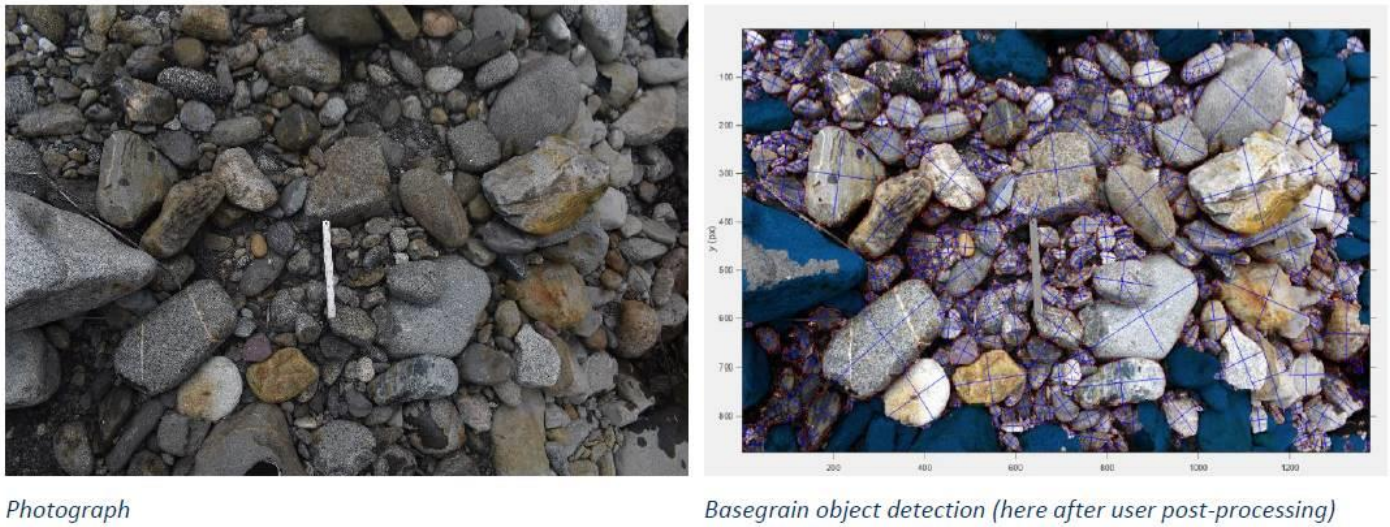


Figure 32 : Image de banc et traitement BASEGRAIN correspondant (source ARTELIA)

Les granulométries calculées par BASEGRAIN ont tendance à être sous-estimées par rapport aux méthodes plus traditionnelles d'échantillonnage des sédiments (Wolman et / ou analyse photo non automatisée basée sur une grille), pour diverses raisons :

- Les particules de sédiments se chevauchent souvent, ce qui n'est pas pris en compte dans l'analyse automatisée,

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

- L'analyse BASEGRAIN a tendance à sur-segmenter les plus grosses particules. L'effet peut être partiellement, mais pas complètement compensé par le post-traitement de l'utilisateur,
- BASEGRAIN donne une distribution massique, représentative de la couche de subsurface (méthode de Fehr). Les méthodes traditionnelles, utilisées pour l'étalonnage des formules de transport des sédiments, donnent une taille de sédiment représentative de la couche superficielle. En raison des processus d'armurage, la granulométrie de la couche superficielle est systématiquement plus grande que la granulométrie de la couche de subsurface.

Nous avons réalisé différentes comparaisons, notamment avec la méthode de comptage manuelle (cf. 3.4.3.2) et il semble qu'il y est systématiquement un biais de résultats entre ces méthodes dans la détermination des diamètres caractéristiques de 1 ou 2 cm.

Il semble donc préférable d'utiliser la méthode de comptage manuel ou de faire un pré-tri avec BASEGRAIN mais de retraiter systématiquement les images retenues en comptage manuel.

3.4.3.2 Méthode de comptage manuel

Il est conseillé d'utiliser le logiciel ImageJ qui permet de traiter rapidement une photographie de banc par comptage manuel. Le temps est estimé à environ 5 minutes par photo.

Les étapes sont les suivantes :

- Ouvrir une photo dans le logiciel
- Ajouter une grille puis ajuster sa taille pour avoir environ 100 intersections de ligne
- Ajuster l'échelle grâce à la règle ou au mètre présent sur la photo
- Mesurer à la souris l'axe b de chaque particule située aux intersections de ligne
- Sauvegarder les résultats

On obtient la liste de toutes les mesures, qu'il est alors possible de traiter comme pour une mesure Wolman.

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

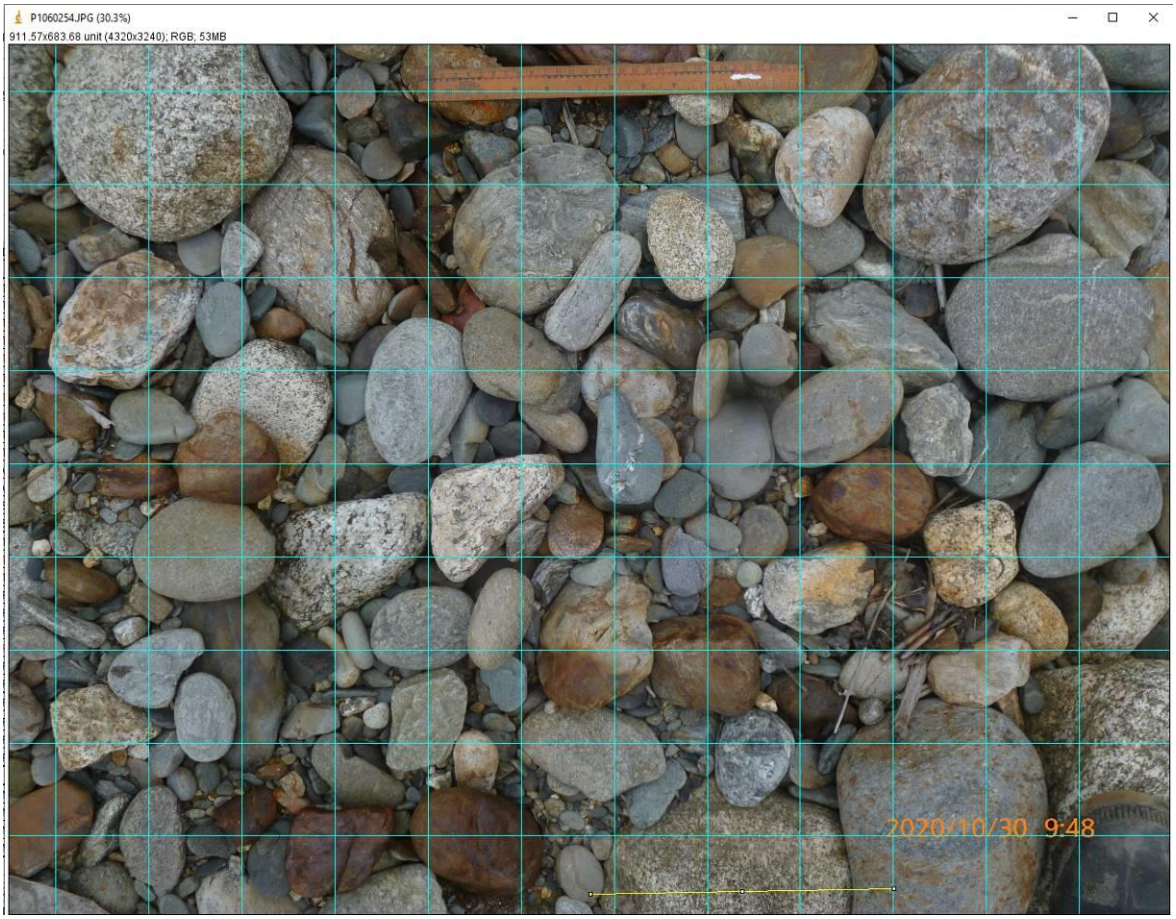


Figure 33 : Grille sur une photo de banc (logiciel ImageJ)

Un mini-guide des différentes étapes pour utiliser le logicel est donné en annexe 1.

3.5 PRELEVEMENT DANS LA MASSE

3.5.1 Définition de la méthode

Le prélèvement des matériaux dans la masse se fait sur 1 à 2 mètres de profondeur en général. Cette solution présente plusieurs avantages :

- Le prélèvement ne concerne pas que la surface, influencée par les derniers épisodes de crue, principalement à la décrue et souvent composée de la fraction la plus grossière.
- Le prélèvement en profondeur permet de prendre en compte différents états successifs et d'obtenir ainsi une "moyenne", plus fidèle à la granulométrie d'ensemble.

(Source Lefort-Koulinski, cf. [10]).

Il faut toutefois noter que les formules usuelles de calcul de transport solide ont été calées sur des mesures de comptage de la couche superficielle.

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

Très courante pour les lits sableux cette méthode est difficile à mettre en œuvre sur les lits à charge grossière, en raison de la masse à prélever, puis de la nécessité de transporter une partie de cette masse à des fins de tamisage.

La méthode consiste à décaper la couche de surface puis à prélever à la pelle un certain volume de sédiment puis de mesurer (ou tamiser) et peser in situ les élements les plus grossiers et enfin de tamiser le reste en laboratoire.

3.5.2 Volume de sédiment à prélever

Il y a différentes méthodes pour estimer le volume à prélever. Celui-ci dépend de la granulométrie.

On peut citer :

- *Church et Al (1987)* [14]: *le poids total doit être supérieur à 100 fois le poids du plus gros éléments*

$$Ms > 100/6*\pi*(Dmax)^3*(\rho_s/\rho_a)$$

Dmax (cm)	Masse minimum (kg)	Volume minimum (L)
2	2	1
4	9	3
6	30	11
8	71	27
10	139	52
15	468	177
20	1109	419

- Lefort-Koulinski (2018) [10]: le poids de l'échantillon (kg) est fonction du diamètre d50 (mm) :

$$P > 0.2\ (d_{50})^2$$

D50 (cm)	Masse minimum (kg)	Volume minimum (L)
0.5	5	2
1	20	8
2	80	30
4	320	121
6	720	272
8	1280	483

On voit qu'on atteint plus d'1 tonne par échantillon pour un d50 de 8 cm ou un dmax de 20 cm.

3.5.3 Tamisage et pesée

Le volume prélevé est souvent fractionné en deux parties traitées de façon différente :

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

- La fraction grossière (plus de 32 mm) est mesurée sur place (diamètre intermédiaire de chaque élement), ou tamisée puis pesée sur place.
- La fraction fine sera mise en sac et traitée en laboratoire, ce qui permet l'analyse précise de toute l'étendue granulométrique, y compris les sables ou même les limons si nécessaire.

En laboratoire, le matériau transite dans une colonne de tamis et la courbe granulométrique est déterminée en fonction du poids retenu sur chaque tamis. La norme AFNOR (NF P18-560) est en général retenue pour le tamisage.

maille des tamis (mm)	poids du refus (gr)
80.0	
63.0	
50.0	
40.0	
31.5	
25.0	
20.0	
16.0	
12.5	
10.0	
8.0	
6.3	
5.0	
4.0	
3.15	
2.5	
2.0	
1.6	
1.25	
1.0	
0.8	
0.63	
0.5	
0.4	
0.315	
0.25	
0.2	
0.16	
0.125	
0.1	
0.08	
0.063	
poids tamisé :	

Le tracé de la courbe granulométrique permet de déduire les diamètres de référence d16, d30, d50, d84 et d90.

Le diamètre moyen est égal à dm = Somme (dΔP/P)

Avec P : poids total de l'échantillon

Et ΔP : poids du refus de la classe de diamètre moyen d

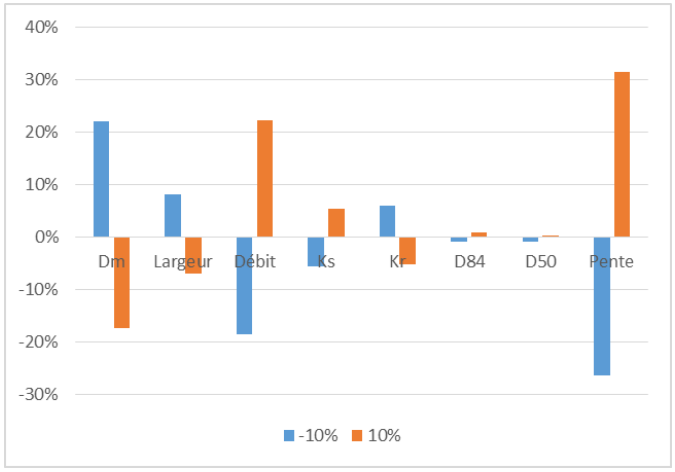
Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

3.6 INCERTITUDES

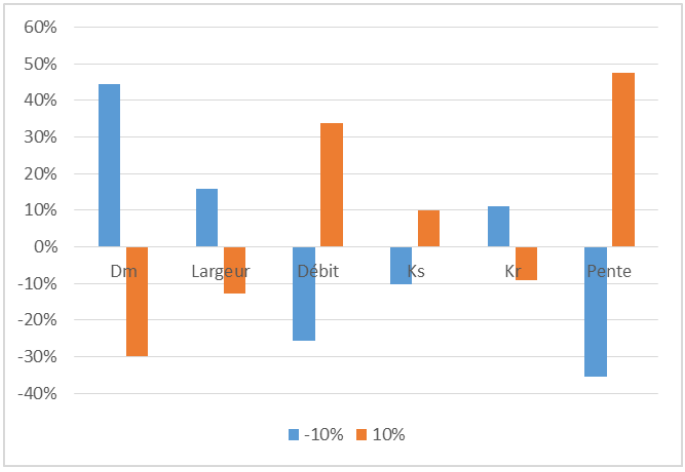
Comme décrit dans les paragraphes précédents, la détermination de la granulométrie est entachée d'une forte incertitude, notamment lors du choix du site de mesure. Ces mesures granulométriques ont comme objectif de servir de données d'entrée lors des calculs de transport solide. On a cherché à déterminer quel était l'impact de cette incertitude sur les calculs de transport solide sur la base de 2 formules : Recking et Lefort.

Pour deux rivières torrentielles différentes appelées A et B, il a été regardé l'impact de la diminution ou de l'augmentation de 10% de chacun des paramètres sur le volume global transporté pour l'ensemble de la chronique de débit.

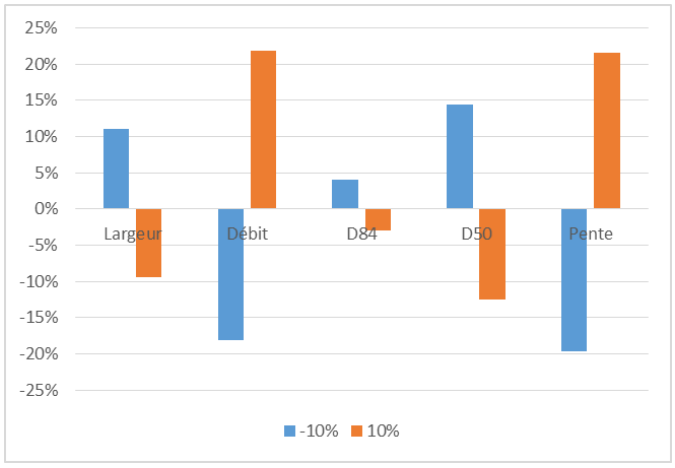
Les résultats sont les suivants :



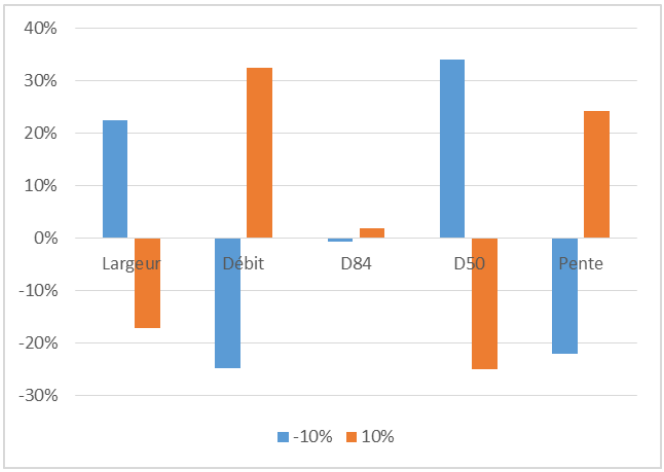
Site A et formule de Lefort.



Site B et formule de Lefort.



Site A et formule de Recking



Site B et formule de Recking

Figure 34. Ecart sur le volume de transport suivant la modification des paramètres d'entrée de + ou – 10 %

Pour la formule de Lefort, on peut noter que pour ces 2 cas d'étude, les principaux paramètres entrainant une incertitude sont : le Dm, le débit et la pente. En ordre 2, on trouve la largeur, le coefficient de Strickler (Ks) et le

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

coefficient de rugosité (Kr). Les diamètres D84 et D50 ont peu d'influence, et surtout il aurait été plus pertinent de regarder l'influence de la modification des rapports D84/D50 et D50/D16 qui sont utilisées dans la formule et qui représentent l'étendue granulométrique. Toutefois, dans un objectif de comparaison avec la formule de Recking, il a été choisi de regarder l'influence directe des diamètres.

Pour la formule de Recking, on peut noter que pour ces 2 cas d'étude, les principaux paramètres entrainant une incertitude sont : le D50, le débit et la pente. En ordre 2, on trouve la largeur, mais elle parait plus influente que dans la formule de Lefort. Le diamètre D84 a également plus d'influence que dans la formule de Lefort.

En synthèse, sur ces cas d'études et pour ces 2 formules, une modification de 10% de la granulométrie entraine une variation sur le volume moyen de transport de 20 à 45 %. Or il est clair que l'incertitude sur la granulométrie est généralement supérieure à 10%.

Il est donc conseillé de porter une attention particulière à la détermination de ce paramètre et de réaliser lors de chaque étude un calcul d'incertitude pour évaluer l'impact d'une variation de la granulométrie sur le résultat. Ce calcul d'incertitude sera basé sur le faisceau des courbes granulométriques récoltées, après élimination des valeurs paraissant aberrantes (site de mesure non représentatif).

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

4. BIBLIOGRAPHIE

[1]: Mosley M. P., Tindale D. S., 1985 Sediment variability and bed material sampling in gravel-bed rivers, https://doi.org/10.1002/esp.3290100506

[2]: Bray D.I., Church M., 1980, Armored versus paved gravel beds, J. Hydraul. Div. 106, 1937–1940,

[3]: Parrot E., 2015, Thèse, Analyse spatio-temporelle de la morphologie du chenal du Rhône du Léman à la Méditerranée, sous la direction d'Hervé Piegay. - Lyon : Université Jean Moulin (Lyon 3)

[4] : Mesures de terrain pour l'acquisition d'images subaquatiques sur le Rhône, rapport de mesure Mai 2015 version 3.1, OSR 3 (Observatoire des Sédiments du Rhône) ;
http://www.graie.org/osr/IMG/pdf/rapportimagerie_v3.5_drm_vf.pdf

[5]: Christian Mörtl & Al, GALET: A deep learning image segmentation model for drone-based grain size analysis of gravel bars, proceeding 39th IAHR World Congress 2022

[6]: Wolman, M. G. (1954). A method of sampling coarse river-bed material., American Geophysical Union, 35(6), 951

[7]: Cao H., 1985, Resistance hydraulique d'un lit à gravier mobile à pente raide; étude expérimentale, PhD thésis, 285 pp, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

[8]: MEUNIER & CARION, 1987, Etude méthodologique de la détermination des courbes granulométriques des lits des cours d'eau, Cemagref Grenoble

[9]: Recking A, 2013, Simple Method for Calculating Reach-Averaged Bed-Load Transport J. Hydraulic Engineering https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000653.

[10]: Lefort, 2018, Morphodynamique fluviale. Approche théorique et expérimentale, Presse des ponts

[11]: Oldrich Navratil, Protocole de mesure granulométrique de Wolman https://vod.canal-u.tv/vod/media/canalu/documents/unittv/morphologie.habitats.et.bioc.noses.physique.et.cologie.fluviale_18766/sem4_seq4_sedi

[12]: Collins, M., K. Lucey, B. Lambert, J. Kachmar, J. Turek, E. Hutchins, T. Purinton, and D. Neils. 2007. Stream Barrier Removal Monitoring Guide. Gulf of Maine Council on the Marine Environment. http://www.gulfofmaine.org/streambarrierremoval/Stream-Barrier-Removal-Monitoring-Guide-12-19-07.pdf

[13]: M. Detert & V. Weitbrecht, User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN, Advances in River Sediment Research – Fukuoka et al. (eds)© 2013 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00062-9

[14]: Church, M., McLean, D.G. and Wolcott, J.F. (1987). River bed gravels: sampling and analysis. In: C.R. Thorne, J.C. Bathurst and R.D. Hey (Editors) Sediment transport in gravel-bed rivers. John Wiley and Sons, Chichester, 43-79.

[15] : La gestion des rivières : transport solide et atterrissements. Guide méthodologique Agence de l'Eau n°65. 1999

[16] : Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière, ONEMA

[17] : Guide technique pour la mesure et la modélisation du transport solide, OFB INRAE, 2021

[18] : Torrents et rivières de montagne. Dynamique et aménagement. Recking, 2013

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

ANNEXE 1 : UTILISATION DU LOGICIEL IMAGEJ

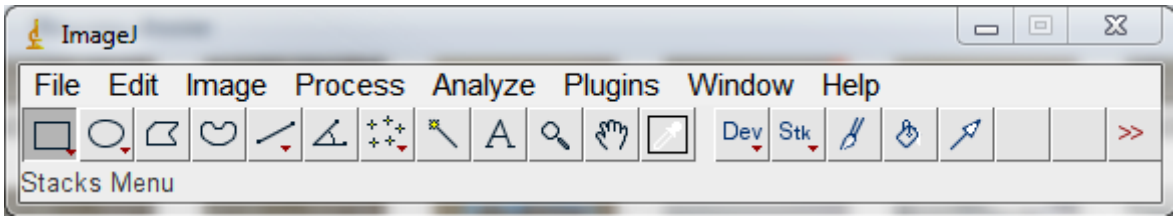
SITE OFFICIEL

https://imagej.nih.gov/ij/

MINI GUIDE

Cette méthode simple, permet de traiter un grand nombre de prise de vue en passant entre 5 et 10 min par prise de vue

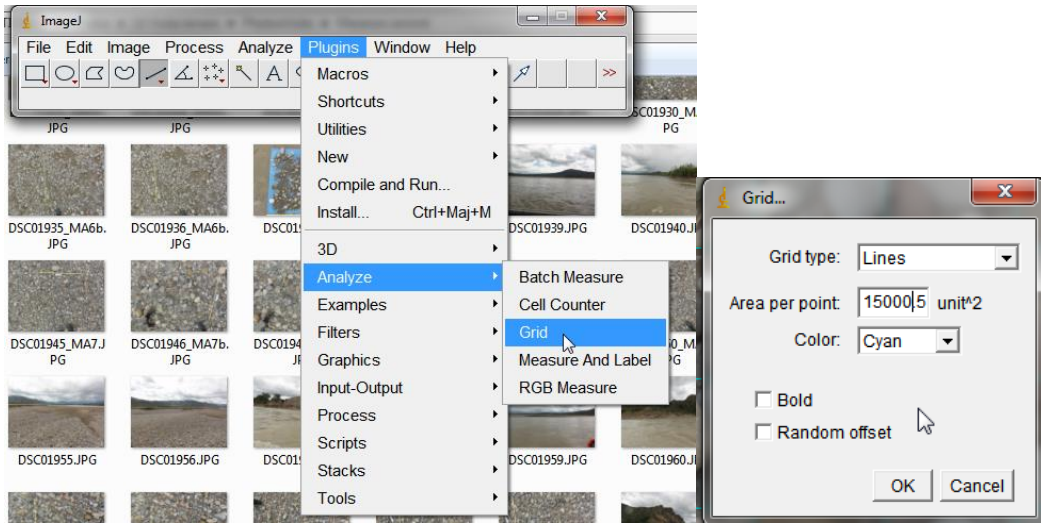
- Lancer le logiciel



- Ouvrir une image :

File -> open …

- Ajouter une grille :



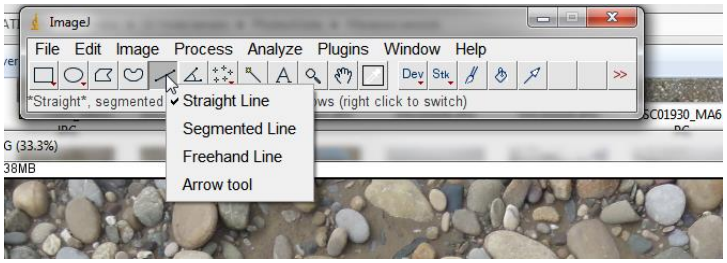
Ajuster la taille de la grille en augmentant ou diminuant *Area per point* puis Ok

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

- Ajuster l'échelle :

Se fait en deux étape : (i) mesure du mètre ; (ii) sauvegarde de l'échelle

(i) Mesure du mètre

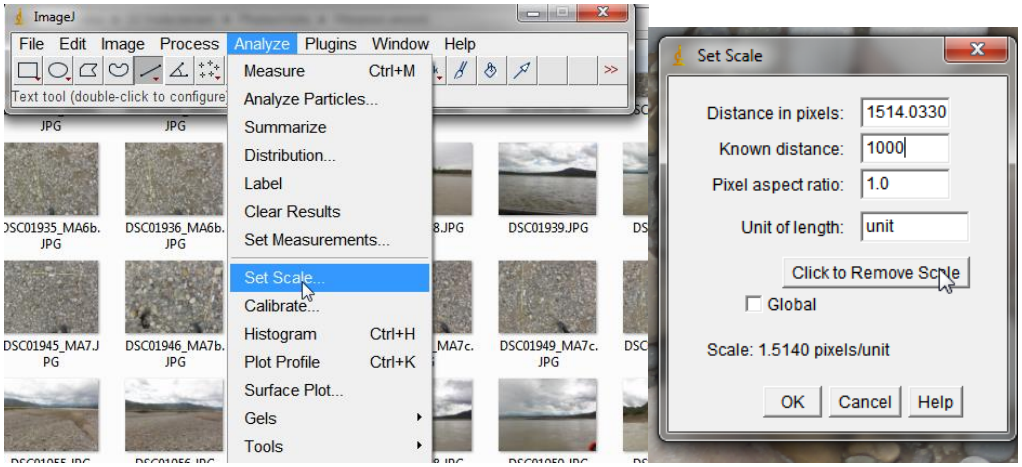


Il est possible de zoomer l'image en appuyant sur Ctrl + avant et arrière avec la molette de la souris.

Dans un premier temps faire la mesure du mètre : la mesure se fait en laissant appuyer le clic gauche de la souris : puis on déplace la souris et on lâche le clic gauche à l'extrémité du mètre.

(ii) Sauvegarde de l'échelle :

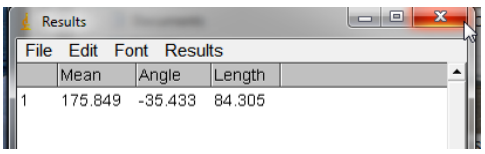
Analyse -> set scale



La distance en pixel est en mémoire : indiquer la longueur connue du mètre dans l'unité désirée (ici 1000 mm) puis cliquer sur *Click to remove scale* et ok.

- Prendre des mesures multiples :

Mesurer à la souris comme ci-dessus (maintenir le clic gauche) l'ensemble des particules situées aux intersections de grille. La mesure est en mémoire mais ne se copie pas dans le tableau récapitulatif. Il est nécessaire d'appuyer sur la touche m pour enregistrer la mesure. Si une erreur a été réalisée dans la mesure, il suffit donc de reprendre la mesure.



Quand l'ensemble des particules ont été mesurées, il est possible de faire un copié-collé du tableau dans excel ou de sauvergarder via File/Save as.

Copyright EDF – 2022. Tous droits réservés.
Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation