



# MASCARET v8.1

## Module de calcul de capacité de transport de sédiments MASCAPA

### NOTE DE PRINCIPE

Copyright © 2015 EDF - CEREMA

EDF - SA au capital de 924.433.331 euros - R.C.S. Paris B 552 081 317  
CEREMA - Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

# Résumé

Fudaa-Mascapa est le module de calcul de capacité de transport de l'outil numérique MASCARET [1], code de calcul d'hydraulique à surface libre monodimensionnel. Il calcule le débit solide par charriage ou transport total dans une rivière.

Le débit solide annuel en chaque section du cours d'eau peut être déduit, et des bilans sédimentaires par tronçon peuvent être calculés.

A noter que la structure du module, codé en Java, permet une évolution aisée vers des fonctionnalités plus complexes : prise en compte d'affluents, de singularités, voire de la gestion des fonds.

Ce rapport est la note de principe du code.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Objectifs du Code</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Principes Physiques</b>	<b>2</b>
2.1	Hypothèses générales . . . . .	2
2.2	Débit solide le long du bief . . . . .	3
2.2.1	Formule de Meyer-Peter & Müller (1948) . . . . .	3
2.2.2	Formule d'Engelund & Hansen (1967) . . . . .	3
2.2.3	Formule de Smart & Jäggi (1983) . . . . .	3
2.2.4	Formule de Van Rijn (1984) . . . . .	4
2.2.5	Formule de Rieckenmann (1990) . . . . .	4
2.2.6	Formule de Lefort (1991) . . . . .	4
2.2.7	Formule de Lefort (2007) . . . . .	5
2.2.8	Formule de Recking (2010) . . . . .	6
2.2.9	Formule de Recking (2011) . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Données d'entrée : Paramètres sédimentaires</b>	<b>7</b>
	<b>Références</b>	<b>8</b>

# Notations

## Notation

$D_i$	Diamètre majorant des diamètre de i% de la masse solide
$D_{50}$	Diamètre médian
$D_m$	Diamètre moyen arithmétique $= \sum d_i p_i$ ( $p_i$ est le pourcentage en masse de particules de diamètre $d_i$ )
$D^*$	Diamètre adimensionnel $= D_m \left[ \frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3}$
$F_r$	Nombre de Froude ( $F_r = \frac{U}{\sqrt{gH}}$ )
$H$	Profondeur de l'écoulement
$K$	Coefficient de Strickler de l'écoulement
$K_r$	Coefficient de Strickler pour les grains ( $K_r = \frac{21.1}{D_m^{1/6}}$ ) ou ( $K_r = \frac{26}{D_{90}^{1/6}}$ ) pour la formule de Meyer-Peter & Müller
$L$	Largeur du lit
$Q$	Débit
$q$	Débit unitaire ( $q = Q/L$ )
$Q_s$	Débit solide (ou capacité de transport solide) en $kg/s$
$q_s$	Débit solide unitaire ( $q_s = Q_s/L$ )
$R_h$	Rayon hydraulique
$Re$	Nombre de Reynolds ( $Re = UH/\nu$ )
$Re^*$	Nombre de Reynolds particulaire ( $Re^* = u^* D/\nu$ )
$S$	Pente d'énergie ou de fond
$s$	Densité relative ( $s = \rho_s/\rho$ )
$T$	Paramètre adimensionnel de transport solide $= \frac{u^{*2} - u_c^{*2}}{u_c^{*2}}$ [7]
$U$	Vitesse moyenne
$u^*$	Vitesse de frottement $= \sqrt{\tau/\rho} = \sqrt{gHS}$
$u_c^*$	Vitesse de frottement critique $= \sqrt{\tau_c/\rho}$
$\alpha$	Angle de frottement interne de sédiment
$\nu$	Viscosité cinématique de l'eau
$\Phi$	Transport solide adimensionnel $= \frac{14\theta^{2.5}}{[1+(\theta_m/\theta)^4]}$
$\rho$	Masse volumique d'eau
$\rho_s$	Masse volumique des sédiments
$\tau$	Contrainte moyenne au fond
$\tau_e$	Contrainte efficace
$\theta_m$	Seuil de mobilité pour la fraction grossière uniquement ( $D_{84}$ dans la formule de Recking 2011)
$\theta$	Nombre de Shields
$\theta_c$	Nombre de Shields critique pour le début du mouvement

Sauf indication contraire, le rayon hydraulique est  $R_h = (H \times L)/(L + 2H)$ , sous l'hypothèse d'une section d'écoulement rectangulaire. Cette hypothèse est réalisée pour homogénéiser les résultats : certaines formules ayant intégré cette hypothèse de façon explicite, d'autres de façon moins explicite.

# 1 Objectifs du Code

L'évolution des rivières à grandes échelles de temps et d'espace fait maintenant partie des préoccupations environnementales. Les développements humains et l'extraction des matériaux dans les rivières mènent à la transformation des cours d'eaux naturels. La volonté de limiter l'impact de l'évolution morphologique des rivières aménagées sur l'environnement ou même sur les activités humaines pose le problème de la représentation de ces évolutions sur le long terme.

Il y a donc un besoin d'une meilleure compréhension de processus hydrosédimentaires qui conditionnent l'évolution morphologique des cours d'eau.

La modélisation à grande échelle de la dynamique hydrosédimentaire peut servir d'appui à la définition d'un plan de gestion durable et rationnel du système fluvial, ainsi que prévoir si besoin des travaux de restauration écologique. L'un des objectifs du module Fudaa-Mascapa, intégré dans le logiciel MASCARET du LNHE, EDF, R&D, est ainsi de prédire l'évolution d'un cours d'eau sur le long terme (année après année) au travers d'une approche simplifiée basée sur les bilans sédimentaires.

Fudaa-Mascapa est capable de calculer, en chaque section du cours d'eau, les taux annuels de transport solide selon différentes formules empiriques. Des bilans sédimentaires par tronçon peuvent être déduits afin d'appréhender les tendances d'évolution du lit.

La structure du module, codé en Java, permet une évolution aisée vers des fonctionnalités plus complexes : prise en compte d'affluents, de singularités voire de la déformation des fonds.

Ce document constitue la note de principe de Fudaa-Mascapa.

## 2 Principes Physiques

### 2.1 Hypothèses générales

Le module calcule la capacité de transport solide d'un écoulement le long d'un bief. Le bief est modélisé selon les hypothèses du code de calcul MASCARET. La géométrie est décrite par des profils en travers, entre lesquels des sections de calcul sont interpolées. L'utilisation de MASCARET permet d'obtenir au droit de chaque section la surface mouillée, la vitesse, le périmètre mouillé et le tirant d'eau pour chacun des débits simulés.

Les résultats des calculs hydrauliques réalisés par MASCARET sur le bief sont des données d'entrée de MASCAPA. On suppose donc que les variables hydrauliques sont connues de même que la rugosité totale du lit (exprimée par le coefficient de Strickler dans MASCARET). Ceux-ci ne sont pas modifiés par le transport solide pendant la simulation.

Les unités du transport solide donné par chacune des formulations implémentées sont en  $m^3/s$ . Cependant MASCAPA fournit le débit solide en  $kg/s$ . Pour cela il multiplie le débit solide volumétrique par  $\rho_s$ .

Différentes formules issues de la littérature sont implémentées dans Fudaa-Mascapa. Elles s'appuient sur la notion d'une contrainte ou d'un débit seuil, responsable du début de transport solide. La contrainte hydraulique s'exprime par :

$$\tau_h = \rho g R_h S$$

La contrainte adimensionnelle (ou nombre de Shields) est donnée par la relation :

$$\theta = \frac{\tau}{\rho g (s-1)D} = \frac{R_h S}{(s-1)D}$$

où  $D$  est égal à  $D_{50}$  ou  $D_m$  selon les formules.

La contrainte efficace est liée à la rugosité de grain, selon la relation suivante :

$$\tau_e = \tau_h \cdot \left( \frac{K}{K_r} \right)^{3/2}$$

## 2.2 Débit solide le long du bief

Le logiciel se limite au transport de sédiments granulaires par charriage ou total (charriage et suspension).

Les formules prises en compte sont les suivantes :

- Formule de Meyer-Peter & Müller (1948)
- Formule d'Engelund & Hansen (1967)
- Formule de Smart & Jäggi (1983)
- Formule de Van Rijn (1984)
- Formule de Rieckenmann (1990)
- Formules de Lefort (1991 et 2007)
- Formules de Recking (2010 et 2011)

### 2.2.1 Formule de Meyer-Peter & Müller (1948)

La formule de Meyer-Peter & Müller (1948) est issue d'expériences en laboratoires. Elle est adaptée aux cas de transport par charriage soit pour des contraintes hydrodynamiques adimensionnelles  $\theta$  inférieures à 0.3. Elle a été calée pour des diamètres s'étendant de 0.4 à 29 mm et des pentes de fond de 0.4 à 2.4 %. La formule utilise le diamètre  $D_m$ .

Elle fait intervenir les deux paramètres suivants :

- la contrainte adimensionnelle de début d'entraînement  $\theta_c$ , qui est égale à 0.047, et
- la contrainte efficace  $\theta_{eff}$  qui est donnée par :  $\left(\frac{K}{K_r}\right)^{3/2} \theta$  avec  $K_r = \frac{26}{D_{90}^{1/6}}$

Si  $\theta_{eff} < \theta_c$ , le débit solide  $Q_s$  (en  $m^3/s$ ) est égal à 0.

Sinon il est donné par la formule suivante :

$$Q_s = 8L\sqrt{g(s-1)D_m^3}(\theta_{eff} - \theta_c)^{3/2}$$

### 2.2.2 Formule d'Engelund & Hansen (1967)

La formule d'Engelund & Hansen (1967) s'appuie sur des expériences en laboratoire. Elle s'applique à des grains de diamètre compris entre 0.15 et 1.6 mm et pour des pentes de fond faibles. La formule utilise le diamètre  $D_{50}$  et donne le débit solide total (en  $m^3/s$ ) sous la forme :

$$Q_s = L \frac{0.1}{f} \sqrt{g(s-1)D_{50}^3} \theta^{5/2}$$

avec :

$$f = \frac{2gR_h S}{U^2}$$

### 2.2.3 Formule de Smart & Jäggi (1983)

La formule de Smart & Jäggi (1983) s'appuie sur des expériences en laboratoire [6]. Elle s'applique à des grains de diamètre compris entre 2 et 10.5 mm et pour des pentes de fond comprises entre 3 et 20 %. La formule utilise les trois diamètres  $D_m$ ,  $D_{90}$  et  $D_{30}$ .

Le débit solide  $Q_s$  (en  $m^3/s$ ) est donné par la formule suivante :

$$Q_s = 4Q \left( \frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.2} \frac{S^{1.6}}{(s-1)} \left( 1 - \frac{\theta_c}{\theta} \right)$$

où la contrainte critique adimensionnel  $\theta_c$  est donnée par :

$$\theta_c = 0.05 \cos(\arctan(S)) \left( 1 - \frac{S}{\tan \varphi} \right)$$

avec  $\varphi = 35^\circ$  = angle de frottement interne du matériau.

### 2.2.4 Formule de Van Rijn (1984)

La formule de Van Rijn (1984) est une méthode semi-empirique validée pour les sables [7]. Elle s'applique à des grains de diamètre compris entre 0.2 et 2 mm. La formule utilise les deux diamètres  $D_{50}$  et  $D_{90}$ .

Le débit solide  $Q_s$  (en  $m^3/s$ ) est donné sous la forme :

$$Q_s = 0.053L\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}\frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}}$$

et fait intervenir les paramètres suivants :

- le paramètre  $T$

$$T = \frac{u^{*2} - u_c^{*2}}{u_c^{*2}}$$

- le paramètre  $u^*$

$$u^* = \sqrt{g} \frac{U}{18 \log \left( \frac{4R_h}{D_{90}} \right)}$$

- le paramètre  $u_c^{*2}$ , calculé via la courbe de Shields donnée par la forme suivante :

$$u_c^{*2} = g(s-1) \cdot D_{50} \cdot [\alpha \cdot D_*^\beta] = g(s-1) \cdot D_{50} \cdot \theta$$

avec

$$D_* = D_{50} \left[ \frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3}$$

$D_*$	$\alpha$	$\beta$
$D_* < 4$	0.24	-1
$4 < D_* < 10$	0.14	-0.64
$10 < D_* < 20$	0.04	0.1
$20 < D_* < 150$	0.013	0.29
$150 < D_*$	0.055	0

### 2.2.5 Formule de Rieckenmann (1990)

La formule de Rieckenmann (1990) s'appuie sur des expériences en laboratoire. Elle s'applique à des grains de diamètre compris entre 0.4 et 10 mm et pour des pentes de fond comprises entre 0.0004 et 0.2 %. La formule utilise les trois diamètres  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  et  $D_{30}$ .

Le débit solide  $Q_s$  (en  $m^3/s$ ) pour les pentes de fond  $S < 0.03\%$  est sous la forme :

$$Q_s = 1.5L(q - q_c)S^{1.5}$$

Pour  $S > 0.03\%$ ,  $Q_s$  prend la forme :

$$Q_s = L \frac{12.6}{(s-1)^{1.6}} \left( \frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.2} (q - q_c) S^2$$

avec le débit de début d'entraînement  $Q_c$  (en  $m^3/s$ ) :

$$Q_c = 0.065(s-1)^{5/3} g^{0.5} D_{50}^{1.5} S^{-1.12}$$

### 2.2.6 Formule de Lefort (1991)

La formule de Lefort (1991) donne le débit solide sans faire intervenir la largeur de la rivière.

L'utilisation de la formule Lefort (1991), formule calée sur les essais de laboratoire de Meyer-Peter & Müller et plus tard de Smart & Jäggi, se limite à des pentes de 0.25 à 2.4 %. La formule utilise les trois diamètres  $D_m$ ,  $D_{90}$  et  $D_{30}$ . Elle donne le débit solide apparent (tenant compte des vides) et considère un ratio largeur-hauteur du lit  $L/h = 18$ .

La formule originale de Lefort est (en  $m^3/s$ ) :

$$Q_{s,app} = 4.45Q \left( \frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.2} \frac{S^{1.5}}{(s-1)} \left[ 1 - \left( \frac{Q_c}{Q} \right)^{0.375} \right]$$

Le débit solide est relié au débit solide apparent par  $Q_s = 0.755 \cdot Q_{s,app}$  (calculé en prenant la densité apparente égale à 2 et une densité des matériaux égale à 2.65), soit :

$$Q_s = 3.36Q \left( \frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.2} \frac{S^{1.5}}{(s-1)} \left[ 1 - \left( \frac{Q_c}{Q} \right)^{0.375} \right]$$

avec le débit de début d'entraînement  $Q_c$  (en  $m^3/s$ ) :

$$Q_c = 0.0776 \sqrt{g D_m^5} \frac{(s-1)^{8/3}}{S^{13.6}} (1 - 1.2S)^{8/3}$$

### 2.2.7 Formule de Lefort (2007)

La formule Lefort (2007) s'appuie sur des expériences en laboratoire. Elle s'applique à des grains de diamètre compris entre 0.1 et 55 mm et pour des pentes de fond allant jusqu'à 20 %. La formule utilise les diamètres  $D_m$ ,  $D_{90}$  et  $D_{30}$ . Le débit solide calculé inclut le charriage et la suspension.

Le débit solide  $Q_s$  (en  $m^3/s$ ) est donné par :

$$Q_s = \frac{C_p \cdot Q}{s \cdot 10^6}$$

où la concentration  $C_p$  [2] est égale à :

$$C_p = 3.176 \cdot 10^6 \cdot cor \cdot \left( \frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.21} \frac{s}{(s-1)^{1.38}} S^m [G(Q^*)]^Z$$

La concentration  $C_p$  fait intervenir les paramètres  $cor$ ,  $m$ ,  $G(Q^*)$ , et  $Z$  :

- $cor$  est un coefficient de correction qui tient compte de l'effet des dunes.

$$cor = 1 - 9e^{(-0.08 \cdot Q^* (\frac{K}{Kr})^{2.4})} \text{ si } \frac{K}{Kr} < 0.6 ; \text{ sinon } cor = 1$$

- l'exposant  $m$  :  $m = 1.887 + 0.09 \log(S)$

- le calcul de la fonction  $G(Q^*)$  nécessite le calcul du débit de mise en mouvement  $Q_c$  (en  $m^3/s$ ), donné sous la forme suivante :

$$Q_c = \sqrt{g D_m^5} C_{(D_m^*)} (s-1)^{5/3} \left( \frac{L}{D_m} \right)^{2/3} \left( \frac{K}{Kr} \right)^{-0.42} S^{-n}$$

avec  $n = 1.725 + 0.09 \log(S)$

$C_{(D_m^*)}$  est donné par :

$$C_{(D_m^*)} = 0.0269 \text{ si } D_m < 0.008 \\ \text{sinon } C_{(D_m^*)} = 0.0269 + \frac{0.532}{(1.1 + D_m^*)} - 0.0589 \exp^{-D_m^*/60}$$

Finalement  $G(Q^*)$  est donné par :

$$G(Q^*) = 3.88 \left[ 1 - \left( \frac{0.75}{Q^*} \right)^{0.25} \right]^{5/3} \text{ si } Q^* > 2.5$$

$$G(Q^*) = 0.4 \left[ \frac{Q^*}{2.5} \right]^{6.25(1-0.37Q^*)} \text{ si } Q^* < 2.5$$

avec  $Q^* = \frac{Q}{Q_c}$



– l'exposant  $Z$  est donné sous la forme :

$$Z = 0.78 + \frac{1.53Re^{0.14}}{D_m^{*0.78}}$$

avec

$$Rh = \frac{hL}{L + 2h}; Re = \frac{QR_h}{Lh\nu}$$

### 2.2.8 Formule de Recking (2010)

La formule de Recking (2010) s'appuie sur des expériences en laboratoire et des mesures en terrain. Elle s'applique à des grains de diamètre compris entre 0.4 et 220 mm et pour des pentes de fond comprises entre 0.001 et 7 %. La formule utilise les deux diamètres  $D_{50}$  et  $D_{84}$ .

Dans cette formule, le diamètre  $D$  est défini par  $3.5D_{84}$  pour les rivières à graviers ( $D_{50} > 0.002mm$ ) et par  $D_{50}$  pour les rivières à sable.

Le rayon hydraulique  $R_{hg}$  (utilisé pour le calcul de  $\theta$ ) est donné par l'équation suivante :

$$\frac{Q \cdot (L - 2R_{hg})}{R_{hg} \cdot L^2 \sqrt{gR_{hg}S}} = 6.25 + 5.75 \cdot \log\left(\frac{R_{hg}}{D}\right)$$

Le débit solide  $Q_s$  (en  $m^3/s$ ) est donné par :

Si  $\theta_{84} < \lambda$

$$Q_s = L \cdot 0.0005 \sqrt{g(s-1)D_{84}^3} \left(\frac{D_{84}}{D_{50}}\right)^{-18\sqrt{S}} \left(\frac{\theta_{84}}{\theta_{c84}}\right)^{6.5}$$

Si  $\theta_{84} > \lambda$

$$Q_s = L \cdot 14 \sqrt{g(s-1)D_{84}^3} \theta_{84}^{2.45}$$

avec les paramètres adimensionnels  $\theta_{c84}$ ,  $\theta_{84}$ , et  $\lambda$  donnés par les équations suivantes :

$$\theta_{c84} = (1.32S + 0.037) \left(\frac{D_{84}}{D_{50}}\right)^{-0.93}$$

$$\theta_{84} = \frac{R_{hg} \cdot S}{(s-1)D_{84}}$$

$$\lambda = 12.53 \left(\frac{D_{84}}{D_{50}}\right)^{4.445\sqrt{S}} \theta_{c84}^{1.605}$$

### 2.2.9 Formule de Recking (2011)

La formule Recking (2011) s'appuie sur des expériences et des mesures en terrain. Elle s'applique à des grains de diamètre compris entre 0.5 et 600 mm et pour des pentes de fond comprises entre 0.01 et 7 % [4]. La formule utilise les deux diamètres  $D_{50}$  et  $D_{84}$ .

La formule donne le débit solide  $Q_s$  (en  $m^3/s$ ) sous la forme :

$$Q_s = L \cdot \Phi \sqrt{g(s-1)D_{84}^3}$$

où le paramètre de transport solide adimensionnel  $\Phi$  est défini par :

$$\Phi = \frac{14\theta^{2.5}}{[1 + (\theta_m/\theta)^4]}$$

avec  $\theta_m$  le seuil de mobilité pour uniquement la fraction grossière donné par :

$$\theta_m = (5S + 0.06) \left(\frac{D_{84}}{D_{50}}\right)^{4.4\sqrt{S}-1.5} \quad \text{pour les graviers } (D_{50} > 0.002) \text{ et } \theta_m = 0.045 \text{ pour les sables.}$$

Il est possible de calculer  $\theta$  soit à l'aide du rayon hydraulique  $R_{hg}$  de façon itérative comme dans la formule de Recking (2010) ou d'utiliser la formule ci-dessous [5].

$$\theta = \frac{R_h \cdot S}{(s-1) \cdot D} = \frac{S}{(s-1) \cdot D_{84} \cdot [2/L + \alpha(gS)^b \cdot (Q/L)^c \cdot D_{84}^d]}$$

avec

	$\alpha$	$b$	$c$	$d$
$(Q/L)/\sqrt{gSD_{84}^3} > 100$	3.20	0.30	-0.61	-0.09
$(Q/L)/\sqrt{gSD_{84}^3} < 100$	1.60	0.23	-0.46	-0.32

### 3 Données d'entrée : Paramètres sédimentaires

Fudaa-Mascapa est intégré dans l'onglet “*Sédiment*” du logiciel MASCARET.

La figure 1 montre l'interface d'édition des paramètres de sédimentologie du module Fudaa-Mascapa. Il y a deux entrées : paramètres et résultats. Les deux entrées sont activées en cochant la case “*Sédimentologie active*”, en haut à gauche de l'interface.

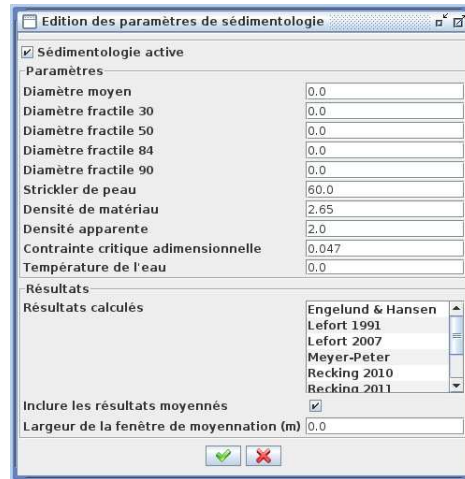


FIGURE 1 – *Edition des paramètres de sédimentologie du module Fudaa-Mascapa.*

En les activant, l'utilisateur peut définir, dans la première section “*Paramètres*”, les valeurs sédimentologiques tels que le diamètre moyen, le diamètre fractile  $D_{30}$ , le Strickler de peau, la densité de matériau, etc. Les valeurs indiquées sur les cases à côté de chaque paramètre sont des valeurs par défaut. Elles doivent donc être modifiées par l'utilisateur en fonction du cas d'étude. Par exemple, la valeur par défaut de Strickler de peau est de  $60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; elle est calculée pour un diamètre de grain de 1 mm avec la formule de Strickler.

Dans la deuxième entrée “*Résultats*”, l'utilisateur choisit la formule pour calculer le débit solide. Il existe neuf formules qui peuvent être utilisées pour le même calcul.

Enfin, pour tenir compte du lissage des fonds et donc des fluctuations des capacités de transport solide, le calcul peut être fait sur une moyenne mobile de longueur fixée. Il est alors nécessaire d'activer la case à cocher “*Inclure les résultats moyennés*” en bas de l'interface, en précisant la largeur de moyennation.

## Références

- [1] GOUTAL, N., ZAOUI, F., BESNARD, A. 2007. *Note de principe système mascaret v7p0*. Technical Report EDF-R&D H – P73 – 2007 – 0515
- [2] LEFORT, P. 2007. Une formule semi-empirique pour le calcul du transport solide des rivières et torrents, paper presented at *Transport solides et gestion des sédiments en milieux naturels et urbains*, 28-29 novembre, Lyon, SHF pp. 143 – 149
- [3] RECKING, A. 2010. *Evaluation des formules de transport solide en rivière avec prise en compte de l'échelle temporelle*. Rapport PGRN p. 30
- [4] RECKING, A., RICHARD, D., DEGOUTTE, G. 2013. *Torrents et rivières de montagne dynamique et aménagement*. Éditions Quae, France
- [5] RECKING, A. 2012. *Cours d'hydraulique et de transport solide*. Master II, Paris 6
- [6] SMART, G.M., JÄGGI, M.N. 1983. *Sedimenttransport in steilen Gerinnen*. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zurich p. 91
- [7] VAN RIJN, L.C. 1993. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua Publications, Amsterdam