HAL
open science

Rapport Final Action 2.5: Evaluation de la vulnérabilité des barrages vis-à-vis des aléas torrentiels

Guillaume Piton, Alain Recking, Davide Patrocco, Paolo Ropele, Franco Colle, Jules Le Guern, Ismail Rifai

To cite this version:

Guillaume Piton, Alain Recking, Davide Patrocco, Paolo Ropele, Franco Colle, et al.. Rapport Final Action 2.5: Evaluation de la vulnérabilité des barrages vis-à-vis des aléas torrentiels. [Rapport de recherche] IRSTEA - Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture, 2 Rue de la Papeterie, 38402 Saint-Martin-d'Hères; Region Piemonte; Region Autonoma Val d'Aosta. 2015. hal-02369775

HAL Id: hal-02369775

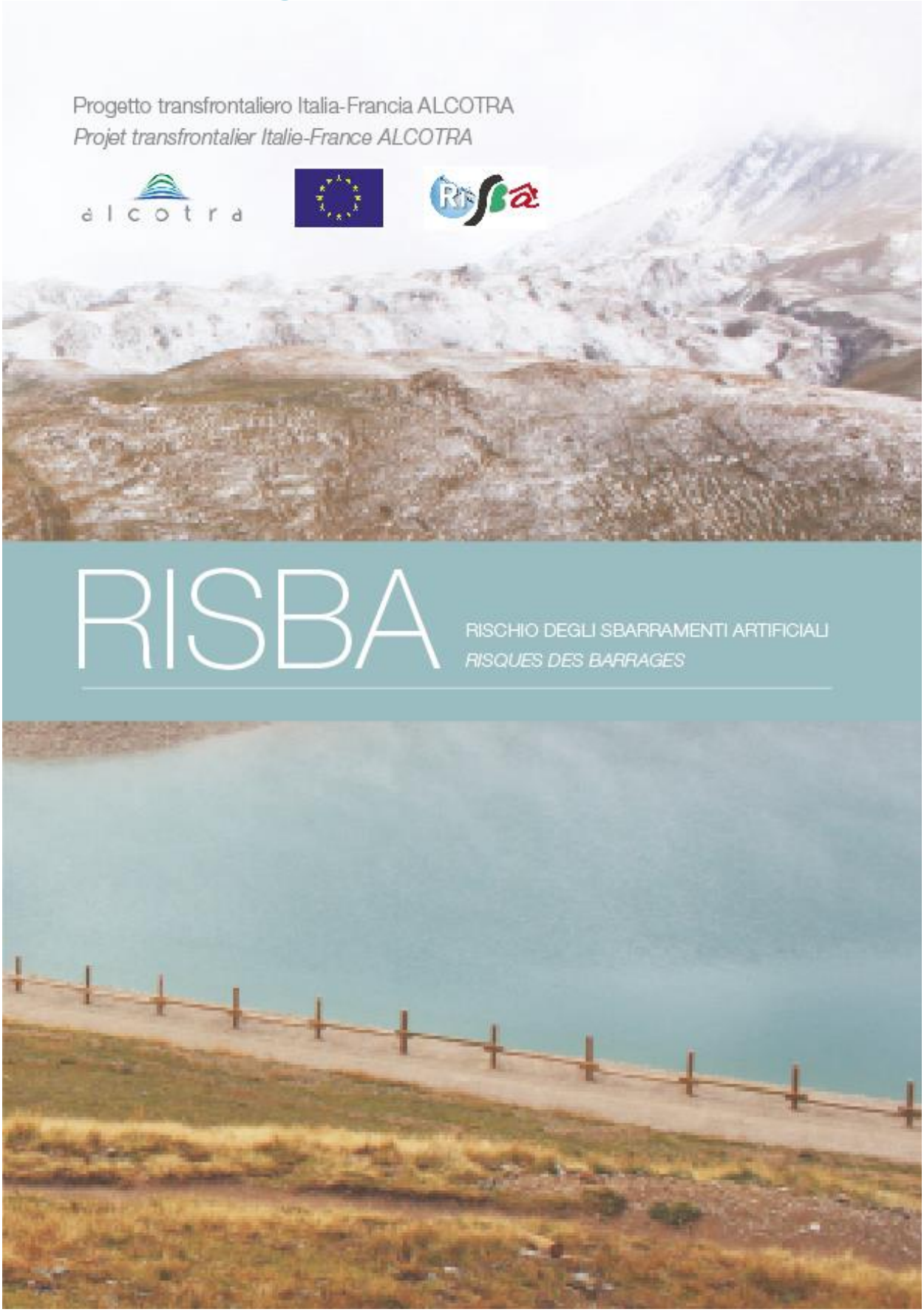
https://hal.science/hal-02369775v1

Submitted on 19 Nov 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RAPPORT FINAL Action 2.5 Evaluation de la vulnérabilité des barrages vis-à-vis des aléas torrentiels



Action 2.5 Evaluation de la vulnérabilité des barrages vis-à-vis des aléas torrentiels

PITON Guillaume[1], RECKING Alain[1],
PATROCCO Davide[2], ROPELE Paolo[3], COLLE Franco[3],
LEGUERN Jules[1], RIFAÏ Ismail[1]

1. Contexte

1.1. Implantation des ouvrages

Les retenues collinaires et d'altitude sont pour certaines d'entre elles construites directement dans le lit des torrents. Ainsi des prises d'eau de montagne (Blanchet 1975), par exemple celle du Mont d'Arbois en France, et certains barrages de montagne (Bouvard 2004), par exemple le barrage de Brusson en Italie, montrent des problèmes d'engravement tel qu'illustré figure suviante.

Figure 1: Dépôts massifs dans la retenue de Fond de France sur le Bréda, crue de 2005 (Isère, France) photo © IRMA (Gominet 2010)

En parallèle, les problèmes d'érosions, d'embâclement et d'inondation des installations restent une menace permanente pour les structures construites dans le voisinage des torrents tel qu'illustré figure suivante.

[1] Irstea – Equipe Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches (ETNA) 2 rue de la Papeterie, 38 402 ST-MARTIN-D'HÈRES FRANCE
[2] Regione Piemonte, Direzione Regionale Opere Pubbliche, Difesa del Suolo, Economia Montana e Foreste, Settore Pianificazione Difesa del Suolo, Difesa Assetto Idrogeologico e Dighe, Via Petrarca, 44 - 10126 TORINO ITALIA
[3] Regione Autonoma Valle d'Aosta, Dipartimento programmazione, difesa del suolo e risorse idriche, Struttura organizzativa opere idrauliche, via Promis, 2/a 11100 AOSTA ITALIA

Figure 2: Crue torrentielle du Bréda en 2005 engendrant des dépôts sédimentaires, embâcles de flottants et inondations d'installation hydrauliques (Isère, France) photo © IRMA (Gominet 2010)

1.2. Aléas torrentiels

Les deux caractéristiques principales des torrents et des aléas liés à ces cours d'eau sont : (i) la rapidité et la faible durée des crues qu'ils subissent (entre quelques dizaines de minutes et quelques heures) (Fabre 1797) , et (ii) les volumes très importants de sédiments érodés, transportés et déposés (Armanini et al. 1991).

Les aléas torrentiels doivent être abordés à deux échelles : (i) à l'échelle du bassin versant, il faut estimer l'hydrologie du torrent et les potentiels de production sédimentaire afin de caractériser l'intensité de la crue pouvant atteindre le site et l'ouvrage étudié, et (ii) à l'échelle du tronçon longeant ou traversant le site et l'ouvrage, il faut estimer les risques d'érosions, d'affouillements, de dépôts, etc.

1.3. Hydrologie torrentielle

L'hydrologie torrentielle est une science complexe : la rapidité des phénomènes et le manque de données sur les pluies en montagne aussi bien que sur les débits dans ces cours d'eau rend difficile les analyses. Le travail de (Mathys et al. 2013) a récemment rassemblé les méthodes spécialement destinées aux études hydrologiques des bassins versants de montagne.

1.4. Erosion de sols et limitation des apports sédimentaires à l'échelle du bassin versant

L'érosion des sols et la limitation des apports sédimentaires est une préoccupation qui est étudiée sérieusement depuis le milieu du 19ème siècle dans les Alpes (Demontzey 1882; Duile 1841; Gras 1857; Surell 1870), ces études ayant été inspirées par des travaux pionniers réalisés en Italie et en France (Fabre 1797; Frisi 1770). Les préoccupations premières des ingénieurs s'intéressant aux risques torrentiels étaient la protection des zones agricoles, des zones habitées et des voies de transport (routes et voies ferrées). La protection des ouvrages hydrauliques est arrivée plus tard avec le développement de ces derniers dans les montagnes (Blanchet 1975).

Les paragraphes suivants rappellent rapidement les moyens d'action dont disposent les gestionnaires pour la gestion des risques sédimentaires. L'ensemble de ces moyens sont encore utilisés à travers le monde pour protéger les retenues des risques de sédimentation (Kostadinov et al. 2008).

1.5. Techniques de corrections torrentielles

1.5.1. Plantation et génie biologique

Les premiers ingénieurs ayant étudié la problématique de la correction torrentielle, dès le 19ème siècle, ont souligné l'importance que la végétation a sur la stabilisation des versants. Les Alpes françaises avaient subi des opérations de déboisement excessives et les risques torrentiels avaient augmenté entre le 18ème et le 19ème siècle, en partie du fait de la disparition partielle des forêts et de leur effet stabilisateur sur les pentes (Demontzey 1882). À l'époque, les sociétés montagnardes étaient encore largement agricoles et une main d'œuvre nombreuse était présente dans les vallées. L'État français a alors amorcé de grandes campagnes d'achat des terrains couvrant les bassins versants torrentiels et a engagé des plans de plantation des hauts bassins versants. Ces mesures ont été associées à des réseaux de drainages visant à améliorer la stabilisation des versants. L'objectif était alors de stabiliser les zones de production sédimentaire.

Les problèmes de déforestation du côté italien des Alpes étaient similaires bien que les analyses historiques laissent entendre que la déforestion côté Italien était légèrement moins marquée que côté français (Fesquet 1997). La figure suivante illustre le taux de boisement (surface boisées/surface totale) des différentes régions d'Italie et de France au lancement des politiques de reboisement.

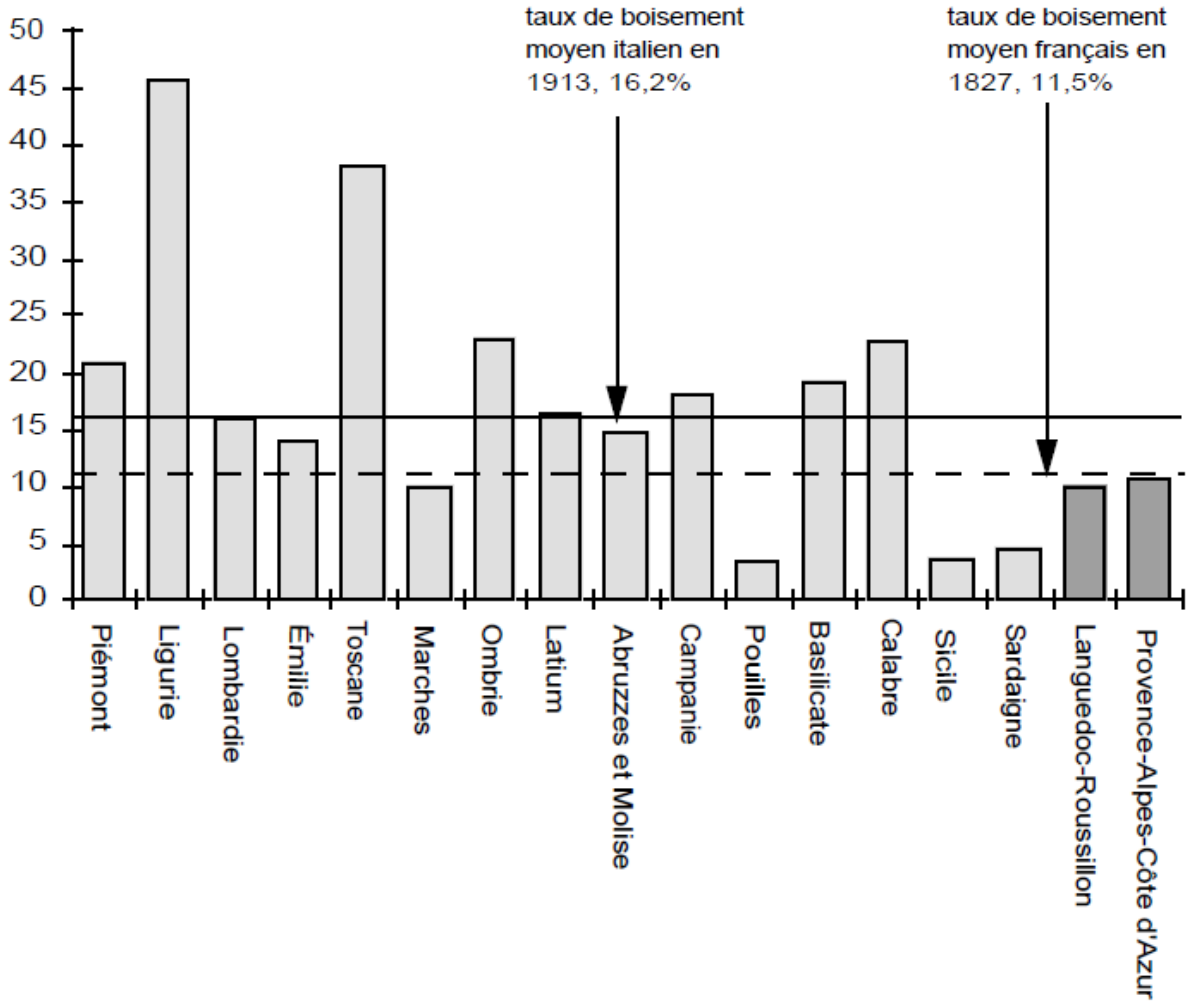


Figure 3: Le taux de boisement des régions méditerranéennes italiennes et françaises au moment, respectif, de plus faible extension du couvert forestier. En 1913 en Italie et 1827 en France (Fesquet 1997).

1.5.2. Stabilisation des chenaux dans les hauts bassins

En parallèle des opérations de plantations, des travaux de confortement des lits des torrents étaient engagés via la construction de barrages (Figure suivante, croquis A à D). Le côté italien des Alpes a, à la même époque, engagé des travaux de création de barrages du même type (Marchi & Cavalli 2007; Rinaldi et al. 2011).

L'érosion sévissant dans un certain nombre de bassins versants est partiellement contrôlée par l'évolution du niveau du pied des pentes : si le torrent a régulièrement tendance à éroder le pied des pentes, ces dernières sont alors déstabilisées et les processus d'alimentation sédimentaire par ravinement, glissement de terrain... sont plus réguliers. Une forte activité torrentielle se traduit par :

- la déstabilisation des versants amont par érosion des pieds de versants, et
- le transfert de volumes importants de sédiments vers la zone aval.

Le premier phénomène limitait l'efficacité des plantations amont, le second est la conséquence du premier et le problème contre lequel il s'agit de lutter. Des barrages ont donc été construits pour stabiliser le niveau et le tracé en plan du lit du torrent, limiter les déstabilisations de versants en reboisement et stopper les incisions de long terme des torrents (Bernard 1927; Demontzey 1882). Ces ouvrages ont des effets secondaires de rétention totale de sédiment lors de leur remplissage initial et de modulation du transport solide par rétention temporaire des sédiments au gré des respirations torrentielles (variations transitoires du stock sédimentaire du lit se manifestant par des changements dans la cote du fond et la propagation de vagues sédimentaires dans le lit du cours d'eau) (Gras 1850).

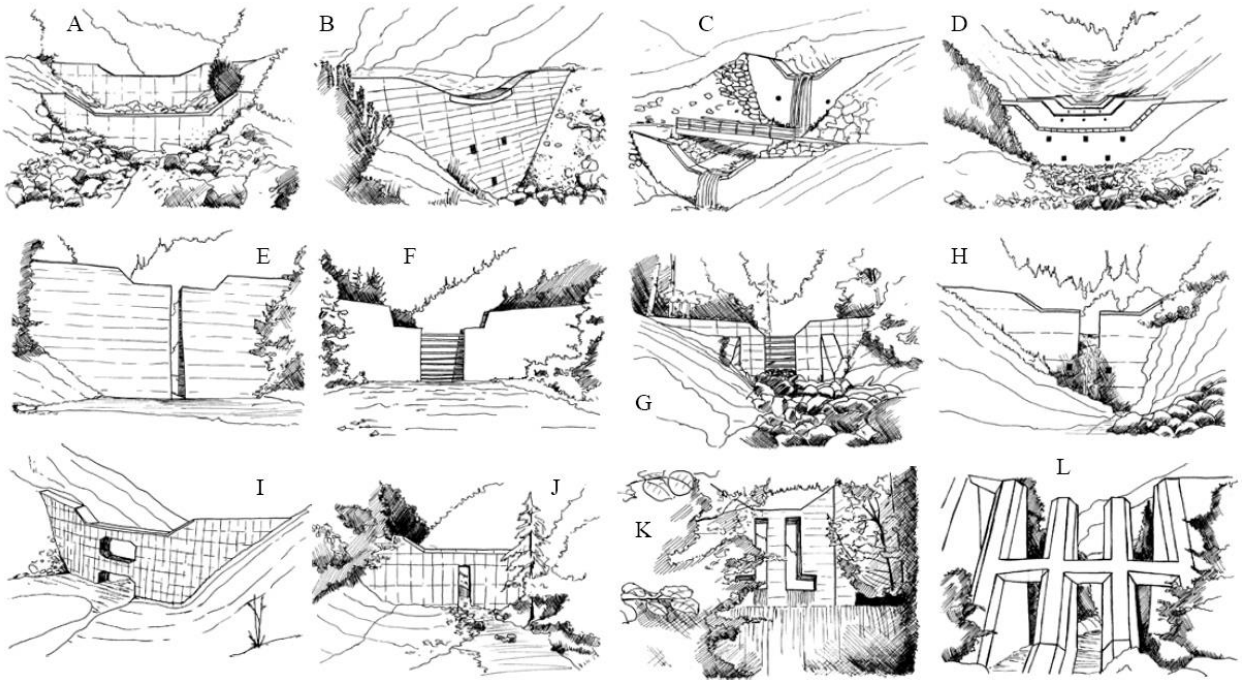


Figure 4 : Croquis de formes de barrages de corrections torrentielles (A-D) et barrages filtrants (E-L) (Suda et al. 2009)

Un travail d'analyse des archives a été réalisé dans le cadre de Risba afin de remettre en lumière les objectifs et fonctions des barrages de corrections, ceux-ci sont divers en fonction de la zone d'implantation des barrages, de leurs formes et positions vis-à-vis des autres. Ce travail est en cours de finalisation (Piton et al. n.d.)

1.5.3. Piégeage des sédiments avant l'arrivée dans la retenue

Au droit des zones de dépôt naturel, des ouvrages de piégeage des sédiments équipés de barrages filtrants (plages de dépôts) peuvent être implantés (Figure 4 E-L). De tels ouvrages ont été créés en parallèle des barrages de correction et des plantations mais n'étaient utilisés qu'en dernier ressort : les moyens de curage mécanique étaient très limités au 19ème siècle qui devaient alors être réalisés à la main. Le développement des engins de terrassement après la seconde guerre mondiale a permis de faciliter les curages, celui du béton armé a permis la création de structures plus résistantes et pourtant équipées d'ouverture (Van Effenterre 1982). Les barrages filtrants qui avaient été testés dès les débuts des travaux de Restauration des Terrains en Montagnes (Demontzey 1882) et les ouvrages de piégeage se sont alors pleinement développés entre les années 1970 et 1990 (Gruffaz 1996).

L'exode rural a rendu cette solution encore plus intéressante : la main d'œuvre montagnarde en mesure d'entretenir les barrages de correction et de continuer l'effort de végétalisation des hauts bassins diminuait (Van Effenterre 1982).

1.5.4. Chenalisations

En complément des techniques de diminution des apports solides à la source, de la stabilisation des lits torrentiels dans les zones de production et de transfert, et du piégeage des sédiments, il est parfois simplement nécessaire de maintenir l'écoulement torrentiel dans un tronçon donné avec un minimum de dynamique de dépôts et d'érosions au niveau local. Pour ce faire, sont régulièrement utilisés des techniques de protections de berges, d'endiguements et de chenalisations par recalibrage du lit (Van Effenterre 1982).

Figure 5 : Chenalisation du torrent du St Julien sur son cône de déjection (photo de gauche : 1898 ; photo de droite : 1911)(Anon 1911)

Ces techniques sont aussi usuellement utilisées dans des contextes d'écoulements fluviaux. Un plus grand soin à la résistance des ouvrages aux érosions doit être pris dans le contexte torrentiel. Par ailleurs, la revanche des endiguements, c'est-à-dire la hauteur de sécurité entre la ligne d'eau et la crête des digues doit prendre en compte le risque de variation du fond du lit (CIPC 2013).

2. Objectif de l'action 2.5 du projet RISBA : la protection des retenues contre les sédiments

2.1. Contexte de la problématique

Les volumes sédimentaires produits et transportés dans les montagnes sont tels que partout où cela est possible, il faut concevoir des ouvrages transparents à ces apports. Cette transparence peut être obtenue par différents moyens (Figure suivante) tels que :

- l'effacement de la retenue lors de la crue, c'est-à-dire l'ouverture en grand de vannes permettant de faire disparaitre le remous liquide dû au barrage ;
- les chasses hydrauliques, c'est-à-dire l'abaissement contrôlé du plan d'eau par l'ouverture des vannes de fonds dans l'objectif de remettre en mouvement les sédiments déposés dans la retenue ;
- l'équipement de la retenue par un ouvrage de contournement : un tunnel de by-pass ou le maintien d'un chenal parallèle à la retenue peut permettre de transférer les écoulements de crues et leur charge sédimentaire sans passage dans la retenue.

Ces techniques ne peuvent être adaptées à tous les sites et de nombreux barrages sont peu à peu comblés de sédiments par les rivières et torrents qui les alimentent (Bouvard 2004). Ces sédiments sont transportés selon deux processus :

- les sédiments fins : argiles, limons et sables sont transportés en suspension et ont tendance à se déposer loin dans le lac de retenue ;
- les sédiments grossiers : sables grossiers, graviers et blocs sont transportés par des mécanismes de charriage et ont tendance à former un dépôt de forme deltaïque au débouché du cours d'eau dans la retenue.

Les dépôts qui ont eu lieu dans les queues de retenues depuis leur création sont généralement extraits et valorisés sous la forme de granulats pour les remblais routiers ou le marché de la construction. Depuis quelques dizaines d'années, les problèmes causés par la rupture de la continuité sédimentaires et les mesures de réduction de ces effets sont de plus en plus pris en compte (Malavoi et al. 2011). Ces préoccupations ne sont pas l'objet du projet RISBA mais peuvent fortement influencer la destination finale des sédiments piégés par les retenues et pièges associés.

La dernière alternative existant dans les retenues où la transparence sédimentaire n'est pas possible par des effacements, des chasses ou des structures de by-pass, est de réaliser des opérations de correction torrentielle.

- A l'aide d'opération visant la diminution de la fourniture sédimentaire (gestion à la source par reforestation et stabilisation des lits à l'aide de barrages),
- A l'aide d'ouvrage visant la gestion des flux sédimentaires tels que les pièges à graviers et plages de dépôts.

En effet, il semble préférable de piéger les apports juste en amont de la retenue dans une structure dédiée pour pouvoir les extraire dans de bonnes conditions et ensuite les réutiliser de la façon la plus adaptée au site (réintroduction des matériaux en aval, valorisation extérieure).

Les différentes manières de gérer les sédiments sont résumées dans la figure suivante.

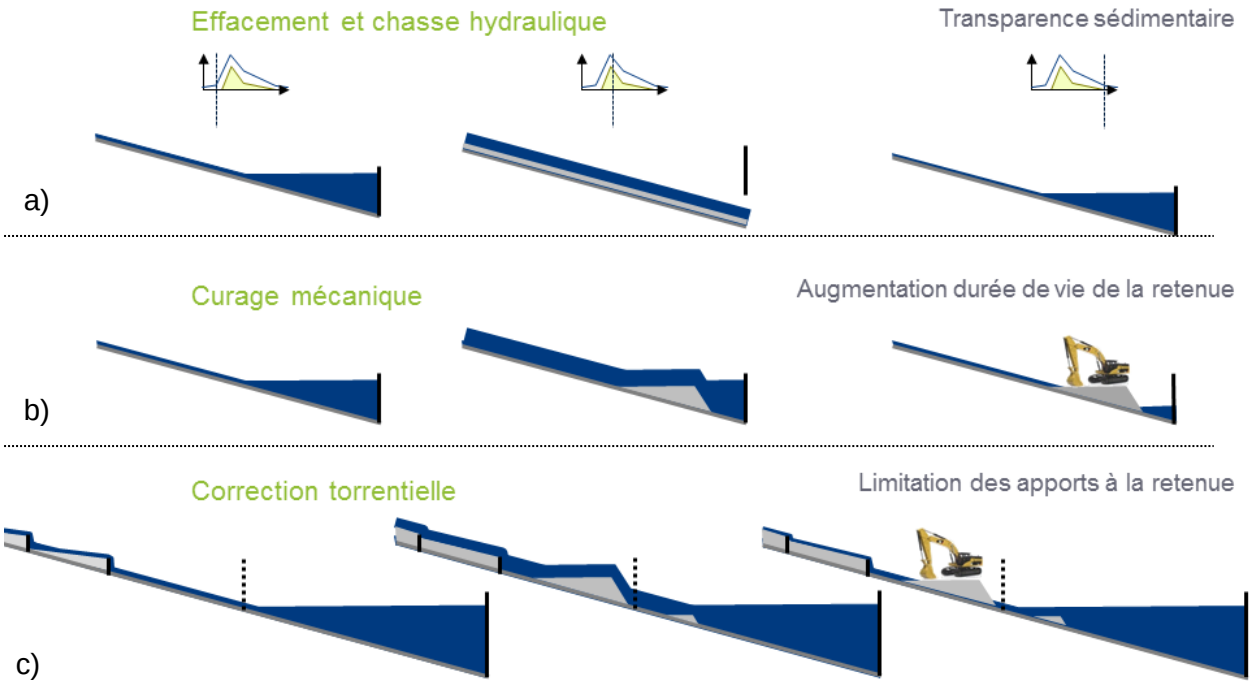


Figure 6 : Fonctionnement schématique des méthodes de gestion de la sédimentation des retenues avant la crue, pendant la crue et après la crue : a) mise en transparence et chasses hydrauliques, b) curages mécaniques des dépôts dans la retenue et c) correction torrentielle amont

2.2. Questions abordées dans le cadre de l'action 2.5

Le travail réalisé dans le cadre de l'action 2.5 du projet RISBA s'est donc intéressé à la protection des retenues contre les sédiments et les dépôts torrentiels. Pour cela, cette action a travaillé sur les trois questions suivantes :

- **Quelles sont les règles de l'art de la conception des ouvrages de protection torrentielles ?**

Cette question a été abordée à travers un important travail bibliographique croisé avec des visites de sites en France et en Italie et des interviews de spécialistes.

- **Quels sont les effets des barrages de correction torrentielle sur le transport solide ? Cela permettrait de déterminer s'il est pertinent d'équiper les cours d'eau situés en amont des retenues par de tels ouvrages et de continuer à maintenir les ouvrages existants ;**

En complément des éléments existants dans la littérature, cette question a été abordée à l'aide d'expériences sur modèle réduits croisés avec des observations de terrains.

- **Quels sont les mécanismes de piégeage des sédiments qui permettent le bon ou le mauvais fonctionnement d'une plage de dépôt ? Cela permettrait de déterminer comment concevoir pertinemment ces ouvrages en amont des retenues.**

En complément des éléments existants dans la littérature, cette question a aussi été abordée à l'aide d'expériences sur modèle réduits croisés avec des observations de terrains.

3. Stabilisation amont des lits torrentiels : utilisation des barrages de correction torrentielle

3.1. Objectif des barrages de correction

Si l'objectif premier des barrages de correction torrentielle était présenté comme étant une lutte contre les affouillements verticaux et latéraux des lits torrentiels (Bernard 1927; Demontzey 1882; Thiéry 1891), certains auteurs indiquaient que ces ouvrages pouvaient avoir d'autres effets tels que la modulation du transport solide, c'est-à-dire l'atténuation des pics de fourniture sédimentaire du haut bassin versant en une fourniture plus régulière et moins intense (Gras 1857). Cet aspect intéressant pour la gestion des risques torrentiels peut aussi intéresser les gestionnaires des retenues collinaires et d'altitude : il est plus aisé de gérer des apports sédimentaires réguliers et peu intenses, que des apports erratiques et intenses. Des essais sur modèles physiques ont été réalisés sur de longues durées pour mieux comprendre l'effet des barrages et de ces phénomènes de modulations du transport sédimentaire.

3.2. Nouveaux éléments mis en évidence par les essais conduits dans le projet RISBA

3.2.1. Dispositif expérimental et résultats

3.2.1.1. Dispositif expérimental

Trois configurations différentes ont été analysées (Figure 7) : un test de référence sans ouvrage (Ref Test), un second avec un ouvrage de correction torrentielle (1CD Test) et un dernier avec trois ouvrages de correction torrentielle (3CD Test). Plus de détails sont disponibles dans (Piton & Recking 2014b; Piton & Recking 2014a).

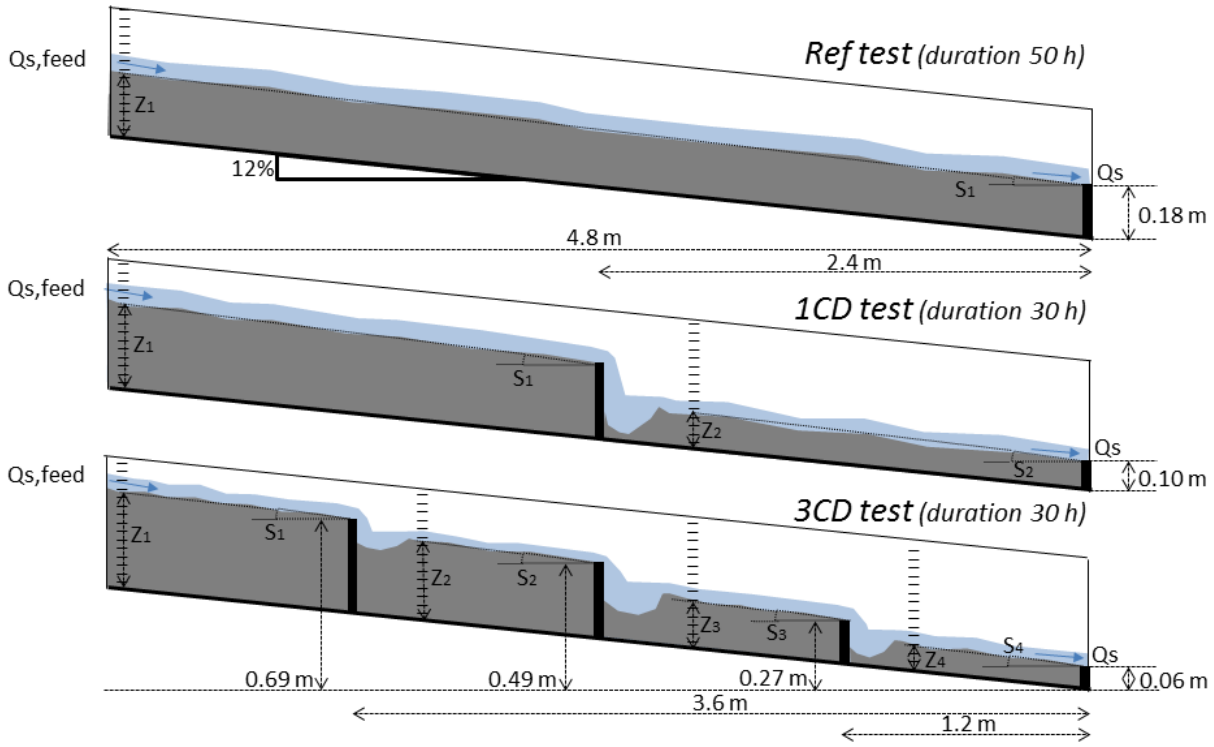


Figure 7 : Schéma des différents dispositifs - a) Ref Test ; b) 1CD Test ; c) 3CD Test (Piton & Recking 2014b)

3.2.1.2. Aspect du lit et tri granulométrique

Le transport par charriage peut être important dans les rivières de montagne. La différence de mobilité entre les sédiments fins et grossiers conduit à un mécanisme très efficace de tri granulométrique aux conséquences contrastées, avec des lits alternant entre:

- des états stables (pavage de surface) et
- des érosions très intenses (destruction du pavage).

Un fort tri granulométrique induit une variation de l'aspect du lit entre deux états extrêmes illustrés dans la figure suivante:

- un lit recouvert de sédiments fins mis à jour lors des phases d'érosion et
- un lit pavé de sédiments grossiers lors des phases d'aggradation.

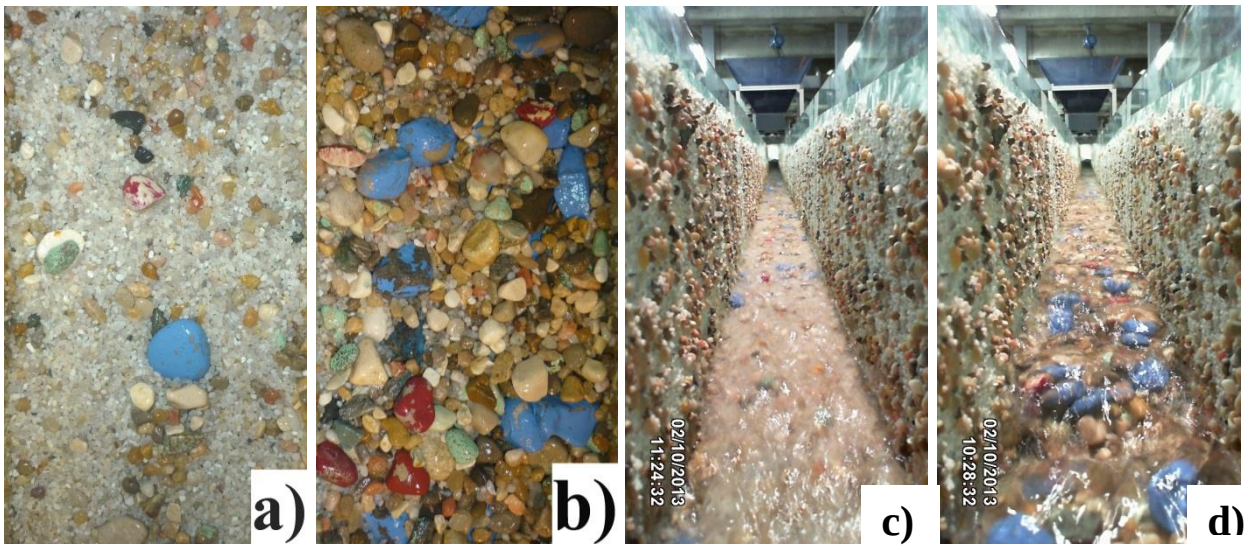


Figure 8 : Illustration des aspects extrêmes de l'état du lit : a) à sec durant un épisode de nappe de charriage : aspect fin et lisse, b) à sec durant un épisode de pavage : granulométries grossières majoritairement présentes en surfaces, c) sous eau pendant un nappe de charriage et d) sous eau pendant un épisode de pavage, clichés tirés de (Piton & Recking 2014b; Piton & Recking 2014a)

Cette capacité à basculer entre deux états extrêmes est particulièrement marquée dans les rivières de montagne. Des recherches récentes nous poussent à soupçonner que ce phénomène intrinsèque au transport solide des cours d'eau à faible nombre de Shield et à granulométrie très étendues pourrait activement participer à l'aggravation des aléas associés aux cours d'eau torrentieles (Bacchi et al. 2014; Recking 2013; Recking 2010; Recking et al. 2008).

L'expression de ces phénomènes de tri granulométriques, que nos observations de terrains on confirmé comme existantes (Figure suivante), a été étudiée plus en détail dans un contexte de torrent équipé de barrage.

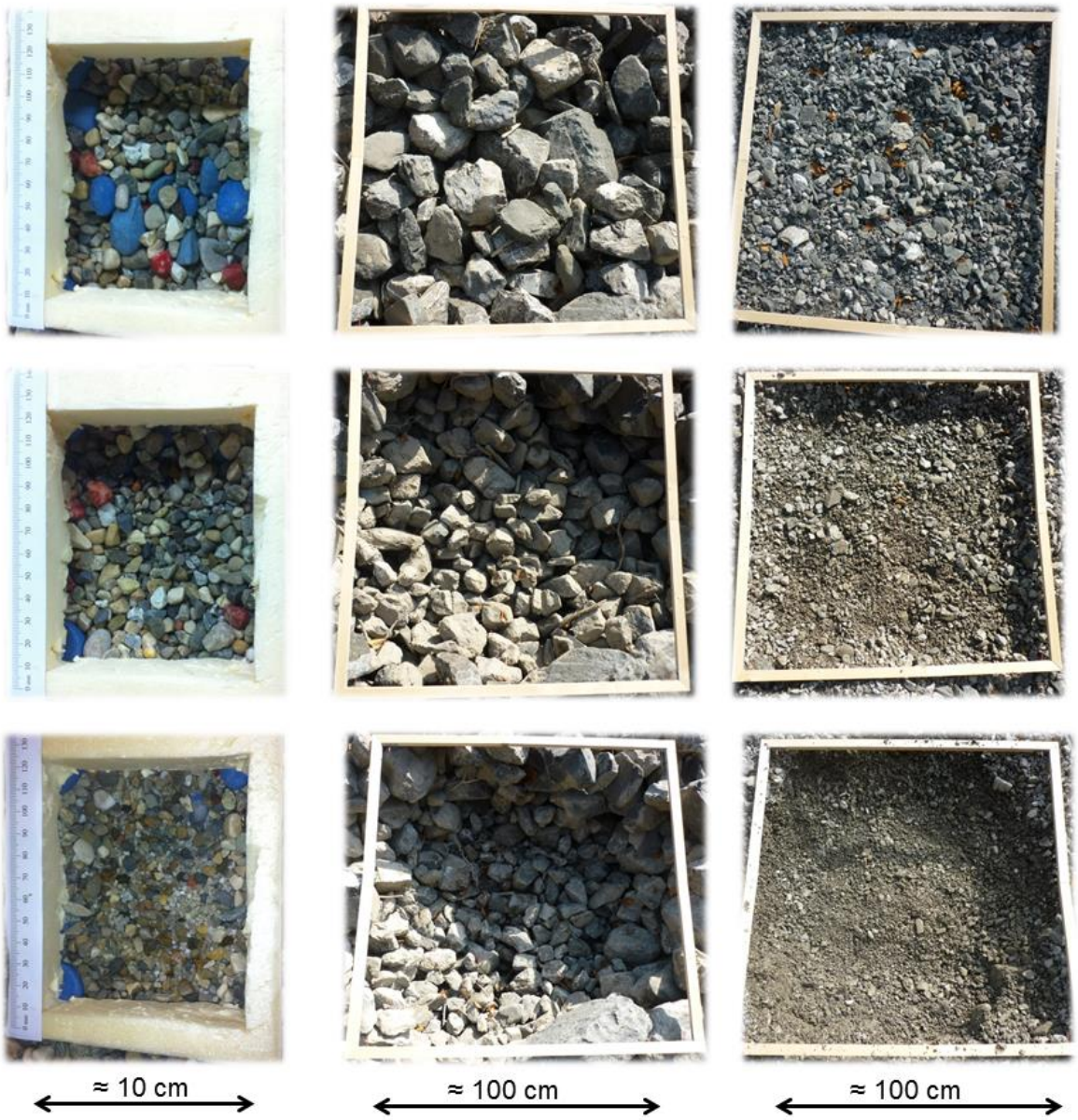


Figure 9 : Tri granulométrique vertical sur des zones de dépôt : mesures de laboratoires et mesures de terrain sur le torrent du Manival (Isère, France) : résultats similaires de présence des éléments grossiers sur le dessus du dépôt et de percolation des plus fins au cours du transport, manifestation probable de tri cinématique (Bacchi 2011; Bacchi et al. 2014; Recking 2006), clichés tirés de (Le Guern et al. 2014)

3.2.1.3. Transport sédimentaire

L'aspect de surface du lit influence l'efficacité du transport solide : plus le lit est rugueux, *plus le transport* sédimentaire est faible et inversement. Le débit solide en sortie de canal varie ainsi entre *moins de 1% et plus de 300% du taux d'alimentation* lors des phases d'aggradation ou de dépavage (Figure 10).

3.2.1.4. Pentes du lit

Les fluctuations de débit solide induisent des variations de stockage dans le lit par conservation de la masse (Figure 10). Les pentes de chaque bief évoluent donc au cours du temps,

reproduisant les respirations des torrents observées sur le terrain par le RTM en France et le CONSORZIO FORESTALE en Italie.

3.2.1.5. Fluctuation du lit

La présence d'ouvrages de correction torrentielle influence la fréquence des fluctuations du lit en fonction de la longueur des biefs entre barrages (Figure 10).

Il a été observé que la durée entre les deux états extrêmes du lit (aggradation et érosion maximales) augmentait avec la longueur du bief.

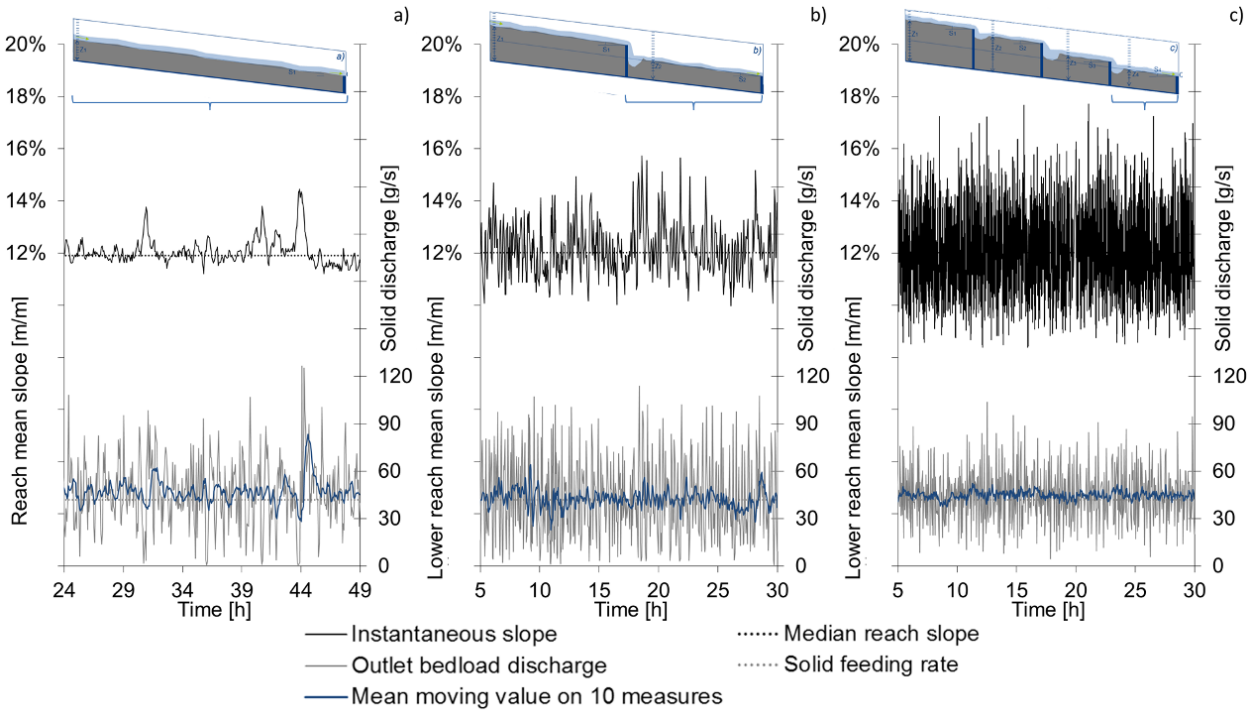


Figure 10 : 25h d'évolution temporelle des pentes des biefs aval et du débit solide aval: a) Ref test sans barrage, b) 1CD test avec un barrage et c) 3CD test avec 3 barrages

3.2.2. Discussion

3.2.2.1. Influence à long terme sur l'équilibre des pentes.

Les résultats de nos expériences montrent que les barrages de correction torrentielle n'influencent pas significativement la pente moyenne dans des conditions de fourniture sédimentaire similaire et par comparaison avec un bief alluvial sans ouvrage (Figure 10).

Pourtant de telles diminutions de pentes sont observées sur le terrain entre les barrages de correction torrentielle (Ferro & Porto 2011; Kostadinov 1993; Porto & Gessler 1999). Nous pensons que ces observations peuvent être liées à deux raisons :

- les torrents qui ont été corrigés par des barrages ont souvent été reboisés en parallèle : si la fourniture sédimentaire diminue au cours du temps, pour ces raisons ou pour d'autres, les pentes entre les barrages et celle générale du lit sont vouées à diminuer (Poncet 1995; Thiéry 1891).
- les pentes initiales des lits concernés n'étaient probablement pas purement alluviales (lit creusé dans le socle rocheux, influences de blocs rocheux d'origines colluviales). La création de barrages au-dessus du lit permet la création de pentes alluviales plus faibles.

Dans ce cadre, nous faisons l'hypothèse que l'ajout d'ouvrages de correction torrentielle ne conduit pas à une baisse systématique et intrinsèque de la pente moyenne des biefs : leur présence accélère simplement l'atteinte de l'équilibre dynamique:

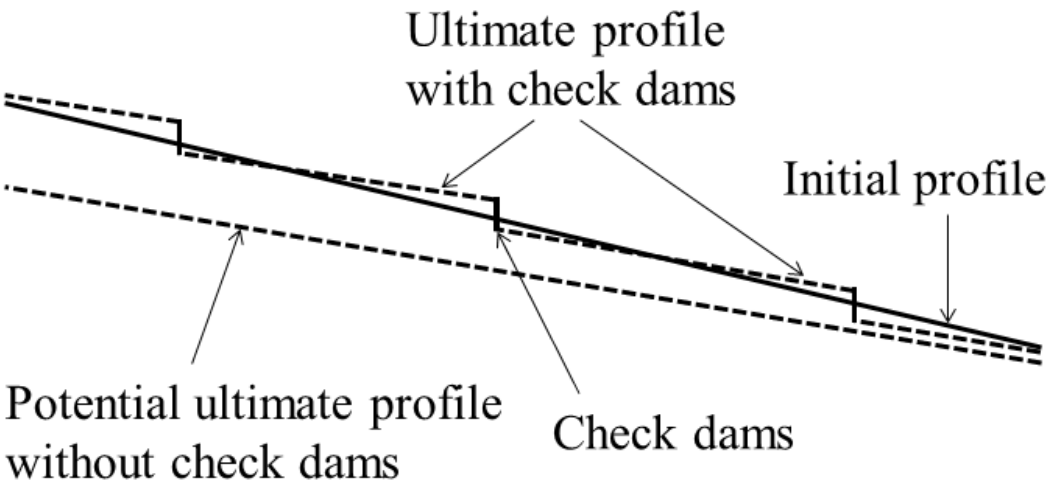


Figure 11 : Schéma d'un profil en long représentant l'état initial avant construction des barrages et les états d'équilibre avec et sans barrages (adapté de (USACE 1994) dans (Piton & Recking 2014b))

3.2.2.2. Influence à court terme sur les volumes d'érosion

Le test de référence montre qu'un événement érosif (dépavage) peut affecter la totalité du canal. L'ajout d'ouvrages de correction torrentielle crée des points fixes dans le lit du torrent : chaque segment évolue alors indépendamment des autres:

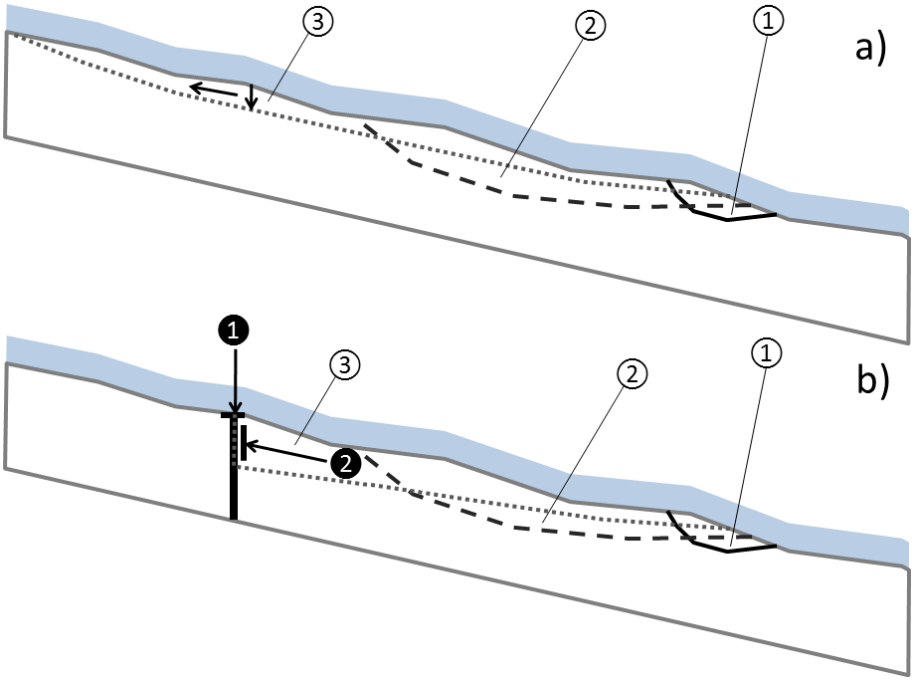


Figure 12 : Schéma d'un profil en long représentant les différentes étapes de propagation d'un évènement d'érosion et de dépavage (de (1) à (3) : a) sans point fixe créé par un barrage ou un obstacle naturel et b) avec un point fixe; N.B. les dépôts n'ont pas été représenté pour simplifié la figure (Piton & Recking 2014b)

La longueur des biefs est ainsi raccourcie, le volume stocké et la probabilité de dépavages de grande ampleur diminuent. Ce constat explique le changement de fréquence des bouffées sédimentaires à l'aval (Figure 10) : si chaque volume d'érosion est plus petit, le principe de conservation de la masse impose que la fréquence des cycles augmente. On observe alors des pulsations solides plus fréquentes mais de moindre volume.

3.2.3. Conclusion sur l'effet des barrages de correction torrentielle

En abaissant les volumes maximaux transportés lors des événements de dépavage et en créant un effet tampon sur les volumes sédimentaires transportés, ils modulent le transport solide. Cet effet avait été conceptualisé par (Jaeggi 1992) et est décrit dans les cours de Restauration des Terrains en Montagne de (Poncet 1995). La figure suivante en illustre synthétiquement les symptomes observables sur le terrain.

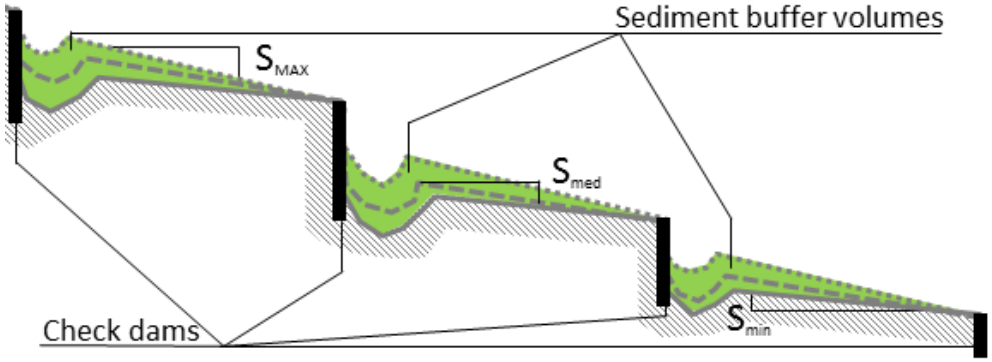


Figure 13: Profil en long d'un torrent équipé d'une série de barrage : les respirations torrentielles amène les biefs entre barrages à montrer des fluctuations de pentes, stockant ainsi des sédiments pendant des épisodes de fort transport pour les laissé repartir lors des crues suivantes (Figure adaptée de (Jaeggi 1992) dans (Piton & Recking 2014b))

La lecture d'anciennes archives, notamment les ouvrages de (Gras 1857) et de (Bernard 1927) montre que cet effet est connu depuis longtemps par les praticiens de terrains. Il reste aujourd'hui mal compris et généralement considéré comme un effet secondaire.

En synthèse, les barrages et seuils de correction torrentielle participent efficacement à la réduction des risques : ils permettent en effet de « libérer au détail ce que les torrents relâcheraient en masse trop brutalement » (Poncet 1995). Ces résultats mettent en évidence l'intérêt de l'installation de telles structures en amont des retenues potentiellement menacées par des aléas torrentiels : **en présence de barrages de correction, la gestion des flux solides, moins intenses et plus réguliers, est rendue plus aisée que celle d'apports rares et massifs menaçants la retenue d'engravement.**

Des observations complémentaires de terrains associés à des expériences de laboratoire utilisant des conditions d'apports plus réalistes doivent être menées pour comprendre dans quelle mesure ces résultats peuvent être extrapolées à d'autres situations (plus grand espace entre barrage, alimentation épisodique en matériaux solides, crues extrêmes, etc).

4. Piégeage des sédiments en amont de la retenue : utilisation des barrages filtrants

4.1. Objectif des barrages filtrants

Les barrages filtrants peuvent avoir des objectifs très divers (Hübl et al. 2005), ce qui explique la grande diversité de formes d'ouvrages existants sur le terrain (Figure 4 et Figure 14) :

- rétention: piégeage définitif de la charge sédimentaire dans l'ouvrage ;
- modulation du débit solide : piégeage temporaire de volumes solides pour diminuer les forts débits instantanés dans le bief aval ;
- filtration : piégeage sélectif des blocs rocheux ou bois flottants qui pourraient poser des problèmes dans le bief aval ;
- brise charge : ouvrages dédiés à dissiper la forte énergie des bouffées de laves torrentielles pour en diminuer le pouvoir érosif dans le chenal aval.

L'assignation d'un objectif donné à un ouvrage est directement liée aux enjeux aval et aux phénomènes pouvant poser problème (tendance aux dépôts, capacité de transport limitée, risque d'embâcles, sensibilité à l'érosion, etc.). Dans le cas des retenues collinaires et d'altitude où les opérations de transparence sédimentaire sont impossibles, l'objectif d'un barrage filtrant sera d'opérer une ***rétention complète des sédiments grossiers.***

Figure 14 : Barrages filtrants : a) Barrage peigne de Rio Fosse (Val de Susa, It.) : rétention complète par blocage mécanique des galets ; b) Barrage à dent de Rio Joans (Val de Susa, It.) piégeage sélectif des gros blocs par blocage mécanique ; c) Barrage à fentes large équipées de grilles aciers du Torrent de Grand Valey (Val d'Aoste, It.) : rétention des évènements extrêmes liée au colmatage des grilles par blocage mécanique de gros blocage et d) Barrage à pertuis du Lavanchon (Isère, Fr.) : modulation par contrôle hydraulique + rétention complète par blocage mécanique des flottants

La rétention des sédiments fins nécessite de grands bassins où les écoulements sont assez calmes pour permettre la sédimentation de la charge en suspension. Ce type d'ouvrage est

généralement trop encombrant pour être mis en place en montagne et ne fait pas l'objet de la présente note. Les sédiments fins peuvent faire l'objet de chasses dans les retenues.

4.2. Mécanismes contrôlant le piégeage

Le dépôt de la charge solide grossière transportée par les torrents peut être contrôlé par différents processus liés aux caractéristiques des barrages filtrants (Figure 15) (Zollinger 1983) :

- ① la diminution de la capacité de transport dans le bassin du barrage liée à une pente de bassin plus faible que la pente amont du cours d'eau ;
- ② l'étalement de la lame d'eau et des écoulements résultant en une chute de la capacité de transport ;
- ③ la sédimentation de la charge grossière dans la zone d'eau calme liée au remous liquide en amont du barrage filtrant : formation d'un delta ;
- ④ le blocage mécanique des matériaux transportés contre le barrage filtrant.

En fonction de la place disponible pour la mise en place du piège à sédiments, les concepteurs mettront à profit les différents mécanismes : par exemple sur un site où une surface importante est disponible en amont de la retenue, un bassin large et de faible pente générera des dépôts grâce aux mécanismes ① et ②, même en présence d'un barrage de petite taille.

Si au contraire, peu de place est disponible, un barrage de plus grande hauteur permettra de mettre à profit les mécanismes ③ et ④ pour piéger des sédiments sur une plus grande épaisseur.

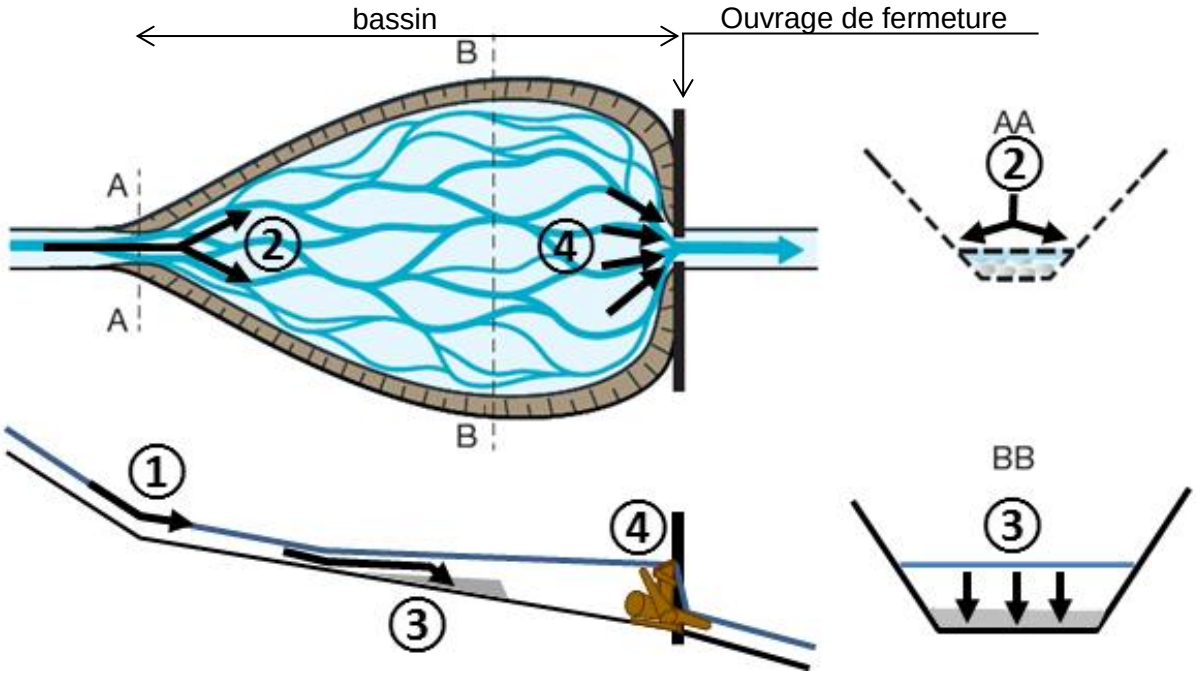


Figure 15 : Mécanismes contrôlant le dépôt des sédiments dans un barrage filtrant : 1) diminution de la capacité de transport liée à une pente de bassin inférieure à la pente du torrent, 2) diminution de la capacité de transport liée à l'étalement des écoulements, 3) sédimentation deltaïque dans la zone de remous liquide du barrage filtrant et 4) blocage mécanique des matériaux transportés contre le barrage filtrant (adapté de Zollinger 1983))

4.3. Nouveaux éléments mis en évidence par les essais conduits dans le projet RISBA

4.3.1. Questions scientifiques

Les critères de conception permettant de contrôler les mécanismes ③ et ④ sont, d'après la synthèse de l'état de l'art réalisé dans le cadre du projet RISBA, relativement bien renseignés dans la littérature (Piton & Recking 2015a; Piton & Recking 2015b).

Les mécanismes ① et ② sont par contre moins connus et peu d'expériences ont étudié en détail la dynamique de dépôt et d'érosion dans les bassins des barrages filtrants. Des expériences ont donc été réalisées pour apporter des éléments de connaissance à l'hydraulique et à la morpho-dynamique des dépôts massifs se déroulant dans les plages de dépôts (Le Guern 2014; Le Guern et al. 2014). Des observations de terrains sont en cours pour compléter ces analyses.

4.3.2. Démarche de recherche

Des expériences en laboratoire ont été réalisées afin de modéliser les phénomènes de dépôts de charriage dans une zone d'élargissement terminée par un barrage filtrant. Les détails concernant le dispositif expérimental peuvent être trouvés dans (Le Guern 2014) et dans (Carbonari 2015).

En complément, des simulations exploratoires par modélisation numérique des problématiques ont été entreprises pour tester la capacité des logiciels à reproduire les morphologies complexes de type tressage (Rifaï 2014).

Des missions d'observation des remplissages de plages de dépôt ont été menées grâce à des caméras installées sur le terrain.

Pour compléter l'ensemble, des visites d'ouvrages (Figure 14) ont été réalisées en France et en Italie faisant intervenir les ingénieurs d'IRSTEA, des Regions Piémont et Val d'Aoste et les experts locaux des problématiques torrentielles :

- Valerio SEGOR de la Division Aménagement Hydrogéologiques des Bassins Versant de la région Val d'Aoste,
- Alberto DOTTA du Consorzio Forestale du Haut Val de Suse et
- Yann QUÉFÉLÉAN, Damien KUSS et Bruno LAILY du RTM.

4.3.3. Modélisation physique des plages de dépôts – Travaux de Jules Le Guern & Guillaume Piton – bassins rectangulaires

Ces expérimentations ont été réalisées courant 2014, avant l'été 2014 assez intense en termes de crues (Ravoire de Pontamafrey, St Antoine de Modane, Palles et Merdaret de Chantelouve et torrent du Grand Rocher à la Chalp).

Ce sont ces expériences qui ont mis en lumière l'importance du piégeage initial dans la partie amont des ouvrages et la nécessité de réaliser un bassin à la forme réaliste pour pouvoir s'approcher au mieux de la réalité.

4.3.3.1. Tri granulométrique

Le tri granulométrique qui générait des phénomènes de fluctuations 2D du niveau du lit dans les expériences en canal étroit (cf. 3.2) a étendu son expression à des fluctuations 3D du tracé en plan des chenaux d'écoulement. La morphologie des dépôts s'est trouvée extrêmement contrôlée par les mécanismes de tri granulométrique.

4.3.3.2. Morphologies des dépôts

Nous avons mis en évidence une tendance des dépôts à présenter des cycles entre un état chenalisé et un état d'écoulements en nappes ou à chenaux multiples (Figure 16). Ces fluctuations cycliques ont été précédemment observées sur des expériences concernant la dynamique des cônes de déjection ou des deltas (Reitz & Jerolmack 2012; Van Dijk et al. 2012; Van Dijk et al. 2009).

Pour mémoire on considère que les dépôts sont liés aux quatre phénomènes suivants:

- ① la diminution de la capacité de transport dans le bassin du barrage liée à une pente de bassin plus faible que la pente amont du cours d'eau ;
- ② l'étalement de la lame d'eau et des écoulements résultant en une chute de la capacité de transport ;
- ③ la sédimentation de la charge grossière dans la zone d'eau calme liée au remous liquide en amont du barrage filtrant : formation d'un delta ;
- ④ le blocage mécanique des matériaux transportés contre le barrage filtrant.

Les observations ont montré que de façon systématique les phénomènes suivant étaient observés:

- La première phase du cycle morphologique correspond à la formation d'un dépôt massif en amont de la plage. Ce dernier est lié principalement au mécanisme ②.
- L'écoulement balaye la zone, créant de petites avancées des dépôts sous la forme de lobes de part et d'autre du dépôt initial. Celui-ci s'allonge et s'élargit en même temps qu'il s'élève. Il forme une accumulation raide concentrée dans l'amont de la plage de dépôt. Un transport sédimentaire secondaire a lieu dans les chenaux multiples. Ce transport finit par former des morphologies de tressage (Le Guern et al. 2014).
- L'accumulation finit par atteindre un état instable car trop raide et haut, conduisant à une destruction locale du pavage et à la libération des nappes de charriages (bouffées de sédiments plus fins lissant le fond du lit et augmentant la capacité de transport). Ces phénomènes déstabilisent alors brusquement le dépôt et l'érosion s'emballe.
- Un chenal central s'incise dans le dépôt et entraine les sédiments vers l'aval du bassin de stockage.
- L'étalement de l'écoulement en aval du dépôt (mécanisme ②) et les dépôts massifs liés au mécanisme ③ génèrent un nouvel arrêt de ces sédiments remis en mouvement.

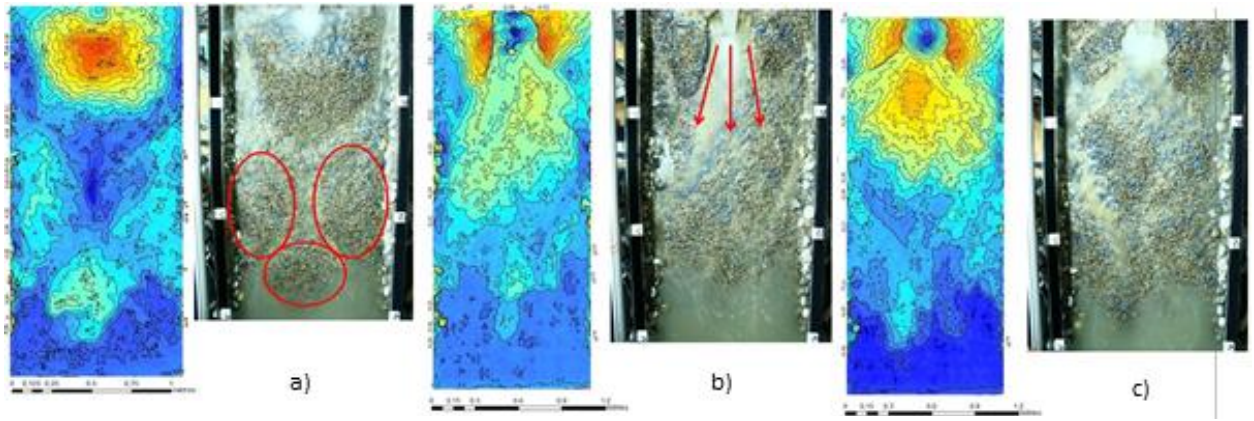


Figure 16 : Morphologies et photographies des écoulements dans différentes étapes d'un cycle : a) écoulements en nappes et multichenalisés, b) chenalisation soudaine et dispersion aval des sédiments accumulés en tête d'ouvrage et c) reconstitution des écoulements de tressage et reprise des dépôts amont sous écoulement nappe

Les dépôts ayant lieu dans le bassin d'une plage de dépôt ne semblent donc pas avoir lieu de manière régulière sous la forme d'un processus continu. Ils se font préférentiellement au débouché du torrent dans le bassin.

Des cycles d'écoulements en nappe et chenalisés dispersent ensuite les sédiments dans le bassin. Les mécanismes ③ et ④ finissent par piéger les apports dans la partie aval du bassin. Les dépôts dans les pièges à sédiments sont donc le résultat de la rencontre de fronts sédimentaires avançant de façon cyclique et contrôlés par les mécanismes ① et ② et les remous solides contrôlés par l'aval par les mécanismes ③ et ④.

4.3.3.3. Application de formules d'estimation du transport solide

Une tentative de modélisation des phénomènes décrits plus haut grâce aux formules de transport solide usuellement utilisées dans les torrents a été réalisée (formules de (Couvert et al. 1991; Rickenmann 1991; Smart & Jaeggi 1983)). En faisant varier les largeurs de transport en fonction des largeurs mesurées lors des expériences, nous espérions retrouver les pentes mesurées pour les différentes concentrations solides injectées dans le canal. Nous avons observé que les formules tirées de la littérature *sous estimaient systématiquement* les pentes des dépôts. Nous en concluons que la pente des dépôts ne peut pas être estimée de façon précise dans les bassins larges des plages de dépôt. Une méthode alternative doit être développée pour cela. Le travail sera poursuivi sur ce sujet.

Le mémoire complet des Jules Le Guern est fourni en annexe.

4.3.4. Visites de sites

4.3.4.1. Ouvrages visités

Les sites répertoriés sur la carte suivante ont été visités dans le cadre du projet RISBA.

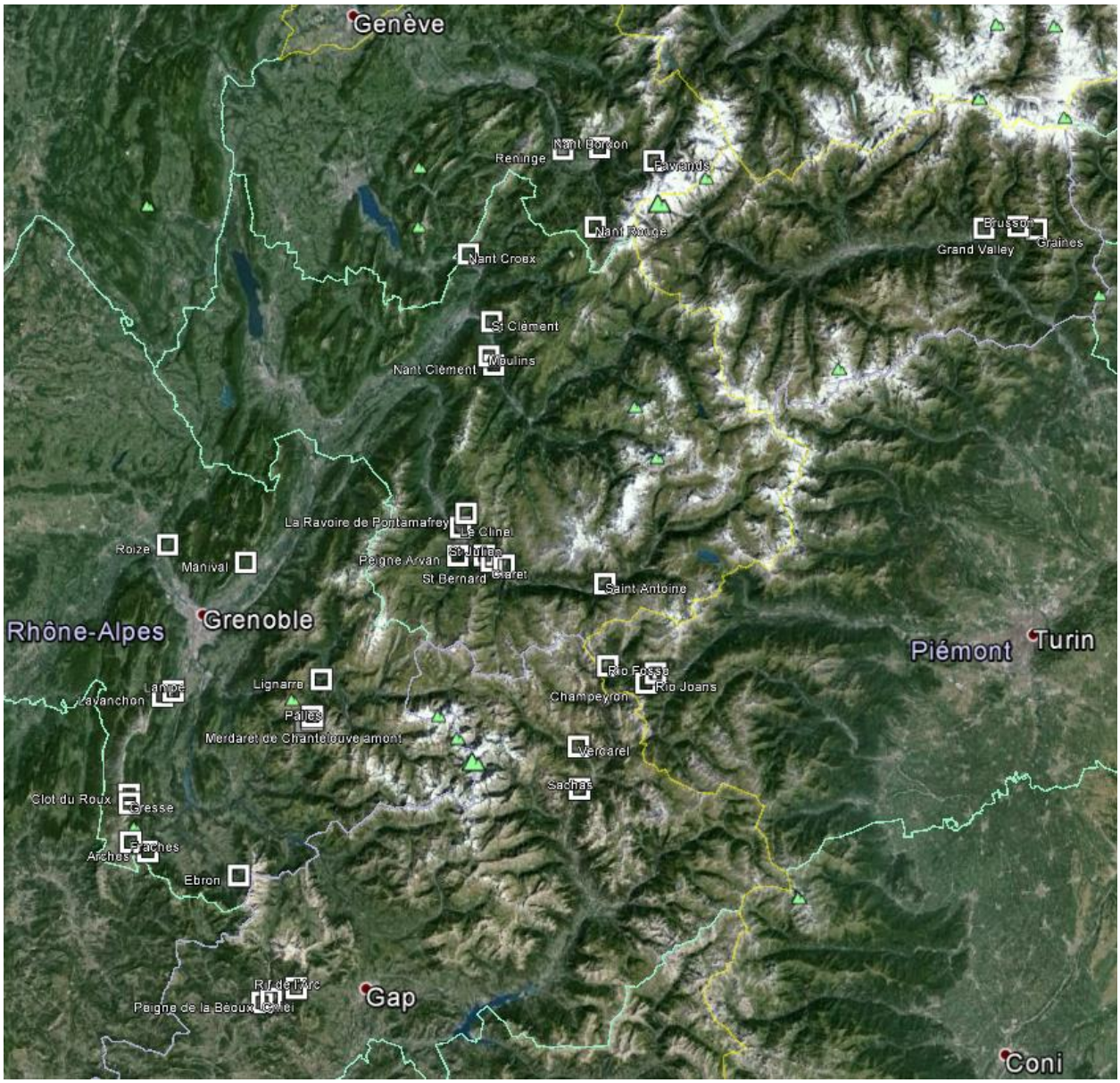


Figure 17 : Cartographie des ouvrages visités dans le cadre de Risba (Fond Google earth)

Il a été choisi de visiter :

- Une trentaine de plages de dépôts situées dans les Alpes Française, généralement les plus grandes et plus représentatives du parc existant, ainsi que les ouvrages et torrents ayant subi des crues torrentielles importantes:
  - Crue du Bastan et de l'Yse à Barège et Luz Saint-Sauveur (2013)
  - Crue de la Ravoire de Pontamafrey (2014),
  - Crue des torrents des Palles et du Merdaret de Chantelouve et du torrent du Grand Rocher de la Chalp (2014).
  - Crue du Saint Antoine de Modane (2014),

  - Visite des plages de dépôts des Hautes Alpes, de l'Isère, de la Savoie et de la Haute Savoie (2014).
- Quelques ouvrages caractéristiques en Italie :
  - Structures sur les torrents du Rio Fosse, du Rio Joans et du Champeyron en Alta Valle de Susa ;
  - Structures du torrent de Grand Valley et des barrages de Brusson et de Graines en Val d'Aosta.

L'ensemble des comptes rendus de visites sont fournis en annexe.

En complément des observations qualitatives permettant de mieux comprendre les phénomènes qui ont lieu dans les plages de dépôt, nous avons réalisé une analyse statistique des formes des bassins afin de réaliser un modèle ayant la représentativité la meilleur par rapport au parc d'ouvrage existant.

4.3.4.2. Analyse statistique des formes de ouvrages

Afin de déterminer quelle forme de bassin il était le plus pertinent de tester, des mesures des largeurs et longueurs des plages de dépôts visitées ont été réalisées. Trois paramètres géométriques indépendants et adimensionnels ont été calculés pour chaque ouvrage mesuré :

- **L, L'allongement (Lenghtening)** représente l'allongement du bassin :

$$L = \frac{L_{max}}{W_{max}}$$

  Avec Lmax la longueur du bassin (m) et Wmax la largeur maximum du bassin (m).

- **C, la compacité (compactness)** représente la compacité du bassin : elle compare la surface prise par le bassin avec un rectangle de largeur égale à Lmax et de longueur égale à Wmax. Un bassin avec une compacité de 1 a une forme rectangulaire et occupe l'ensemble de la surface définit par son rapport d'aspect ; un bassin avec une compacité de 0,5 a une forme ayant une surface similaire à celle d'un losange ou d'un triangle et occupe la moitié de la surface définit par son rapport d'aspect, etc.

$$C = \frac{\sum subareas}{L_{max}\, W_{max}}$$

  Avec Σsubareas la surface total du bassin (m²).

- **E, l'excentricité (Eccentricity)** représente la répartition de la surface du bassin entre l'amont et l'aval de celui-ci.

$$E = 2\,\frac{\sum subareas \cdot L_{bar}}{\frac{L_{max}}{2}\sum subareas}$$

  Avec Lbar, l'abscisse des barycentres des sub-surfaces constituant le bassin.

La figure suivante illustre des formes simplifiées respectant des valeurs données des différents paramètres de forme :

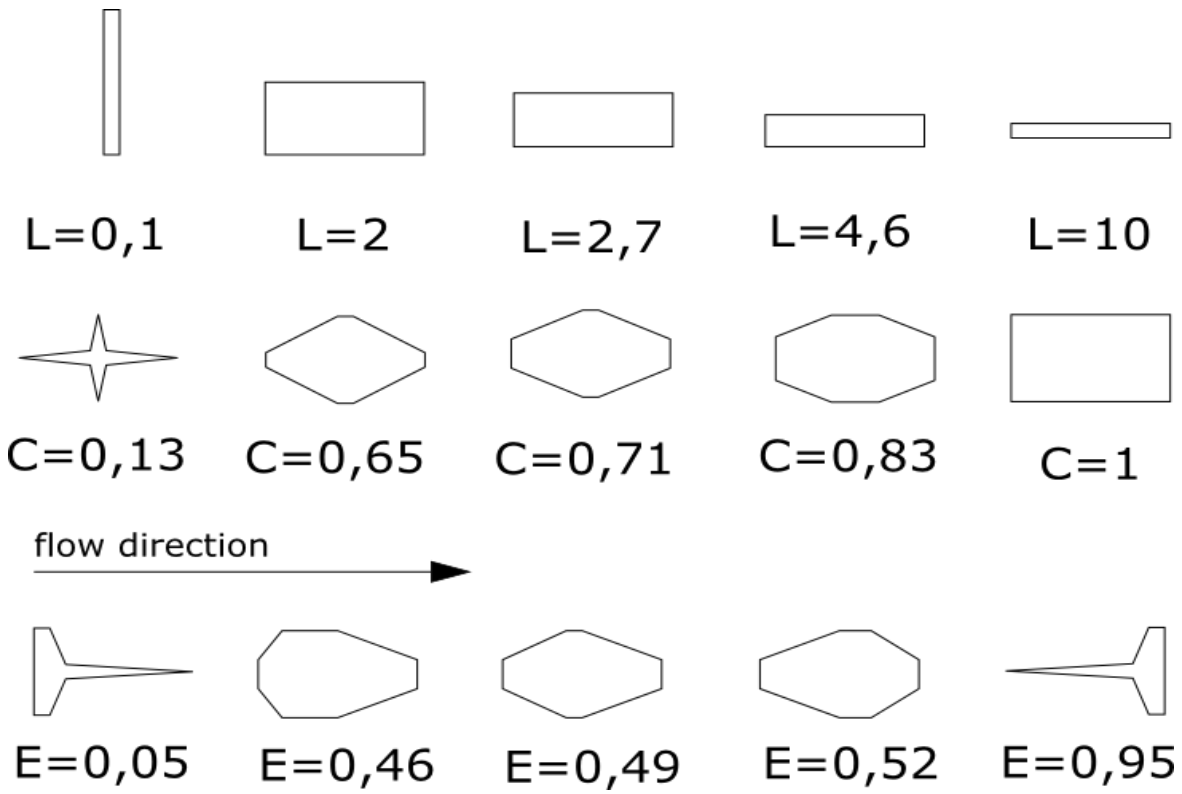


Figure 18 : Formes simplifiées respectant les paramètres adimensionnels présentés plus haut, les deux formes extrêmes sont simplement illustrative de l'effet de la variation d'un paramètre, la forme du milieu illustre la valeur médiane de l'échantillon et les 2ème et 4ème formes illustrent les quantiles 20% et 80% de l'échantillon (Carbonari 2015)

Le tableau suivant fournit les statistiques de base de l'échantillon des ouvrages visités :

Table 1 Quantiles des grandeurs physiques et des paramètres adimensionnels des ouvrages visités. L'échantillon étant présenté dans la Table 2

	Min	Quantile 5%	Quantile 20%	Median	Quantile 80%	Quantile 95%	Max
Watershed surface [km²]	0.4	0.64	0.9	3.9	11.92	35.6	220
Volume of the sediment trap basin [m³]	700	2 500	5 000	12 000	27 000	118 000	300 000
Length of the sediment trap basin [m]	33.7	54.5	76.6	117	225	426.2	900
Width of the sediment trap basin [m]	17	20.7	27	36.5	67.8	94.4	110
Basin slope [%]	2	2.38	4.28	10.6	14.42	15.6	23.2
Deposit slope [%]	0.1	1.15	2.9	5.75	10.2	13.35	16.5
Lengthening [-]	0.9	1.6	**2.0**	**2.7**	**4.6**	8.9	10
Compactness [-]	0.56	0.57	**0.65**	**0.71**	**0.83**	0.95	1
Eccentricity [-]	0.39	0.42	**0.46**	**0.49**	**0.52**	0.54	0.62

On constate que :

- L'allongement des bassins des plages de dépôt varie beaucoup, en réalité ceci dépend de l'installation de l'ouvrage :
  - Si ce dernier présente clairement un bassin élargi en amont de l'ouvrage, cette partie élargie dépasse rarement 2 à 4 fois sa largeur,
  - Si l'ouvrage est simplement situé dans le lit du torrent, ce paramètre de rapport d'allongement perd de sa significativité puisqu'il n'existe pas de bassin clairement établi.
- La compacité varie peu autour de 0,7 ; de l'ordre de 0,6 pour les bassins les plus élargis par rapport au torrent, elle tend vers 1 pour les ouvrages sans bassin élargi situé dans le lit.
- L'excentricité varie aussi peu atour de 0,5 laissant entendre que les bassins ont souvent des parties divergentes presque symétriques à leur partie convergente.

Les plages de dépôt présentant la forme caractéristique de poire illustrée dans la Figure 15 n'a été observée que dans quelques torrents à lave torrentielle. La majorité du temps, la topographique locale et les contraintes foncières dictent la forme du bassin de l'ouvrage.

L'échantillon total des mesures réalisées est fourni dans la table suivante.

4.3.4.3. Implication pour la modélisation physique

Les travaux menés courant 2014 sur une plage de dépôt rectangulaire (L~ 2.2, C=1, E=0,5) ont permis de démontrer l'incidence forte de la forme du bassin de la plage de dépôt (voir plus loin résultats de Jules Le Guern).

Cette analyse de terrain a été menée à la suite de ces premiers résultats et afin de déterminer quelques formes seraient représentatives de la réalité pour les tests fin 2014 / début 2015.

Dans la suite de cette analyse, il a été décidé de réaliser des tests sur un modèle réduit présentant une compacité moyenne de 0,7, une excentricité moyenne de 0,5 et un allongement de faible de 2.

Des essais complémentaires devront être menés pour définir les conditions de sédimentation dans une plage présentant un allongement plus grand, sans doute de l'ordre de 4,6.

Dép	Municipality	Torrent	Supply	Sw	Volume	Height	Trap slope	Deposit slope	Length	Width	Area	Lengthening	Compactness	Eccentricity
			BL/T/DF	km²	m^3	m	%	%	m	m	m²			
05	La Roche-Des-Arnauds	Béoux	BL	NA	NA	NA	2.4	NA	216	110	23440	1.96	0.99	0.49
05	La Roche-Des-Arnauds	Le Rif De L'Arc	BL	8.9	11000	2.6	3.2	2.9	130	48.5	3502	2.68	0.56	0.45
05	Puy-St-André	Sachas	BL	14.8	7000	5.0	10.5	NA	336	98	23842	3.43	0.72	0.45
05	St-Chaffray	Verdarel tot	DF	2.3	50000	2.5	15	NA	264	75	12345	3.52	0.62	0.39
05	Veyne	Chiei	DF	0.4	8000	3.0	7.4	8.7	78	18	928	4.33	0.66	0.46
38	Chantelouve	Palles	T	0.7	5000	4.0	NA	7	78	32.8	1741	2.38	0.68	0.53
38	Chantelouve	Merdaret amont	T	0.9	8000	5.0	NA	16.5	110	37	3183	2.67	0.78	0.48
38	Chantelouve	Merdaret aval	T	3.8	12000	5.0	NA	10.2	283	53	10417	5.34	0.69	0.4
38	Chichilianne	Fraches	DF	0.9	5000	4.0	NA	12.3	218	54	8071	4.04	0.69	0.52
38	Chichilianne	Arches	DF	1.2	2500	2.5	NA	10.8	220	26	4875	8.46	0.85	0.52
38	Gresse en Vercors	Gresse	T	1.7	5000	5.0	11	1.5	63	43	1570	1.47	0.58	0.62
38	Gresse en Vercors	Clot Du Roux	T	0.7	6000	NA	23.2	NA	33.7	17	491	1.98	0.86	0.48
38	Oulles	Lignarre	BL	46.0	10000	10.0	NA	NA	110	66	5939	1.67	0.82	0.46
38	St-Paul-De-Varces	Lavanchon	T	7.7	14000	5.7	9	5.3	167	26	3868	6.42	0.89	0.51
38	St-Paul-De-Varces	Lampe	T	0.6	5000	NA	9	NA	60	28.7	1094	2.09	0.64	0.49
38	Tréminis	Ebron	DF	3.9	100000	5.0	14.9	NA	500	54	23545	9.26	0.87	0.48
38	Voreppe	Roize	BL	10.0	2500	3.0	4.4	NA	71	31.3	1510	2.27	0.68	0.48
73	Pontamafrey	Ravoire	DF	3.9	23000	7.0	NA	NA	90	50	3640	1.8	0.81	0.48
73	Pontamafrey	Clinel	BL	0.8	700	3.0	15.2	NA	50	27	1085	1.85	0.8	0.49
73	St Jean de Maurienne	Arvan	BL	220.0	130000	3.0	2	2	900	90	67013	10	0.83	0.51
73	St-Julien-Montdenis	Claret	DF	2.9	23000	8.0	13	7.5	115	60	3840	1.92	0.56	0.48
73	St-Julien-Montdenis	St Julien	DF	20.0	20000	NA	10.9	NA	132	30	2561	4.4	0.65	0.52
73	St-Martin-la-Porte	St-Bernard amont	DF	16.0	15000	7.5	11.4	NA	80	32	1653	2.5	0.65	0.54
73	St-Martin-la-Porte	St-Bernard aval	DF	16.2	20000	7.5	10.7	NA	120	36	3023	3.33	0.7	0.52
73	Tours-en-Savoie	St Clément	DF	10.0	40000	10.0	14.3	0.1	245	81	15741	3.02	0.79	0.54
73	Ugine	Nant Croex	DF	2.8	18000	6.0	8.1	NA	61	24	1046	2.54	0.8	0.51
74	Chamonix	Favrand	T	5.6	25000	0.0	NA	6.2	119	32	2992	3.72	0.79	0.48
74	Les Contamines-Montjoie	Nant Rouge	DF	9.8	300000	18.0	NA	3.8	200	27	3744	7.41	0.69	0.47
74	Passy	Nant Bordon	T	4.1	30000	3.0	NA	4.1	80.3	90	4211	0.89	0.58	0.46
74	Sallanche	Reninge	T	1.9	5000	2.0	3.8	4.9	82.4	31	2554	2.66	1	0.5

Table 2 Caractéristiques des ouvrages visités: Col1 : N° de département, col2 Commune de l'ouvrage, col 3 : torrent, col3 : phénomène torrentielle (DF : debris flow=laves torrentielles/T : transitory=mixte/BL : bed-load=charriage),col5 Superficie de bassin versant, col : volume de l'ouvrage, col7 : Hauteur de l'ouvrage, col8 : pente de curage, col9 : pente des dépôts observés, col 10 : longueur du bassin, col 11 : largeur du bassin, col 12 : surface du bassin, col 13 : Rapport d'aspect, col 14 : Compacité et col 15 : Excentricité

4.3.1. Modélisation physique des plages de dépôts – Travaux de Costanza Carbonari & Guillaume Piton – bassins L2C0.7E0.5

Une nouvelle forme de plage de dépôt a été construite sur les bases des analyses statistiques des mesures de terrains.

Les expériences réalisées sur cette configuration redémontre l'existance des cycles de faciès d'écoulement chenalisé, dispersés en bras multiple depuis l'aval puis sur l'ensemble de la zone de dépôt.

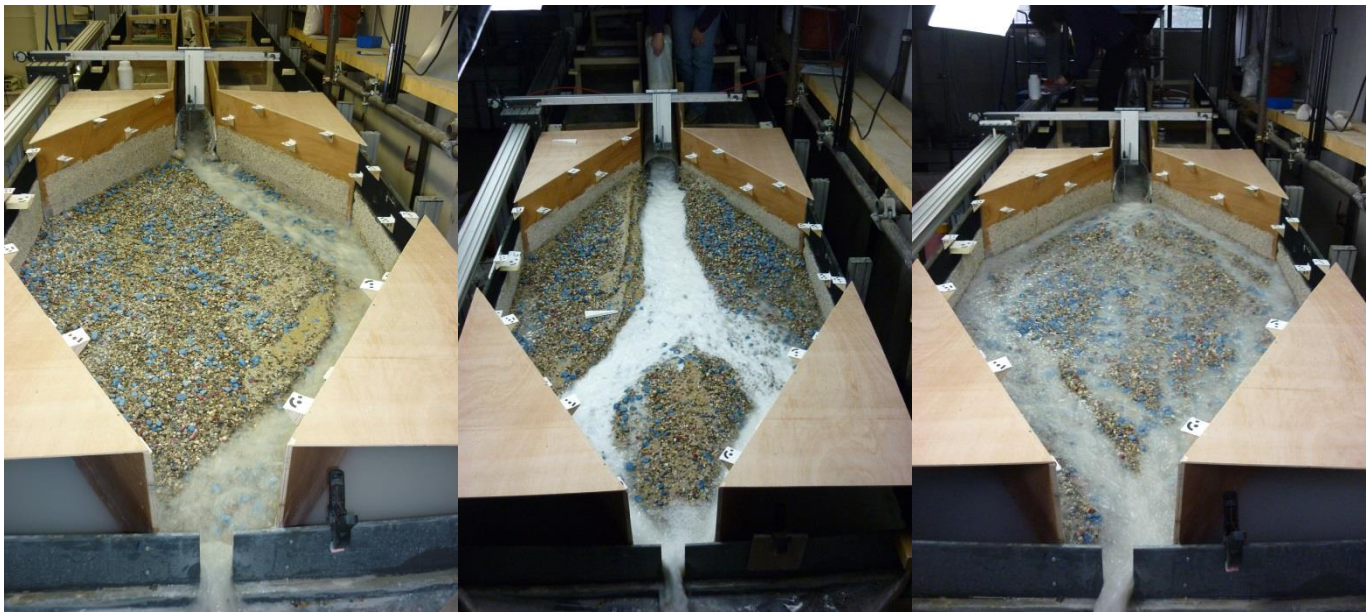


Figure 19 : Photographies des écoulements dans différentes étapes d'un cycle : résultats similaires à la configuration rectangulaire.

Ici encore, le tri granulométrique semble être un facteur clé du contrôle des morphologies.

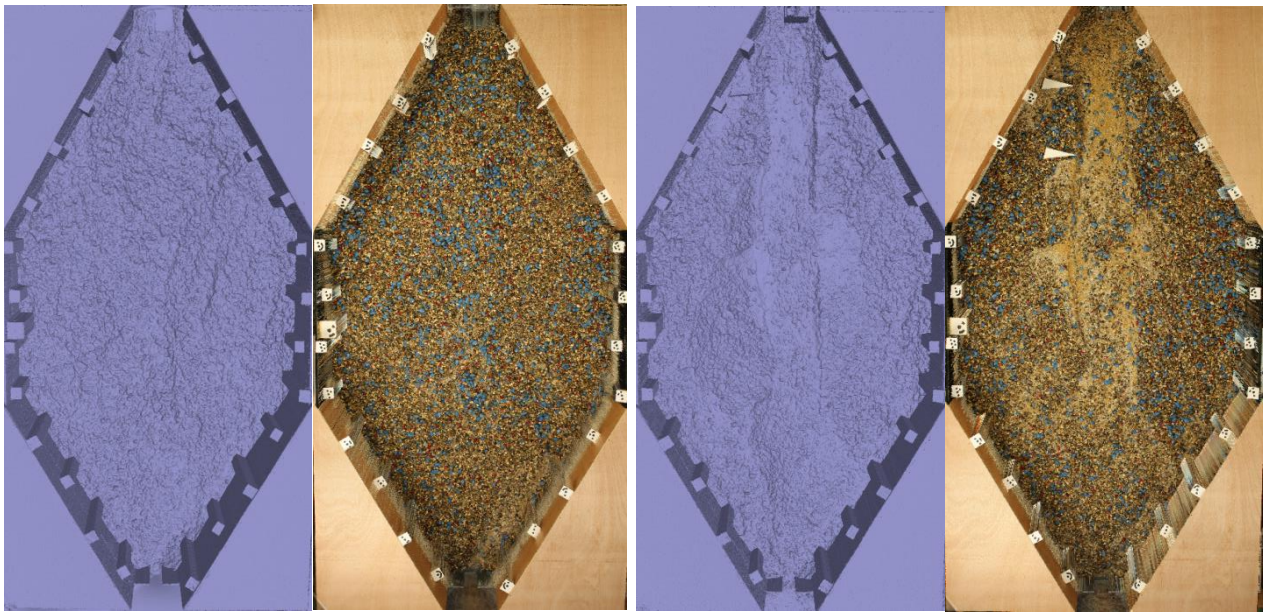


Figure 20 : Détail des morphologies et du tri granulométrique dans deux étapes clés à gauche un faciès d'écoulement en nappe et pavé ; à droite un chenal marqué après une rupture, apparition de la granulométrie fine sous-jacente.

En complément des mesures de topographies réalisées par photogrammétrie, des mesures de vitesses d'écoulement ont été réalisée par analyse d'image et utilisation du logiciel Fudaa qui réalise de la Large Scale Particle Image Velocimetry (LS-PIV).

Dans la suite des recherches menées par (Hauet et al. 2014; Le Coz et al. 2014), nous avons tenté d'appliquer la méthode aux écoulements torrentiels en faible submersion relative et en présence de fort transport sédimentaire.

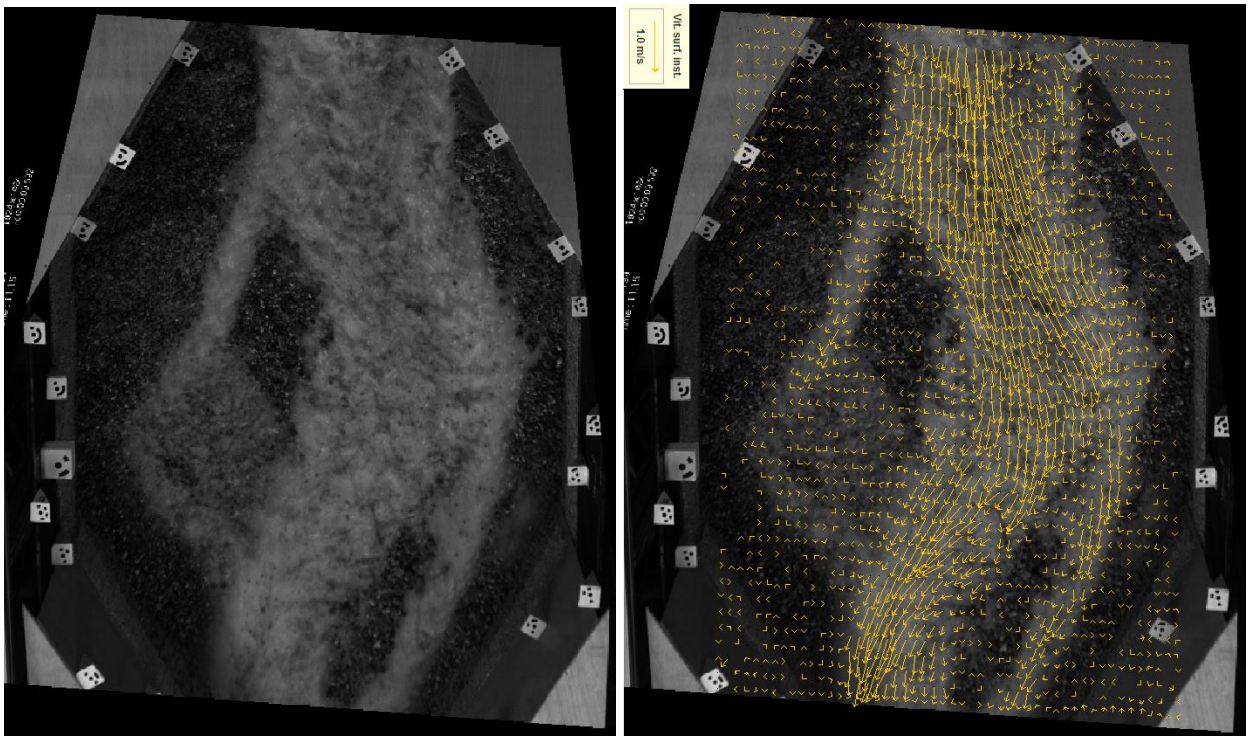


Figure 21 : Image brute et champs de vitesses de surface mesurés par Fudaa superposé

Cette méthode semble prometteuse mais a montrer des résultats partiellement biaisés : les vitesses semblent sous estimées à la suite d'un contrôle indépendant par une méthode de Particle Tracking Velocimetry. Ce résultat est probablement causé par le trop faible rapport pixel/mm de nos images. Il n'a pas été possible d'abaisser ce rapport à cause de la trop grande mobilité du chenal actif dans la plage de dépôt.

Les données de vitesses et de topographies dans cette nouvelle configuration d'ouvrage sont en cours d'analyse à la fin du projet Risba. Le projet a permis de lancer la dynamique, de mettre en lumière des résultats inattendus et de compléter l'équipement du laboratoire IRSTEA. Cet équipement et la plateforme torrentielle seront encore utilisés pour approfondir le sujet.

4.3.2. Modélisation numérique des écoulements en tresses

Des tests ont été entrepris pour explorer la capacité des logiciels de modélisation numérique à reproduire les processus hydrauliques et géomorphologiques qui ont lieu dans les plages de dépôts.

Les expériences de (Le Guern et al. 2014) ont confirmé que les dépôts dans les pièges à sédiments ressemblent aux morphologies des rivières en tresses. Un travail de recherche a été lancé afin de déterminer si les outils numériques existants à ce jour sont capable de correctement modliser ces phénomènes de tressage, dont la dynamique naturelle et l'influence détaillée sur le transport solide sont encore mal comprises (Ashmore 2013)

Figure 22 : Faciès de tressage observés dans des plages de dépôt : sur le terrain (crue du torrent des Moulins – Epierre - Savoie France– 2013) et modèle physique du Chagnon (Koulinski et al. 2011)

(Rifaï 2014) a donc testé la capacité du logiciel TELEMAC2D-SYSIPHE à reproduire des systèmes en tresses. Les rivières en tresses sont des cours d'eau présentant plusieurs chenaux qui se divisent, s'entrecroisent et se rejoignent séparés par plusieurs bancs éphémères. L'abondance de l'apport en sédiments, une puissance forte et des berges facilement érodables sont des conditions nécessaires au tressage. La complexité apparente du schéma de tressage ainsi que sa grande dynamique rendent le cas des rivières tressée intéressant aussi bien pour la compréhension que pour la modélisation. Plusieurs travaux de recherches en modélisation numérique de la morphodynamique s'intéressent au cas des rivières en tresses.

Dans ce travail, nous avons cherché à évaluer la robustesse d'un modèle 2-D à base physique (TELEMAC2D couplé à SISYPHE) et juger son habilité à reproduire la dynamique de tressage ainsi que l'évolution du motif résultante de différents forçages. La construction du modèle a été largement inspirée d'expériences en canal illustrant l'initiation du tressage et son développement. L'idée était ensuite de remodéliser numériquement les étapes de formation et d'établissement des faciès de tressage.

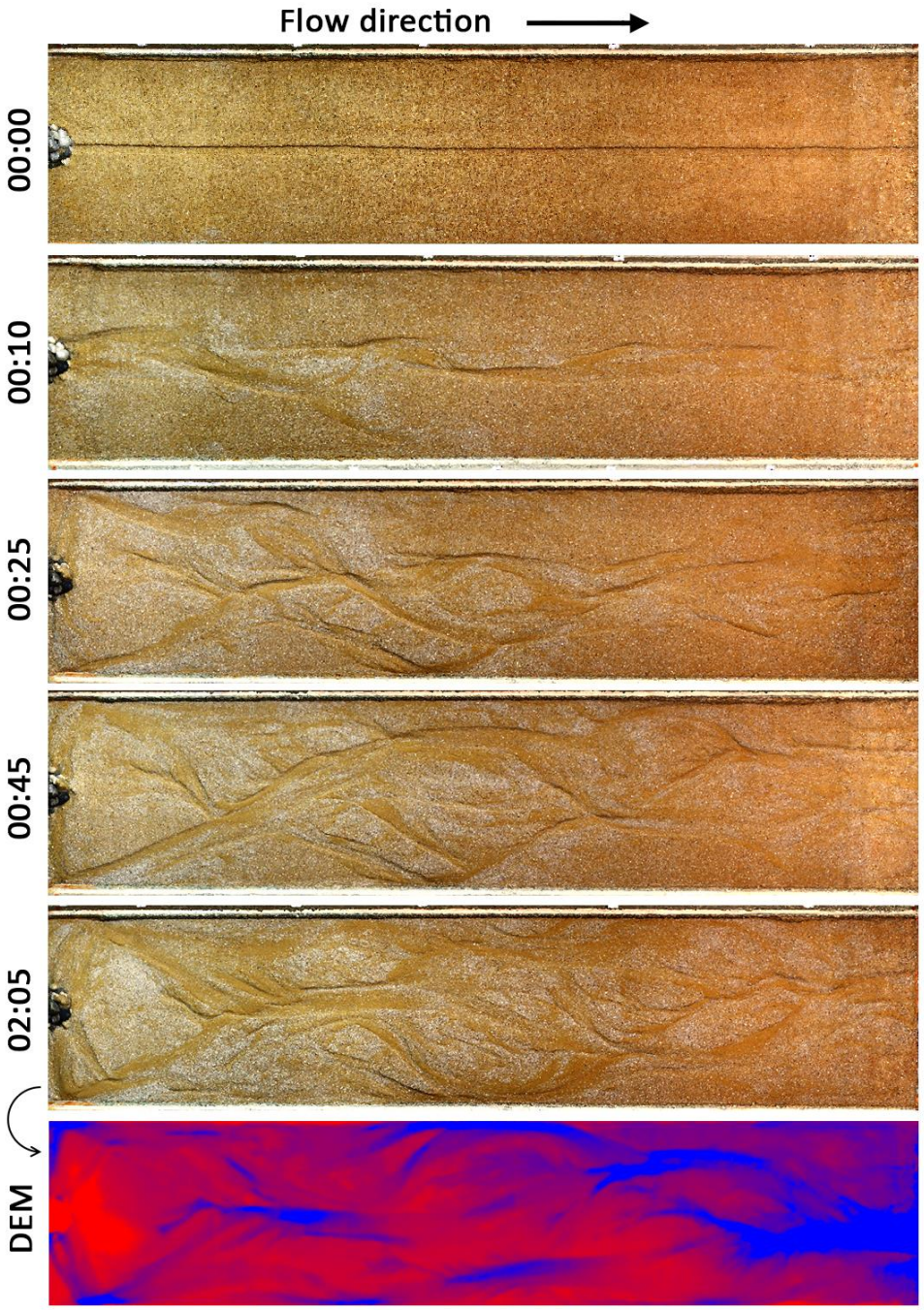


Figure 23 : Modèle physique : Formation progressive d'un faciès de tressage dans un lit à granulométrie bimodale, complexification progressive des formes du lit et tri granulométrique (Rifaï 2014)

Ce choix a été motivé par la disponibilité de données et de points de comparaison. De plus, le fait de prendre comme état initial un fond plat et des conditions aux limites les plus simples possible, nous a permis de mener une analyse isolée de la capacité du modèle à reproduire un motif de tresses et maintenir son développement.

Les simulations 2-D ont été menées par la méthode des éléments finis pour la partie hydrodynamique et par la méthode des volumes finis pour la partie morphodynamique. Les schémas numériques utilisés pour la convection des vitesses et hauteurs d'eau sont, respectivement, la méthode des caractéristiques et le schéma distributif PSI conservatif, en accord avec les paramètres par défaut de TELEMAC. Par ailleurs, l'effet de la pente, la

déviation des sédiments transportés ainsi que les courants secondaires ont été pris en compte dans ce travail.

Les résultats des simulations ont montré que le modèle TELEMAC2D/SISYPHE a permis de reproduire avec succès la phase initiation du motif de tressage:

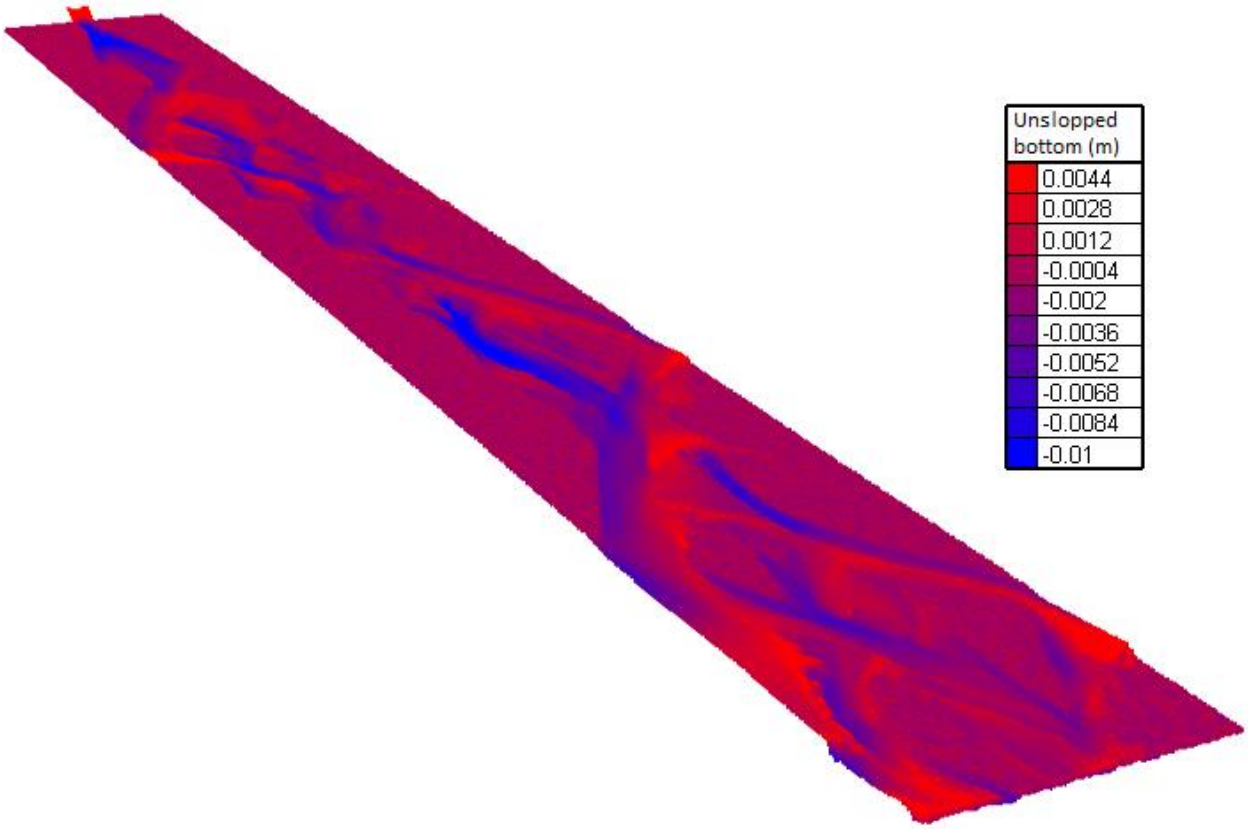


Figure 24 :Modèle numérique : Résultat de la topographie du lit dans une des modélisations réalisées

Le relief obtenu était comparable aux motifs des modèles physiques de tresses. En effet, la dynamique de formation des tresses et la formes des bancs est similaires à celles observées pour des rivières naturelles et bancs d'essais.

Néanmoins, une fois les tresses formées, elles ne sont plus maintenus et le modèle converge vers une morphologie à chenal unique. Cela suggère un manque de variabilité latérale de l'afflux liquide et solide et/ou une mauvaise représentation des processus d'érosion des berges due à un raffinement insuffisant du maillage.

En synthèse les tests montrent des résultats encourageant mais une incapacité du logiciel à maintenir le faciès caractéristiques à chenaux multiples. Des recherches plus approfondies sur les équations décrivant les mécanismes de tri granulométriques et sur la capacité du logiciel à réviser son maillage de calcul en temps réel doivent être menées avant de pouvoir espérer appliquer les outils numériques actuels dans des études de conceptions de plages de dépôts.

Le mémoire complet des Ismail Rifaï est fourni en annexe.

5. Conclusions

Les retenues collinaires et d'altitude doivent être protégées contre les risques torrentiels qui peuvent sévir à leur voisinage.

Des techniques de protection contre les érosions doivent être mises en place si des écoulements approchent les infrastructures. Il faut en complément protéger l'ouvrage contre les dépôts si ce dernier n'est pas transparent. Pour piéger l'ensemble de la charge sédimentaire en amont des retenues collinaires et d'altitude, nous préconisons donc de mettre en place des pièges à sédiments.

Ces derniers seront équipés d'un bassin à la largeur maximum possible afin de maximiser l'effet ② (l'étalement de la lame d'eau et des écoulements). Partout où cela est possible, leurs pentes seront abaissées pour maximiser l'effet ① (la diminution de la capacité de transport dans le bassin du barrage liée à une pente de bassin plus faible que la pente amont du cours d'eau). Si des déblais sont nécessaires pour établir les bassins, le haut des bassins sera équipé d'une structure de type barrage de correction limitant le risque de déstabilisation du chenal amont.

Figure 25 : Vue aérienne des plages de dépôt de la Gresse (Isère, France) et du Nant Bourdon (Haute Savoie, France) : bassin élargi promouvant l'étalement de la lame d'eau et le dépôt des graviers, situé de plus à des ruptures de pente naturelles (photos géoportail.fr)

Les barrages filtrants de fermeture des ouvrages seront équipés de barreaux très rapprochés ou de petit pertuis (Figure 14 a et d) pour maximiser les effets ③ et ④ (sédimentation de la charge grossière dans la zone d'eau calme liée au remous liquide en amont du barrage filtrant et blocage mécanique des matériaux transportés contre le barrage filtrant).

Figure 26 : ouvrages à petites ouvertures visant une rétention complète des sédiments par blocage mécanique : plages du Nant Bourdon et du Nant Rouge (Haute Savoie, France)

Si la place manque pour mettre en place des pièges à sédiments de taille adaptée à la production sédimentaire naturelle du bassin versant amont, des barrages de correction torrentielle seront mis en place pour mettre à profit leur effet de modulation du transport solide en amont du piège à sédiment.

Enfin, dans le cadre de l'action 2.5 du projet RISBA, un important travail bibliographique a été réalisé pour mettre en évidence les bonnes pratiques et règles de l'art en matière de protection contre les risques torrentiels.

- L'équipe d'IRSTEA travaillant dans le cadre du projet RISBA s'est associée à une autre équipe IRSTEA pour rédiger un livre de synthèse sur les bonnes pratiques en matière de conception des protections contre les risques torrentiels. Ce travail sera publié en 2015 (Tacnet et al. in preparation)

- Deux articles traitant de la conception des pièges à sédiments utilisant des barrages filtrants sont en cours de finalisation de révision et sont d'ors et déjà accepté par le *Journal of Hydraulic Engineering* (Piton & Recking 2015a; Piton & Recking 2015b)*:*

    - Le premier article (DESIGN OF SEDIMENT TRAPS WITH OPEN CHECK DAMS: A REVIEW, Part I: hydraulic and deposition processes) traite de la conception des ouvrages du point de vue hydraulique et sédimentation. Il présente d'abord le contexte général dans lequel ces ouvrages sont construits. Leurs fonctions sont discutées. Une procédure détaillée de conception est proposée. La seconde partie concerne le design hydraulique de la forme du barrage filtrant et de son évacuateur de crue. La troisième partie s'intéresse à la formation et au développement des dépôts, à l'effet du caractère transitoire des crues et décrues, à l'effet de la forme du bassin et de sa pente de fond. Des formules sont proposées pour estimer les hauteurs et pentes de dépôts. L'article se termine par un panorama des questions scientifiques demandant encore du travail afin de parfaire ce domaine de travail.

    - Le second article (DESIGN OF SEDIMENT TRAP USING OPEN CHECK DAMS: A REVIEW, Part II: Woody debris problems) s'intéresse plus particulièrement au problème des flottants. En effet des retours d'expériences montrent que les flottants ont une incidence très importante sur le fonctionnement des pièges à sédiments et plages de dépôts. Pour mieux prendre en compte cet aspect, l'article propose: une première partie s'intéressant aux méthodes d'estimation de la production de flottants par les bassins versants en temps de crue en terme de volume et de dimension. Quelques éléments sont donnés sur leur transfert et incidences sur les écoulements. Une seconde partie qui détaille les retours d'expériences connus sur les interactions entre flottants et différentes formes de barrages: ces élements doivent permettrent aux concepteur de déterminer le type de structure le plus adapté aux besoins de chaque site. La troisième partie rapporte les critères de conception visant les dimensions des ouvertures, les efficacités et les capacités de piégeages et les pertes de charges associées aux flottants. Enfin une procédure détaillée de conception est proposée et ces pistes de recherches futures sont fournies.

- Un article rapportant l'histoire de l'usage des barrages de correction torrentielle dans les manuels rédigés par les forestiers et ingénieurs chargés de la Restauration des Terrains en Montagne. Ce travail remet en perspective les évolutions conjointes des connaissances des processus torrentiels et des techniques et rôles donnés aux barrages. Il analyse comment l'homme a adapté la technique de la correction des torrents au fur et à mesure de sa meilleur compréhension des phénomènes en jeux. Il permet, *a posteriori*, de définir une grille de lecture des rôles des barrages situés en divers points des bassins versants torrentiels (Piton et al. in preparation.).

6. Sommaire

1. Contexte 2
1.1. Implantation des ouvrages 2
1.2. Aléas torrentiels 3
1.3. Hydrologie torrentielle 3
1.4. Erosion de sols et limitation des apports sédimentaires à l'échelle du bassin versant 3
1.5. Techniques de corrections torrentielles 4
1.5.1. Plantation et génie biologique 4
1.5.2. Stabilisation des chenaux dans les hauts bassins 5
1.5.3. Piégeage des sédiments avant l'arrivée dans la retenue 5
1.5.4. Chenalisations 6
2. Objectif de l'action 2.5 du projet RISBA : la protection des retenues contre les sédiments 7
2.1. Contexte de la problématique 7
2.2. Questions abordées dans le cadre de l'action 2.5 8
3. Stabilisation amont des lits torrentiels : utilisation des barrages de correction torrentielle 9
3.1. Objectif des barrages de correction 9
3.2. Nouveaux éléments mis en évidence par les essais conduits dans le projet RISBA 9
3.2.1. Dispositif expérimental et résultats 9
3.2.2. Discussion 12
3.2.3. Conclusion sur l'effet des barrages de correction torrentielle 14
4. Piégeage des sédiments en amont de la retenue : utilisation des barrages filtrants 15
4.1. Objectif des barrages filtrants 15
4.2. Mécanismes contrôlant le piégeage 16
4.3. Nouveaux éléments mis en évidence par les essais conduits dans le projet RISBA 17
4.3.1. Questions scientifiques 17
4.3.2. Démarche de recherche 17
4.3.3. Modélisation physique des plages de dépôts – Travaux de Jules Le Guern & Guillaume Piton – bassins rectangulaires 18
4.3.4. Visites de sites 20
4.3.1. Modélisation physique des plages de dépôts – Travaux de Costanza Carbonari & Guillaume Piton – bassins L2C0.7E0.5 25
4.3.2. Modélisation numérique des écoulements en tresses 27
5. Conclusions 30
6. Sommaire 32
7. Référence 33

7. Référence

Anon, 1911. *Ecole Forestière - Restauration et conservation des terrains en montagne. Deuxième partie, Description sommaire des périmètres de restauration, Région des Alpes.*,

Armanini, A., Dellagiacoma, F. & Ferrari, L., 1991. From the check dam to the development of functional check dams. *Fluvial Hydraulics of Mountain Regions*, 37, pp.331–344.

Ashmore, P., 2013. Treatise on Geomorphology. In E. (Ed. . J. (Editor in Chief) Wohl Shroder, ed. *Treatise on Geomorphology*. Elsevier Inc., pp. 289–312.

Bacchi, V., 2011. *Etude expérimentale de la dynamique sédimentaire d'un système à forte pente soumis à des conditions hydrauliques faibles*. UNIVERSITÉ DE GRENOBLE. Available at: http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/62/53/81/PDF/Bacchi_Vito_2011.pdf.

Bacchi, V. et al., 2014. The effects of kinetic sorting on sediment mobility on steep slopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39, p.8.

Bernard, C., 1927. *Cours de restauration des montagnes* E. N. des Eaux et Forêt, ed., Ecole normale des eaux et forêts.

Blanchet, C., 1975. Importance de l'emplacement de la prise d'eau dans la rivière pour la Protection contre le débit solide. In *9th congress of the international commission on irrigation and drainage conference proceedings*. Moscow, USSR - 28 July-02 August, pp. 303–320.

Bouvard, M., 2004. *Transport des sédiments dans les ouvrages hydrauliques*, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées.

Carbonari, C., 2015. *Ms Thesis manuscripts: Small scale experiments of deposition processes occuring in sediment traps, LS-PIV measurments and geomorphological descriptions.* Univ. of Florence.

CIPC, 2013. La revanche dans les projets de protection contre les crues et de l'analyse de dangers - Recommendations de la Commission pour la protection contre les crues (CIPC). *Wasser Energie Luft*, 105, pp.122–132.

Couvert, B. et al., 1991. General survey on torrential check dams and sediment trap [Etude générale sur les seuils de correction torrentielle et les plages de dépôt]. *Houille Blanche*, 46(6), pp.449–456.

Le Coz, J. et al., 2014. Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free FUDAA-LSPIV software. In *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, RIVER FLOW 2014*. Lausanne: CRC Press/Balkema, pp. 1961–1967.

Demontzey, P., 1882. *Traité pratique du reboisement et du gazonnement des montagnes* J. Rothschild, ed., Ministères de l'agriculture et du commerce et des travaux publiques.

Van Dijk, M. et al., 2012. Contrasting morphodynamics in alluvial fans and fan deltas: Effect of the downstream boundary. *Sedimentology*, 59(7), pp.2125–2145.

Van Dijk, M.., Postma, G.. & Kleinhans, M.G.., 2009. Autocyclic behaviour of fan deltas: An analogue experimental study. *Sedimentology*, 56(5), pp.1569–1589.

Duile, J., 1841. *Bericht und Anträge des Herrn J. Duile ... an Landammann und Rath des Kantons Glarus über den Untersuch der Wild- und Gebirgsbäche im Kanton Glarus*, Glarus.

Van Effenterre, C., 1982. Les barrage perméables de sédimentation. *Revue Forestière Française*, 5, pp.87–93. Available at: http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/21614/RFF_1982_5_87.pdf?sequence=1.

Fabre, J.-A., 1797. *Essai sur la théorie des torrens et des rivières* -, ed., chez Bidault Libraire.

Ferro, V. & Porto, P., 2011. Predicting the equilibrium bed slope in natural streams using a stochastic model for incipient sediment motion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(8), pp.1007–1022.

Fesquet, F., 1997. *Un corps quasi-militaire dans l'aménagement du territoire : le corps forestier et le reboisement des montagnes méditerranéennes en France et en Italie aux XIX et XX èmes siècles*. Université Paul Valéry, Montpellier III.

Frisi, P., 1770. *A Treatise on Rivers and Torrents; with the Method of Regulating Their Course and Channels*, London: J. Weale.

Gominet, S., 2010. *Tout le monde le prenait pour un fou -événements et catastrophes naturelles en Isère - mars 2001 - décembre 2008* I. des Risques MAjeurs, ed., 15 rue Eugène Faure, 38000 Grenoble: IRMA. Available at: http://www.irma-grenoble.com/PDF/05documentation/ouvrages/livre_photo_site.pdf?PHPSESSID=a5e98ef61516ec4b7acff3f4b14e83e8.

Gras, S., 1857. *Etudes sur les torrents des Alpes* V. Dalmont, ed., Paris: F.Savy.

Gras, S., 1850. *Exposé d'un système de défense des cours d'eau torrentiels des Alpes et application au torrent de la Romanche dans le département de l'Isère.* C.-G. et Vr Dalmont, ed., Grenoble: Charles Vellot.

Gruffaz, F., 1996. *Etude de description et analyse des plages de dépôt torrentilles réalisées dans les Alpes et Pyrénées Françaises*, RTM.

Le Guern, J., 2014. *Ms Thesis manuscripts: Modélisation physique des plages de dépôt : analyse de la dynamique de remplissage*.

Le Guern, J., Piton, G. & Recking, A., 2014. Braiding-like pattern initiation in a steep slope sediment trap.

Hauet, A. et al., 2014. Application of the LSPIV method for the measurement of velocity fields and flood discharges in reduced scale model and in rivers [Application de la méthode LSPIV pour la mesure de champs de vitesse et de débits de crue sur modèle réduit et en rivière]. *Houille Blanche*, (3), pp.16–22.

Hübl, J. et al., 2005. Structural mitigation measures. In *Proceedings zum 3rd Probabilistic Workshop: Technical Systems + Natural Hazards, 24-25 Nov. Wien*.

Jaeggi, M.N.R., 1992. Dynamics of Gravel-Bed Rivers. In Wiley Chichester, ed. Billi P, Hey RD, Thorne CR, Tacconi P, pp. 593–605.

Kostadinov, S. et al., 2008. Erosion control works and the intensity of soil erosion in the upper part of the river Toplica drainage basin. In *IOP Conference Series: Earth and*

Environmental Science. 1-12. IOP Publishing. Available at: http://iopscience.iop.org/1755-1315/4/1/012040/pdf/1755-1315_4_1_012040.pdf.

Kostadinov, S., 1993. Possibility of Assessment of the Slope of Siltation Based on the Some Hydraulic Characteristics of the Torrential Flows. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 45(5), pp.28–33. Available at: https://www.jstage.jst.go.jp/article/sabo1973/45/5/45_5_28/_pdf.

Koulinski, V., ARTELIA & RTM, 2011. *Étude sur modèle réduit de la plage de dépôt du Chagnon*, Commune de Vars.

Malavoi, J.R. et al., 2011. *Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière.* V. Barre, ed., Onema.

Marchi, L. & Cavalli, M., 2007. Procedures for the documentation of historical debris flows: Application to the Chieppena Torrent (Italian Alps). *Environmental Management*, 40(3), pp.493–503.

Mathys, N. et al., 2013. Torrents et Rivières de Montagne: dynamique et aménagement. In G. D. D. Richard A. Recking, ed. QUAE, pp. 81–138.

Piton, G., Carladous, S. & Recking, A., The role of check dams in torrent control works: An historical perspective from the French Alps. *In preparation*.

Piton, G. & Recking, A., 2015a. Design of sediment traps with open check dams: a review, part I: hydraulic and deposition processes. *(Accepted by the) Journal of Hydraulic Engineering*, pp.1–23.

Piton, G. & Recking, A., 2015b. Design of sediment traps with open check dams: a review, part II: woody debris problems. *(Accepted by the) Journal of Hydraulic Engineering*, pp.1–17.

Piton, G. & Recking, A., 2014a. Grade control structure influences on steep slope stream dynamics: bed level fluctuations and sediment transport variations. In *SHF Conference : Small scale morphological evolution of coastal, estuarine and river systems*. Nantes; 6 & 7 october 2014.

Piton, G. & Recking, A., 2014b. The dynamic of streams equipped with check dams. In *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, RIVER FLOW 2014*. pp. 1437–1445.

Poncet, A., 1995. *Restauration et conservation des terrains en montagne* S. RTM, ed., Office National des Forêts.

Porto, P. & Gessler, J., 1999. Ultimate bed slope in Calabrian streams upstream of check dams: Field study. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(12), pp.1231–1242.

Recking, A., 2010. A comparison between flume and field bed load transport data and consequences for surface-based bed load transport prediction. *Water Resources Research*, 46(3).

Recking, A., 2006. *An experimental study of grain sorting effects on bedload*. INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON.

Recking, A. et al., 2008. Bed-Load transport flume experiments on steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(9), pp.1302–1310.

Recking, A., 2013. Relations between bed recharge and magnitude of mountain streams erosions. *Journal of Hydro-Environment Research*, -, pp.1–10.

Reitz, M.D. & Jerolmack, D.J., 2012. Experimental alluvial fan evolution: Channel dynamics, slope controls, and shoreline growth. *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface*, 117(2), pp.1–19.

Rickenmann, D., 1991. Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(11), pp.1419–1439.

Rifaï, I., 2014. *2D modeling of braided river sediment dynamic (Modélisation 2-D de la dynamique sédimentaire d'une rivière en tresses)*. ENGEES / Université de Strasbourg.

Rinaldi, M., Piégay, H. & Surian, N., 2011. Geomorphological approaches for river management and restoration in Italian and French Rivers. *Geophysical Monograph Series*, 194, pp.95–113.

Smart & Jaeggi, M., 1983. Sediment Transport on Steep Slopes. In *Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 64*.

Suda, J. et al., 2009. Safety assessment of barrier structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 5(4), pp.311–324.

Surell, A., 1870. *Etude sur les torrents des Hautes Alpes (2nd Edition)* Dunod, ed., Paris: Librairie des corps impériaux des ponts et chaussées et des mines.

Tacnet, J.M. et al., *Design of protection works against torrential floods* -, ed., (In preparation for) Wiley Online Library.

Thiéry, E., 1891. *Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement* Baudry et Cie, ed., Librairie Polytechnique, PARIS.

USACE, 1994. *Channel stability assessment for flood control projects*, Washington, DC 20314-1000: U.S. Army Corps of Engineers. Available at: http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/EM_1110-2-1418_sec/EM_1110-2-1418.pdf.

Zollinger, F., 1983. *Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz (ihre Morphologie und die Möglichkeiten einer Steuerung) [processes in debris detention basins for torrent control (A morphology and the possibilities of control)]*. ETH Zürich.

Annexes:

- Mémoire de master de Jules Le Guern

- Compte rendu des visites de site réalisées dans le cadre du projet Risba

- Mémoire de master de Ismail Rifaï