



HAL
open science

Fonctions des barrages de correction torrentielle

Guillaume Piton, Simon Carladous, Alain Recking, Jean-Marc Tacnet,
Frédéric Liébault, Damien Kuss, Yann Quefféléan, Olivier Marco

► To cite this version:

Guillaume Piton, Simon Carladous, Alain Recking, Jean-Marc Tacnet, Frédéric Liébault, et al.. Fonctions des barrages de correction torrentielle. *Cybergeographe: Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 2019, 10.4000/cybergeographe.32190 . hal-02132860

HAL Id: hal-02132860

<https://hal.science/hal-02132860v1>

Submitted on 17 May 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.

FONCTIONS DES BARRAGES DE CORRECTION TORRENTIELLE [FUNCTIONS OF CHECK DAMS IN STEEP CREEKS]

Guillaume PITON^{*1}, Simon CARLADOUS², Alain RECKING¹, Jean Marc TACNET¹, Frédéric LIEBAULT¹,
Damien KUSS³, Yann QUEFFELEAN², Olivier MARCO²

*Contact : guillaume.piton@irstea.fr

¹ Univ. Grenoble Alpes, Irstea, UR ETNA, Grenoble, France.

²Office National des Forêts, Département Risques Naturels, Grenoble, France

³Office National des Forêts, service Restauration des Terrains de Montagne de l'Isère, Grenoble, France

Citation : Guillaume Piton, Simon Carlados, Alain Recking, Jean-Marc Tacnet, Frédéric Liebault, Damien Kuss, Yann Queffelea and Olivier Marco, « Fonctions des barrages de correction torrentielle », *Cybergeo : European Journal of Geography* [Online], Environment, Nature, Landscape, document 896, Online since 15 May 2019, URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/32190> ; DOI:10.4000/cybergeo.32190

Résumé

Depuis plus de 150 ans, les hommes utilisent les barrages de correction torrentielle pour essayer de limiter l'activité géomorphologique des cours d'eau de montagne et les dommages induits. Ils sont probablement les ouvrages les plus emblématiques des travaux de lutte contre l'érosion en milieu montagnard. Les sociétés de montagne ont ainsi hérité de milliers de ces ouvrages bâtis dans les ravines et combes des hauts bassins. L'évaluation de l'efficacité d'un ouvrage et du dispositif auquel il appartient, les décisions qui concernent leur maintenance ou la réalisation de nouveaux aménagements nécessitent en premier lieu une compréhension fine des fonctions qu'ils assurent pour avoir un effet sur les phénomènes torrentiels. Les étapes suivantes consistent à évaluer quantitativement l'effet de chacune de ces fonctions sur les caractéristiques des crues et leurs effets combinés. Comprendre les fonctions de ces ouvrages parfois très vieux peut toutefois être compliqué, notamment parce que le contexte socio-environnemental dans lequel les ouvrages ont été bâtis a souvent changé. Cet article retrace, à travers une analyse d'archives françaises, les objectifs variés pour lesquels des barrages de correction torrentielle ont été bâtis. Cet article analyse en premier lieu la chronologie de la définition théorique de chaque fonction et son application sur le terrain. Au XIXe siècle, des ingénieurs ont en effet développé un corpus de connaissances empiriques et conceptuelles très détaillé sur les mécanismes d'érosion, la morphodynamique torrentielle et les processus de transport sédimentaire, ainsi que sur les interactions entre barrages de correction torrentielle et ces processus naturels. La deuxième partie de cet article synthétise les descriptions conceptuelles des fonctions de barrages de correction torrentielle à la lumière de plus de 150 ans d'expérience, ainsi que leurs implications sur les caractéristiques des ouvrages. L'expérience française est ensuite rapidement comparée à celle d'autres nations pionnières dans le domaine de la correction torrentielle. On discute ensuite les prochaines étapes et travaux de recherche à mener, pour développer des analyses complètes de l'efficacité des barrages de correction torrentielle dans les dispositifs de protection contre les risques. Finalement cet article retrace comment, conceptuellement, les barrages de correction torrentielle influencent la morphodynamique des torrents, en gardant à l'esprit les connaissances acquises à la fois dans les guides des pionniers et dans les travaux de recherche plus récents.

Mots clés:

Gestion des risques, inondation, érosion/sédimentation, montagne

Introduction

Les montagnes sont d'importantes sources sédimentaires pour les rivières de piémonts (Wohl, 2006). Les rivières et les ruisseaux jouent en effet un rôle clé dans la cascade sédimentaire en transférant et tamponnant les flux entre les versants actifs et les plaines alluvionnaires (Fryirs, 2013). Dans les cours d'eau de montagne, le transport sédimentaire a principalement lieu pendant les crues. Ces dernières ont ainsi régulièrement des conséquences graves et coûteuses en termes de dommages sur les enjeux qui sont exposés à ces phénomènes (Meunier, 1991) : réduction de la capacité des barrages hydroélectriques, coupures des réseaux, endommagement des zones commerciales, industrielles et d'habitations, pertes de vies humaines et blessés. L'homme intervient donc souvent dans les bassins versants de montagne pour réduire les conséquences négatives des apports solides excessifs issus des torrents.

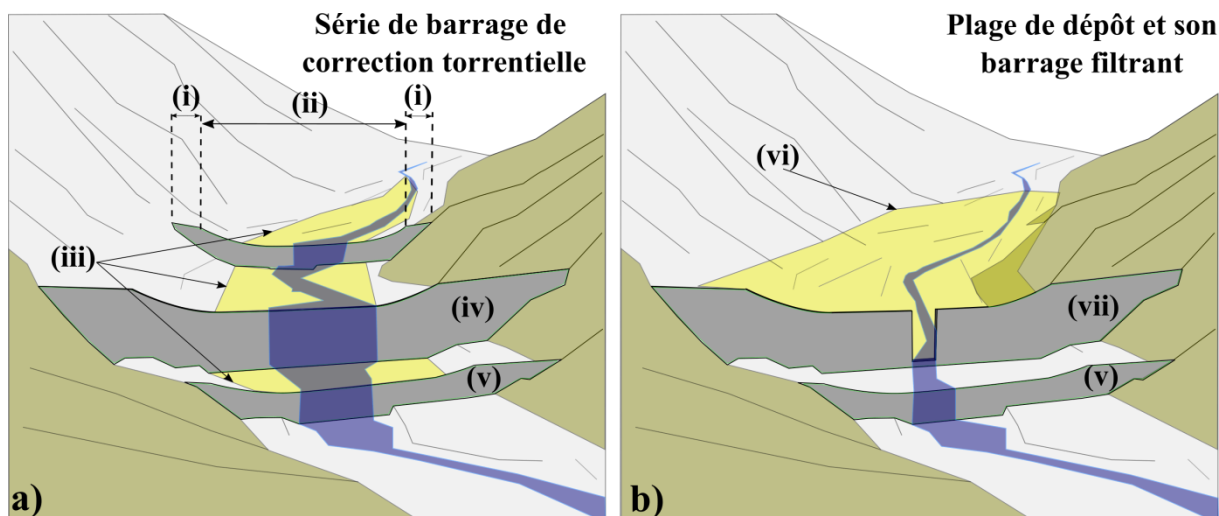
Le terme de "torrent" est largement utilisé en Europe et moins en Amérique. Il est dérivé de l'adjectif latin *torrens* qui signifie "éphémère" mais surtout "impétueux" et sous-entend ainsi la violence et la rapidité des crues du cours d'eau (Gaffiot, 1934). Le terme de torrent fait donc référence aux cours d'eau ayant une activité géomorphologique particulièrement marquée comparée aux "ruisseaux" réputés plus calmes (Surell, 1841).

Cette activité géomorphologique est le fruit de la rencontre entre 1. les réponses hydrologiques rapides, typiques mais non restrictives aux zones de montagne, et 2. une disponibilité sédimentaire suffisante. L'existence d'un torrent est donc principalement liée à l'activité de sources sédimentaires, généralement définies comme localisées, telles que les glissements de terrain ou les écroulements rocheux, ou diffuses, telles que le ravinement ou la reptation (Reid, Dunne, 2003). Leur production sédimentaire fluctue naturellement dans le temps (Fryirs, 2013) en fonction du climat et de changements dans l'occupation des sols (Gomez *et al.*, 2003 ; Liébault *et al.*, 2005 ; Comiti, 2012), en particulier au niveau du couvert végétal (Phillips *et al.*, 2013).

Le rôle de la végétation dans la stabilisation de l'érosion des sols est connu depuis l'antiquité (Van Andel *et al.*, 1986) engendrant, au moins depuis le Moyen-Âge, l'édiction de lois réglementant les coupes forestières avec pour but la prévention de l'érosion (Fesquet, 1997, p. 114 ; JSA, 2003 ; 2012 ; Okamoto, 2007 ; Evette *et al.*, 2009). Dans les zones propices à l'érosion, les interventions sur les versants telles que les reboisements, le génie biologique et la construction de terrasses, ont parfois été mises en œuvre en combinaison avec des travaux de correction des ravines et torrents, de chenalisation des lits sur les cônes de déjection et d'endiguement des rivières. Les ouvrages de génie civil tels que les barrages de correction torrentielle, les endiguements et les protections de berges peuvent ainsi être observés depuis les têtes et jusqu'aux pieds des bassins versants. Des débats scientifiques et techniques ont de tout temps opposé partisans du génie civil et du génie biologique (Fesquet, 1997, p. 520 ; Hall, 2005, p. 72 ; Bischetti *et al.*, 2014). Il est toutefois désormais largement accepté que chaque technique est adaptée à des contextes différents et qu'elles sont complémentaires (Combes, 1989 ; deWolfe *et al.*, 2008). Parmi tous les ouvrages de génie civil, les barrages et seuils sont probablement les plus emblématiques du domaine de la correction torrentielle.

A travers cet article, les termes de "barrage" ou de "barrage de correction torrentielle" sont utilisés indifféremment et désignent des ouvrages constitués de bois, de gabions, de pierres sèches, de maçonnerie et/ou de béton armé, bâtis en travers de torrents et ravines dans les bassins versants torrentiels (figure 1a). Ces ouvrages sont atterris, c'est-à-dire remplis de sédiments, et n'ont pas pour fonction de retenir de l'eau. C'est une différence fondamentale avec les barrages et seuils dits "hydrauliques" plus largement connus dans leur rôle de rétention d'eau. Barrages hydrauliques et barrages de correction torrentielle ont par ailleurs un statut différent dans la réglementation française (Carladous, Quefféléan, 2017).

Figure 1 : Vue schématique et définition des composants d'une série de barrages de correction torrentielle (a), d'une plage de dépôt, ouvrage regroupant un bassin de dépôt et son barrage filtrant (b)



Définitions des composants des ouvrages : (i) ailes de barrage ; (ii) cuvette de barrage ; (iii) zone dite de « régulation du transport solide » où des phénomènes d'érosion et de dépôt sédimentaire alternent dans le temps, phénomène aussi dénommé "respiration" dans le jargon technique ; (iv) barrage ; (v) contre-barrage, petit ouvrage situé à proximité d'un barrage et dédié à sa protection contre les affouillements ; (vi) bassin de la plage de dépôt ; (vii) barrage filtrant dit aussi « ouvrage de fermeture » de la plage de dépôt.

Dans la littérature, des ouvrages similaires ont été appelés "barrages RTM" (Restauration des Terrains de Montagne), *check dams* (barrages de contrôle ; Piton *et al.*, 2017), *consolidation dams* (barrages de consolidation ; D'Agostino, 2013), *solid body dams* (barrages à corps plein ; Wehrmann *et al.*, 2006), *SABO dams* (barrage SABO ; l'équivalent japonais de RTM ; Chanson 2004), *crib barriers* (barrières de caissons ; Garcia, 2008), *bed sills* (seuils de fond ; Gaudio *et al.*, 2000), *weirs* et *thresholds* (seuils ; Rinaldi, Simon, 1998 ; Blinkov *et al.*, 2013) ou *grade control structures* (ouvrages de maintien du profil en long ; USACE, 1994).

Dans le jargon technique, on différencie un seuil d'un barrage par leur hauteur de cuvette : les premiers faisant moins de deux mètres de haut. Les petits seuils, rustiques, en bois ou en gabions utilisés dans la correction des ravines sont aussi appelés *check dams* en anglais (Heede, 1967). Ces ouvrages peuvent être considérés comme les cousins réduits des grands barrages de correction torrentielle modernes. Ces petits ouvrages font en effet face à des processus similaires à une échelle différente : les phénomènes érosifs présentant des caractéristiques intrinsèques d'invariance d'échelle (Paola *et al.*, 2009). La plus grande dimension des systèmes torrentiels limite simplement l'usage de certaines techniques de construction. Par exemple, les ouvrages en bois résistent mal aux laves torrentielles. Il faut par ailleurs prendre en compte l'effet stabilisateur de la végétation qui dépend de l'échelle du système : l'influence du couvert végétal et des systèmes racinaires est forte sur les érosions et instabilités de surface mais limitée sur les grands glissements profonds.

De petits ouvrages fixant la position de passages à gué ou protégeant des zones agricoles sont utilisés depuis l'antiquité (Leopold, 1992 ; McCorriston, Oches, 2001). L'environnement agressif des ruisseaux de montagne a toutefois probablement détruit la plupart des plus anciens ouvrages qui n'ont pas été repris et entretenus. Armanini *et al.* (1991), Jaeggi, Pellandini (1997), Okamoto (2007) et Koutsoyiannis *et al.* (2008) donnent quelques exemples de constructions de barrages de correction torrentielle antérieures au XVIII^e siècle, mais il semble que de tels grands ouvrages (hauts de plusieurs mètres) étaient des initiatives locales et relativement rares, prises à la suite d'une catastrophe ou en dernier recours. À l'époque, l'absence d'une compréhension générale du problème torrentiel et de standards de construction rendait difficile la mise en œuvre d'ouvrages adaptés et suffisamment résistants dans les torrents les plus actifs.

Les bases de l'hydraulique moderne ont été partiellement jetées par la communauté scientifique italienne, stimulée par les travaux de Leonardo Da Vinci (1452-1519) et de Benedetto Castelli (1577-1643). Des opérations pionnières ont ainsi été mises en œuvre dans les bassins du Po et de l'Arno (Castelli, 1628 ; Frisi, 1770 ; Hall, 2005 ; Comiti, 2012 ; Bischetti *et al.*, 2014). Leurs travaux ont influencé des ingénieurs d'autres pays d'Europe, notamment en France (Marsh, 1864 ; p. 386), et même jusqu'en Chine (Koenig, 2014). Certains ingénieurs se sont concentrés plus particulièrement sur les montagnes et ont souligné de façon cohérente, bien que probablement par des réflexions et observations indépendantes (Marsh, 1864, p. 205), les caractéristiques spécifiques des rivières torrentielles et des torrents (Frisi, 1770 ; von Zallinger, 1779 ; Fabre 1797).

À la fin du XIXe siècle, en Europe et au Japon, l'intense développement de l'économie et des infrastructures (routes, voies ferrées et transport fluvial) a nécessité la mise en place de protections contre les apports de sédiments issus des montagnes et qui perturbaient leur fonctionnement (Napoléon III, 1860, p. 161 ; Kamibayashi, 2009). Un important développement des travaux de correction torrentielle dans les hauts bassins a ainsi été justifié dans l'objectif de limiter le transfert de sédiments depuis les torrents vers les systèmes fluviaux aval. Des opérations de contrôle de l'érosion basées sur des reboisements et ouvrages de génie civil ont alors été mises en œuvre en montagne. Elles étaient encadrées par les lois portant sur le contrôle de l'érosion des montagnes, adoptées dans de nombreux pays souvent à la suite d'une période de crues sévères et d'importants dommages (Eisbacher, 1982) : par exemple, en France en 1860, en Suisse en 1876, en Italie en 1877, en Autriche en 1884 ou au Japon en 1897.

Les gestionnaires actuels de torrents ont ainsi hérité de milliers d'ouvrages de protection qui nécessitent des opérations d'entretien dont le coût peut être considéré comme important (Mazzorana *et al.*, 2014). En France par exemple, 92 873 barrages et seuils de correction torrentielle, 10 tunnels, 736 km de réseaux de drainage et 74 km de râteliers paravalanches ont été inventoriés en 1964 (Messines du Sourbier, 1964). Toutefois, seulement 14 000 barrages et seuils sont aujourd'hui régulièrement entretenus pour le compte de l'État par le service RTM dans les forêts domaniales de 11 départements de montagne des Pyrénées et des Alpes (Carladous *et al.*, 2016b). Plusieurs raisons peuvent expliquer cette différence entre l'inventaire de 1964 et l'actuel : 1. le Massif Central a été l'objet d'important travaux au début de la RTM mais les zones reboisées et équipées d'ouvrages sont gérées directement par l'ONF (Office National des Forêts) et non par le service spécialisé RTM ; 2. des ouvrages de très petite taille, individualisés, de génie civil et génie biologique, ont été comptabilisés en 1964, là où seuls les ouvrages de génie civil les plus importants sont actuellement suivis ; 3. des ouvrages non entretenus ont été détruits ; enfin, 4. des choix ont été faits sur les ouvrages qu'il est nécessaire de continuer de maintenir en état et donc de suivre.

La pertinence de maintenir ces ouvrages parfois vieux et difficiles d'accès est questionnée par les donneurs d'ordres actuels. Dans un bassin versant où des enjeux donnés doivent être protégés, il est nécessaire de décider entre plusieurs variantes d'aménagement et de gestion : détruire intentionnellement certains ouvrages, abandonner simplement leur maintenance, continuer leur entretien ou investir dans de nouveaux ouvrages. Afin d'aider la prise de décisions, il est nécessaire de définir la réduction du risque permise par chacune de ces solutions techniques (Carladous *et al.*, 2014b), ceci en prenant en compte les ouvrages et leurs effets (Margreth et Romang, 2010). Ces études comprennent typiquement plusieurs étapes : 1. définition des besoins et objectifs de protection, c'est à dire de réduction du risque ; 2. détermination des "fonctions" des barrages, c'est-à-dire de leur effet qualitatif sur le phénomène ; 3. estimation de leur "capacité", c'est-à-dire de leur effet quantitatif sur la morphodynamique ; 4. propager les changements dans l'aléa torrentiel à travers tout le système de protection en considérant la fiabilité des ouvrages mais aussi l'incertitude liée aux connaissances limitées sur les phénomènes impliqués ; 5. répéter ces étapes pour chaque variante d'aménagement et de gestion. La comparaison de la réduction du risque associée à chaque solution avec les objectifs initialement donnés permet d'évaluer leur efficacité respective. L'intégration du coût nécessaire à la réalisation de chaque solution (investissement, entretien) permet d'évaluer leur efficacité respective. Déterminer rigoureusement les fonctions des barrages est donc la seconde étape clé de ces études. Elle définira quels processus géomorphologiques devront être étudiés par la suite (Carladous *et al.*, 2014b).

Selon l'expérience des auteurs, en pratique il n'est parfois pas simple de déterminer ces fonctions. En effet, la morphodynamique des bassins versants peut avoir changé depuis la période de construction des ouvrages. De plus, ces fonctions doivent être déterminées parmi plusieurs

potentielles : une telle liste n'était pas accessible simplement aux praticiens français hors des archives analysées dans cet article (Carladous *et al.*, 2014a). La présente synthèse de la littérature vise ainsi à clarifier : 1. quels objectifs les ingénieurs visaient à atteindre quand ils bâtissaient des barrages de correction torrentielle ; et 2. comment la compréhension de la morphodynamique torrentielle, et donc des effets des travaux, a évolué depuis les travaux des pionniers. Nous démontrons ainsi qu'un ouvrage aussi simple qu'un barrage de correction torrentielle peut être bâti à des fins très variées et avoir des effets et fonctions spécifiques qui peuvent être mis en évidence ; nous montrons aussi que les ingénieurs de la RTM se sont appuyés sur des observations de terrain, des approches conceptuelles, des retours d'expériences de leurs essais et erreurs, pour développer une compréhension empirique de ces fonctions et des effets des ouvrages de protection sur la morphodynamique des torrents.

L'histoire française est intéressante pour plusieurs raisons. 1. Bien que n'étant probablement pas les premiers à théoriser le concept, les ingénieurs français ont été les premiers à mettre en œuvre des opérations de correction torrentielle à l'échelle nationale après les lois de 1860 (voir paragraphe discussion). 2. L'expérience française a par la suite influencé de nombreux autres pays dans le lancement de leur propre politique de correction torrentielle, par exemple en Autriche (Zollinger, 1984), dans les Balkans (Kostadinov, 2007 ; Blinkov *et al.*, 2013) et au Japon (JSA, 2003, p. 18 ; Nishimoto, 2014). 3. La large échelle des programmes de correction torrentielle français dans les environnements variés de trois chaînes de montagnes (Alpes, Massif Central et Pyrénées) a forcé les ingénieurs français à traiter des sujets extrêmement variés (torrents, ravinements, glissement de terrains, risques périglaciaires, avalanches), souvent avec des spécificités régionales (Kalaora et Savoye, 1986 ; Fesquet, 1997). Une analyse historique similaire pourrait et mériterait d'être faite dans plusieurs autres pays de montagne mais n'est malheureusement que partiellement disponible en anglais, et encore moins en français. Ceci aiderait la communauté scientifique à mieux comprendre les approches et problématiques actuelles des autres pays, les uns comme les autres étant partiellement des héritages socio-historiques.

La première partie de cet article retrace l'évolution chronologique des pratiques françaises à travers les travaux pionniers et l'évolution des connaissances théoriques, en particulier pendant les premières mises en œuvre de la RTM. On synthétise dans un second temps les fonctions des barrages à la lumière de plus de 150 ans de recherche appliquée et d'observations de terrain. Une troisième partie retrace quelques éléments sur l'histoire de la correction torrentielle à l'étranger. La dernière partie synthétise les étapes à mener pour une analyse complète permettant d'aider la prise de décision pour la maintenance des barrages de correction torrentielle, à savoir la quantification de leurs effets, le bilan de leur efficacité et fiabilité, et finalement l'analyse de risque et d'efficience.

Partie 1 : Développement historique de la correction torrentielle en France

Début du XIXe siècle : le lobby "forestier"

En France, le pic historique de population dans les zones de montagne date du début du XIXe siècle. Le taux de déboisement maximal qui y était alors constaté a notamment été attribué à la dérégulation des coupes forestières sous la Révolution française (1789-1799). La conséquence était une augmentation de l'érosion des sols et des problèmes liés à un apport trop important de sédiments dans les cours d'eau (Surell, 1841 ; Blanchard, 1944 ; Fourchy, 1966 ; Fesquet, 1997). En réaction, un lobby de "forestiers" rassemblant officiers, chercheurs et grands propriétaires terriens défendait la nécessité de reboiser les zones de montagnes (Kalaora et Savoye, 1986). Leurs théories ont été diffusées à l'étranger (Marsh, 1864, p. 205 ; Brown, 1876 ; Woeikof, 1901).

Plusieurs ingénieurs des Ponts et Chaussées, notamment Jean-Antoine Fabre (1748-1834) et Alexandre Surell (1813-1887), étudièrent la morphodynamique des torrents et publièrent des livres qui ont fait date (Fabre, 1797 ; Surell, 1841). Dans une vision autoritaire de l'action publique, ils recommandèrent d'arrêter immédiatement les opérations de déboisement sur les versants sensibles aux érosions et de lancer le reboisement des zones de montagne sous la supervision et le financement de l'État français. Les opérations de protection faisaient alors principalement appel à des endiguements des chenaux sur les cônes de déjection. Ils mirent en lumière leur incapacité à faire face aux apports solides massifs (voir paragraphe suivant). Ils recommandaient donc "d'éteindre" la production

sédimentaire à la source (c'est-à-dire dans les têtes de bassins déboisées) à l'aide de travaux de correction torrentielle (reboisement et génie végétal). Ils reconnaissaient que cette tâche serait longue mais la considéraient comme la seule option durable.

Milieu du XIXe siècle : travaux pionniers sur les barrages

Un ingénieur des Mines, Scipion Gras (1806–1873) et deux ingénieurs des Ponts et Chaussées, Philippe Breton (1811–1892) et Michel Costa de Bastelica (1817-1881), écrivirent par la suite des livres sur la conception et les fonctions des barrages de correction torrentielle (Gras, 1850 ; 1857 ; Breton, 1867 ; Costa de Bastelica, 1874). Ces auteurs s'efforcèrent de centrer la conception des ouvrages de protection sur les processus hydro-morphologiques, soulignant la nécessité d'adapter les ouvrages aux spécificités du bassin versant. Ils complétèrent les analyses géomorphologiques de Surell et s'intéressèrent aussi à la physique du transport solide. Ils mirent en lumière que, dans le cas torrentiel, l'origine des aléas était liée à un excès de charge sédimentaire plutôt qu'à un simple excédent de débit liquide comme c'est généralement le cas dans les systèmes fluviaux. Les dépôts massifs et les aléas qui en découlent sont le fruit d'une fourniture sédimentaire dépassant la capacité de transport de l'écoulement. Ils soulignèrent aussi que cette capacité est fortement corrélée à la pente des tronçons. Sur la base de ces considérations, ils expliquèrent pourquoi les endiguements montrent généralement des résultats décevants sur les torrents : le rehaussement du profil en long par les dépôts de matériaux favorise le débordement et nécessite de rehausser sans cesse les crêtes des digues. Ils travaillaient dans la région de Grenoble (France) où, comme dans la majorité des Alpes du Nord françaises, la continuité sédimentaire de nombreux torrents était perturbée par le passé glaciaire des vallées : de nombreux cônes de déjection n'étaient que partiellement connectés aux systèmes fluviaux en conséquence de la largeur de vallées ou d'opérations d'endiguement des rivières de plaine. Ils décrivent les problèmes qui émergent dans de tels systèmes dits "découplés" : dépôt quasi-total au pied du cône de déjection et remous solide régressif comblant le chenal amont. En conclusion, Gras (1850 ; 1857) et Breton (1867) recommandèrent de ne pas seulement endiguer les chenaux torrentiels sur les cônes de déjection car cela revenait simplement à reporter plus en aval le même problème d'excès sédimentaire. Le système fluvial aval, à la pente insuffisante pour transporter la fourniture solide issue du bassin versant amont, montrera en effet une tendance à l'aggradation avec ou sans digues. L'endiguement peut même aggraver la vitesse d'exhaussement puisque la capacité d'étalement de la charge sédimentaire est diminuée. Ces auteurs considéraient donc que la seule solution était d'agir sur les sources sédimentaires.

Ils concédaient que les reboisements pouvaient être efficaces bien qu'insuffisants à deux titres : 1. il faudrait des décennies pour vraiment stabiliser des torrents par de simples reboisements ; et 2. ils ne seraient pas suffisants pour traiter les zones très instables de certains bassins versants. De fait, des barrages pouvaient permettre d'obtenir une protection de court terme et compléter les reboisements dans des zones particulièrement instables.

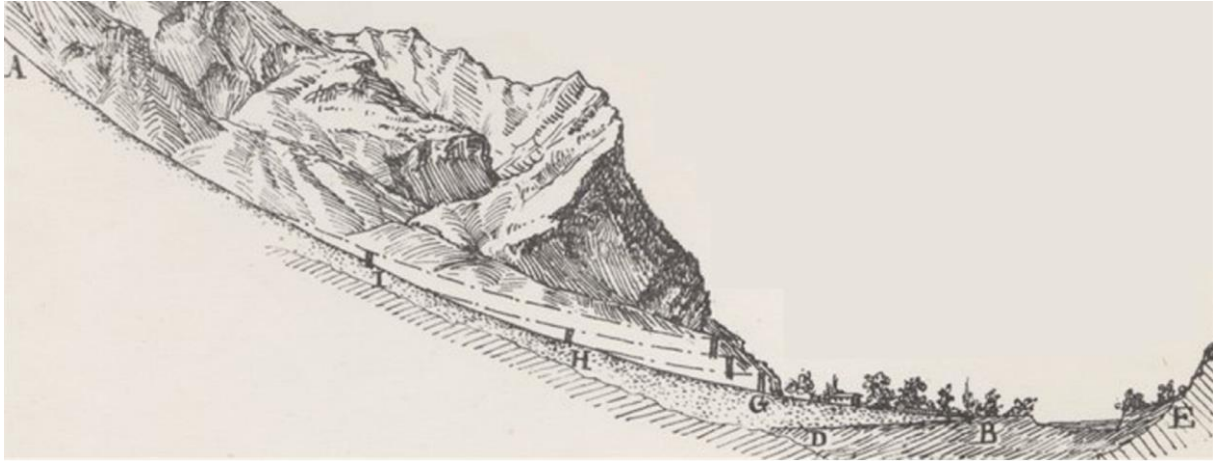
Ils anticipèrent de plus que des incisions devaient apparaître en aval de ces barrages en conséquence du transfert des écoulements d'eau claire concomitants à la suppression de la continuité sédimentaire. De leur point de vue, ces incisions devaient être mises à profit pour augmenter la taille et donc la capacité du chenal. Une fois les barrages pleins, la continuité sédimentaire serait rétablie et des chenaux plus larges et plus profonds seraient plus aptes à absorber les volumes transférés. Cela donnerait le temps d'améliorer la correction du torrent, par exemple en ajoutant de nouveaux barrages, ce qui augmenterait la capacité de piégeage des matériaux. Leurs livres décrivent dès la fin du XIXe siècle trois fonctions distinctes des barrages de correction torrentielle : la rétention, la consolidation de versants et la régulation du transport solide.

Définition pionnière des barrages de rétention

Comme expliqué précédemment, toute fourniture sédimentaire génère une instabilité géomorphologique aggravée dans les bassins versants découplés de leur système fluvial aval. Dans de tels cas, un piégeage presque total et définitif des apports sédimentaires amont doit être recherché, fonction désignée dans la suite de ce travail comme de la "rétention". Les gorges et zones encaissées étaient considérées comme des sites adaptés pour maximiser le volume piégé pour une hauteur de

barrage donnée (Gras, 1857 ; Breton, 1867). Les auteurs recommandaient alors la construction de séries de barrages très proches les uns des autres dans une zone appropriée, plutôt que la dispersion d'ouvrages à travers le bassin versant (figure 2).

Figure 2 : Profil en long d'un torrent avec scenarii d'implantation d'ouvrages



Site optimal de mise en œuvre d'une série de barrages de rétention (au point G) pour encourager la rétention dans les gorges plutôt que la dispersion des barrages (aux points I et H) qui auraient permis de stocker des volumes moins importants. Source : Breton (1867)

Définition pionnière des barrages de consolidation de versant

L'activité des glissements de terrain, éboulements rocheux et autres instabilités de versants est fortement contrôlée par leur érosion de pied même si d'autres facteurs la favorisent également (géologie, infiltrations d'eaux amont ; Kuss, 1900b). Afin de ralentir la fourniture sédimentaire, Gras (1850) et Costa de Bastelica (1874) proposèrent d'élever artificiellement le niveau du fond de vallée pour combler à nouveau le vide creusé par l'activité érosive du torrent et de protéger ainsi les pieds des parois et versants. Ce comblement serait rétabli et fixé par des ouvrages nommés "barrages de consolidation de versants". Ils seraient bâtis en aval de l'instabilité et de sa zone d'influence en termes de surpressions liées au mouvement de terrain pour limiter les sollicitations sur la structure des ouvrages.

Définition pionnière des barrages de régulation du transport solide

Certains torrents montrent une tendance à des dépôts massifs sur leur cône de déjection, souvent à l'occasion d'épisodes de laves torrentielles, malgré une continuité sédimentaire torrent-rivière suffisante. Gras (1857) suggéra que la tendance naturelle des lits torrentiels à fluctuer en niveau, à "respirer" selon le jargon du domaine, pourrait être mise à profit pour réguler les forts débits solides entre les barrages. Il recommanda de forcer des élargissements du chenal en utilisant des barrages larges avec une cuvette très plate. Les laves torrentielles se déposeraient préférentiellement dans ces zones élargies, engraisant les tronçons entre les barrages. L'effet de purge récent de la lave torrentielle laissant généralement place à une période plus calme de transport par charriage, les dépôts de laves torrentielles seraient alors érodés par des écoulements de charriage durant les crues suivantes, plus "claires". Seuls les blocs, de taille trop importante pour être emportés seraient alors laissés sur place et pourraient être utilisés pour renforcer la structure des barrages.

Gras (1857) et Costa de Bastelica (1874) établirent aussi, de manière théorique, qu'un ensemble de barrages percés d'ouvertures, prenant la forme de larges pertuis ou de larges fentes, auraient des effets

équivalents de régulation du transport solide. En appelant cet ensemble "labyrinthe de rétention", ils anticipaient ainsi certains pièges à matériaux modernes (voir paragraphe discussion).

Gras (1857) recommandait ainsi de bâtir des séries de barrages dans les hauts bassins et dans les gorges pour réguler le transport solide. Si leur effet de modulation n'était pas suffisant, un labyrinthe de rétention pouvait être ajouté en aval de la série de barrages, à proximité du sommet du cône de déjection.

Finalement, Gras (1857) concédait que des séries de barrages pouvaient aussi être utilisées sur les cônes de déjection pour une fonction de régulation. Dans ce cas, ils devaient être bâtis comme des seuils de fond, c'est-à-dire au niveau du fond du lit du torrent, et non au-dessus du lit du torrent. En effet, de lourds dépôts incontrôlables sur une haute structure bâtie sur le cône de déjection augmenteraient le risque d'avulsion (bifurcation du chenal dans un nouveau lit) et la probabilité d'atteinte des enjeux situés sur ce cône (voir paragraphe discussion).

1860-1882 : vers la Restauration et conservation des Terrains en Montagne

Le Second Empire de Napoléon III, établi en 1852, promut la mise en place de grands travaux sur les infrastructures (Lilin, 1986). Ce régime autoritaire fut le siège de la décision de lancer le reboisement des montagnes (Fourchy, 1966). Les plus de 50 ans d'activité lobbyiste des "forestiers" (Fabre, 1797 ; Surell, 1841 ; Jouyne, 1850 ; Champion, 1856), en complément de la crise hydrologique du milieu du XIXe siècle (crues majeures sur la plupart des grands systèmes fluviaux français ; Coeur, 2003 ; Coeur, Lang, 2008) aboutirent à un ambitieux programme de reboisement à travers la loi du 28 juillet 1860 sur le reboisement des montagnes, complétée par la loi du 8 juin 1864 sur le gazonnement des montagnes (Brugnot, 2002).

Les premiers tests et essais furent immédiatement lancés après 1860 par l'administration des "Eaux et Forêts". Ils ne furent pas réalisés dans une région spécifique : les travaux étaient effectués partout où l'administration parvenait à acquérir un périmètre suffisant à reboiser (Mougin, 1931).

Après la chute du Second Empire en 1870, la loi sur la Restauration et la conservation des Terrains de Montagne (RTM) fut proclamée le 4 avril 1882 (Tétreau, 1883). La nouvelle assemblée républicaine, à l'écoute des plaintes de populations de montagne, réduisit les ambitions de reboisement. L'effort de travail serait concentré sur les "*zones à l'érosion active et avérée*". Cela concernait principalement les lits des torrents, les systèmes de ravines, les couloirs d'avalanches et les glissements de terrains, ce qui impliquait d'utiliser plus le génie civil et moins les opérations de reboisement extensif (Brugnot, 2002).

Fin du XIXe siècle : premières règles de l'art

L'ingénieur forestier Prosper Demontzey (1831-1898) publia les premières règles de l'art complètes de lutte contre l'érosion et de correction des torrents (Demontzey, 1882). Il y détailla en particulier les processus torrentiels et proposa une classification toujours en cours : 1. les torrents à affouillement sont alimentés par des processus de ravinement ; 2. les torrents à "clappes" désignaient dans le jargon les torrents alimentés par des parois et dérochoirs, qui sont des zones impossibles à reboiser ; et 3. les torrents glaciaires, dont le haut des bassins sont occupés par des moraines et glaciers, sont trop élevés en altitude pour être reboisés. Bien que leurs gorges et cônes de déjection soient semblables, les dispositifs de correction doivent être partiellement adaptés à ces différents types de torrents.

Demontzey proposa aussi de nombreuses techniques de RTM. De son point de vue de forestier, les lits des torrents devaient être stabilisés spécifiquement pour faciliter les opérations de reboisement sur les versants et sur les berges. Les barrages devaient donc être bâtis pour stabiliser les lits, diminuer leur pente et les élargir pour empêcher les incisions et affouillements ainsi que les déstabilisations de berges qui en résultaient (figure 3). Dans cette stratégie, il soulignait que certains ouvrages pourraient être abandonnés aussitôt que la forêt aurait établi son rôle stabilisateur.

Pour les torrents à clappes et glaciaires, les barrages de rétention étaient recommandés en étant complétés de barrages de stabilisation implantés dans les zones situées à l'aval pour prévenir leur incision. L'ingénieur forestier Edmond Thiéry (1841-1918) introduisit ensuite rapidement les calculs

de stabilité des ouvrages de génie civil et d'hydraulique. Il complétait ainsi les descriptions conceptuelles et empiriques de Demontzey (Thiéry, 1891).

La pédagogie, le volume et le détail des travaux de Demontzey (1882) et Thiéry (1891) entraînèrent leurs traductions immédiates et leur large diffusion à l'étranger (Woeikof, 1901 ; Kostadinov, 2007 ; Kostadinov et Dragovic, 2013 ; Bischetti *et al.*, 2014). Il est toutefois intéressant de noter que plusieurs détails fournis par Gras et Breton sur la conception des barrages et leurs effets sur le transport solide ne sont pas repris par ces recommandations issues de l'école forestière de Nancy d'où étaient désormais issus les ingénieurs forestiers chargés de la RTM. En synthèse, Demontzey et Thiéry recentrèrent les fonctions des barrages sur leur capacité à faciliter les opérations de reboisement pour "éteindre" les torrents (Fesquet, 1997).

Figure 3 : Schéma d'un profil en travers de torrent sans ouvrage (a et b) puis corrigé (c)

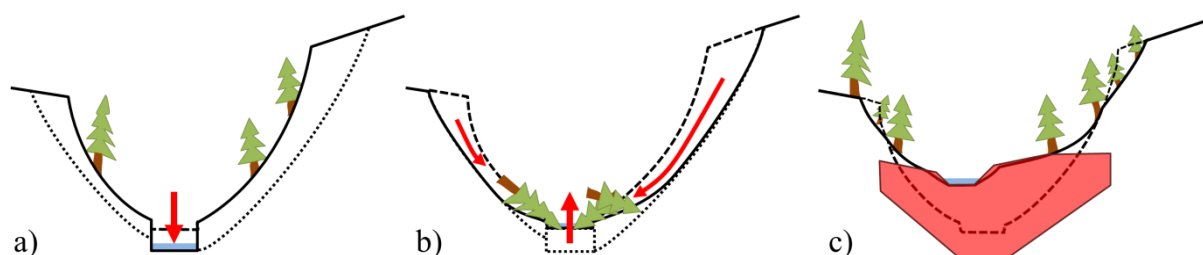


Schéma montrant l'effet des érosions du profil en long et l'origine de certaines respirations du lit : dépavage et incision (a) entraînant des instabilités latérales (b). Ces deux processus peuvent être stabilisés par la mise en place d'un barrage adapté (c). Bâti au-dessus du lit initial, ce barrage empêche l'incision et les déstabilisations de versants, ce qui a pour effet de créer un thalweg plus large et de déplacer l'axe du lit vers la berge la moins sensible à l'érosion.

Début du XXe siècle : la seconde génération d'ingénieurs RTM

Les trois ingénieurs forestiers Paul Mougin (1866-1939), Charles Kuss (1857-1940) et Claude Bernard (1872-1927) sont des figures marquantes de la seconde génération d'ingénieurs de la RTM. Ils eurent l'opportunité de participer au premier grand travail de bilan après déjà 50 ans de travaux (Eaux et Forêts 1911a ; 1911b ; 1911c) et de développer des conceptions alternatives dans les cas où la technique classique de grands barrages en arches était mise en défaut (Messines du Sourbier, 1939a).

La rupture de la poche glaciaire du glacier de Tête Rousse (Haute-Savoie) qui entraîna la catastrophe de Saint-Gervais (175 morts, 1892 ; Kuss, 1900a), fut la démonstration que les moraines perchées pouvaient devenir de dangereuses sources de laves torrentielles. Kuss (1900b) détailla le sujet dans un livre et décrivit comment des barrages de rétention pouvaient être construits pour piéger, sur le long terme, ces accumulations dans les têtes de versants (par exemple sur la figure 4). Le rude climat montagnard et les attaques des avalanches rendaient les solutions alternatives (reboisement ou drainage) inopérantes dans ce contexte.

Figure 4 : Illustration historique d'un barrage de rétention situé dans la partie supérieure d'un bassin versant torrentiel



Barrages de rétention dans les têtes de bassins : dépôts morainiques du ravin des Arandellys, branche secondaire du torrent de la Griez qui rejoint l'Arve aux Houches (Haute Savoie, France). Source : Eaux et Forêts, 1911b.

En complément des torrents glaciaires, un nombre significatif de grands torrents à laves torrentielles doivent leur activité à des glissements de terrains et des avalanches rocheuses. Dans ce cas, les techniques classiques de reboisement étaient peu efficaces et remplacées par des détournements tels que les tunnels de contournement de pied de glissement (par exemple dans Mougin, 1900) ou les barrages de consolidation de versant, définis précédemment. Sur la base de plusieurs retours d'expériences de mise en œuvre de tels ouvrages, Kuss (1900a) publia une description détaillée des interactions entre torrents et glissements de terrains ou éboulements rocheux.

La période entre 1882 et 1914 a parfois été appelée "âge d'or de la RTM" (Brugnot, 2002). Pendant cette période d'intense activité, 1062 torrents des Alpes ont été corrigés sur les 1891 initialement inventoriés. Seulement une centaine de torrents ont été identifiés dans les Pyrénées, le Massif Central et les Cévennes, ce qui est un chiffre trop faible pour ne pas être douteux (Mougin, 1931 ; Poncet, 1968). Une centaine de glissements de terrains et autant de couloirs d'avalanches ont aussi fait l'objet de travaux RTM à cette période (Requillard *et al.*, 1997).

La loi de 1882 a finalement été amendée par celle du 16 août 1913 qui permettait à nouveau d'étendre les périmètres RTM à la restauration et la conservation des sols mais aussi à la régulation du régime des eaux. On renouait avec la possibilité originelle d'établir une approche extensive des actions RTM.

Stratégies post-1918

Le nombre de nouveaux projets a significativement diminué après la première guerre mondiale (Crécy, 1983). Ceci était en particulier dû à l'exode rural qui a entraîné les diminutions des dommages potentiels dans les vallées et de la disponibilité d'une main d'œuvre bon marché (Van Effenterre, 1982). De plus, le financement de l'entretien des ouvrages a eu tendance à diminuer et peu de nouveaux ouvrages furent construits dans les hauts bassins (Requillard *et al.*, 1997 ; Brugnot, 2002).

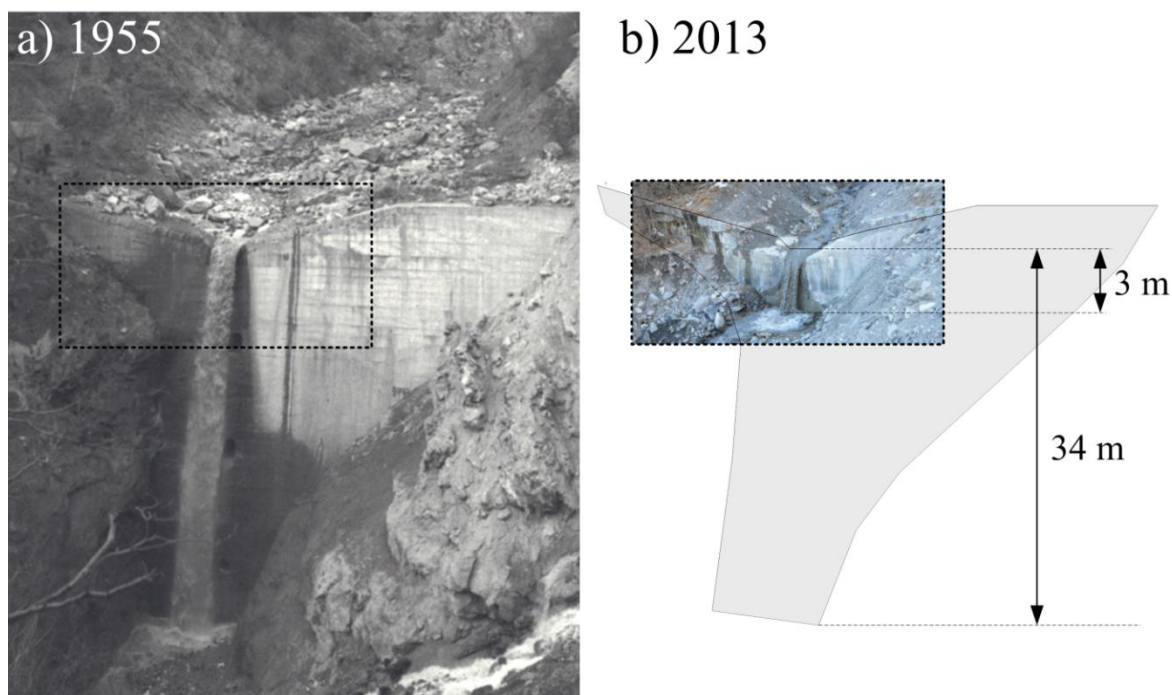
Suite à cette période, Bernard (1927) synthétisa dans ses cours de RTM les connaissances acquises depuis les ouvrages de Demontzey et de Thiéry. Les fonctions des barrages de correction torrentielle y

sont plus détaillées et la liste prend désormais en compte les effets de régulation du transport solide et l'utilité des barrages de consolidation dans le traitement des glissements de terrain.

L'usage du béton armé augmenta à partir des années 1940 (Poncet, 1995), ce qui permit de concevoir et de construire des barrages autostables à partir de 1955. Ceux-ci présentaient l'avantage d'être moins chers que les traditionnels barrages poids en maçonnerie dans le cas des ouvrages de grande hauteur (Bordes, 2010). Alors que certains ouvrages en béton armé qui ont été conçus avec une marge de sécurité suffisante sont toujours en bon état (par exemple, figure 5), des tentatives d'optimisation de l'épaisseur des barrages ont parfois montré des résultats décevants. La ruine de nombreux ouvrages trouvait alors son origine dans le manque de règles de conception fonctionnelle et structurale ou de réalisation. Des reprises en sous-œuvre pour le renforcement de ces ouvrages ont ainsi souvent été nécessaires. Les normes et règles de mise en œuvre des constructions en béton ont alors commencé à être développées dans les années 1980 (BAEL, 1980).

Le béton armé permit aussi de construire de nouveaux ouvrages tels que les barrages filtrants qui ferment les plages de dépôt (figure 1b). Après les premiers tests pionniers des années 1950 et 1960 (Reneuve, 1955 ; Clauzel et Poncet, 1963), le nombre de ces structures ouvertes explosa pendant les années 1970 et 1980 en France, comme à l'étranger (Deymier *et al.*, 1995 ; Poncet, 1995 ; Gruffaz 1996). Le développement de cette nouvelle génération d'ouvrages n'eut d'ailleurs pas lieu spécifiquement en France (Piton, Recking, 2016a ; 2016b).

Figure 5 : Illustration d'un des premiers grands barrages de correction torrentielle française en béton armé en 1955 (a) et en 2013 (b)



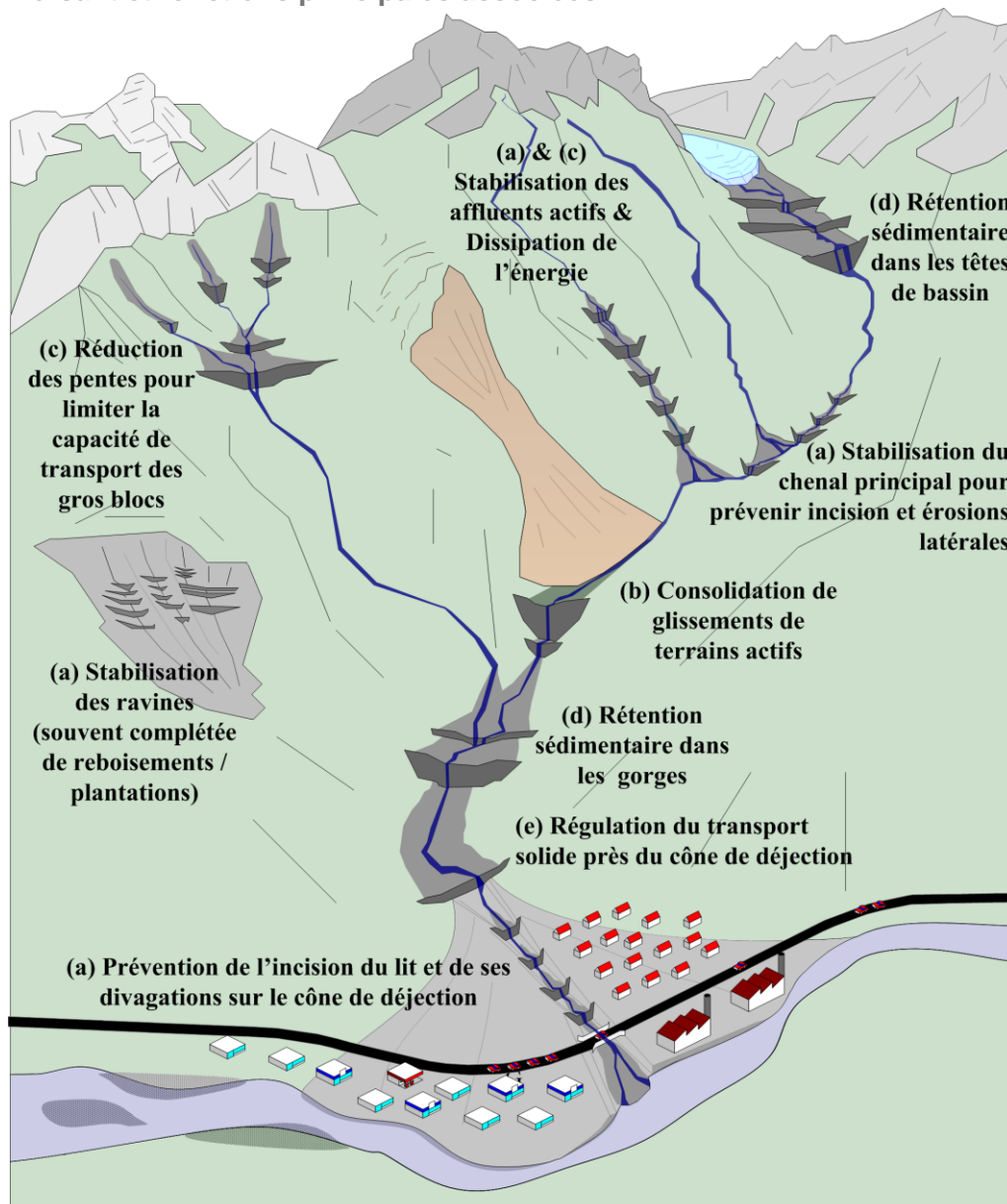
Le barrage "Fèvre" dans la branche du Bonrieu du torrent de Saint-Martin-La-Porte (Savoie, France), de 34 m de haut entre pied et cuvette, 37 m entre pied et ailes, 4 m d'épaisseur en crête, 7,6 m en pied et construit en 1939-1942, est situé juste en amont du pied de l'immense glissement de terrain du Bonrieu (Messines du Sourbier, 1939b). La gorge aval est désormais comblée par l'avancement du glissement de terrain, ce qui permet de consolider ce dernier. Le barrage est toujours en bon état bien qu'il soit enterré sur presque toute sa hauteur par les matériaux du glissement de terrain ; en 2013 seulement 3 m de parement étaient visibles. Le barrage remplit parfaitement sa fonction un peu particulière : diminuer l'énergie et la puissance érosive des laves torrentielles amont qui creusaient la gorge aval et dont l'incision avait des effets catastrophiques en favorisant l'activité du glissement de terrain. Source : photo 1955 par L. Anchierrri, et 2013 par agents ONF-RTM 73 avec l'autorisation aimable du service ONF-RTM 73

Partie 2 : Synthèse des fonctions des barrages de correction torrentielle

De nombreux auteurs travaillant sur la correction torrentielle ont proposé des listes des fonctions des barrages (Zollinger, 1985 ; Ikeya, 1989 ; Armanini *et al.*, 1991 ; Hübl, Suda, 2008). Elles sont toutefois moins précises que la liste établie dans le présent chapitre. Celui-ci fournit une définition détaillée des fonctions introduites dans le chapitre précédent. Ces définitions peuvent ne pas être en accord avec certaines habitudes de langage et jargons locaux qui peuvent avoir l'inconvénient d'introduire de la confusion d'une région à l'autre. La figure 6 représente un bassin versant symbolique dans lequel les ouvrages et leurs fonctions associées sont localisés. Le tableau 1 regroupe les caractéristiques (forme du barrage et localisation) de barrages conçus pour réaliser au mieux ladite fonction.

L'identification d'une seule et unique fonction pour une série de barrages donnée peut être un exercice compliqué. En effet, dans certains cas, une série de barrages peut clairement répondre à plusieurs fonctions à la fois, telles que par exemple la stabilisation du lit et la réduction de sa pente (Zeng *et al.*, 2009). Ces fonctions ne sont donc pas mutuellement exclusives et concernent l'ensemble des aspects de la morphodynamique des systèmes torrentiels caractérisés par de forts couplages entre cours d'eau et versants. Par conséquent, leur définition pratique nécessite des approches transdisciplinaires regroupant des spécialistes en hydraulique torrentielle, géologie, géomécanique et génie forestier (Hübl *et al.*, 2005). Après la phase transitoire de remplissage initial des barrages et d'ajustements des versants, des effets de plus long terme tels qu'une certaine régulation du transport solide ou des cas particuliers de consolidation des biefs aval (exemple de la figure 5) peuvent émerger avec le temps et parfois devenir prépondérants dans la réduction de l'aléa en aval.

Figure 6 : Exemples de localisations typiques de protections torrentielles dans un bassin versant et fonctions principales associées



Légende : (a) stabilisation du lit, (b) consolidation de versant, (c) réduction de la pente, (d) rétention et (e) régulation du transport solide. Les mesures de correction complémentaires (reboisement, drainage, chenalisations, endiguements et plages de dépôt) ainsi que les fonctions et effets secondaires n'ont pas été mentionnés par souci de clarté.

Tableau 1 : Caractéristiques et localisations des barrages afin d'optimiser leur performance relative à chaque fonction

Fonction	Caractéristique de conception	Situation par rapport aux autres barrages	Situation au sein du bassin versant
Stabilisation du lit	Largeur de la cuvette \approx Largeur du chenal actif	Assez proche pour permettre la continuité longitudinale de la stabilisation entre deux ouvrages	Partout où l'incision et les divagations du chenal principal doivent être prévenues
Consolidation de versant	Barrage ou série de barrages à la cuvette significativement plus haute que le niveau initial du lit		Directement en aval d'une importante instabilité de versant : glissements de terrain, réseaux de ravines, parois
Réduction de la pente du lit	Le niveau de la cuvette du barrage doit être légèrement au-dessus du niveau du lit naturel pour créer un bief alluvial en amont avec une pente de compensation plus faible que la pente initiale		Dans les zones où la pente longitudinale est plus forte que celle correspondant à l'équilibre alluvionnaire et partout où l'aggradation, le dépôt de gros blocs et les respirations torrentielles ne sont pas un problème
Rétention*	Grand barrage ou série de barrages qui maximisent le volume de sédiments piégés	Un ou plusieurs barrages proches les uns des autres en aval d'une zone de remplissage volumineuse	Où le stockage de long terme est possible : dans les têtes de bassins ou plus souvent dans les gorges** (et dans le cas de nouveaux projets, sur des sites où la continuité sédimentaire peut être supprimée sans incidence néfaste pour l'aval).
Régulation du transport solide	Cuvette plus large que le chenal actif, étalant ainsi la lame d'eau	Barrages éloignés pour maximiser la surface de dépôt sur le bief amont.	Où la pente est assez douce et l'espace assez large pour disposer d'une surface de stockage temporaire significative ; zone étendue de respiration du lit

* Dans les dispositifs de correction torrentielle modernes, des plages de dépôt régulièrement curées par des engins de terrassement sont préférées aux ouvrages de rétention à la durée de vie limitée.

** Les vieux barrages de rétention atterris jusqu'à la cuvette constituent souvent des zones avantageuses de régulation du transport solide.

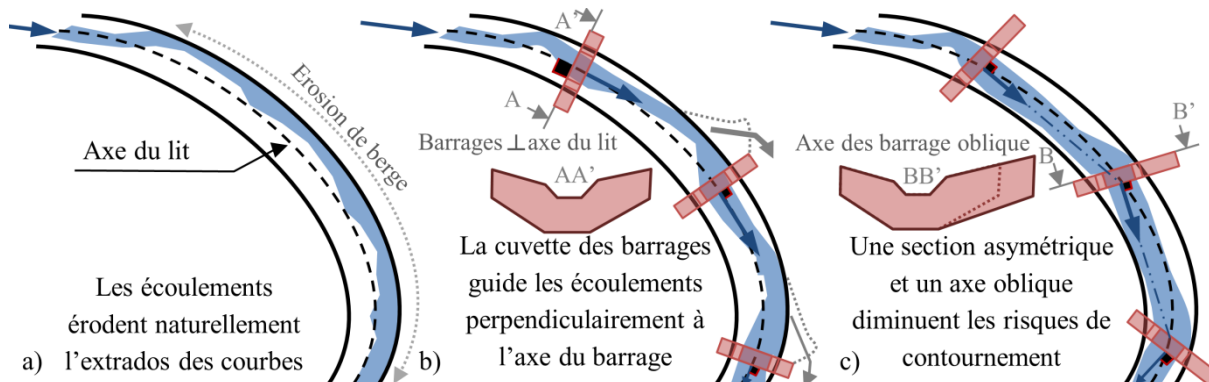
Stabilisation du lit

Les caractéristiques géologiques de nombreux lits torrentiels permettent aux écoulements de générer des incisions longitudinales et/ou d'importantes érosions de berges (figure 3). Sur les cônes de déjection, des dommages trouvent ainsi leur source dans les affouillements latéraux des berges (naturelles ou artificialisées par des digues et protections de berges), ou dans l'établissement de nouveaux cheminements d'écoulement après avulsion. La stabilisation du lit des torrents est la plus répandue des fonctions des barrages de correction torrentielle. Elle peut être décomposée en deux sous-fonctions.

La stabilisation longitudinale vise à prévenir l'incision du lit par la création de séries d'ouvrages constituant des points fixes dans le profil en long. Ils stabilisent les matériaux qui, en leur absence, auraient été érodés par le torrent, entraînant une incision et des effets secondaires de déstabilisation de berges (figure 3).

La stabilisation planimétrique vise à limiter les divagations du chenal actif. A cette fin, l'axe de la cuvette des barrages est orienté pour guider les écoulements dans une direction choisie (Deymier *et al.*, 1995). Dans les courbes en particulier, les barrages doivent (peut-être contre intuitivement) être bâtis obliquement à l'axe du chenal de manière à forcer la direction de l'écoulement vers le centre de la cuvette de l'ouvrage situé à l'aval plutôt que vers ses ailes (figure 7). Ceci a pour effet de prévenir les érosions de berges, contournements d'ouvrages et avulsions résultant de la mise en œuvre inadéquate d'un ouvrage perpendiculaire à l'axe initial du lit (Tacnet, Degoutte, 2013). Certains ouvrages ont parfois été bâtis spécialement dans un objectif de stabilisation planimétrique du lit. Les épis peuvent avoir des effets équivalents mais sont moins utilisés dans les torrents aux lits raides car ils sont plus sensibles aux phénomènes d'affouillement et sous-cavage, qui sont un problème récurrent lié aux respirations torrentielles (Fabre, 1797).

Figure 7 : Vue en plan schématique illustrant la fonction de stabilisation planimétrique du lit



Légende: (a) sans ouvrage, l'extrados des courbes souffre préférentiellement de problèmes d'érosions. Les barrages guident les écoulements dans une direction prédéfinie : soit (b) vers les berges et les ailes de l'ouvrage situé à l'aval ce qui encourage la création d'une niche d'érosion latérale (implantations inadaptées car orientations perpendiculaires à l'axe local du lit torrentiel) ; soit (c) vers la cuvette de l'ouvrage situé à l'aval ce qui diminue le risque de contournement de ce dernier et encourage un centrage des écoulements (implantations adaptées, contre-intuitives car obliques par rapport à l'axe du torrent).

La cuvette des barrages de correction torrentielle n'est généralement pas calée au niveau initial du lit, mais quelques mètres plus haut (figure 3c). Ceci est notamment lié au fait que creuser des fouilles de plusieurs mètres pour bâtir les fondations et le voile de l'ouvrage dans les ravines et lits torrentiels peut générer des déstabilisations latérales et longitudinales (Jaeggi, Pellandini, 1997). L'effet de réduction des pentes et la meilleure stabilité des berges sont deux conséquences de ces contraintes de réalisation (voir plus en détail dans le paragraphe réduction des pentes). On note au contraire que les barrages dédiés à la stabilisation des lits en incision sur les cônes de déjection ne doivent pas être bâtis

plus haut que le niveau initial du profil en long alluvial mais plutôt au même niveau ; ils sont ainsi parfois appelés "seuils de fond" (*bed sills* en anglais) ou "seuils enfouis" (voir aussi le paragraphe régulation du transport solide).

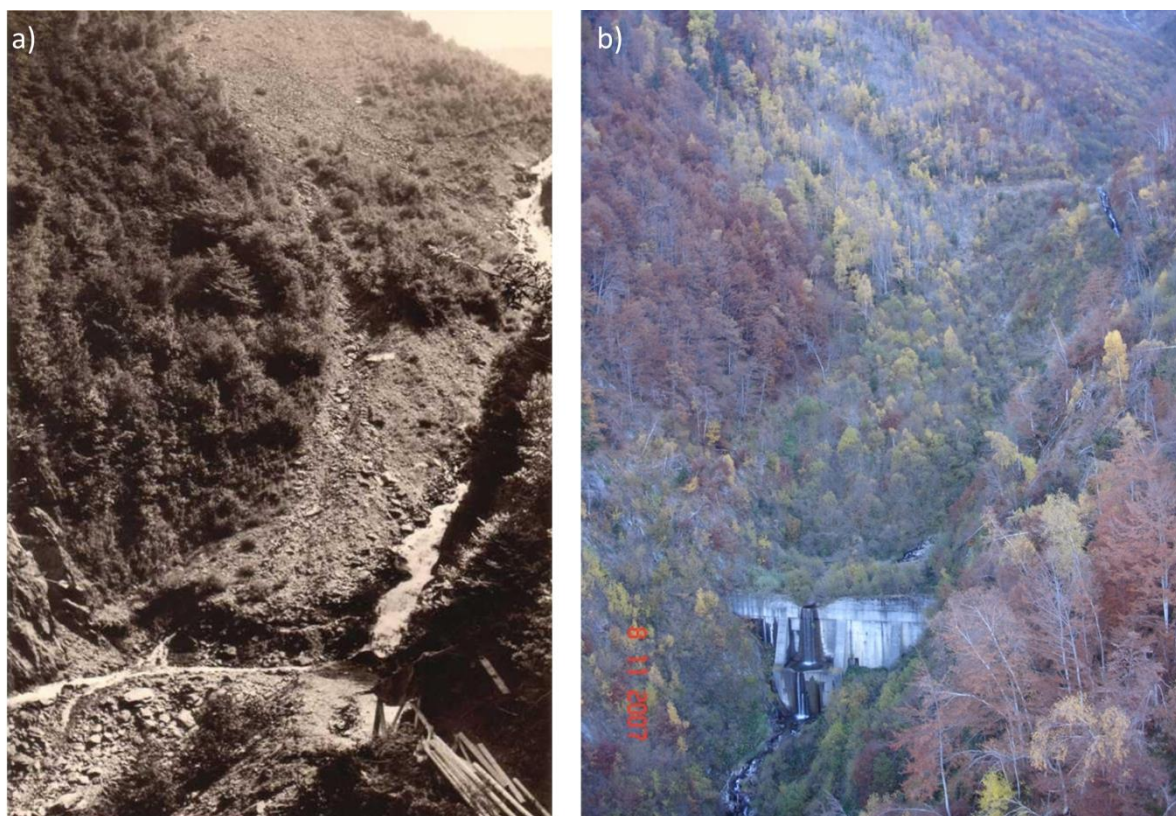
Les opérations de stabilisation de lit étaient souvent associées à des opérations de reboisement et re-engazonnement des berges et versants. La stabilisation du lit par les barrages entraîne toutefois naturellement un effet secondaire de reprise spontanée de la végétation (Bombino *et al.*, 2009 ; Zeng *et al.*, 2009 ; García-Ruiz *et al.*, 2013). Zeng *et al.* (2009) ont par exemple comparé deux bassins versants torrentiels similaires (≈ 14 km², Province du Yunnan, sud-ouest de la Chine) : le premier bassin versant a été laissé en l'état comme témoin ; le second a été corrigé dès les années 1960 (117 barrages, tous détruits en 1974, ont été remplacés par 44 nouveaux ouvrages plus grands, de 3 à 6 m de haut). Après 25 ans, les auteurs décrivent le développement "*de nombreux arbres matures, de l'herbe et des buissons vivants sur les berges des torrents, au-dessus des biefs équipés de barrages*". Les auteurs décrivent ainsi le couplage entre stabilisation du lit et reprise de la végétation de berge : les incisions dans les ravines entraînaient régulièrement des glissements de terrain de faible profondeur, empêchant la fixation durable de la végétation ; après l'atterrissement des barrages, les incisions marquées ne pouvaient plus avoir lieu, stabilisant ainsi les pieds de berges et diminuant leur fruit ; ces pentes plus stables étaient alors plus propices à l'installation de la végétation.

En conclusion, on note que cette fonction vise à stabiliser des sources diffuses de production sédimentaire. Les barrages bâtis dans les zones impropres à l'installation de la végétation stabilisent simplement les lits torrentiels, préviennent l'incision et limitent cette production sédimentaire. Dans les zones propices à une reprise de la végétation (spontanée ou encouragée par l'homme), un second effet de stabilisation de la production sédimentaire émerge sur le long terme. Le développement de la végétation est alors facilité par la plus grande stabilité des thalwegs, la diminution du nombre de glissements de surface et la décroissance des surfaces sujettes au ravinement. Les barrages servent ainsi parfois temporairement en attendant la reprise de la végétation ou plus durablement en l'absence de celle-ci.

Consolidation de versant

Les sources sédimentaires d'un torrent peuvent être diffuses comme indiqué précédemment ou concentrées au niveau de quelques instabilités localisées mais majeures tels que des glissements de terrains ou des écroulements rocheux. Le taux d'ablation des versants, c'est-à-dire le taux moyen d'érosion de surface, ainsi que l'activation des instabilités de versants sont significativement contrôlés par l'incision des thalwegs à leur pied (Sklar, Dietrich, 2008 ; Egholm *et al.*, 2013). Plus spécifiquement, la réactivation d'un glissement de terrain à la suite d'une incision dans le lit d'un torrent est classique et peut provoquer une forte augmentation de l'activité torrentielle, souvent sous forme de laves torrentielles (Gras, 1848 ; Messines du Sourbier, 1939b ; Zeng *et al.*, 2009 ; Wang, 2013). Remplir à nouveau le fond de vallée et consolider le pied de l'instabilité de versant est souvent une mesure efficace pour diminuer l'activité des sources sédimentaires majeures que sont les glissements de terrains et autres instabilités de versants (Kuss, 1900a ; Eisbacher, 1982 ; Kronfellner-Kraus, 1983). Les barrages de consolidation de versant permettent de répondre à ces objectifs en élevant significativement le niveau du lit et en consolidant ainsi le versant (figure 6b et figure 8).

Figure 8 : Illustration d'un barrage de consolidation de versant



Glissement sur le torrent de Saint Clément (Tours-en-Savoie, Savoie, France), (a) avant et (b) après consolidation par un barrage. Source : photos avec l'autorisation aimable de l'ONF-service RTM 73

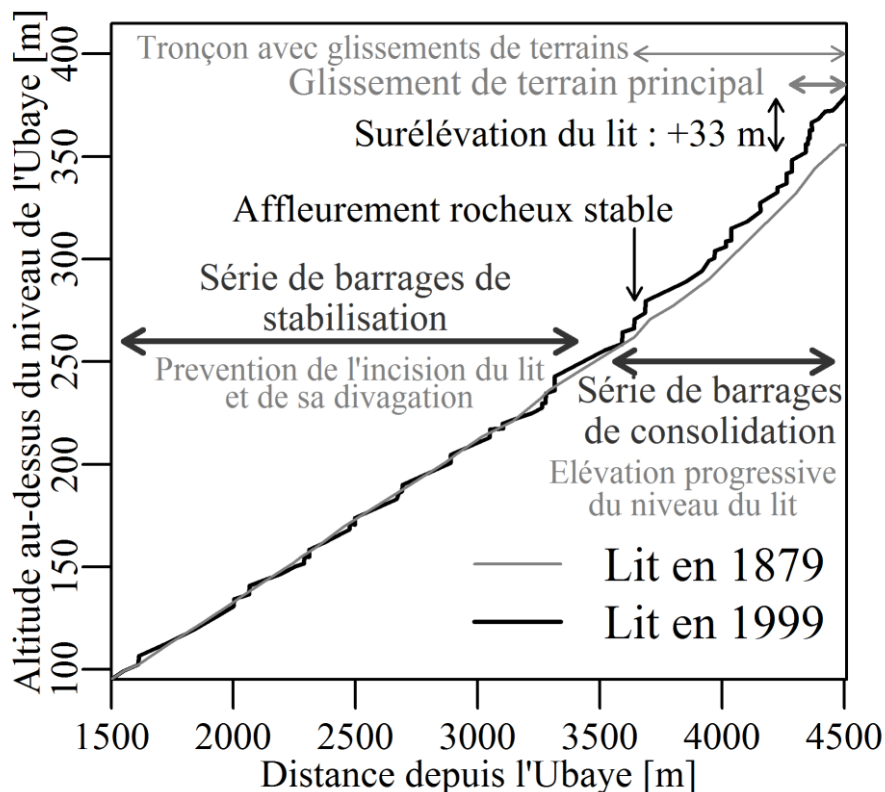
L'élévation du lit d'un torrent a généralement de fortes conséquences géomorphologiques qui se propagent à l'amont par remous solide (aggradation, engraissement), ainsi qu'à l'aval où les apports solides sont supprimés ou diminués durant le remplissage de l'ouvrage et la formation de l'atterrissement du barrage (Heede, 1986). En créant un fond de vallée plus large, souvent à la pente plus douce, des dépôts massifs ont lieu et les écoulements ont une tendance aggravée à la divagation et à l'érosion des berges. Ceci justifie parfois la construction de nouveaux ouvrages de stabilisation plus proches de la zone de glissement ou des opérations régulières de curage/recalibrage dans la zone atterrie du barrage de consolidation (Delsigne *et al.*, 2001). Etant donné ces actions complémentaires à mener, le choix d'élever fortement le niveau d'un torrent doit être justifié par une limitation claire de l'activité d'une source sédimentaire majeure. Il se peut en effet que de simples ouvrages de stabilisation soient plus aisés à entretenir (voir aussi paragraphe Régulation du transport solide vis-à-vis des problèmes liés aux ouvrages calés trop haut).

Une opération de consolidation peut être réalisée par un seul ouvrage (figure 8), par une succession de quelques barrages assurant une élévation localisée du lit du torrent (figure 6b) ou par une série d'ouvrages élevant graduellement le profil en long et ressemblant à une série de barrage de stabilisation (figure 9). Le choix entre ces options est déterminé par le contexte géologique : 1. disponibilité d'un affleurement rocheux constituant un support de fondation suffisant à un grand ouvrage et 2. extension spatiale de la zone d'instabilité.

Les fonctions de stabilisation du lit et de consolidation des versants peuvent apparaître comme similaires et sont donc souvent confondues. Pour clarifier cette différenciation, nous proposons les éléments de description suivants. Les barrages de stabilisation pourraient être bâtis au niveau du lit du torrent, mais, en pratique, la plupart d'entre eux le sont légèrement plus haut que le niveau initial, ceci pour de multiples raisons : moindre risque de déstabilisation des versants à la construction, facilité de construction, effets secondaires et localisés de consolidation des berges et de réduction des pentes. Au contraire, les barrages de consolidation sont bâtis spécifiquement pour élever le profil en long, parfois

jusqu'à des dizaines de mètres : 50 m pour le barrage de consolidation du glissement de terrain de l'Illgraben (Wallis, Suisse ; Eisbacher, 1982), ou 33 m dans le cas du Riou Bourdoux de Barcelonnette (Alpes de Haute Provence, France) illustré par la figure 9, dans l'objectif de re-comblar le fond de vallon incisé et de diminuer l'activité d'une source sédimentaire majeure située à proximité.

Figure 9 : Profil en long illustrant la distinction stabilisation de lit et consolidation de versant



Profil en long du torrent du Riou Bourdoux (Barcelonnette, Alpes de Haute Provence, France) en 1879 avant correction et en 1999 après correction. Dans le tronçon aval, les barrages stabilisent le lit à son niveau historique. Au contraire, le tronçon amont a été équipé d'une série de barrages de consolidation pour traiter les problèmes chroniques de glissements de terrain qui y ont lieu. Source : figure adaptée de Delsigne *et al.* (2001) et information de Demontzey (1882).

Réduction de la pente

Les barrages de correction torrentielle réduisent souvent la pente du bief amont. Dans la plupart des torrents, la pente initiale n'est pas une pente d'équilibre alluvionnaire (Lane, 1955). Cette situation est la plupart du temps liée à un pavage de surface composé d'éléments grossiers fournis par des processus colluvionnaires (c'est-à-dire de versants) tels que les avalanches, chutes de blocs et glissements de terrain ; et d'autre part de blocs détachés d'affleurements rocheux du fond de vallée. Les blocs qui constituent le pavage d'un lit de torrent sont rarement mobilisés par les écoulements (Recking *et al.*, 2012). La pente de ce lit est alors plus raide que la pente d'équilibre alluvionnaire (Gras, 1850), nommée "pente de compensation" dans le jargon de la RTM. Etant donné que les barrages sont construits au-dessus du niveau initial du lit, les sédiments transportés par les crues se déposent sur le bief amont, ce qui crée un bief alluvial dans un environnement aux fortes influences colluviales (Piton, Recking, 2016c). La pente de ce bief alluvial nouvellement formé est nécessairement plus faible que (ou tout juste égale à) la pente initiale non-alluviale (figure 10).

Figure 10 : Comparaison entre pente initiale avant correction et pente de compensation mesurée en amont des barrages

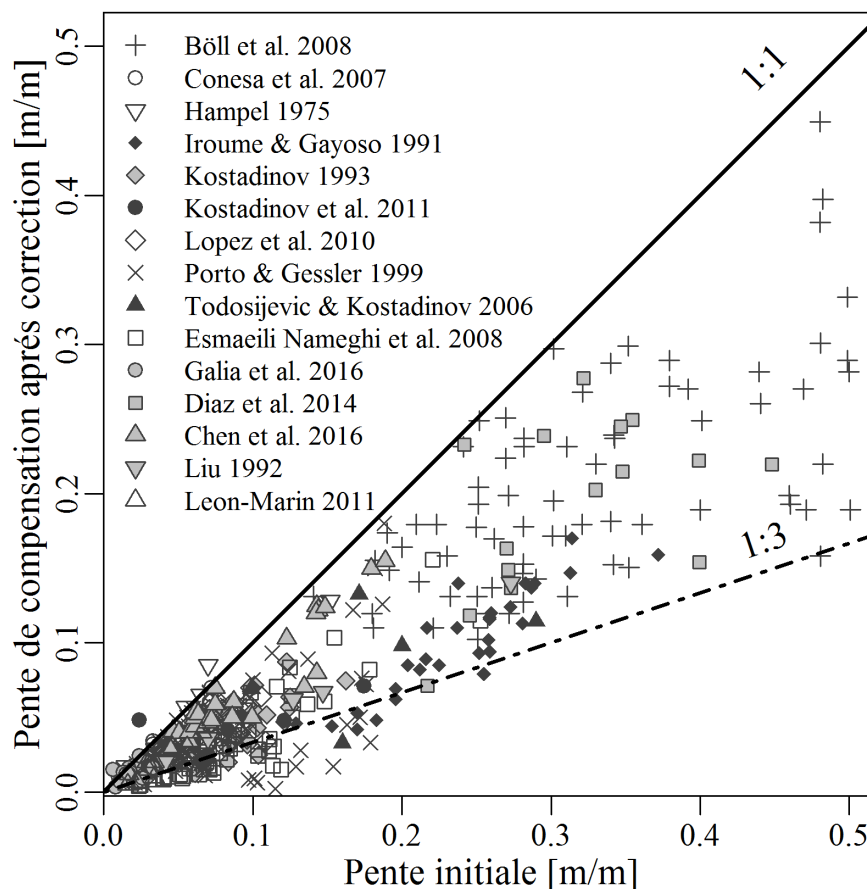


Illustration de la tendance générale à la réduction des pentes en amont des barrages de correction torrentielle dans un jeu de données de terrain (448 données) : la pente de dépôt, dite aussi "pente de compensation" dans le jargon historique est quasiment systématiquement inférieure à la pente initiale bien qu'elle puisse en être proche. Elle est aussi souvent supérieure à un tiers de la pente initiale si cette dernière dépasse 0.2. Pour des pentes inférieures et en particulier dans le cas de barrages très proches les uns des autres, les pentes de dépôt sont parfois quasi-nulle. Sources : données tirées de Böll *et al.* (2008), Chen *et al.* (2016), Conesa-Garcia *et al.* (2007), Diaz *et al.* (2014), Esmaili Nameghi *et al.* (2008), Galia *et al.* (2016), Hampel (1975), Iroume et Gayoso (1991), Kostadinov (1993), Kostadinov *et al.* (2011), León Marín (2011), Liu (1992), López *et al.* (2010), Porto et Gessler (1999), Todosijevi et Kostadinov (2006).

Le principe de la correction torrentielle s'appuie alors sur ce phénomène puisque des pentes plus faibles génèrent des écoulements moins énergétiques, diminuant ainsi : 1. les vitesses d'écoulement (diminution du nombre de Froude et des problèmes érosifs liés aux ressauts) ; 2. les érosions de berges ; 3. les ruptures de pavage ; 4. les flux instantanés de transport solides ; 5. la capacité des écoulements à transporter de très gros blocs qui peuvent détruire des ouvrages par impact, obstruer les chenaux et aggraver les risques de dépavage et l'engraissement en matériaux de l'écoulement. L'effet de la réduction de la pente du lit est illustré par des images emblématiques de gros blocs, recrutés originellement dans le chenal et les versants mais qui ne sont finalement pas transférés jusqu'au cône de déjection mais laissés par les crues entre les barrages (figure 11).

Figure 11 : Illustration de l'effet d'arrêt des blocs rocheux par les barrages



Énorme bloc (15 à 20 m³) arrêté sur un barrage de la série supérieure du Saint-Antoine de Modane (Savoie, France), 2014. Source : photo avec l'aimable autorisation de S. Carlados - ONF-DRN.

Rétention sédimentaire

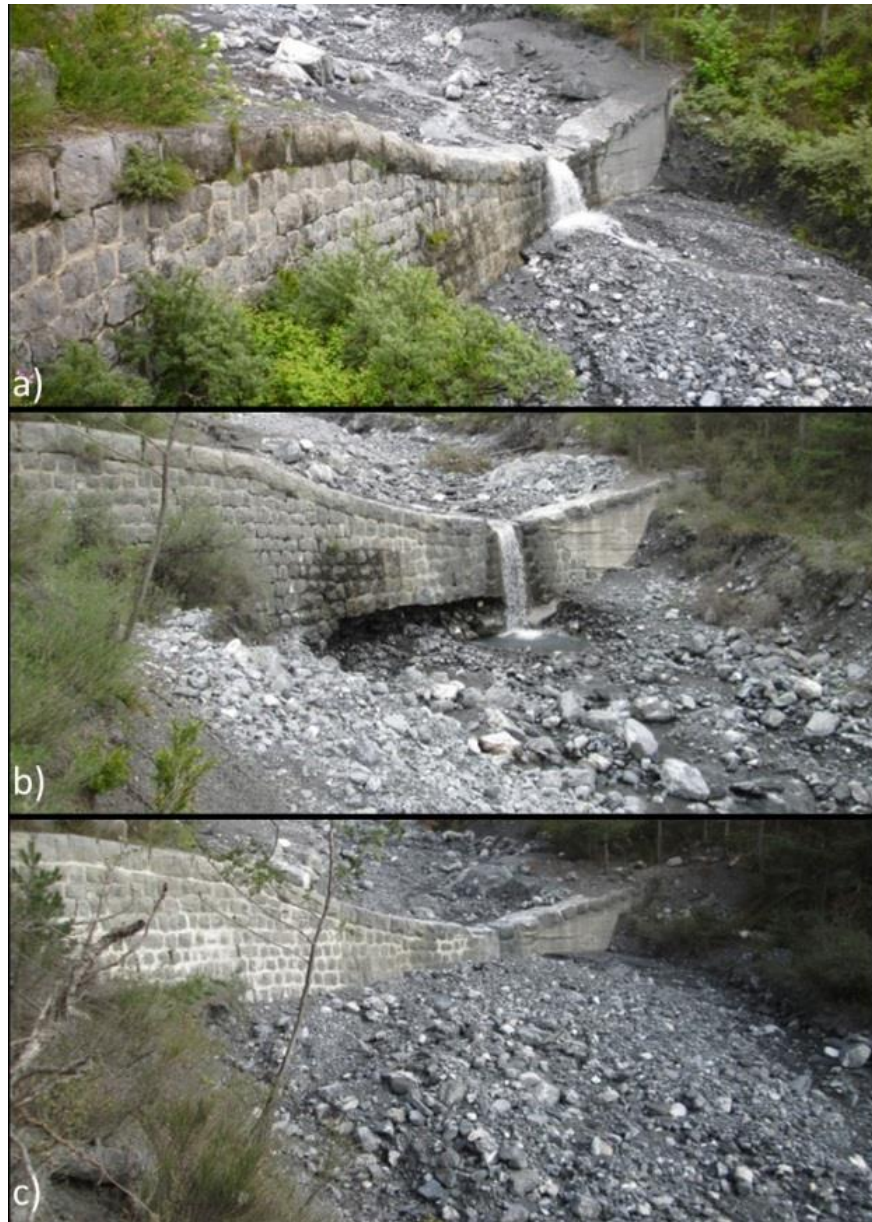
Le comblement des biefs situés en amont des barrages piège durablement les sédiments (figure 4, figure 6d). Cette fonction est présente sur tous les ouvrages dont la cuvette est bâtie au-dessus du niveau initial du lit. Elle reste toutefois généralement secondaire car le volume ainsi piégé est négligeable par rapport à la production sédimentaire du bassin versant. Il existe toutefois quelques ouvrages, appelés barrages de rétention, qui sont bâtis spécifiquement pour piéger un volume maximum de sédiments dans leur zone d'atterrissement et ne sont pas voués à être curés mécaniquement comme le sont les plages de dépôt (figure 2, figure 4). Ce piégeage de long terme entraîne un déficit sédimentaire à l'aval du barrage dont les effets potentiellement négatifs sont multiples (Brandt, 2000). Une fois que l'ouvrage est complètement atterri, de nouveaux barrages peuvent éventuellement être bâtis près de l'ouvrage principal pour prolonger le comblement du thalweg amont (figure 2). Ces ouvrages spécifiquement dédiés à la rétention ont été préférentiellement bâtis dans des zones où une surélévation limitée du niveau du lit maximise le volume piégé. Parfaitement conscients que ce type d'opération n'était pas durable, (voir analyse de Wang, Kondolf, 2014 sur ce point), Breton (1867) soulignait que des opérations complémentaires de stabilisation des sources sédimentaires étaient nécessaires en complément des mesures de rétention, ces dernières devant être proposées en dernier recours. Depuis les années 1970-1980, le développement des engins de terrassement a rendu possible le curage des ouvrages après chaque crue et permis le développement des plages de dépôt (Dodge, 1948 ; Van Effenterre 1982), rendant l'implémentation de nouveaux grands ouvrages de rétention assez rare. Ce concept de piégeage total est loin des approches modernes de maintien de la continuité sédimentaire, mais peut expliquer l'existence de vieux barrages de grande taille dans certaines vallées de montagne.

Régulation du transport solide

Les barrages de correction torrentielle régulent le transport solide (figure 12). Le lit de certains torrents montrent des fluctuations naturelles de granulométrie, de section en travers et de niveaux du lit, c'est-à-dire de stockage sédimentaire (Church, Ferguson, 2015) : ce sont les fameuses "respirations torrentielles". Des observations de terrain de ces respirations au niveau de barrages sont nombreuses (Fabre, 1797 ; Jaeggi, 1992 ; Poncet, 1995 ; Astrade *et al.*, 2011 ; Theule *et al.*, 2012 ; 2015). Elles sont naturelles dans la cascade sédimentaire (Fryirs, 2013) et peuvent être influencées par l'hydrologie, la (dé)-connectivité sédimentaire, la granulométrie et les fluctuations intrinsèques du processus de transport solide (Jerolmack, Paola, 2010). La création de points fixes dans le profil en long d'un torrent rend le bief amont au barrage indépendant des fluctuations de niveau du bief aval : les érosions régressives ne peuvent alors plus se propager. Ces compartiments indépendants stockent

et libèrent des matériaux, créant des zones tampons entre les ouvrages (Jaeggi, 1992). Ces biefs s'engraissent plus particulièrement pendant les crues chargées de sédiments et libèrent des matériaux pendant les crues d'eaux claires qui suivent. Les barrages modifient ainsi la dynamique des respirations torrentielles qui sont naturellement liées à des échanges permanents entre écoulement et lit (Recking, 2014). Cette tendance laissait Poncet (1995, p. 713) penser que « *les barrages sont particulièrement utiles à la correction torrentielle parce qu'ils délivrent "au détail", ce que le torrent livrait trop brutalement "en gros"* ». Cet effet de régulation a été démontré par Piton et Recking (2016c) sur des modèles réduits en laboratoire.

Figure 12 : illustration de la variation de stockage sédimentaire au pied d'un barrage, signe d'un effet de régulation du transport solide



Observations d'effet tampon sur le transport solide à l'aval d'un barrage de 5 m de haut, sur le torrent du Bourdoux (06) : a) mai 2013, niveau du lit élevé au pied du barrage, signe d'un fort stockage sédimentaire ; b) mai 2014, niveau très bas du lit au pied du barrage révélant le pied sous-cavé de l'ouvrage, signe d'un déstockage sédimentaire ; c) septembre 2014, nouvelle phase de stockage sédimentaire. Source : Photos avec l'aimable autorisation de K. Royer, ONF-service RTM 06.

Gras (1857) concédait que cette régulation du transport solide avait aussi lieu dans les chenaux des cônes de déjection équipés de barrages. Des précautions doivent toutefois être prises dans ces contextes. Les chenaux situés sur les cônes de déjection doivent être aussi profonds que possible pour absorber et transférer efficacement les crues et apports sédimentaires au système fluvial aval. Les barrages doivent donc y être bâtis non pas au-dessus, mais au niveau du lit. De plus, leur cuvette ne doit pas être trop large parce que l'étalement de la lame d'eau entraîne des dépôts et, en conséquence, des divagations du lit qui augmentent dramatiquement les risques d'avulsion et d'inondation incontrôlée sur le cône de déjection. Certains barrages qui avaient été bâtis au-dessus du lit sur le cône de déjection ont été volontairement démantelés par la suite car ces précautions n'avaient pas été prises dès leur conception (torrent du Boscodon, Les-Crots, Hautes Alpes, France : un barrage en 2004 ; torrent du Piézan, Cons-Saint-Colombe, Haute Savoie, France : un barrage en 2014 ; Torrent de la Salle, La-Salle-Les-Alpes, Hautes Alpes, France : trois barrages en 2016). Les leçons qui s'imposent doivent être tirées de ces expériences coûteuses, notamment le rappel, avant tout projet d'aménagement, de l'indispensable analyse du profil en long et de son évolution probable sur les plusieurs décennies de fonctionnement des ouvrages.

Partie 3 : Correction torrentielle à l'étranger

Des dégâts et décès liés aux cours d'eau de montagne et aux torrents sont relevés sur tous les continents. Les hommes sont donc intervenus depuis longtemps, à travers le monde, pour limiter les dommages liés aux phénomènes torrentiels (Skermer, VanDine, 2005). Les paragraphes qui suivent ne cherchent pas à être exhaustifs car le sujet mériterait d'être traité à travers des livres dédiés. Toutefois, un aperçu rapide de l'histoire des autres pays où des travaux pionniers de correction torrentielle ont eu lieu est intéressant pour aider à comprendre les similarités et différences qu'on relève aujourd'hui dans les approches de prévention du risque torrentiel. On ajoutera que de tels résumés sont généralement disponibles seulement dans la langue locale et rarement en français ou en anglais pour un lectorat plus large.

Italie

En Italie, les archives rapportent des traces des effets du déboisement sur l'érosion des sols et sur la pénurie de bois d'œuvre et de chauffage au moins depuis la période Romaine (Hughes, Thirgood, 1982 ; Comiti, 2012). La théorie de base de la correction torrentielle (stabilisation des sources sédimentaires, limitation de l'érosion des cours d'eau et diminution du transport solide) avait déjà été développée au moins depuis le XVIIe siècle dans une communauté scientifique italienne déjà très active (Comiti, 2012). La loi de 1877 sur le reboisement était considérée comme exemplaire dans son approche de la restauration (Hall, 2005, p. 40), même si elle n'a pas été suivie par autant d'actions qu'espérées (Fesquet, 1997, p. 315 ; Hall, 2005, p. 51, p. 74). La différence de temporalité dans le lancement d'un investissement public fort dans la correction torrentielle des deux côtés de la frontière franco-italienne a vraisemblablement une double origine historique et politique. D'une part l'exploitation lourde et généralisée des sols est plus ancienne en Italie qu'en France. La rapidité de la dégradation de la problématique torrentielle a ainsi été plus évidente et inquiétante en France. Ingénieurs et politiques français étaient alors plus aptes à prendre des décisions ambitieuses (Marsh, 1864, p. 237). D'autre part, la mise en œuvre d'une politique publique à l'échelle nationale pouvait être lancée plus simplement dans le contexte d'un Etat-Nation français, dirigé de façon autoritaire, que dans le contexte de pouvoirs et de services techniques fragmentés qui existaient en Italie avant l'unification de 1861 (Marsh, 1864, p. 217 ; Fesquet, 1997, p. 177).

Certaines régions, notamment la partie ouest des Alpes italiennes, proches de la frontière franco-italienne, ont toutefois concentré des travaux conséquents de correction torrentielle (reboisement et barrages) depuis 1869 (Hall, 2005, Chap 2). Des ouvrages ont aussi été bâtis dans le Tyrol dès 1841 (Marchi et Cavalli, 2007), ainsi qu'en Slovénie (Logar *et al.*, 2005). Ces régions étaient à l'époque sous contrôle de l'empire Austro-Hongrois, donc dans le domaine des ingénieurs Autrichiens. C'est pourquoi les techniques utilisées dans ces régions sont très semblables à celles développées en Autriche.

Autriche

Les idées des auteurs français mentionnés dans les chapitres précédents avaient déjà émergées en Autriche (et peut-être aussi ailleurs) à travers les travaux de von Zallinger (1779), de von Aretin (1808) et de Duile (1826 ; 1841). L'administration autrichienne ne semble toutefois pas avoir pris leurs recommandations en compte pour lancer une politique à l'échelle du pays. C'est seulement après les crues de 1882 qu'une vaste politique de correction torrentielle a été lancée, partiellement sur le modèle français (Zollinger, 1984). Les autrichiens sont rapidement devenus des experts dans le domaine et diffusèrent leurs connaissances en Europe et plus loin, comme par exemple Amerigo Hofman dans ses nombreuses interventions au Japon (Zollinger, 1984 ; Okamoto, 2007).

Suisse

Des bassins de rétention dédiés au piégeage des sédiments ont été créés dès les années 1840 pour protéger les chemins de fer suisses (Vischer, 2003). Ils inspirèrent Demontzey et furent utilisés en France, par exemple sur les torrents des Palles et du Merdaret (Chantelouve, Isère, France ; Bernard, 1927). La première série de barrages bâtis en Suisse dans un projet global de correction torrentielle ont été conçus par l'ingénieur Autrichien Josef Duile (1776-1863), sur le Rûfirunse à Mollis (Duile, 1841). Plusieurs opérations ont été réalisées dans la suite de cet exemple (Vischer, 2003, Chap 12). Le rapport de Culman (1865), établi à l'échelle de la Confédération helvétique, a alors constitué un bilan des mesures à mettre en œuvre pour se protéger contre le risque torrentiel : identification des bassins versants qui justifiaient la réalisation d'un "système général de défense", synthèse des techniques de protection existantes et de leurs coûts, définition des outils législatifs et mesures générales nécessaires. Son auteur soulignait la nécessité d'effectuer des travaux complémentaires à la construction des barrages de correction torrentielle, comme ceux de lutte contre les érosions de versants et de reboisement. De nombreuses opérations furent réalisées en particulier après la loi fédérale sur la police des forêts de 1876 (Vischer, 2003, Chap 15). Cela a contribué à ce que la Suisse devienne un pays leader dans le domaine de l'hydraulique torrentielle.

Japon

Les aléas liés aux sédiments (crues torrentielles, glissements de terrains, ruptures de barrages formés suite à des glissements de terrain) constituent un problème majeur au Japon. Ils ont en effet généré en moyenne 79 morts/an sur la période 1967-2009 (JSA, 2003 ; 2012). Le pays a donc une culture de la lutte contre l'érosion et les risques torrentiels ancienne et très ancrée dans la société, avec par exemple des lois interdisant le déboisement des versants remontant au moins jusqu'au VII^e siècle, des travaux d'endiguement datant du XVI^e siècle et des opérations de correction torrentielle (dites "SABO" en japonais) datant du XVII^e siècle (JSA, 2003). Quelques barrages de correction torrentielle ont ainsi été bâtis vers 1700 dans l'ancien domaine de Fukuyama (Préfecture d'Hiroshima) et sont toujours en bon état (Okamoto, 2007).

Des collaborations avec des ingénieurs européens et américains hydrauliciens et génie civilistes débutèrent vers la fin du XIX^e siècle (Okamoto, 2007 ; Kamibayashi, 2009). Elles continuèrent au début du XX^e siècle, par exemple avec l'expert autrichien Amerigo Hofman. En parallèle, des ingénieurs japonais venaient en Autriche, comme Shitaro Kawai en 1871 et Otokichi Watanabe en 1877, ou Kitaro Moroto au début du XX^e siècle (J. Hübl et H. Nishimoto, *communication personnelle*, 2015), ainsi qu'en France (Nishimoto, 2014), pour compléter leur formation par des visites et des séjours dans les écoles d'ingénieurs hydrauliciens et forestiers. Des techniques européennes ont ainsi inspiré la conception de certains ouvrages japonais (Wang, 1901, p. 474 ; JSA, 2003, p. 16). Cependant, les événements sont de magnitude plus forte au Japon qu'en Europe. Cela s'explique par des pluies plus intenses liées aux typhons, par l'influence néfaste de la géologie volcanique (modifiant notamment la rhéologie des laves torrentielles pour former des lahars, plus rapides, massifs et destructeurs) et par l'occurrence plus régulière d'ondes de submersion résultant de la rupture de barrages formés par des glissements de terrains (Schuster, 2000 ; JSA, 2003 ; 2012). Les experts japonais ont alors développé leurs propres techniques de correction torrentielle et de protection

adaptées à ce contexte. Ils allèrent, et continuent d'aller, dans d'autres pays pour aider à la mise en œuvre de mesures et techniques de protection contre les risques torrentiels (JSA, 2003, p. 106 ; Skermer et VanDine, 2005 ; Lin *et al.*, 2010) tandis que leur communauté scientifique continue à être très active sur le sujet.

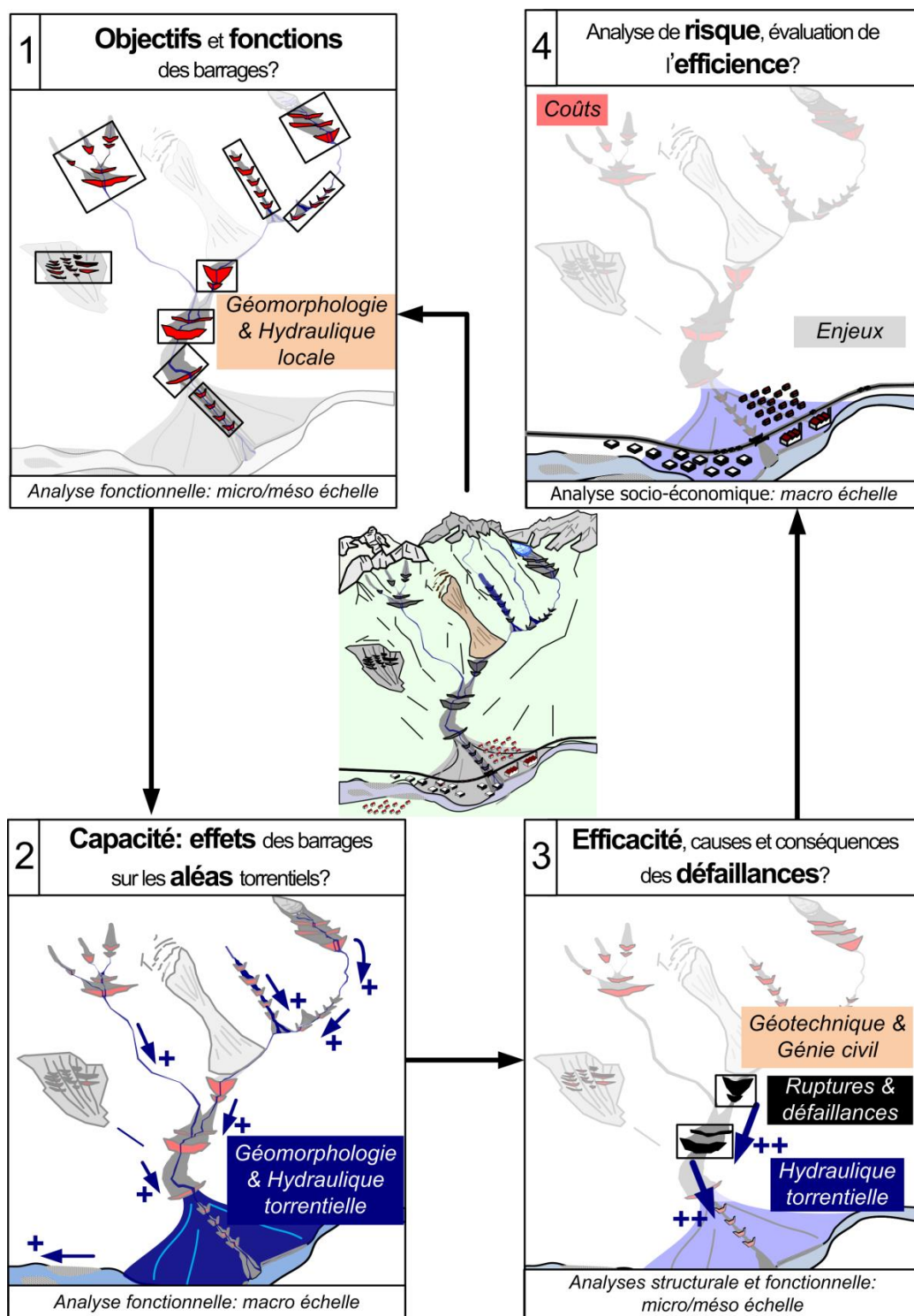
Amérique du Nord

Les techniques européennes de restauration des terrains de montagne et de correction torrentielle furent ramenées en Amérique du Nord par des auteurs tel que George Perkins Marsh (1801-1882) qui confessait qu'il avait été fortement influencé par les théories des ingénieurs de la RTM autrichienne, allemande, italienne et plus particulièrement française (Marsh, 1864, p. 217 ; Hall, 2005, p. 41). Les expériences nord-américaines de lutte contre l'érosion se sont toutefois plus généralement appuyées sur le génie végétal et les petits ouvrages rustiques que sur les grands ouvrages de génie civil (Hall, 2005, Chap 3 ; deWolfe, *et al.*, 2008). Les dispositifs de stabilisation des ravines utilisant de petits seuils en bois ou en pierres sèches ont notamment été testés par Heede (1960 ; 1978; 1982) et sont encore régulièrement utilisés (Nichols *et al.*, 2016). Quelques grands barrages visant à stabiliser des lits de rivières ou à devenir des barrages de rétention ont néanmoins été bâtis au milieu du XXe siècle en Californie, zone américaine emblématique en termes de laves torrentielles (Skermer, VanDine, 2005). Les deux techniques que sont les plages de dépôts curées mécaniquement et les barrages de rétention ont été utilisées (Dodge, 1948 ; Ferrell et Barr, 1965), même si les premières le sont beaucoup plus (VanDine, 1996 ; M. Church, *communication personnelle*, 2015 ; O. Hungr, *communication personnelle*, 2016).

Partie 4 : Analyse de l'effet des ouvrages de correction torrentielle

Après avoir établi les fonctions assurées par les barrages, l'analyse globale de leur effet sur l'aléa torrentiel est requise pour aider à décider des actions à mener à l'échelle du bassin versant. Les étapes de cette analyse sont résumées dans la figure 13 et détaillées dans le chapitre qui suit en prenant comme exemple les travaux de correction torrentielle en général. Chacune de ces étapes constitue un défi en soi avec la nécessaire quantification des effets et l'évaluation de l'efficacité, de l'efficience et du risque résiduel.

Figure 13 : Etapes pour l'évaluation intégrée de l'effet sur l'aléa torrentiel, de l'efficacité et de l'efficience des mesures de correction torrentielle



Etapes d'analyses basées sur une analyse des composantes structurales, fonctionnelles et socio-économiques, aidant *in fine* à décider de la stratégie de maintenance des ouvrages et dispositifs existants. L'échelle "micro" correspond à l'ouvrage ; l'échelle "méso" correspond au dispositif qui est un ensemble d'ouvrages permettant d'accomplir une fonction donnée ; l'échelle "macro" correspond à un ensemble de dispositifs présents dans un bassin versant dont l'objectif est de protéger une même zone d'enjeux, autrement appelé « bassin d'enjeux » ou « bassin de risques ».

Quantifier les effets sur l'aléa selon chaque fonction

L'étude de l'aléa torrentiel doit s'appuyer sur une approche transdisciplinaire qui doit en synthèse déterminer (Mazzorana *et al.*, 2012) : 1. quels types de phénomènes torrentiels peuvent affecter le bassin versant, 2. à quelle fréquence et selon quelle intensité, et 3. sur quelle étendue spatiale. Dans un bassin de risque donné, les dispositifs de protection auxquels peuvent appartenir les barrages visent à modifier les aléas vis-à-vis d'un état initial, c'est-à-dire un état du bassin versant sans dispositif. Cette modification de l'aléa doit être quantifiée comme la modification des probabilités d'occurrence de différentes magnitudes d'évènement, par exemple des volumes de lave torrentielle, des débits solides donnés ou des tailles de blocs transportés. Il est ainsi nécessaire d'appliquer, pour chaque fonction d'ouvrage, une méthode qui aide à déterminer à quel point ce dernier modifie les processus de crue. Cette étape est celle de l'évaluation de la capacité de l'ouvrage qui correspond à la mesure quantitative de l'effet attendu par la réalisation de chaque fonction (Tacnet *et al.*, 2012).

La littérature contient des méthodes permettant l'évaluation de la capacité des barrages relative à la fonction de réduction de la pente du lit (Kostadinov, 1993; Porto, Gessler, 1999 ; Ferro, Porto, 2011 ; Kostadinov, Dragovic, 2013). Les analyses préliminaires concernant les interactions glissement de terrain-barrage sont une base à l'évaluation de la capacité relative à la fonction de consolidation de versant (Nicot *et al.*, 2001). Des études récentes sur les aspects de régulation du transport solide permettent d'aborder l'évaluation de la capacité relative à cette fonction (Remaître *et al.*, 2008 ; Astrade *et al.*, 2011 ; Piton, Recking, 2016c). Ces sujets requièrent toutefois des actions de validation ou de nouveaux développements pour estimer correctement la capacité des ouvrages.

La capacité liée aux fonctions de stabilisation du lit et de rétention des sédiments est fortement conditionnée par la topographie du lit des torrents (profils en long et en travers des fonds de vallées), ainsi que 1. dans le cas de la capacité de stabilisation, par la susceptibilité à l'érosion (Hungar *et al.*, 1984 ; Theule *et al.*, 2012 ; 2015) et les tendances générales à l'incision des lits (Hungar, 2005 ; Takahashi, 2007) dans les tronçons corrigés des torrents ; 2. dans le cas de la capacité de rétention, par la production sédimentaire totale du bassin versant sur une durée donnée (Recking, 2012 ; Piton, Recking, 2017). Les méthodes quantitatives destinées à estimer les volumes d'érosion locale et la production sédimentaire des bassins versants restent toutefois entachées de larges incertitudes et doivent être utilisées avec prudence (Liebault *et al.*, 2013).

Un état de l'art exhaustif des méthodes d'estimation de la capacité relative à chaque fonction des barrages de correction torrentielle serait nécessaire (deWolfe *et al.*, 2008). Il faudrait qu'il soit réalisé en prenant en compte les effets potentiels liés aux changements d'échelle (ouvrage, dispositif, bassin versant), en précisant les domaines d'application et les incertitudes des différentes méthodes.

Estimation de l'efficacité des ouvrages

L'aléa torrentiel résulte du phénomène de cascade sédimentaire. L'évaluation de la capacité des ouvrages doit prendre en compte les effets cumulés de l'ensemble des ouvrages situés au sein d'un bassin versant (voir par exemple, Remaître *et al.*, 2008). Même si elle est potentiellement compliquée, cette analyse devrait s'appuyer sur les étapes suivantes : 1. étude hydro-géomorphologique complète du bassin versant ; 2. identification des fonctions de chaque ouvrage ; 3. évaluation de la capacité comme l'effet produit sur l'aléa ; et 4. évaluation des potentielles défaillances structurales et fonctionnelles et analyse des conséquences associées. Ce travail doit conclure à l'efficacité fonctionnelle des ouvrages qui correspond à la comparaison entre l'objectif de réduction de l'aléa préalablement défini et l'effet des ouvrages sur l'aléa torrentiel en tenant compte des défaillances potentielles (AFNOR, 2001).

L'analyse de l'efficacité des ouvrages doit prendre en compte l'analyse des conséquences de leurs défaillances potentielles, jusqu'à leur ruine complète. Pour la plupart des cas connus, la ruine de barrages de correction torrentielle n'a pas significativement aggravé l'évènement en aval, même dans le cas d'une ruine complète d'une série de barrages (par exemple Mougin, 1897 ; Jaeggi et Pellandini, 1997 ; Wang, 2013 ou Chen *et al.*, 2015). Le volume de matériau lié à la crue naturelle dépasse en général largement celui lié à la ruine du dispositif. La crue de Bièscas sur le Rio Arás dans les Pyrénées centrales espagnoles en 1996 est toutefois un des rares contre-exemples significatifs. La ruine de 35 barrages de correction torrentielle sur une série de 40 aurait fourni environ les deux tiers des matériaux transportés ayant comblé le chenal du torrent à l'apex du cône de déjection, ce qui a

redirigé les écoulements vers un camping où 87 personnes sont décédées (García-Ruiz *et al.*, 1996 ; White *et al.*, 1997 ; Benito *et al.*, 1998). Dans ce cas, la défaillance du dispositif a été principalement imputée à la conception des ouvrages qui présentaient des erreurs manifestes (notamment des cuvettes de barrages sous-dimensionnées et des ancrages des ailes dans les berges très insuffisants) dans une configuration de site avec certaines spécificités aggravantes (matériaux morainiques très érodables, cassure de pente très marquée à l'apex du cône). L'absence d'une maintenance adéquate de certains ouvrages est aussi de plus en plus pointée comme une source potentielle additionnelle d'aléa en cas de ruine (Sodnik *et al.*, 2014). D'autres catastrophes équivalentes pourraient être observées en cas de maintenance inexistante ou inadaptée ou de mauvais standard de conception.

Des retours d'expériences à la suite de grandes catastrophes ou tirées de bases de données sur les ouvrages (Dell'Agnese *et al.*, 2013 ; Carladous *et al.*, 2014a) peuvent aider à identifier les différents modes de défaillance (Vuillet, 2012), analyser leurs conséquences et proposer des mesures préventives adaptées. Par exemple, pour un barrage de rétention (fonction), le volume cible (capacité objectif) peut ne pas être atteint parce qu'il est contourné par une érosion latérale (mode de défaillance fonctionnelle) ou parce qu'il est ruiné (mode de défaillance structurale) (Tacnet *et al.*, 2012 ; Carladous *et al.*, 2016c). Ces modes de défaillances ont été étudiés dans plusieurs travaux (notamment Comiti *et al.*, 2013 ; Rudolf-Miklau et Suda, 2011 ; 2013) dont il faudrait réaliser un état de l'art. Ce dernier permettrait ensuite d'aboutir à des recommandations vis-à-vis de la conception et du suivi des ouvrages (par exemple, Bergmeister *et al.*, 2009 ; Suda *et al.*, 2010 ; Rudolf-Miklau, Suda, 2013).

En synthèse, de nouveaux travaux sont nécessaires à l'établissement de méthodes complètes d'évaluation de l'efficacité des ouvrages de correction torrentielle à l'échelle du bassin versant complet. Elles devraient être en mesure de combiner l'analyse de la capacité relative à chaque fonction et celles des conséquences des défaillances potentielles, structurales et fonctionnelles.

Analyse de risque et bilan d'efficience

Pour aider les gestionnaires d'ouvrages, l'analyse finale est celle de l'efficience des mesures proposées qui doit comparer la réduction de l'aléa et du risque induit que ces mesures permettent avec les ressources utilisées (coût total qui inclut les coûts d'investissement, de suivi, d'entretien annuel, d'entretien exceptionnel et, éventuellement, de réparation en fin de vie - AFNOR 2001). L'analyse du risque torrentiel qui doit intégrer la présence d'ouvrages de protection nécessite normalement de prendre en compte leurs effets fonctionnels mais aussi les potentiels effets secondaires négatifs tels que la déconnectivité dans la cascade sédimentaire (Fryirs, 2013) ou les conséquences des défaillances d'ouvrages. De plus, l'évaluation du risque torrentiel (Tacnet *et al.*, 2014) devrait intégrer la perte de conscience du risque qui suit la mise en place d'un système de correction d'un torrent (Eisbacher, 1982 ; White *et al.*, 1997).

Comparer plusieurs variantes d'aménagement pour choisir laquelle est la plus pertinente à mettre en œuvre est finalement un problème décisionnel compliqué. Les méthodes d'aide à la décision telles que les analyses coûts-bénéfices (ACB : utilisées pour comparer des solutions pour un projet nouveau), les analyses coûts-efficacité (ACE : plus adaptée pour comparer des scénarios de maintenance) et les analyses multicritères (AMC : capables de prendre en compte des dommages intangibles) ont été appliquées aux risques naturels depuis les années 1990 (Gamper *et al.*, 2006 ; Carladous, 2013). Elles visent à comparer des variantes à travers l'agrégation de plusieurs critères (Schärlig, 1985). Des outils d'application d'ACB ont notamment été développés en Suisse (Greminger, 2005 ; Bründl *et al.*, 2009) et en Autriche (BLFUW, 2009). En France, les ACB appliquées au domaine torrentiel ont d'abord été testées dans la vallée de la Maurienne (Savoie, France ; Verrier, 1980), puis sur le torrent du Manival (Saint-Nazaire-les-Eymes, Isère, France ; Brochot *et al.*, 2003). Ces analyses ont mis en évidence l'insuffisance des données nécessaires à l'application rigoureuse de ces méthodes dans le contexte des risques naturels en montagne, ce qui est un problème récurrent dans le domaine torrentiel (Poncet, 1975). Ces méthodes sont par contre déjà régulièrement utilisées dans le domaine fluvial (Erdlenbruch *et al.*, 2008 ; CGDD, 2014 ; 2018) bien que les détails de leur application évoluent encore régulièrement sous la forme d'un processus d'amélioration continue piloté par le Commissariat Général au Développement Durable (CGDD). On note toutefois que la physique des processus est moins compliquée dans le domaine fluvial que dans le domaine torrentiel et les effets distants des ouvrages sont moins marqués ou complexes à caractériser.

Certaines évolutions historiques depuis le XIXe siècle compliquent encore les prises de décision vis-à-vis de la maintenance des ouvrages existant (Carladous *et al.*, 2016a) : 1. les enjeux ont, en général, évolué d'une population native pérenne à une population touristique temporaire (Crécy, 1983 ; Brugnot, 2002 ; Comiti, 2012) ; 2. l'activité torrentielle et la morphodynamique des bassins versants ont changé suite aux reboisements spontanés et artificiels ou à la correction des torrents qui impactent fondamentalement le fonctionnement géomorphologique des paysages (Liébault *et al.*, 2005) ; 3. de nouvelles alternatives à la technique des anciens barrages pleins sont apparues avec la démocratisation des engins de terrassement (par exemple par des curages et régallages dans les lits) et les barrages filtrants des plages de dépôt (Piton et Recking, 2016a ; 2016b) ; et finalement 5. l'importance de la continuité sédimentaire au sein des hydrosystèmes est maintenant mieux comprise et prise en compte dans les politiques publiques, par exemple dans la Directive Cadre sur l'Eau (EU, 2000).

Il en résulte que la morphodynamique des cours d'eau de montagne mérite toujours des recherches et études, au moins dans l'objectif de produire les données nécessaires à la mise en œuvre des méthodes d'aide à la décision dans des contextes compliqués par les changements climatiques mais aussi biologiques, techniques et sociétaux.

Conclusion

Des milliers de torrents sont équipés de séries de barrages de correction torrentielle. Comme leur maintenance a un certain coût, on peut interroger leur efficacité à réduire les risques et être tenté d'abandonner certains vieux ouvrages. Ce point est d'ailleurs régulièrement discuté comme une solution pour réactiver le transport de stocks sédimentaires piégés et stabilisés par la correction torrentielle (Bravard, 1991 ; Liébault *et al.*, 2008 ; Pont *et al.*, 2009 ; Rinaldi *et al.*, 2011). Pour définir les stratégies d'entretien à mener, il est absolument nécessaire de connaître l'effet des ouvrages sur les processus de crue. Ces effets sont définis qualitativement par les fonctions des ouvrages, et quantitativement par la capacité des ouvrages reliée à chaque fonction, à la fois à l'échelle de l'ouvrage et du bassin versant complet. La comparaison de ces effets avec des objectifs de protection donnés permet de faire le bilan de leur efficacité, tandis que la comparaison avec les coûts totaux permet de faire le bilan de leur efficience.

Dans certains cas, l'abandon de certains ouvrages peut être justifié par la disparition du risque qui justifiait initialement la réalisation des ouvrages. Elle peut être liée à l'évolution de l'aléa et/ou de la présence d'enjeux exposés à cet aléa. Ainsi, l'arrêt de l'entretien d'ouvrages conçus pour protéger des zones agricoles ou des villages désormais abandonnés peut être envisagé. Dans d'autres cas, la suppression de certains ouvrages pourrait être proposée car ils ont été si efficaces dans le temps qu'on considère que l'aléa est désormais limité. Or cette décision peut en fait être liée à l'oubli de leur fonction initiale, c'est-à-dire la raison pour laquelle les ouvrages ont été bâtis à l'origine, et pourrait être catastrophique par réactivation des processus d'érosion et une nouvelle augmentation de l'aléa qui était pourtant maîtrisé. La définition de l'attente que nous avons aujourd'hui vis-à-vis de l'effet des ouvrages peut aussi être rendue compliquée par des changements dans les contextes socio-économiques et environnementaux (Dufour et Piégay, 2009 ; Carladous *et al.*, 2016a) : notre compréhension de l'importance de la continuité sédimentaire a par exemple évolué, ou encore de nombreux bassins versants ont été spontanément ou artificiellement reboisés depuis la construction des ouvrages.

La revue et analyse historique du développement de l'approche française présentée dans cet article devraient conduire à une meilleure compréhension de la fonction des barrages et seuils de protection torrentielle. Les fonctions et caractéristiques principales de ces ouvrages sont synthétisées dans le tableau 1 et dans la figure 6. Cette synthèse peut ne pas être exhaustive et nous devons garder à l'esprit que la plupart des ouvrages peuvent avoir plusieurs fonctions, parfois à travers des effets secondaires complexes (comme détaillé, par exemple, dans la figure 5). Toutefois, nous croyons que cette synthèse offre un cadre d'analyse utile à la définition des effets potentiels d'un ouvrage donné, pris dans son contexte environnemental actuel et considérant l'histoire récente du bassin versant. La discussion présente ensuite les étapes suivantes qui doivent permettre l'analyse complète de l'aléa torrentiel en tenant en compte de l'efficacité des ouvrages. Nous avons ainsi souligné plusieurs questions et sujets qui mériteraient des travaux complémentaires de recherche.

D'un point de vue géomorphologique plus large, la gestion actuelle et moderne des rivières doit prendre en compte la dynamique naturelle du transport solide (EU, 2000), ce qui nécessite une connaissance suffisante du fonctionnement de la cascade sédimentaire au sein du bassin versant (Church, Ferguson, 2015). Cette dernière est en effet influencée par de multiples impacts anthropiques (Wohl, 2006) créés par les barrages et leurs effets sur les chenaux.

La présente revue aidera, nous l'espérons, les communautés des gestionnaires, des ingénieurs et des scientifiques à déterminer comment ces ouvrages influencent la morphodynamique des bassins versants, pour mener leurs analyses en connaissance de cause et intégrer des proxys de l'effet subtil de la correction torrentielle.

Remerciements

Cette étude a bénéficié des financements des Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement, des projets européens INTEREG ALCOTRA RISBA et ALPINE SPACE SEDALP et Horizon 2020 NAIAD (Grant Agreement n°73097). Les auteurs tiennent à remercier Christine KOSMOPOULOS pour son travail d'éditeur, Sebastian SCHWINDT pour son aide avec les publications en allemand ; Johannes HÜBL, Mike CHURCH, Stefano CREMA, Oldrich HUNGR et Haruo NISHIMOTO qui ont fourni des éléments sur les travaux de correction torrentielle en Autriche, Amérique du Nord, Italie et Japon ; Stuart LANE, Mike CHURCH, et Francesco COMITI pour leurs suggestions ayant permis d'améliorer le manuscrit. Cette version a bénéficié des corrections additionnelles de Roxane MARCHAL et de Colette CAUVIN et des remarques éclairées de deux relecteurs anonymes que nous remercions profondément pour leurs commentaires.

Sigles utilisés

ACB : Analyse Coût-Bénéfice
ACE : Analyse Coût-Efficacité
AMC : Analyse Multicritères
CGDD : Commissariat Général au Développement Durable
ONF : Office National des Forêts
RTM : Restauration des Terrains de Montagne

Bibliographie

- AFNOR., 2001, *NF EN 13306 X 60-319 - Terminologie de la maintenance*, Association Française de Normalisation.
- Van Andel T. H., Runnels C. N., Pope K. O., 1986, "Five Thousands Years of Land Use and Abuse in the Southern Argolid, Greece", *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens*, Vol. 55, No.1, 103–128.
- Von Aretin J. G., 1808, *Über Bergfalle und die mittel, denfelben vorzubeugen, oder wenigstens ihre Schädlichkeit zu vermindern mit vorzüglicher Rücksicht auf Tirol*, Fischerischen Buchhandlung, Innsbruck.
- Armanini A., Dellagiacomma F., Ferrari L., 1991, "From the check dam to the development of functional check dams", *Fluvial Hydraulics of Mountain Regions*, Vol. 37, 331–344.
- Astrade L., Ployon E., Veyrat-Charvillon S., 2011, "Les données laser terrestre à haute résolution pour le suivi de la charge de fond dans les tronçons torrentiels, retours d'expériences". in S. Jaillet, E. Ployon, and T. Villemin, eds. *Images et modèles 3D en milieux naturels*, Coll Edytem, 107–118.
- BAEL., 1980, "Règles B.A.E.L. 80," Ministère de l'environnement et du cadre de vie et Ministère des transports.
- Benito G., Grodek T., Enzel Y., 1998, "The geomorphic and hydrologic impacts of the catastrophic failure of flood-control-dams during the 1996-Biescas flood (Central Pyrenees, Spain)", *Zeitschrift für Geomorphologie*, Vol. 42, No.4, 417–437.
- Bergmeister K., Suda J., Hübl J., Rudolf-Miklau F., 2009, *Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren: Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele*, Ernst Sohn, 1–211.

- Bernard C., 1927, *Cours de restauration des montagnes*. (E. N. des Eaux et Forêt, Ed.), Ecole normale des eaux et forêts, 788.
- Bischetti G. B., Di Fi Dio M., Florineth F., 2014, “On the Origin of Soil Bioengineering”, *Landscape Research*, Vol. 39, No.5, 583–595.
- Blanchard R., 1944, “Deboisement et reboisement dans les Préalpes françaises du Sud”, *Revue de géographie alpine*, Vol. 32, No.3, 335–388.
- BLFUW., 2009, “Kosten-Nutzen-Untersuchungen im Schutzwasserbau Richtlinie. KNU gemäß Par. 3 Abs. 2 Ziffer 3 WBFV Fassung,” Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion Wasser, Vienna, Austria.
- Blinkov I., Kostadinov S., Marinov I. T., 2013, “Comparison of erosion and erosion control works in Macedonia, Serbia and Bulgaria”, *International Soil and Water Conservation Research*, Vol. 1, No.3, 15–28.
- Böll A., Kienholz H., Romang H., 2008, “Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raumplanung TEIL E: WILDBÄCHE,” Swiss Confederation - National Platform for natural Hazards, Bern.
- Bombino G., Gurnell A. M., Tamburino V., Zema D. A., Zimbone S. M., 2009, “Adjustments in channel form, sediment calibre and vegetation around check-dams in the headwater reaches of mountain torrents, Calabria, Italy”, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 34, No.7, 1011–1021.
- Bordes J.-L., 2010, “Les barrages en France du XVIIIème à la fin du XXème siècle en France, histoire, évolution technique et transmission du savoir.”, *Pour Mémoire*, Vol. 9, 70–120.
- Brandt S. A., 2000, “Classification of geomorphological effects downstream of dams”, *Catena*, Vol. 40, No.4, 375–401.
- Bravard J., 1991, “La dynamique fluviale à l’épreuve des changements environnementaux: Quels enseignements applicables à l’aménagement des rivières?”, *La Houille Blanche*, No.7-8, 515–522.
- Breton P., 1867, *Mémoire sur les barrages de retenue de graviers dans les gorges des torrents*. (Dunod, Ed.), Librairie des corps impériaux des ponts et chaussées et des mines, Paris.
- Brochot S., Duclos P., Bouzit M., 2003, “L’évaluation économique des risques torrentiels: intérêts et limites pour les choix collectifs de prévention.”, *Ingénieries*, Vol. Numéro Spécial, 53–68.
- Brown J. C., 1876, *Reboisement in France: or, records of the replanting of the Alps, the Cevennes, and the Pyrenees with trees, herbage, and bush, with a view to arresting and preventing the destructive consequences and effects of torrents.*, Henry S. King Co., London, 351.
- Brugnot G., 2002, “Développement des politiques forestières et naissance de la restauration des terrains en montagne”. *Annales des ponts et chaussées*, 23–30.
- Bründl M., Krummenacher B., Merz H., 2009, “Decision making tools for natural hazard risk management - Examples from Switzerland”. *Safety, reliability and risk analysis: theory, methods and applications: proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2008, and 17th SRA-Europe*, CRC Press/Balkema, Leiden, Valence, Spain.
- Carladous S., 2013, September, “Analyse critique des méthodes d’évaluation de l’efficacité économique des mesures de protection contre les risques naturels en montagne.”, Université Paul Valéry, Montpellier, France.
- Carladous S., Michaud M.-P., Tacnet J.-M., Delvienne Q., 2014a, “A survey on protection work databases used at the Alpine Space level: analysis of contents and state of the art related to protection work effectiveness assessment in START-it-uP (WP4).” European Regional Development Fund - Alpine Space Program - START-it-uP project: State-of-the-Art in Risk Management Technology: Implementation and Trial for Usability in Engineering Practice and Policy. <http://www.alpine-space.eu/startitup>.
- Carladous S., Piton G., Recking A., Liebault F., Richard D., Tacnet J. M., Kuss D., Philippe F., Quefféléan Y., Marco O., 2016a, “Towards a better understanding of the today French torrents management policy through a historical perspective”. *E3S Web Conf.*, 12011.
- Carladous S., Piton G., Tacnet J., Philippe F., Nepote-Vesino R., Quefféléan Y., Marco O., 2016b, “Protection against natural hazards in French mountains: historical analysis of actions and decision contexts in public forests”. *13th INTERPRAEVENT Conf. Proc.*, 34–42.

- Carlados S., Quefféléan Y., 2017, “Note de cadrage sur la définition des ouvrages de correction torrentielle objet de l’exception prévue à l’article R562-12 du Code de l’Environnement,” Office National des Forêts - Département Risques Naturels.
- Carlados S., Tacnet J.-M., Batton-Hubert M., 2016c, “Protection structures against natural hazards: from failure analysis to effectiveness assessment”. *13th INTERPRAEVENT Conf. Proc.*, 735–743.
- Carlados S., Tacnet J.-M., Eckert N., Curt C., Batton-Hubert M., 2014b, “Vers une analyse intégrée de l’efficacité des ouvrages de protection contre les risques naturels en montagne : évaluation économique en complément des volets structurels et fonctionnels.” in C. Curt, L. Peyras, J. Baroth, and A. Chateauneuf, eds. *8ème Journées Fiabilité, Matériaux et Structures - analyse de risques et fiabilité des systèmes dans leur environnement*, France.
- Castelli B., 1628, *della misura dell’acqua corrente [traicté de la mesvre des eavx covrantes]*, traduction du latin au vieux français de Bernard Barcovda, 1664.
- CGDD., 2014, “Analyse multicritères des projets de prévention des inondations. Guide méthodologique.” Ministère de l’Ecologie, du Développement durable et de l’Energie, Commissariat général au développement durable, Paris, France.
- CGDD., 2018, “Analyse multicritère des projets de prévention des inondations - Guide méthodologique 2018,” Commissariat général au développement durable.
- Champion M., 1856, *Recherche historiques sur les inondations du Rhône et de la Loire*, Typographie Panckoucke.
- Chanson H., 2004, “Sabo Check Dams - Mountain Protection Systems in Japan”, *International Journal of River Basin Management*, Vol. 2, No.4, 301–307.
- Chen J. G., Chen X. Q., Zhao W. Y., You Y., 2016, “Discussion of ‘Design of Sediment Traps with Open Check Dams. I: Hydraulic and Deposition Processes’ by Guillaume Piton and Alain Recking”, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 142, No.10, 07016008–1–2.
- Chen X., Cui P., You Y., Chen J., Li D., 2015, “Engineering measures for debris flow hazard mitigation in the Wenchuan earthquake area”, *Engineering Geology*, Vol. 194, No.Special Issue on “The Geological and Geotechnical Hazards of the 2008 Wenchuan Earthquake, China: Part II, 73–85.
- Church M., Ferguson R., 2015, “Morphodynamics: Rivers beyond steady state”, *Water Resources Research*, Vol. 51, No.4, 1883–1897.
- Clauzel L., Poncet A., 1963, “Barrages filtrants et corretion torrentielle par ségrégation des matériaux charriés”, *Revue Forestière Française*, Vol. 4, 280–292.
- Coeur D., 2003, “Genesis of a public policy for flood management in France: The case of the Grenoble valley (XVIIth-XIXth centuries)”. *Palaeofloods, Historical Floods and Climatic Variability: Applications in Flood Risk Assessment. CSIC, Madrid (Proceedings of the PHEFRA Workshop, Barcelona, 16-19th October, 2002)*, 373–378.
- Cœur D., Lang M., 2008, “Use of documentary sources on past flood events for flood risk management and land planning”, *Comptes Rendus - Geoscience*, Vol. 340, No.9-10, 644–650.
- Combes F., 1989, “Restauration des terrains en montagne. Du rêve à la réalité”, *Revue Forestière Française*, Vol. 41, No.2, 91–106.
- Comiti F., 2012, “How natural are Alpine mountain rivers? Evidence from the Italian Alps”, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 37, No.7, 693–707.
- Comiti F., Lenzi M. A., Mao L., 2013, “Check dams, morphological adjustments and erosion control in torrential streams”. in C. Conesa-Garcia and M. A. Lenzi, eds., Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, NY, 263–282.
- Conesa-Garcia C., López-Bermudez F., Garcia-Lorenzo R., 2007, “Bed stability variations after check dam construction in torrential channels (South-East Spain)”, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 32, No.14, 2165–2184.
- Costa de Bastelica M., 1874, *Les torrents : leurs lois, leurs causes, leurs effets, moyens de les réprimer et de les utiliser, leur action géologique universelle.* (J. Baudry, Ed.), Librairie Polytechnique, Paris.
- de Crécy L., 1983, “Evolution de la ‘Restauration des terrains en montagne de 1860 à 1983’. La politique de prévention des risques naturels en montagne depuis 150 ans.” *108ème congrès national des Sociétés savantes.*

- Culman K., 1865, *Rapport au Conseil Fédéral sur les torrents des Alpes Suisses inspectés en 1858 - 1859 - 1860 et 1863*, Imprimerie L. Corbaz and Co., 590.
- D'Agostino V., 2013, "Check dams, morphological adjustments and erosion control in torrential streams". in C. Conesa-Garcia and M. A. Lenzi, eds., Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, NY, 185–210.
- Dell'Agnese A., Mazzorana B., Comiti F., Von Maravic P., D'agostino V., 2013, "Assessing the physical vulnerability of check dams through an empirical damage index", *Journal of Agricultural Engineering*, Vol. 44, No.1, 2.
- Delsigne F., Lahousse P., Flez C., Guiter G., 2001, "Le Riou Bourdoux: Un monstre alpin sous haute surveillance", *Revue forestière française*, Vol. 53, No.5, 527–541.
- Demontzey P., 1882, *Traité pratique du reboisement et du gazonnement des montagnes*. (J. Rothschild, Ed.), Ministère de l'agriculture et du commerce et des travaux publics, Paris, 528.
- deWolfe V. G., Santi P. M., Ey J., Gartner J. E., 2008, "Effective mitigation of debris flows at Lemon Dam, La Plata County, Colorado", *Geomorphology*, Vol. 96, No.3, 366–377.
- Deymier C., Tacnet J. M., Mathys N., 1995, *Conception et calcul de barrages de correction torrentielle [Design and computation of check dams]*. (C. Editions, Ed.), Cemagref Grenoble Pegr, 287 p.
- Díaz V., Mongil J., Navarro J., 2014, "Topographical surveying for improved assessment of sediment retention in check dams applied to a Mediterranean badlands restoration site (Central Spain)", *Journal of Soils and Sediments*, Vol. 14, No.12, 2045–2056.
- Dodge B. H., 1948, "Design and Operation of Debris Basins". *Proceedings, Federal Inter-Agency Sedimentation Conference*, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Washington, DC, 274–301.
- Dufour S., Piégay H., 2009, "From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits", *River research and applications*, Vol. 25, No.5, 568–581.
- Duile J., 1826, *Über Verbauung der Wildbäche in Gebirgs-Ländern, vorzüglich in der Provinz Tirol und Vorarlberg*, Rauch, 180.
- 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.
- Eaux et Forêts., 1911a, *Restauration et conservation des terrains en montagne. Première partie, Renseignements généraux*, Imprimerie Nationale.
- Eaux et Forêts., 1911b, *Restauration et conservation des terrains en montagne. Deuxième partie, Description sommaire des périmètres de restauration, Région des Alpes.*, Imprimerie Nationale.
- Eaux et Forêts., 1911c, *Restauration et conservation des terrains en montagne. Troisième partie, Description sommaire des périmètres de restauration, Région des Cévennes et du Massif Central, Région des Pyrénées.* (Ministère de l'agriculture - Direction générale des Eaux et Forêts, Ed.), Imprimerie Nationale.
- Van Effenterre C., 1982, "Les barrage perméables de sédimentation", *Revue Forestière Française*, Vol. 5, 87–93.
- Egholm D. L., Knudsen M. F., Sandiford M., 2013, "Lifespan of mountain ranges scaled by feedbacks between landsliding and erosion by rivers", *Nature*, Vol. 498, No.7455, 475–478.
- Eisbacher R., 1982, "Slope stability and land use in mountain valleys", *Geoscience Canada*, Vol. 9, No.1, 14–27.
- Erdlenbruch K., Gilbert E., Grelot F., Lescoulier C., 2008, "Une analyse coût-bénéfice spatialisée de la protection contre les inondations - Application de la méthode des dommages évités à la basse vallée de l'Orb.", *Ingénieries*, Vol. Vol. 53, 3–20.
- Esmaeili Nameghi A., Hassanli A., Soufi M., 2008, "A study of the influential factors affecting the slopes of deposited sediments behind the porous check dams and model development for prediction", *Desert*, Vol. 12, No.2, 113–119.
- EU., 2000, *EU Water framework directive*, European Commission of the European Union, Brussels.

- Evette A., Labonne S., Rey F., Liebault F., Jancke O., Girel J., 2009, “History of bioengineering techniques for erosion control in rivers in western europe”, *Environmental Management*, Vol. 43, No.6, 972–984.
- Fabre J.-A., 1797, *Essai sur la théorie des torrens et des rivières*, Bidault Libraire, Paris, 342.
- Ferrell W. R., Barr W. R., 1965, “Criteria and methods for use of check dams in stabilizing channel banks and beds”. *Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, 1963*, US Department of Agriculture, 376.
- 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*, Vol. 36, No.8, 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.
- Fourchy P., 1966, “Déboisement et reboisement. Les débuts de la lutte contre l’érosion au XIXe siècle dans les Alpes françaises”, *Revue forestière française*, 467–487.
- Frisi P., 1770, *A Treatise on Rivers and Torrents; with the Method of Regulating Their Course and Channels*, J. Weale, London, 226.
- Fryirs K., 2013, “(Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: A fresh look at the sediment delivery problem”, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 38, No.1, 30–46.
- Gaffiot F., 1934, *Dictionnaire Latin-Français*, Hachette.
- Galia T., Škarpich V., Hradeck J., Pribyla Z., 2016, “Effect of grade-control structures at various stages of their destruction on bed sediments and local channel parameters”, *Geomorphology*, Vol. 253, 305–317.
- Gamper C. D., Thöni M., Weck-Hannemann H., 2006, “A conceptual approach to the use of Cost Benefit and Multi Criteria Analysis in natural hazard management”, *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 6, No.2, 293–302.
- Garcia M., 2008, “Sedimentation engineering process measurements, modeling and practices”. in M. Garcia, ed. *Sedimentation Engineering*, ASCE, 21–163.
- García-Ruiz J. M., Alatorre L. C., Gómez-Villar A., Beguería S., 2013, “Check Dams, Morphological Adjustments and Erosion Control in Torrential Streams”. in C. Conesa-García and M. A. Lenzi, eds., Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, NY, 307–322.
- García-Ruiz J. M., White S., Martí Bono C. E., Valero-Garcés B. L., Errea M. P., Gómez-Villar A., others., 1996, *La catástrofe del barranco de Arás (Biescas, Pirineo aragonés) y su contexto espacio-temporal*, CSIC-Instituto Pirenaico de Ecología (IPE), 52.
- Gaudio R., Marion A., Bovolin V., 2000, “Morphological effects of bed sills in degrading rivers”, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 38, No.2, 89–96.
- Gomez B., Banbury K., Marden M., Trustrum N. A., Peacock D. H., Hoskin P. J., 2003, “Gully erosion and sediment production: Te Weraroa Stream, New Zealand”, *Water Resources Research*, Vol. 39, No.7, ESG31–ESG37.
- Gras S., 1848, “Considérations sur les anciens lits de déjection des torrents des alpes et sur leur liaison avec le phénomène erratique”. *Annales des Mines*, Administration générale des Ponts et Chaussées et des Mines, 21.
- 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*. (Carilian-Gœuri and V. Dalmont, Eds.), Charles Vellot, Grenoble, 112 p.
- Gras S., 1857, *Etudes sur les torrents des Alpes*. (Victor Dalmont, Ed.), F.Savy, Paris, 108.
- Greminger P. et al., 2005, “RiskPlan LearnRisk - Pragmatisches Risikomanagement - Im Dialog zu mehr Sicherheit.” BABS, BUWAL, BWG, Bern.
- Gruffaz F., 1996, “Etude de description et analyse des plages de dépôt torrentilles réalisées dans les Alpes et Pyrénées Françaises,” RTM.
- Hall M., 2005, *Earth Repair: A Transatlantic History of Environmental Restoration*, University of Virginia Press, Charlottesville and London.
- Hampel R., 1975, “Bedeutung wechselnder Geschiebebelastung für Geschiebebilanzen der Wildbachverbauungen.” *INTERPRAEVENT Conference proceedings*, 65–71.

- Heede B. H., 1960, "A study of early gully-control structures in the Colorado Front Range.," Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station.
- Heede B. H., 1967, "Gully Development and control in the Rocky mountain of Colorado.," Colorado State University.
- Heede B. H., 1978, "Designing gully control systems for eroding watersheds", *Environmental Management*, Vol. 2, No.6, 509–522.
- Heede B. H., 1982, "Gully control: Determining treatment priorities for gullies in a network", *Environmental Management*, Vol. 6, No.5, 441–451.
- Heede B. H., 1986, "Designing For Dynamic Equilibrium In Streams", *Water Resources Bulletin*, Vol. 22, No.3, 351–357.
- Hübl J., Strauss A., Holub M., Suda J., 2005, "Structural mitigation measures". *Proceedings zum 3rd Probabilistic Workshop: Technical Systems + Natural Hazards, 24-25 Nov. Wien*.
- Hübl J., Suda J., 2008, "Debris flow mitigation measures in Austria". in Sevkavgiprovdokhoz Institute, ed. *Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection*, Pyatigorsk.
- Hughes J. D., Thirgood J., 1982, "Deforestation, erosion, and forest management in ancient Greece and Rome", *Journal of Forest History*, Vol. 26, No.2, 60–75.
- Hungr O., 2005, "Classification and terminology". in M. Jakob and O. Hungr, eds. *Debris-flow hazards and related phenomena*, Springer, 9–23.
- Hungr O., Morgan G. C., Kellerhals R., 1984, "Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures.", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 21, No.4, 663–677.
- Ikeya H., 1989, "Debris flow and its countermeasures in Japan", *Bulletin - International Association of Engineering Geology*, Vol. 40, No.1, 15–33.
- Iroume A., Gayoso J., 1991, "La pendiente de los depositos en los torrentes del cerro Divisadero, Coyhaique, Chile", *Bosque*, Vol. 12, No.1, 37–42.
- Jaeggi M. N. R., 1992, "Dynamics of Gravel-Bed Rivers". in P. Billi, R. Hey, C. Thorne, and P. Tacconi, eds., John Wiley and Sons, Chichester, 593–605.
- Jaeggi M. N. R., Pellandini S., 1997, "Torrent check dams as a control measure for debris flows". in A. Armanini and M. Michiue, eds. *Recent Developments on Debris Flows*, Springer Berlin Heidelberg, 186–207.
- Jerolmack D. J., Paola C., 2010, "Shredding of environmental signals by sediment transport", *Geophysical Research Letters*, Vol. 37, No.19, 1–5.
- Jouyne Z., 1850, *Reboisement des montagnes: Reboisement, difficultés, causes des inondations et moyens de les prévenir*, Repos, Digne, France.
- JSA., 2003, *SABO in Japan*, Japan Sabo Association, 1–113.
- JSA., 2012, *SABO in Japan - Facing the challenge of National land conserve*, Japan Sabo Association, 1–35.
- Kalaora B., Savoye A., 1986, *La forêt pacifiée. Sylviculture et sociologie au XIXe siècle.*, L'Harmattan, France.
- Kamibayashi Y., 2009, "Two Dutch Engineers and Improvements of Public Works in Japan". *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*, Neunplus1, Berlin, 879–888.
- Koenig A., 2014, "Western books on hydraulics in the historic Beitang Library of the Jesuits in Beijing, China (1583-1773)". *eProceedings of IWA Regional Symposium on Water, Wastewater and Environment: Traditions and Culture*, Patras, Greece, 251–264.
- 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*, Vol. 45, No.5, 28–33.
- Kostadinov S., 2007, "Erosion and torrent control in Serbia: hundred years of experiences". *International conference "Erosion and torrent control as a factor in sustainable river basin management*, Belgrade, 1–17.
- Kostadinov S., Dragovic N., 2013, "Check dams, morphological adjustments and erosion control in torrential streams". in C. Conesa-Garcia and M. A. Lenzi, eds., Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, NY, 63–88.

- Kostadinov S., Dragovic N., Zlatic M., Todosijevic M., 2011, "Natural effect of classical check dams in the torrents of the river toplica drainage basin", *Fresenius Environmental Bulletin*, Vol. 20, No.5, 1102–1108.
- Koutsoyiannis D., Zarkadoulas N., Angelakis A. N., Tchobanoglous G., 2008, "Urban water management in Ancient Greece: Legacies and lessons", *Journal of water resources planning and management*, Vol. 134, No.1, 45–54.
- Kronfellner-Kraus G., 1983, "Torrent Erosion And Its Control In Europe And Some Research Activities In This Field In Austria", *Sabo Gakkaishi - Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol. 35, No.3, 33–44.
- Kuss C., 1900a, *Restauration et conservation des terrains en montagne. Éboulements, glissements et barrages*, Imprimerie Nationale, 61.
- Kuss C., 1900b, *Restauration et conservation des terrains en montagne. Les Torrents glaciaires*, Imprimerie Nationale, 88.
- Lane E. W., 1955, "Importance of fluvial morphology in hydraulic engineering", *Journal of the Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 81, 1–17.
- León Marín V. M., 2011, "Evaluación de los procesos de sedimentación de las presas para el control de aludes torrenciales en las quebradas San José de Galipán, Camurí Chico, Cerro Grande, Camurí Grande y Migueleno, del estado Vargas," Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Leopold L. B., 1992, "Base level rise: gradient of deposition", *Israel Journal of Earth Sciences*, Vol. 41, 57–64.
- Liébault F., Gomez B., Page M., Marden M., Peacock D., Richard D., Trotter C. M., 2005, "Land-use change, sediment production and channel response in upland regions", *River Research and Applications*, Vol. 21, No.7, 739–756.
- Liébault F., Piégay H., Frey P., Landon N., 2008, *Tributaries and the Management of Main-Stem Geomorphology. River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network*, John Wiley Sons, Ltd, 243–270.
- Liebault F., Remaître A., Peteuil C., 2013, "Géomorphologie des rivières de montagne". in A. Recking, D. Richard, and G. Degoutte, eds. *Torrents et rivières de montagne - Dynamique et aménagement*, QUAE, Antony, 15–89.
- Lilin C., 1986, "Histoire de la restauration des terrains en montagne au 19e siècle", *Cah. ORSTOM, sér. Pédol*, Vol. 32, No.2, 139–145.
- Lin Y.-L., Lu H.-S., Omura H., 2010, "Low check dam in early stage of erosion control history in taiwan". *INTERPRAEVENT Conference proceedings*, 850–854.
- Liu C.-M., 1992, "The effectiveness of check dams in controlling upstream channel stability in northeastern Taiwan". *Proc. of the Chengdu Symposium on Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions*, IAHS, 423–428.
- Logar J., Fifer Bizjak K., Kocevar M., Mikoš M., Ribicic M., Majes B., 2005, "History and present state of the Slano Blato landslide", *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 5, No.3, 447–457.
- López J. L., Hernandez-Perez D., Falcón M., 2010, "Lecciones aprendidas del desastre de Vargas. Aportes científico-tecnológico y experiencias nacionales en el campo de la prevención y mitigación de riesgos." in J. L. López, ed., *Fundación Polar / Universidad Central De Venezuela, Caracas - Venezuela*, 441–458.
- Marchi L., Cavalli M., 2007, "Procedures for the documentation of historical debris flows: Application to the Chieppena Torrent (Italian Alps)", *Environmental Management*, Vol. 40, No.3, 493–503.
- Margreth S., Romang H., 2010, "Effectiveness of mitigation measures against natural hazards", *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 64, No.2, 199–207.
- Marsh G. P., 1864, *Man and Nature; or, Physical geography as modified by human action*, Charles Scribner, New York.
- Mazzorana B., Comiti F., Scherer C., Fuchs S., 2012, "Developing consistent scenarios to assess flood hazards in mountain streams", *Journal of Environmental Management*, Vol. 94, No.1, 112–124.

- Mazzorana B., Trenkwald-Platzer H. J., Fuchs S., Hübl J., 2014, “The susceptibility of consolidation check dams as a key factor for maintenance planning”, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, Vol. 66, No.5-6, 214–216.
- McCorriston J., Oches E., 2001, “Two early Holocene check dams from Southern Arabia”, *Antiquity*, Vol. 75, No.290, 675–676.
- Messines du Sourbier J., 1939a, “Nécrologie. Paul Mougin - Inspecteur général des Eaux et Forêts (1866-1939)”, *Revue de géographie alpine*, Vol. 27, No.4, 899–904.
- Messines du Sourbier J., 1939b, “Les calamités publiques en Savoie au cours de l’année 1938”, *Revue de géographie alpine*, Vol. 27, No.3, 647–669.
- Messines du Sourbier J., 1964, *Enquête sur la conservation et la restauration des terrains de montagne*, Administration des eaux et forêts, Paris.
- Meunier M., 1991, *Éléments d’hydraulique torrentielle.*, Cemagref, Antony.
- Mougin P., 1897, “Rapport de M. Mougin, Inspecteur adjoint des Forêts, sur l’affaire Bardel,” Ministère de l’Agriculture – Direction des Forêts.
- Mougin P., 1900, *Restauration et conservation des terrains en montagne - consolidation des berges par dérivation d’un torrent (torrent de Saint Julien)*, Imprimerie Nationale, 39.
- Mougin P., 1931, *La restauration des Alpes.*, Ministère de l’Agriculture, Direction générale des eaux et des forêts, Eaux et génie rural, Paris, France.
- Napoléon III., 1860, *Discours, messages et proclamations de S. M. Napoléon III, empereur des Français : 1849-1860*, Imp. Humbert, Mirencourt, 168.
- Nichols M. H., Polyakov V. O., Nearing M. A., Hernandez M., 2016, “Semiarid watershed response to low-tech porous rock check dams”, *Soil Science*, Vol. 181, No.7, 275–282.
- Nicot F., Tacnet J., Flavigny E., 2001, “Barrages de correction torrentielle: estimation des poussées de berges”, *Revue française de géotechnique.*, No.95-96, 55–63.
- Nishimoto H., 2014, “Relationship between european countries and japan in the field of erosion control at the beginning of the 20th century”. *Proc. of the 2014 International Debris-Flow Workshop*, National Cheng Kung University, Tawian, 4–2.
- Okamoto M., 2007, *The Structure of Sabo Administration*, Japan Sabo Association, Tokyo, 115.
- Paola C., Straub K., Mohrig D., Reinhardt L., 2009, “The ‘unreasonable effectiveness’ of stratigraphic and geomorphic experiments”, *Earth-Science Reviews*, Vol. 97, No.1-4, 1–43.
- Phillips C. J., Rey F., Marden M., Liébault F., 2013, “Revegetation of steeplands in France and New Zealand: Geomorphic and policy responses”, *New Zealand Journal of Forestry Science*, Vol. 43, 1–16.
- Piton G., Carlados S., Recking A., Liébault F., Tacnet J., Kuss D., Quefféléan Y., Marco O., 2017, “Why do we build check dams in Alpine streams? An historical perspective from the French experience”, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 42, No.1, 91–108.
- Piton G., Recking A., 2016a, “Design of sediment traps with open check dams. I: hydraulic and deposition processes”, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 142, No.2, 1–23.
- Piton G., Recking A., 2016b, “Design of sediment traps with open check dams. II: woody debris”, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 142, No.2, 1–17.
- Piton G., Recking A., 2016c, “Effects of check dams on bed-load transport and steep slope stream morphodynamics”, *Geomorphology*, Vol. 291, No.Sediment dynamics in alpine basins, 94–105.
- Piton G., Recking A., 2017, “The concept of travelling bedload and its consequences for bedload computation of mountain streams”, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 42, No.10, 1505–1519.
- Poncet A., 1968, *Cours de restauration et conservation des terrains en montagne*, Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux, des Eaux et Forêts, Paris, France.
- Poncet A., 1975, “Réflexions sur la restauration des terrains en montagne pour une meilleure programmation”, *Revue Forestière Française*, Vol. XXVII, No.5, 362–370.
- Poncet A., 1995, *Restauration et conservation des terrains en montagne.* (S. RTM, Ed.), Office National des Forêts, 1000.
- Pont D., Piégay H., Farinetti A., Allain S., Landon N., Liébault F., Dumont B., Richard-Mazet A., 2009, “Conceptual framework and interdisciplinary approach for the sustainable management

- of gravel-bed rivers: The case of the Drôme River basin (S.E. France)”, *Aquatic Sciences*, Vol. 71, No.3, 356–370.
- Porto P., Gessler J., 1999, “Ultimate bed slope in Calabrian streams upstream of check dams: Field study”, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No.12, 1231–1242.
- Recking A., 2012, “Influence of sediment supply on mountain streams bedload transport”, *Geomorphology*, Vol. 175-176, 139–150.
- Recking A., 2014, “Relations between bed recharge and magnitude of mountain streams erosions”, *Journal of Hydro-Environment Research*, Vol. 8, No.2, 143–152.
- Recking A., Leduc P., Liébault F., Church M., 2012, “A field investigation of the influence of sediment supply on step-pool morphology and stability”, *Geomorphology*, Vol. 139-140, 53–66.
- Reid L. M., Dunne T., 2003, “Sediment budgets as an organizing framework in fluvial geomorphology”, *Tools in fluvial geomorphology*, 463–500.
- Remaître A., W. J. Van Asch T., Malet J.-P., Maquaire O., 2008, “Influence of check dams on debris-flow run-out intensity”, *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 8, No.6, 1403–1416.
- Reneuve P., 1955, “L’évolution de la technique de correction torrentielle”, *Revue Forestière Française*, No.9-10, 689–693.
- Requillard J., Hespel F., Segel V., 1997, “Evolution de la politique de protection contre les torrents au cours de ces deux derniers siècles”, *Risques Infos*, Vol. 8, 14–18.
- Rinaldi M., Piégay H., Surian N., 2011, “Geomorphological approaches for river management and restoration in Italian and French Rivers”, *Geophysical Monograph Series*, Vol. 194, 95–113.
- Rinaldi M., Simon A., 1998, “Bed-level adjustments in the Arno River, central Italy”, *Geomorphology*, Vol. 22, No.1, 57–71.
- Rudolf-Miklau F., Suda J., 2013, “Design Criteria for Torrential Barriers”. in M. Schneuwly-Bollschweiler, M. Stoffel, and F. Rudolf-Miklau, eds. *Dating Torrential Processes on Fans and Cones*, Springer Netherlands, 375–389.
- Schärlig A., 1985, *Décider sur plusieurs critères. Panorama de l’aide à la décision multicritère.*, Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Schuster R., 2000, “Outburst debris-flows from failure of natural dams”. *Proceedings 2nd International Conference on Debris Flow Hazard Mitigation*, 16–20.
- Skemer N. A., VanDine D. F., 2005, “Debris-flow Hazards and Related Phenomena”. in M. Jakob and O. Hungr, eds., Springer, 25–51.
- Sklar L. S., Dietrich W. E., 2008, “Implications of the saltation-abrasion bedrock incision model for steady-state river longitudinal profile relief and concavity”, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 33, No.7, 1129–1151.
- Sodnik J., Martincic M., Mikoš M., Kryžanowski A., 2014, “Are Torrent Check-Dams Potential Debris-Flow Sources?” *Engineering Geology for Society and Territory (IAEG Congress proceedings)*, Springer International Publishing Switzerland, 485–488.
- Suda J., Hübl J., Bergmeister K., 2010, “Design and construction of high stressed concrete structures as protection works for torrent control in the Austrian alps”. *Proceedings of the third international fib congress, 29 May–2 June*, Precast Prestressed Concrete Institute (PCI), Chicago, 1–12.
- Surell A., 1841, *Etude sur les torrents des Hautes Alpes (1st edition)*. (Carilian-Gœury and Vor Dalmont, Eds.), Librairie des corps impériaux des ponts et chaussées et des mines, Paris, 280.
- Tacnet J. M., Degoutte G. ., 2013, “Principes de conception des ouvrages de protection contre les risques torrentiels [Design principles of torrential hazard mitigation structures]”. in A. Recking, D. Richard, and G. Degoutte, eds. *Torrents et rivières de montagne - Dynamique et aménagement*, QUAE, Antony, 267–331.
- Tacnet J.-M., Curt C., Rey B., Richard D., 2012, “Efficiency assessment for torrent protection works: an approach based on safety and reliability analysis”. *Proceedings of the 12th international conference Interpraevent*, Grenoble, France.
- Tacnet J.-M., Dezert J., Curt C., Batton-Hubert M., Chojnacki E., 2014, “How to manage natural risks in mountain areas in a context of imperfect information? New frameworks and paradigms

- for expert assessments and decision-making”, *Environment Systems and Decisions*, Vol. Vol. 34, No.2, 288–311.
- Takahashi T., 2007, *Debris flow. Mechanics, Prediction and Countermeasures*, Taylor and Francis, London, UK, 448 p.
- Tétreau A., 1883, *Commentaire de la loi du 4 avril 1882 sur la restauration et la conservation des terrains en montagne*, Société d'imprimerie et librairie administratives et classiques.
- Theule J. I., Liébault F., Loye A., Laigle D., Jaboyedoff M., 2012, “Sediment budget monitoring of debris-flow and bedload transport in the Manival Torrent, SE France”, *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 12, No.3, 731–749.
- Theule J., Liébault F., Laigle D., Loye A., Jaboyedoff M., 2015, “Channel scour and fill by debris flows and bedload transport”, *Geomorphology*, Vol. 243, 92–105.
- Thiéry E., 1891, *Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement*. (B. et Cie, Ed.), Librairie Polytechnique, Paris, 443.
- Todosijevi M., Kostadinov S., 2006, “Effects of Transversal Structures in the Torrents of the River Drina Catchment”. *BALWOIS Conf. Water Observation and Information System for Decision Support*, Ministry of Environment and Physical Planning of Republic of Macedonia, Skopje, 23–26.
- USACE., 1994, *Channel stability assessment for flood control projects*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000.
- VanDine D. F., 1996, *Debris Flow Control Structures for Forest Engineering*, Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, BC.
- Verrier M., 1980, “Coûts et avantages des travaux RTM - Cas des voies de communication.” UER de Géographie, Grenoble, France.
- Vischer D. L., 2003, *Histoire de la protection contre les crues en Suisse, Des origines jusqu'au 19e siècle*, OFEG, Série Eaux.
- von Zallinger F. S., 1779, *Abhandlung von den Ueberschwemmungen in Tyrol*, kk Hofbuchdr.
- Vuillet M., 2012, “Elaboration d'un modèle d'aide à la décision basé sur une approche probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues fluviales.” Université Paris-Est, Paris, France.
- Wang F., 1901, *Grundriss der wildbachverbauung*, S. Hirzel, Leipzig.
- Wang G. L., 2013, “Lessons learned from protective measures associated with the 2010 Zhouqu debris flow disaster in China”, *Natural Hazards*, Vol. 69, No.3, 1835–1847.
- Wang H.-W., Kondolf G. M., 2014, “Upstream sediment-control dams: Five decades of experience in the rapidly eroding dahan river basin, Taiwan”, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 50, No.3, 735–747.
- Wehrmann H., Hübl J., Holzinger G., 2006, “Classification of Dams in Torrential Watersheds”. *INTERPRAEVENT Conference Proceedings*, Universal Academy Press, Inc. Tokyo, Japan, 829–838.
- White S., Garcia-Ruiz J. M., Marti C., Valero B., Errea M. P., Gómez-Villar A., 1997, “The 1996 Biescas campsite disaster in the Central Spanish Pyrenees, and its temporal and spatial context”, *Hydrological Processes*, Vol. 11, No.14, 1797–1812.
- Woeikof A., 1901, “Annales de géographie”. in P. Vidal de la Blache, L. Gallois, and E. de Margerie, eds., Librairie Armand Colin, Paris, 97–114.
- Wohl E., 2006, “Human impacts to mountain streams”, *Geomorphology*, Vol. 79, No.3-4, 217–248.
- Zeng Q. L., Yue Z. Q., Yang Z. F., Zhang X. J., 2009, “A case study of long-term field performance of check-dams in mitigation of soil erosion in Jiangjia stream, China”, *Environmental Geology*, Vol. 58, No.4, 897–911.
- Zollinger F., 1984, “100 Jahre Wildbachverbauung in Österreich”, *Mensuration, photogrammétrie, génie rural*, Vol. 82, 394–399.
- Zollinger F., 1985, “Debris detention basins in the European Alps”. *International symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention*, Japan Erosion Control Engineering Society, Tokyo, 433–438.