



HAL
open science

Usage des ouvrages de correction torrentielle et plages de dépôt : origine, état des lieux, perspectives

Guillaume Piton, Simon Carladous, Olivier Marco, Didier Richard, Frédéric Liébault, Alain Recking, Yann Queffélec, Jean-Marc Tacnet

► To cite this version:

Guillaume Piton, Simon Carladous, Olivier Marco, Didier Richard, Frédéric Liébault, et al.. Usage des ouvrages de correction torrentielle et plages de dépôt : origine, état des lieux, perspectives. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, 2019, 2019 (1), pp.56-67. <10.1051/lhb/2019008>. <hal-02129862>

HAL Id: hal-02129862

<https://hal.science/hal-02129862v1>

Submitted on 15 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.



HAL Authorization

USAGE DES OUVRAGES DE CORRECTION TORRENTIELLE ET PLAGES DE DEPOT : ORIGINE, ETAT DES LIEUX, PERSPECTIVES

Guillaume PITON⁽¹⁾, Simon CARLADOUS⁽²⁾, Olivier MARCO⁽²⁾, Didier RICHARD⁽¹⁾, Frédéric LIEBAULT⁽¹⁾, Alain RECKING⁽¹⁾, Yann QUEFFELEAN⁽²⁾, Jean-Marc TACNET⁽¹⁾

⁽¹⁾ Univ. Grenoble Alpes, Irstea, UR ETNA, Grenoble, France - e-mail: guillaume.piton@irstea.fr

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

La correction torrentielle des torrents les plus actifs a été lancée en France par la politique de restauration des terrains en montagne de 1882 sur la base de travaux pionniers plus anciens. Elle a d'abord mis à profit la correction active des hauts bassins par la lutte contre l'érosion à la source mais a aussi accompagné le développement de la protection passive des enjeux par le piégeage et la canalisation des écoulements dans les zones aval. Cette lutte contre l'érosion et les risques torrentiels induits fait toujours l'objet d'investissements publics pour entretenir les systèmes de protection existants et, si nécessaire, en construire de nouveaux. Les contextes environnementaux, socio-économiques et techniques d'implantation et de gestion de ces systèmes de protection ont évolué. Il y a donc matière à s'interroger sur l'usage actuel qui est fait des ouvrages de correction torrentielle et des plages de dépôts, ouvrages spécifiques au contexte torrentiel. Cet article rappelle en premier lieu un historique de leur émergence. La seconde partie liste les fonctions de ces ouvrages : quels effets qualitatifs pouvons-nous espérer de ces structures à la lumière de plus de 150 ans d'expérience ? La dernière partie donne quelques perspectives concernant l'usage de ces ouvrages : pourquoi faut-il maintenir un part de correction active malgré les difficultés associées ? Qu'est-ce qui peut justifier d'abandonner ou de détruire certains ouvrages ? Quelles nouvelles approches semblent émerger dans la conception de ces ouvrages, et plus particulièrement des plages de dépôt modernes.

MOTS CLEFS : Restauration des terrains en montagne, barrages RTM, barrages, seuils, laves torrentielles

Using check dams and open check dams in torrent control: origin, state of the art and perspectives

Large operations of torrent control works in the most active catchments have been launched in France by the 1882's mountain areas restoration policy, based on older pioneer works. It first implemented headwater soil and erosion control structures and plantations, although protection structures closer from assets were built on alluvial fans to trap sediment and channelize flows. Soil erosion and the related torrential hazard mitigation continue to be financed by public grants to maintain existing systems and, if necessary, build new ones. The environmental, socio-economic and technical contexts of risk management have changed. The current use of check dams and open check dams in protection strategies may consequently need an update. This paper firstly reviews the historical emergence of check dams and open check dams. It secondly lists their function, i.e., the qualitative effect we can expect they have on hazards in the light of 150 years of tests and trials. The last section gives some perspectives on the use of these structures: why, although complicated and expensive, it worth maintaining some headwater structures? When is it justified to abandon or even dismantled some structures? And finally what seems to be the future way of designing and planning these structures, especially the open check dams?

KEY WORDS : Torrent control works, SABO dams, check dams, weirs, debris flows

Citation: Piton, G.; Carlados, S.; Marco, O.; Richard, D.; Liebault, F.; Recking, A.; Quefféléan, Y. & Tacnet, J. 2019, "Usage des ouvrages de correction torrentielle et plages de dépôt : origine, état des lieux, perspectives", *La Houille Blanche*, 1:57-67, DOI:10.1051/lhb/2019008

I INTRODUCTION

Il y a 30 ans, en 1987, les Alpes ont connu une année avec de nombreuses crues et laves torrentielles à l'origine de dégâts considérables et de plusieurs victimes, comme au Grand-Bornand en Haute-Savoie ou à Modane en Savoie. Ces épisodes ont déclenché un rebond dans la prise de conscience du risque torrentiel et dans l'effort de recherche sur le sujet (Meunier 1989, Vischer 2003). Depuis, les connaissances sur

l'hydraulique torrentielle n'ont pas cessé de progresser et nous disposons désormais de techniques d'analyse et de modélisation spécifiques à ce domaine (Recking et al. 2013). La variabilité des phénomènes restant toutefois naturellement grande, les analyses quantitatives sont toujours entachées d'une certaine imprécision qu'il faut chercher à réduire mais avec laquelle nous devons aussi accepter de travailler.

Les ingénieurs s'intéressent en fait à la géomorphologie des montagnes et à la morphodynamique des torrents depuis bien

plus longtemps. Avec l'aménagement des Alpes, ils ont notamment mis en évidence que les techniques d'endiguement et de canalisation des rivières et fleuves mises au point aux XVII^e et XVIII^e siècles, trouvaient leurs limites dans le contexte torrentiel (Surell 1870 p. 191, Vischer 2003). Des ingénieurs de plusieurs pays d'Europe ont alors porté une plus grande attention aux cours d'eau de montagne. Ils ont abouti à des conclusions similaires, probablement par des réflexions et observations indépendantes (Marsh 1864 p. 250), sur les caractéristiques spécifiques des rivières torrentielles et des torrents (Frisi 1770, von Zallinger 1779, Fabre 1797) et sur les techniques particulières visant à les corriger (von Aretin 1808, Duile 1826, Surell 1841, Gras 1857).

Durant le Second Empire (1852-1870), Napoléon III promut de grands travaux comme le développement des infrastructures de transport (Lilin 1986) et le reboisement des montagnes. En effet, plus de 50 ans d'activité d'un lobby forestier (Kalaora and Savoye 1986), soutenus par les travaux scientifiques évoqués précédemment et la crise hydrologique du milieu du XIX^e siècle avec des crues majeures de la plupart des fleuves français (Bravard 2002, Coeur 2003 et Coeur and Lang 2008), ont conduit à un ambitieux programme de reboisement à travers les lois complémentaires de 1860 et de 1864 (Brugnot 2002). Cela constituait une première avant la Suisse en 1876, l'Italie en 1877, l'Autriche en 1884 et le Japon en 1897. Après la chute du Second Empire, la loi sur la Restauration et la conservation des Terrains de Montagne (RTM) fut proclamée en 1882, abrogeant les deux lois précédentes (Tétreau 1883). La nouvelle assemblée républicaine, à l'écoute des plaintes des populations rurales, y réduisait les ambitions de reboisement extensif : l'effort serait concentré sur les zones où « *les travaux de restauration [seraient] rendus nécessaires par la dégradation du sol, et des dangers nés et actuels* ». Cela concernait principalement les lits des torrents, les systèmes de ravines, les couloirs d'avalanches et les glissements de terrains, dont la restauration pouvait nécessiter d'utiliser moins de reboisements extensifs et plus souvent les techniques de génie civil (Brugnot 2002). On rappellera que cette approche trop restrictive empêchait certaines mesures de précaution : la loi de 1913 abrogea donc cette notion de danger né et actuel pour justifier une intervention au titre de la RTM

Durant la période parfois appelée "âge d'or de la RTM" (1882-1914), des générations d'ingénieurs ont ainsi œuvré à corriger plus d'un millier de torrents en développant et appliquant des techniques combinant génie forestier, génie biologique pour les petits ouvrages temporaires et génie civil pour les digues, tunnels, seuils et barrages (Brugnot 2002). Ces derniers, pleins ou filtrants, sont probablement les ouvrages les plus emblématiques de la correction torrentielle : ils sont le sujet du présent article.

De petits seuils fixant la position de passages à gué ou protégeant des zones agricoles ont été largement utilisés depuis l'antiquité. L'environnement agressif des rivières et torrents de montagne a probablement contribué à détruire la plupart des plus anciens ouvrages qui n'ont pas été entretenus. Les barrages de plusieurs mètres de haut étaient vraisemblablement rares avant le XVIII^e siècle (Piton et al. 2017). A l'époque, l'absence d'une compréhension générale du phénomène torrentiel et de standards de construction rendait difficile la construction d'ouvrages adaptés et suffisamment résistants dans les torrents les plus actifs.

Le XIX^e siècle voit donc la conjonction de plusieurs facteurs propices à la construction de nombreux ouvrages de correction torrentielle : une compréhension de l'origine du phénomène torrentiel, la surabondance de sédiments dans les rivières, un développement économique nécessitant la

sécurisation des axes de communication, des zones habitées et des terres agricoles, une main d'œuvre locale nombreuse, et un État fort à même de lancer des opérations ambitieuses.

Les gestionnaires actuels de torrents ont ainsi hérité de milliers d'ouvrages de protection dont l'entretien est coûteux, qui étaient initialement destinés à protéger des enjeux qui ont changé, dans un environnement qui a évolué. Par ailleurs, d'autres solutions techniques de protection contre les phénomènes torrentiels telles que les ouvrages filtrants en béton armé, régulièrement curées ont été développées. Les changements des contextes environnementaux, techniques et socio-économiques incitent à se poser des questions sur les choix de maintenance et d'investissements.

Plusieurs solutions sont alors envisageables : investir, maintenir, abandonner ou démanteler des ouvrages. Pour décider laquelle mettre en œuvre, il est nécessaire de comparer, avec leur coût, l'évolution (diminution ou augmentation) du risque, depuis le risque initial au risque résiduel, que chacune de ces alternatives devrait permettre d'atteindre (Carladous et al. 2016a). Pour cela, plusieurs étapes sont nécessaires : (i) définition des besoins et objectifs initiaux de protection, (ii) détermination des « fonctions » des ouvrages, c'est-à-dire de l'action attendue sur le phénomène, exprimée qualitativement, (iii) estimation de leur « capacité », c'est-à-dire de leurs effets quantitatifs sur la morphodynamique, évaluée à partir de leurs caractéristiques à la conception/construction et en fonctionnement, (iv) propagation de cet effet sur l'aléa, à travers tout le système de protection et jusqu'au niveau des enjeux où le risque est évalué, en tenant compte de l'imperfection des informations nécessaires à l'analyse, (v) répéter les étapes (ii) à (iv) pour la situation initiale (risque initial) et en tenant compte de chaque action potentielle (risque résiduel) pour évaluer l'évolution du risque due à chaque solution. Déterminer rigoureusement les fonctions des ouvrages de protection est donc un des enjeux fondamentaux pour comparer les différentes solutions de gestion des ouvrages de protection. Cette étape définira quels processus géomorphologiques devront être étudiés par la suite.

Selon l'expérience des auteurs, il n'est parfois pas simple de déterminer les fonctions actuelles des barrages de protection torrentielle en place, notamment parce que la morphodynamique des bassins versants peut avoir changé depuis leur construction. De plus, ces fonctions doivent être déterminées parmi plusieurs potentielles et une telle liste n'était pas simplement accessible aux praticiens français hors des archives du début du 20^{ème} siècle (Carladous et al. 2014).

Pour répondre à ces enjeux, le présent article se décompose en trois parties : (i) une description de l'émergence de la définition des fonctions des ouvrages de correction torrentielle et plages de dépôt ; (ii) une liste des fonctions de ces ouvrages que 150 ans de recul ont permis d'établir et de critiquer ; (iii) des perspectives sur l'usage de ces ouvrages dans les systèmes futurs de protection torrentielle. Nous démontrons ainsi qu'un ouvrage aussi simple qu'un barrage, filtrant ou non, peut être bâti dans des buts très variés, avec des fonctions et effets spécifiques qui dépendent de sa localisation et de ses caractéristiques de conception.

II LA CORRECTION DES TORRENTS

II.1 Les pionniers : des bases théoriques

II.1.1 Les "Forestiers" des ponts et chaussées

Au cours du XIX^e siècle, un fort lobby forestier a œuvré à freiner les déboisements anarchiques et à engager un reverdissement des montagnes (Kalaora and Savoye 1986).

Le rôle de régulation du régime des eaux était un argument récurrent des différents courants qui l'animaient (Andréassian 2004) mais un second aspect finit par émerger : la lutte contre l'érosion.

Jean-Antoine Fabre (1748-1834) publia un ouvrage pionnier sur les différences entre rivières et torrents (Fabre 1797). Ce géomorphologue avant l'heure recommandait le contrôle des rivières torrentielles par des systèmes d'épis et d'endigements. Il convenait cependant qu'un autre traitement devait être mis en œuvre sur les torrents : s'attaquer à la source des sédiments par le reboisement.

Alexandre Surell (1813-1887) reprit et approfondit les réflexions de Fabre pour écrire son « *Etude sur les torrents de Hautes-Alpes* » (Surell 1841). La première partie du livre constitue une monographie pionnière et complète sur l'origine de l'activité torrentielle. La seconde partie est un pamphlet contre le déboisement des versants et une harangue appelant au reboisement autoritaire des montagnes.

Fabre (1797 p. 134), comme Surell (1841, Chap. XXX & XXXII), considéraient l'utilisation des barrages de correction torrentielle insuffisante en soi, mais intéressante pour stabiliser les berges et les lits des torrents, et faciliter ainsi le reboisement des versants. Cependant, les problèmes d'affouillement des structures inquiétaient particulièrement ces auteurs, ce qui décourageait la construction de grands ouvrages. Toutefois, il était fait régulièrement mention de petite correction en fascines et génie biologique (Evette et al. 2009).

II.1.2 Les "barragistes" des mines et des ponts et chaussées

Scipion Gras (1806-1873), Philippe Breton (1811-1892) et Michel Costa de Bastelica (1817-1891) se concentrèrent par la suite 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 de ces ouvrages sur les processus hydro-morphologiques, soulignant leur adaptation nécessaire aux spécificités du bassin versant.

S'intéressant à la physique du transport solide, ils mirent en lumière que l'origine des aléas torrentiels était liée à un excès de charge solide plutôt qu'à un simple excès de débit liquide, ce qui les différenciait des inondations des systèmes fluviaux. Ils notaient dès lors que les dépôts massifs en résultant sont le fruit d'une fourniture dépassant la capacité de transport de l'écoulement, qui est fortement corrélée à la pente des tronçons. Gras (1850, 1857) et Breton (1867) recommandèrent ainsi de ne pas simplement endiguer les chenaux torrentiels sur les cônes de déjection car cela revenait à transférer plus en aval ce problème d'excès sédimentaire. En effet, le système fluvial aval (rivière ou drains agricoles) a généralement une pente insuffisante pour transporter cette charge solide qui s'y dépose, avec ou sans digues. L'aggradation sera même d'autant plus rapide et dangereuse à gérer que la largeur du lit sera contrainte par des digues.

Ces auteurs considéraient donc que la seule solution était d'agir aussi sur les sources sédimentaires en amont des traversées urbaines et agricoles. S'ils concédaient que les reboisements pouvaient être efficaces, ils mettaient en avant deux limites au faveur de la mise en place d'ouvrages de génie civil : (i) parce qu'il faudrait des décennies pour stabiliser des torrents par leur reboisement, les barrages pouvaient être utiles pour obtenir une protection à court terme, et (ii) dans les bassins très instables, des barrages devaient compléter les reboisements qui ne seraient pas suffisants.

Gras, Breton et Costa de Bastelica, en complément du rôle de stabilisation des chenaux déjà mentionné par Surell,

théorisèrent trois nouvelles fonctions possibles des barrages de correction torrentielle. (i) La rétention des sédiments se ferait par piégeage total dans le bief amont, nommé « atterrissement » dans le jargon torrentiel. Elle aura l'avantage de supprimer les apports et d'engendrer l'incision des lits en aval qui gagnerait ainsi en capacité. (ii) La consolidation des versants se ferait en surélevant le niveau du lit à l'aide d'ouvrages. Cela permettrait ainsi d'inverser la dynamique de creusement du thalweg initiée par le torrent et de diminuer la fourniture sédimentaire en ralentissant l'activité des mouvements induits de versants comme les glissements de terrains, écroulements et éboulements. Finalement, (iii) la régulation du transport solide pourrait être facilitée. En effet, Gras (1857) observa la tendance naturelle des lits torrentiels à stocker et déstocker des matériaux en fluctuant de niveau, de géométrie et de granulométrie, à « respirer » selon le jargon. Il anticipa alors que des ouvrages générant des zones à faible pente et de grande largeur auraient tendance à tamponner les flux solides.

Le même auteur, visionnaire pour l'époque, décrivit comment des barrages percés de pertuis larges pourraient avoir un effet similaire de stockage de flux pendant les pics de crues et d'autocurage par la suite. Il anticipa ainsi la conception des plages de dépôts les plus modernes (voir §III.2). Il reuint aussi la possibilité de créer des « places de dépôts », plus classiques, dont l'objectif serait de piéger les sédiments sur le cône de déjection. Elles seraient constituées de bassins larges endigués, éventuellement équipés d'obstacles, et fermés par un ouvrage filtrant équipé d'une grille. Des ouvrages équivalents avaient été mis en place en Suisse pour protéger les voies ferrées dès les années 1840 (Vischer 2003 p. 148). Cependant, la nécessité de les curer manuellement limitait leur démocratisation.

II.2 Les Eaux et Forêts : la mise en œuvre

Les premiers tests et essais furent lancés par l'administration des "Eaux et Forêts", dès l'approbation de la loi de reboisement de 1860. Ils n'étaient pas réalisés dans une région spécifique mais partout où l'administration parvenait à acquérir un périmètre suffisant à reboiser (Mougin 1931).

Prosper Demontzey (1831-1898), Edmond Thiéry (1841-1918), Charles Kuss (1857-1940), Paul Mougin (1866-1939), et Claude Bernard (1872-1927), ingénieurs de l'Ecole Forestière de Nancy puis parfois professeurs dans cette dernière, sont des pédagogues et praticiens qui ont marqué l'histoire de la correction torrentielle et l'usage des barrages et plages de dépôts. Demontzey (1882) et Thiéry (1891) synthétisèrent les premières techniques dans leurs manuels de restauration des terrains en montagne. Ils furent affinés par Kuss (1900a, 1900b) et Mougin (1900) dans les cas particuliers des torrents sujets aux ruptures de lacs et poches glaciaires, ou de déviation et consolidation des pieds de grands glissements de terrains. Les cours de Bernard (1927) remplaçaient de plus la RTM dans une politique d'aménagement du territoire mais constituent surtout un état de l'art de la compréhension de la morphodynamique torrentielle et des techniques de contrôle de cette dernière. Les barrages de correction torrentielle y tiennent une place importante et la liste des nombreuses fonctions que peuvent avoir ces ouvrages a alors sa forme actuelle (voir §III.1).

L'entre-deux-guerres a vu le nombre de nouveaux projets diminuer, mais il fallait désormais maintenir l'important parc d'ouvrages (Brugnot 2002).

L'avènement de deux technologies après la 2^{nde} Guerre Mondiale a révolutionné la correction torrentielle : le béton armé et les engins de terrassement.

L'usage du béton armé augmenta à partir des années 1940 (Poncet 1995). Il permit de construire des barrages autostables dès les années 1950 : ceux-ci étaient moins chers que les barrages poids en maçonnerie dans le cas des grands ouvrages (Bordes 2010). Certains de ces premiers ouvrages sont toujours en bon état car ils ont été conçus en faisant des hypothèses sécuritaires, notamment sous la direction de Lucien Anchierri, chef de service RTM 73. Cependant, par la suite, des tentatives d'optimisation de l'épaisseur des barrages ont parfois donné des résultats décevants avec des ruines régulières d'ouvrages. Le manque de standard de conception et de réalisation s'est alors fait ressentir et des reprises en sous-œuvre pour le renforcement de ces ouvrages ont été nécessaires.

Le béton armé permit aussi de construire de nouveaux ouvrages tels que les barrages filtrants qui ferment les plages de dépôt. La conceptualisation et les premiers tests ont été réalisés dans les années 1950 et 1960 (Reneuve 1955) et sont considérés comme une première mondiale (Ferro 2013). Des ouvrages spécifiquement dédiés au ressuyage des laves torrentielles, piégeant les blocs et déviant la partie fine par des grilles "par-dessous" ont été testés dès 1959 dans les Hautes Alpes (Clauzel and Poncet 1963). Le réel développement des ouvrages filtrant eut lieu un peu plus tard à l'étranger et en France, après le transfert d'une partie des compétences de l'Administration des Eaux et Forêts au nouvel Office National des Forêts (ONF).

II.3 L'ONF-RTM : la gestion

En 1964, à la création de l'ONF, 92 873 barrages et seuils de correction torrentielle, 10 tunnels, 736 km de réseaux de drainage et 74 km de paravalanches avaient été construits dans les 380 000 ha de forêts domaniales RTM des 26 départements français, acquis en application des lois RTM (Messines du Sourbier. 1964, Carladou et al. 2016b). La gestion de ces ouvrages a été transférée à l'ONF, après une période d'ajustements impliquant les Directions Départementales de l'Agriculture (DDA). Le service spécialisé de Restauration des Terrains de Montagne à l'ONF (ONF-RTM) a finalement été créé en 1972, avec une présence limitée dans 10 départements de montagne des Alpes et des Pyrénées (Carladou 2017, Annexe B).

La plupart des torrents les plus actifs ayant été acquis par l'Etat et étant désormais gérés par l'ONF-RTM, les ingénieurs y travaillant se sont naturellement spécialisés en hydraulique torrentielle et dans la conception et l'entretien des ouvrages particuliers de correction torrentielle. Ils ont été appuyés dans cette spécialisation d'abord techniquement puis scientifiquement par l'IRSTEA (d'abord nommé CERAFER, puis CTGREF, puis CEMAGREF jusqu'en 2011).

La plupart des plages de dépôts ont donc été conçues par les services RTM. L'instruction de 1969 indiquait que les plages de dépôts ne relevaient pas de la responsabilité de l'Etat et devaient être financées par les collectivités (MA 1969). Le non-respect de cette règle explique l'implantation de nombreuses plages de dépôt trop en amont, dans les séries domaniales, qu'il aurait été plus approprié d'implanter à proximité des enjeux sur des terrains communaux.

Selon l'inventaire de Gruffaz (1996), 21 plages de dépôts existaient en 1970 et 176 en 1996. Un nouvel inventaire réalisé en 2018 a dénombré 319 ouvrages, la moitié d'entre eux ayant une capacité de stockage de 1000 m³. Le nombre de ces structures ouvertes grandes et petites augmenta fortement des années 1970 à 2000 en France comme à l'étranger (Deymier et al. 1995, Poncet 1995). En effet, le

développement de cette nouvelle génération d'ouvrages n'a pas été spécifique à la France : italiens, suisses, autrichiens et japonais ont adapté, développé et approfondi le concept (Piton and Recking 2016a, 2016b).

Dans les forêts domaniales des départements avec présence d'un service RTM, seulement 14 000 barrages et seuils, pour un total de 21 000 ouvrages, sont aujourd'hui suivis pour le compte de l'Etat propriétaire (Carladou et al. 2016b). La gestion de ce parc d'ouvrages de protection fait désormais l'objet de réflexions quant à l'efficacité des ouvrages (adéquation entre objectifs attendus et capacités atteintes) et à leur efficacité (adéquation entre capacités atteintes et coûts globaux). Ces analyses prennent en compte d'autres critères socio-économiques et visent à améliorer la répartition des crédits d'investissement et d'entretien. Elles se heurtent toutefois à de nombreux verrous techniques, entre autres (i) la complexité de la morphodynamique des torrents, (ii) la difficulté à caractériser la capacité d'un ouvrage : son effet quantifié sur les aléas, ceci à plusieurs échelles (de l'ouvrage jusqu'aux enjeux) et pour chaque fonction donnée, et (iv) la prise en compte des défaillances potentielles et de leurs conséquences (Carladou 2017).

La gestion de ce parc nécessite donc une meilleure compréhension par l'ensemble des acteurs des effets potentiels des barrages et plages de dépôts. S'il apparaît que la quantification de ces effets et leur agrégation reste un sujet complexe nécessitant une approche experte, nous défendons l'idée, dans cet article, que tout un chacun peut comprendre les fonctions attendues de ces ouvrages par la description qualitative de leurs effets.

III QUELS OUVRAGES POUR QUELLES FONCTIONS ?

Après de nombreux débats contradictoires sur l'usage des barrages, la variabilité naturelle des terrains où l'Administration des Eaux et Forêts a exercé son activité RTM a permis de dresser une liste des diverses fonctions potentielles des ouvrages de correction torrentielle, au début du XX^e siècle (voir présentation complète dans Bernard 1927 et Piton et al. 2017). Les ouvrages filtrants peuvent avoir les mêmes fonctions mais c'est leur caractère filtrant qui a ouvert de nouvelles possibilités dans leur utilisation. On synthétise dans la présente section les fonctions de ces deux types d'ouvrages. Ces définitions viennent alors préciser certaines habitudes de langages et jargons locaux.

III.1 Ouvrages de correction torrentielle

Identifier la fonction spécifique d'une série de barrages peut être une tâche compliquée parce que certains ouvrages répondent clairement à plusieurs fonctions à la fois. Ces fonctions ne sont en effet pas mutuellement exclusives et concernent parfois l'ensemble des aspects de la morphodynamique des systèmes montagnards. Leur définition nécessite en conséquence des approches multidisciplinaires regroupant des spécialistes et experts en hydraulique torrentielle, géologie, géomorphologie, géotechnique et génie forestier. Ainsi, certains ouvrages ont été construits dans des sites bien particuliers avec une fonction clairement définie, tandis que des systèmes de correction globale ont pu nécessiter des séries de nombreux barrages conçus pour réaliser plusieurs fonctions à la fois, telles que la stabilisation du lit et la réduction de sa pente (Zeng et al. 2009).

Parmi les ouvrages de correction torrentielle, les praticiens des services RTM différencient les barrages et les seuils selon la hauteur de l'ouvrage sous cuvette : supérieure à 2 m pour les premiers ou inférieure à ce seuil pour les seconds. La Figure 1 représente un bassin versant symbolique dans lequel

les fonctions principales associées à ces ouvrages sont distribuées. La description qui suit des cinq fonctions potentielles des barrages de correction torrentielle est alors un support à cette analyse pratique.

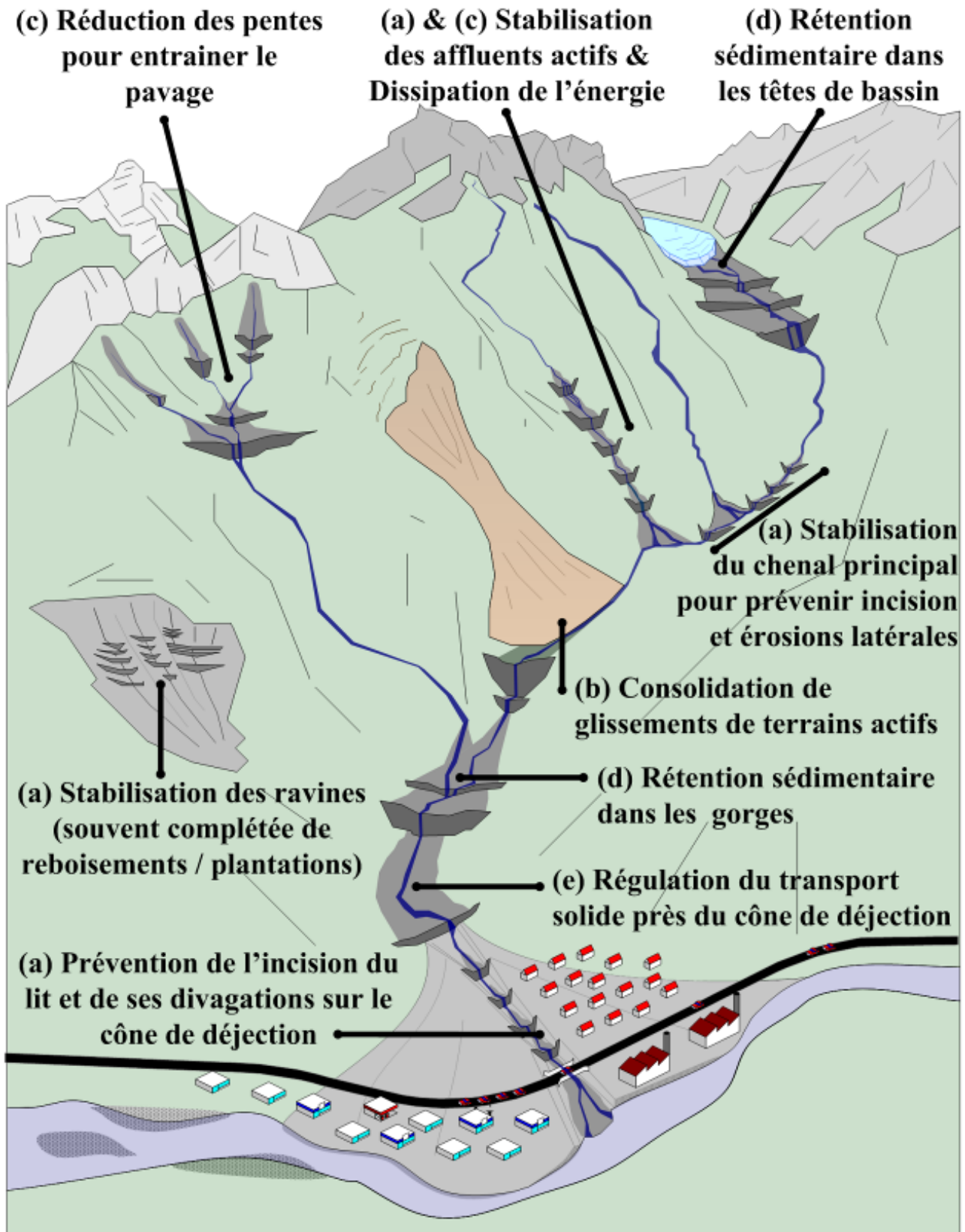


Figure 1 : Exemples de configurations typiques de barrages de correction torrentielle et fonctions principales associées : (a) stabilisation du lit, (b) consolidation de versant, (c) diminution de la pente, (d) rétention et (e) régulation du transport solide ; les mesures de correction complémentaires (reboisement, drainage, chenalisation, endiguements et plages de dépôt) ainsi que les fonctions et effets secondaires n'ont pas été mentionnées par souci de clarté.

III.1.1 Stabilisation du lit

La stabilisation du lit des torrents est la fonction des ouvrages de correction torrentielle la plus répandue. Elle vise à prévenir les incisions longitudinales et/ou les érosions latérales. Elle peut être décomposée en deux sous-fonctions : (i) la stabilisation longitudinale prévient l'incision du lit par la création de points fixes dans le profil en long ; (ii) la stabilisation planimétrique limite les divagations du chenal actif. À cette fin, l'axe de la cuvette des barrages est implantée pour guider les écoulements dans une direction choisie (Deymier et al. 1995). On notera toutefois qu'un calage altimétrique inadapté peut aggraver le risque de divagation (Piton et al. 2017).

Il a été très tôt compris que la stabilisation du lit favorise la reprise spontanée ou artificielle de la végétation. 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 et le second a été corrigé dès les années 1960 (117 barrages, tous détruits en 1974, remplacés par 44 nouveaux ouvrages plus grands : 3-6 m de haut). Après 25 ans, les auteurs décrivent "de nombreux arbres matures, de l'herbe et des buissons vivants sur les berges des torrents, au-dessus des biefs équipés de barrages". Le mécanisme de couplage entre stabilisation du lit et reprise de la végétation de berges peut être résumé ainsi : les incisions dans les ravines entraînaient régulièrement des glissements de berges, empêchant la fixation durable de la végétation ; après l'atterrissement des barrages, les incisions marquées ne peuvent plus avoir lieu, stabilisant ainsi les pieds de berges et diminuant leur fruit, ce qui les rend plus propices à l'installation naturelle ou artificielle de la végétation.

III.1.2 Consolidation des versants

De nombreux torrents trouvent la source de leur fourniture sédimentaire au niveau de quelques instabilités de versants localisées, mais majeures telles que les glissements de terrains. L'activation de ces instabilités de versants est notamment contrôlée par l'état de leur butée de pied, c'est à dire par l'incision des thalwegs (Egholm et al. 2013). Remplir à nouveau le fond du lit pour élever significativement son niveau et former ainsi une butée au pied de l'instabilité est souvent une mesure permettant de ralentir l'activité du mouvement de terrain (Kuss 1900b). Les barrages de consolidation de versant sont spécifiquement dédiés à cette fin. Selon les caractéristiques du site, cette consolidation peut être atteinte par quelques ouvrages de grande hauteur ou par une série d'ouvrages surélevant progressivement le profil en long du torrent (Figure 2). Les résultats les plus probants ont été obtenus avec une implantation des ouvrages jusqu'à l'aval immédiat du glissement ; les ouvrages mis en place au droit de la zone active ont montré plus d'échecs que de réussites, par exemple sur le torrent du Saint-Bernard à Saint-Martin-de-la-Porte (73). C'est cette élévation significative du profil en long qui différencie les barrages de consolidation de ceux de stabilisation, qui visent à fixer le profil à sa position actuelle (à la hauteur d'un barrage près). Ces ouvrages de consolidation étaient souvent accompagnés de dispositifs de drainage très importants dont la plupart ont été abandonnés par manque de connaissance de leur fonction et par difficulté d'entretien. La base de données actuelle des ouvrages inventariant seulement une faible part des ouvrages relevés en 1964 (Messines du Sourbier, 1964, Carladous et al. 2016b). Il est très difficile de dissocier la participation du barrage de celle des drainages dans la consolidation d'un glissement. La connaissance fine du glissement peut seule répondre à cette question qui inquiète à juste titre les gestionnaires.

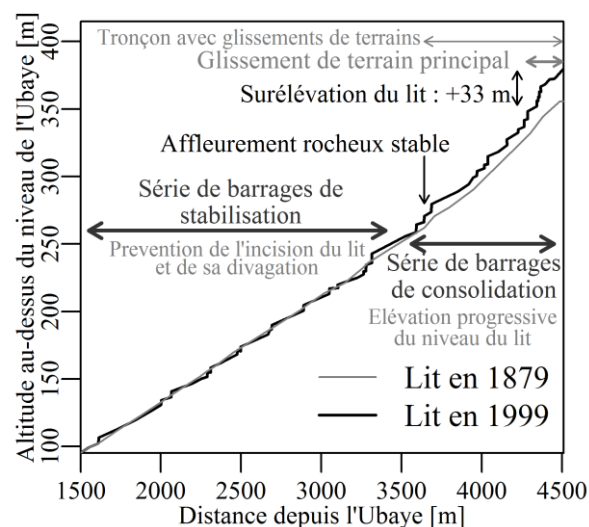


Figure 2 : Profil en long du torrent du Riou Bourdoux (Barcelonnette, 05) en 1879 avant correction et en 1999 après correction : dans le tronçon aval, les barrages stabilisent le lit à son niveau historique alors que le tronçon amont, avec ses problèmes chroniques de glissements de terrain, a été équipé d'une série de barrages de consolidation qui élève graduellement le profil jusqu'à 33 m au-dessus du lit initial dans la zone des glissements les plus actifs (adapté de Demontzey 1882 et de Delsigne et al. 2001).

III.1.3 Réduction des pentes

Le lit de la plupart des torrents est partiellement constitué ou pavé de gros blocs issus des versants et rarement mobilisés par les écoulements (Recking et al. 2012). Leur pente est alors plus raide que la pente d'équilibre alluvionnaire qui serait représentative de la granulométrie réellement transportée (Piton and Recking 2016c, 2017). Les barrages de correction torrentielle sont usuellement bâtis avec une cuvette calée au-dessus du niveau initial du lit pour des raisons pratiques de construction et pour un effet local de consolidation des berges. Dans ce contexte particulier de cours d'eau pavés, la création de tels points fixes bâtis au-dessus du lit initial est généralement suivie par la formation d'un bief amont alluvionnaire à la pente d'équilibre (dynamique) inférieure à l'initiale (Figure 3).

Ce phénomène intéresse la correction torrentielle puisque des pentes plus faibles génèrent des écoulements moins énergiques, diminuant ainsi : (i) les vitesses d'écoulement (diminution des nombres de Froude et des problèmes érosifs liés aux ressauts), (ii) les érosions de berges, (iii) les ruptures de pavage, (iv) les intensités de transport solide et (v) la capacité des écoulements à transporter de très gros blocs qui peuvent détruire des ouvrages, obstruer les chenaux, augmenter la probabilité de dépavage et de recrutement de matériaux par l'écoulement. Il faut aussi noter que la réduction de pente est censée s'accroître avec l'avancement de la correction du torrent et la reprise de la végétation : les apports sédimentaires étant voués à diminuer, la pente d'équilibre dynamique aussi.

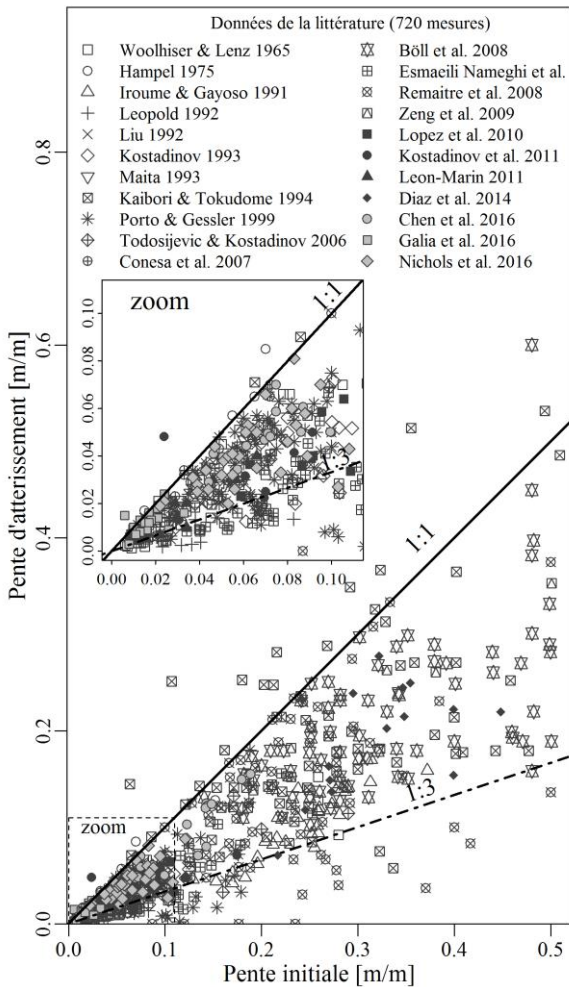


Figure 3 : Comparaison entre pente initiale avant correction (axe horizontal) et pente de dépôt mesurée en amont des barrages ; (axe vertical) qui illustre la tendance générale à la diminution des pentes dans un jeu de 674 données de terrain (références données dans la figure). Les quelques valeurs dépassant la première bissectrice correspondent majoritairement à un bassin versant japonais avec accroissement des phénomènes érosifs suite à un typhon (Kaibori and Tokudome 1994). Les valeurs proches d'une pente nulle correspondent en général à des barrages très proches où les conditions d'établissement d'un équilibre alluvial sont perturbées par la chute et le ressaut du pied du barrage supérieur (Remaître et al. 2008).

III.1.4 Rétention permanente

Le comblement des biefs situés en amont des barrages piège durablement les sédiments transportés. Cette fonction est généralement secondaire pour tous les ouvrages dont la cuvette est bâtie au-dessus du niveau initial du lit. Il existe toutefois quelques ouvrages, appelés barrages de rétention, bâtis spécifiquement pour cette fonction de piégeage d'un volume maximum de sédiment dans leur zone d'atterrissement. Une fois que l'ouvrage était complètement atterri, de nouveaux barrages ont pu être bâtis à son amont immédiat pour prolonger le comblement du thalweg vers l'amont, comme sur la Lignare en Isère (Breton 1867). La construction de nouveaux grands ouvrages de rétention a été très limitée après le développement des engins de terrassement qui ont rendu possible le curage des ouvrages après chaque crue. Par méconnaissance des objectifs initiaux des concepteurs qui leurs avaient donné de grandes dimensions pour avoir une longue durée de vie, certains ouvrages dont l'atterrissement n'était pas encore total ont

ainsi été transformés en plage de dépôt par la réalisation de curages réguliers ; tel que l'ouvrage initialement d'environ 20 m de haut de Bagnère de Luchon. De tels excès de curage diminuent l'efficacité de l'ouvrage. Si ce concept de piégeage total est loin des approches modernes de maintien de la continuité sédimentaire, il peut expliquer l'existence de vieux barrages de grande taille dans certains torrents.

III.1.5 Régulation du transport solide

Les lits des torrents montrent des fluctuations naturelles de granulométrie, de section en travers et de niveaux du lit, c'est à dire de stockage sédimentaire. Ce sont les fameuses "respirations torrentielles". Elles sont naturelles dans la cascade sédimentaire et peuvent être influencées par l'hydrologie, la (dé)connectivité sédimentaire, la granulométrie des sources sédimentaires actives et les fluctuations intrinsèques du processus de transport solide. 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 et dépauges ne peuvent alors plus se propager. Ces compartiments indépendants stockent pendant les périodes de fort transport et libèrent des matériaux par la suite, créant des zones tampon entre ouvrages (Jaeggi 1992, Nishimoto 2011). Cette tendance a poussé Poncet (1995 p. 713) à mettre en avant l'utilité particulière des barrages de correction torrentielle parce qu'ils *délivrent "au détail", ce que le torrent livrait trop brutalement "en gros"*. Cet effet bénéfique de régulation, anticipé très tôt par Gras (1857), persiste sur de nombreux sites. Il est régulièrement observé sur le terrain par les agents, a été mesuré par quelques travaux scientifiques (Astrade et al. 2011b, Theule et al. 2012, 2015) et récemment démontré expérimentalement par Piton and Recking (2016d).

III.2 Ouvrages filtrants des plages de dépôts

L'avènement des engins de terrassement a permis la réalisation de curages réguliers au droit de zones particulières : directement dans le lit du torrent, au niveau d'un atterrissement naturel bien développé, ou au droit d'une plage de dépôt, c'est-à-dire d'un bief localisé fermé artificiellement par un barrage filtrant qui permet d'augmenter l'épaisseur et le volume de dépôt (Van Effenterre 1982). Le caractère filtrant des ouvrages limite la présence d'une zone d'eau morte qui aurait été propice au piégeage de la charge en suspension. L'ouvrage se serait alors comblé peu à peu avec des matériaux qui n'auraient pourtant pas aggravé les aléas torrentiels en aval. Les premiers ouvrages ont été conçus grâce à l'intuition, au bon sens et à la connaissance empirique des ingénieurs de terrain, chaque crue amenant son lot de bonnes et de mauvaises surprises. L'absence de critères de conception a permis à différentes typologies d'ouvrages d'être testées sur le terrain et d'évoluer vers des fonctions adaptées aux spécificités locales (Figure 4). Le premier état de l'art portant sur le sujet a été publié par Deymier et al. (1995) après la création de la majorité des ouvrages existants. Un regard élargi sur la littérature internationale est disponible dans Piton and Recking (2016a, 2016b). Nous mettons ici en évidence les quatre fonctions principales que peuvent assurer ces ouvrages filtrants appelés communément plages de dépôts.

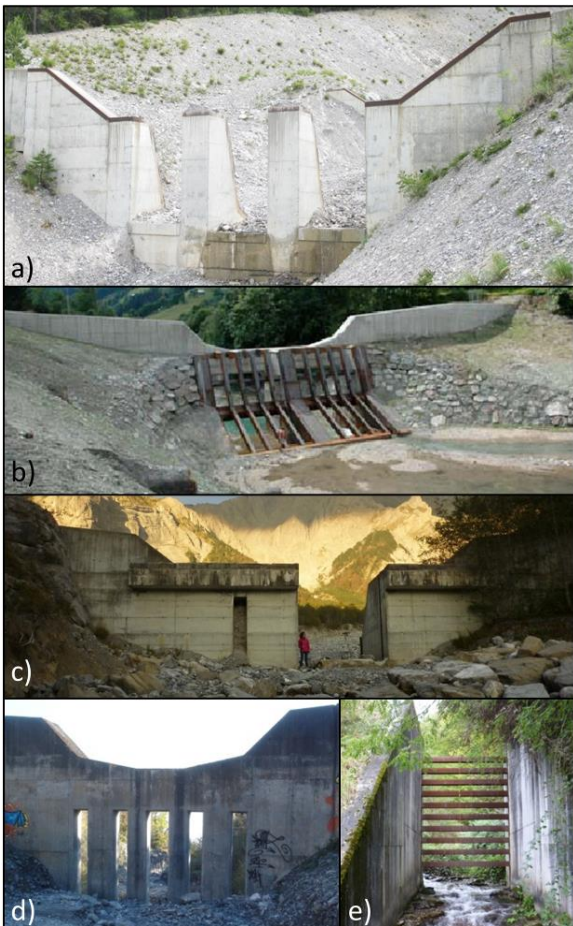


Figure 4 : Illustration de la diversité des typologies et des fonctions des barrages filtrants fermant des plages de dépôts ; (a) piège à blocs du Riou Sec de l'Argentière-La-Bessée (05), (b) piège à flottants de typologie Autrichienne sur le Dientenbach (Autriche) , (c) ouvrage à fente large de régulation du transport solide sur l'Ebron à Treminis (38), et ouvrages de rétention (d) à pertuis étroit sur le Manival à Saint-Ismier (38) et (e) à grille sur le Ruisseau de St-Clément à Tours-en-Savoie (73)

III.2.1 Rétention temporaire de la charge solide

En l'absence de critères de conception, la prudence dictait aux ingénieurs pionniers de chercher un piégeage maximum, c'est-à-dire un effet équivalent à celui des barrages de rétention (cf. III.1.4). La très grande majorité des plages de dépôt ont ainsi été initialement conçues de manière à arrêter les blocs mais aussi les graviers et les flottants, sans distinction, généralement à l'aide de grilles ou de pertuis assez petits pour rapidement s'obstruer (Figure 4d & e). Une plage de dépôt doit alors avoir la capacité de stocker la charge solide transportée lors d'un événement majeur pour être ensuite rapidement curée. Cela la différencie du barrage de rétention qui doit pouvoir stocker des années, voire des décennies, d'apports solides sans intervention.

III.2.2 Régulation du transport solide

Le piégeage de toute la charge solide grossière peut être à l'origine de conséquences géomorphologiques en aval, en particulier des phénomènes d'incision et d'érosions généralisées du lit. Ce phénomène n'est pas anecdotique et conduit à la déstabilisation des protections de berges, digues et ponts (Brandt 2000) comme, par exemple, sur les torrents isérois du Manival ou de l'Ebron (Brochot et al. 2003). Quand les travaux de stabilisation du chenal aval (radiers ou nouvelle série de barrages) n'étaient pas envisageables, il a parfois été nécessaire d'élargir des barrages filtrants pour réguler la capacité de transport plutôt que la réduire à néant.

Le barrage de la Figure 4c en est un bon exemple : l'ouvrage à pertuis étroit construit en 1990 piégeait trop de matériaux, rendant le curage difficile à maintenir et engendrant des incisions de plusieurs mètres en aval (Lefort 2018 p. 61). L'ouvrage a finalement été découpé pour être élargi vers 1998. On distingue sur la Figure 4c un pertuis sur la gauche, beaucoup plus étroit que la large fente visible sur la droite. Les conditions d'exploitation et de protection sont aujourd'hui satisfaisantes.

Des ouvrages filtrants aux ouvertures plus larges que ceux de rétention ont ainsi été conçus pour laisser passer une partie du transport solide. Ceci suggère que l'ouvrage stocke un maximum de matériaux pendant les événements d'apports extrêmes, puis les relargue à la décrue, ou lors d'épisodes ultérieurs. L'obstruction de l'ouvrage par des flottants ou par des blocs réduit cette possibilité de relargage à néant : l'ouvrage fonctionne alors en rétention. Ceci a engendré la nécessité de concevoir des ouvrages plus sélectifs, implantés en amont, pour débarrasser l'écoulement des flottants et sédiments les plus grossiers (SedAlp 2015) ; ou de concevoir des formes d'ouvrages et/ou d'ouvertures qui permettent de minimiser cet impact (tel que sur la plage de dépôt prévue à Vars sur le Chagnon, modélisé sur modèle réduit par Kouliniski et al. 2011).

III.2.3 Piège à blocs

Les blocs transportés par les laves torrentielles atteignent régulièrement des dimensions de plusieurs mètres. Ils sont alors souvent responsables de l'obstruction de ponts ou des lits des torrents au niveau de sections trop étroites ou trop peu raides. Le bon fonctionnement du pertuis large d'un ouvrage de régulation ou la simple protection d'un pont justifient donc parfois de piéger plus en amont les plus gros éléments transportés, tout en influençant au minimum le transit des graviers fins et grossiers.

De tels ouvrages sont équipés de "dents" (Figure 4a) séparant plusieurs ouvertures dont la largeur est un multiple (1.5 à 2 fois) du diamètre des blocs à piéger. La présence de plusieurs ouvertures a pour objectif de maintenir une section libre pour l'écoulement malgré l'arrêt d'un groupe de blocs. Une fraction du corps de la lave torrentielle, mais aussi les graviers charriés, contournent alors les blocs pour passer dans les espaces non obstrués.

III.2.4 Piège à flottants

L'accumulation de flottants perturbe de façon récurrente le fonctionnement d'ouvrages hydrauliques tel que les évacuateurs de crues, prises d'eau et ponts. Les barrages filtrants des plages de dépôt ne sont pas épargnés et les dysfonctionnements pendant les crues de 2005 en Suisse ont donné lieu à un important effort de recherche pour trouver des solutions à ce problème (Lange and Bezzola 2006). Des ouvrages sont ainsi conçus spécialement pour piéger les flottants (par exemple Figure 4b).

Le type le plus classique de piège à flottants, qu'on qualifie de « lourd », est un barrage équipé d'une grille inclinée avec une partie basse quasi-horizontale : la grille piégera les flottants qui seront poussés par les flots vers la partie inclinée où ils resteront toutefois mobiles ; la partie basse quant à elle maintiendra une capacité de transfert des sédiments charriés. Un certain effet de régulation du transport solide y prend place mais l'autocurage, impossible sur les ouvrages verticaux (tel que Figure 4e), est indiscutable sur ces ouvrages horizontaux-inclinés développés en Autriche (SedAlp 2015). L'effet des flottants, les gammes d'utilisation et des variantes plus légères ou d'adaptation d'ouvrages existants sont décrits dans Piton and Recking (2016b).

III.2.5 Ouvrage unique ou série d'ouvrages filtrants ?

A la lecture de cette liste de fonctions, on conçoit aisément que sur des sites complexes, où il serait optimal de piéger blocs et flottants mais seulement une fraction de la charge solide, il peut parfois être nécessaire de bâtir plusieurs ouvrages ayant chacun une fonction propre : par exemple un piège à blocs, puis un piège à flottants puis un ouvrage de régulation (SedAlp 2015). A contrario, une autre solution consiste en un unique grand ouvrage de rétention où les interactions entre flottants et sédiment sont incontrôlées et qui demandera plus d'opérations de curage et pourra nécessiter la stabilisation généralisée du tronçon aval. Les deux scénarios méritent d'être comparés selon leur efficacité et efficacité respectives.

IV PERSPECTIVES D'EVOLUTION

IV.1 Maintenir une part de correction active

L'entretien des barrages de correction torrentielle est une tâche ardue, réalisée dans un environnement hostile (chutes de blocs, crues pendant les chantiers). Les accès, souvent difficiles, impliquent l'utilisation régulière de l'hélicoptère. Trouver une main d'œuvre qualifiée pour réparer les milliers d'ouvrages en pierres de taille à des prix abordables est de plus en plus compliqué (Van Effenterre 1982). La tentation de reporter l'ensemble de l'effort d'entretien de la correction active vers de la protection passive (plages de dépôt, endiguement et protection de berge) est donc forte. D'autant plus que l'état des connaissances scientifiques et techniques permet d'estimer l'effet des protections passives sur l'aléa avec moins d'incertitudes que dans le cas de la correction active (complexité de la morphodynamique des hauts bassins, couplages versants-chenaux, permafrost, etc.) ; et donc peut être pris en compte dans la cartographie des risques comme cela a parfois été le cas (Philippe et al. 2016).

Cette question mérite d'être clairement posée pour décider des actions à mener afin de protéger les enjeux menacés dans un bassin versant torrentiel. En effet, les concepteurs des dispositifs originaux de correction n'avaient pas la possibilité de bâtir et d'entretenir des plages de dépôt modernes.

Cette analyse doit tenir compte des contraintes liées à chaque solution. En effet, la création des plages de dépôts peut être soumise à des contraintes foncières, car plus proches des zones d'enjeux, limitant ainsi leur capacité. Par ailleurs, nous soupçonnons que certains torrents, en particulier ceux équipés de barrages de consolidation de versants, pourraient avoir une activité torrentielle très augmentée en l'absence de ces ouvrages, engendrant le dépassement des capacités de curage d'une plage de dépôt (Anchierry 1966). Une part de correction active semble donc nécessaire. En définitive, c'est une étude complète du bassin versant au cas par cas qui doit aider à déterminer la cartographie des risques et la meilleure solution à adopter pour la protection des enjeux. C'est cette démarche opérationnelle qui a été engagée depuis 2012 sur les bassins versants avec présence d'une forêt domaniale RTM, pour lesquels les services ONF-RTM réalisent les Etudes de Bassins de Risque (EBR). Un bilan des conclusions de ces études pourra être produit dans les années à venir, une fois le panel jugé suffisant.

IV.2 Abandonner certains ouvrages

Dès l'origine, Demontzey (1882 p. 345) soulignait que « *tous les barrages ne sont pas indistinctement appelés à subsister indéfiniment, ..., les seuils et les barrages rustiques pourront sans inconvénient disparaître dans l'avenir, quand la forêt créée dans le bassin de réception et dans le lit même des*

ravins entrera dans la plénitude de sa puissance protectrice ». Cette vision a déjà été suivie dans les faits dans les forêts domaniales RTM, en témoigne la différence entre l'inventaire de près de 93 000 ouvrages en 1964 et celui de 14 000 ouvrages actuellement entretenus par le RTM. La manière de décompter les ouvrages n'était toutefois pas forcément similaire, et on compte un nombre important de petits seuils en pierres sèches qui n'ont d'ailleurs pas résisté lorsqu'ils ont été implantés sur des torrents particulièrement actifs. Elle rappelle simplement que la correction torrentielle est une activité où il faut rester pragmatique et ne pas hésiter à se poser des questions vis-à-vis de l'efficacité actuelle d'ouvrages ayant été bâtis il y a plus d'un siècle, dans un contexte socio-économique très différent (Carladous et al. 2016a).

IV.3 Détruire certains barrages

Trois situations pouvant entraîner une augmentation du risque à leur aval peuvent amener à envisager le démantèlement de barrages : le mauvais calage altimétrique, une forte probabilité de rupture et un déficit sédimentaire marqué à l'aval.

L'effet de réduction de la pente est limité aux biefs pavés ou hors d'équilibre. Il ne s'exprime donc normalement pas sur le cône de déjection, si ce n'est lorsque la tendance de long terme est à la réduction des apports et donc des pentes de dépôts. Cette différence fondamentale de la nature colluviale (c'est-à-dire influencée par les versants) du lit des gorges et de la nature alluviale du lit du cône de déjection a parfois été négligée : des cuvettes des barrages ont été ainsi calées trop haut sur le profil. Le profil en long du torrent y est rehaussé d'une hauteur similaire à celle du barrage, constituant une perte équivalente sur la revanche. Cela augmente la probabilité des débordements en amont de tels barrages. Leur démantèlement est alors envisagé et parfois réalisé : un barrage démantelé en 2004 sur le torrent du Boscodon (Les-Crots, 05) ; un autre en 2014 sur le torrent du Piézan (Cons-Sainte-Colombe, 74) ; trois barrages démantelés en 2016 sur le torrent de la Salle (La-Salle-Les-Alpes, 05). Nous devons tirer aujourd'hui les leçons de cette expérience.

Les barrages de correction torrentielle constituent systématiquement un stock sédimentaire qui pourrait être subitement libéré en cas de ruine de l'ouvrage. Le manque d'entretien de grands ouvrages de rétention est pointé comme pouvant alors être une source importante de matériaux (Sodnik et al. 2014). La ruine d'une série de 35 barrages de rétention soumis à un événement extrême fut d'ailleurs largement responsable de la mort de 87 campeurs près de Biescas en Espagne en 1996 (sensiblement 2/3 des matériaux transportés seraient issus des atterrissements des barrages selon White et al. 1997). Si la probabilité de ruine d'un ouvrage est forte favorisant des ruptures en cascade avec des conséquences importantes sur l'aléa et les enjeux exposés, des opérations de renforcement ou de démantèlement de l'ouvrage doivent être envisagées et comparées. Notons cependant que ce cas ne s'est pas encore présenté en France (Boncompain 2011).

Enfin, certains cours d'eau alimentés par des torrents corrigés souffrent néanmoins d'un déficit chronique de sédiments, en général lié à l'effet combiné de multiples pressions anthropiques (extractions de graviers, endiguement des rivières, construction de barrages réservoirs, reconquête forestière spontanée liée à la déprise rurale) et de la transition climatique marquant la fin du Petit Age Glaciaire. La part de responsabilité des reboisements RTM et des ouvrages de correction torrentielle dans ce déficit est généralement secondaire devant les autres influences anthropiques ou encore la sortie du Petit Age Glaciaire (Rinaldi and Simon

1998, Liébault and Piégay 2002, Liébault et al. 2005, Astrade et al. 2011a). Dans certains bassins versants, les enjeux ont disparu, principalement suite à l'exode rural. Dans ces cas, le démantèlement d'ouvrages peut être envisagé pour rétablir de meilleures conditions de recharge sédimentaire en aval. Ceci est désormais pointé comme une solution à faible coût de rétablissement de la continuité écologique et donc des apports sédimentaires dans les bassins en déficit chronique (Liébault et al. 2008, 2010, Rinaldi et al. 2009). Il faut alors justifier la pertinence à rétablir les apports sédimentaires, l'effet réel du démantèlement des ouvrages sur ces apports et, si besoin, convaincre l'opinion publique de la nécessité de détruire ces ouvrages qui, quel que soit leur efficacité réelle, sont perçus comme ayant assuré la sécurité des biens et des personnes depuis des décennies. Cette remise à disposition de matériaux ne peut ainsi s'envisager qu'en ayant préalablement démontré l'absence d'aggravation de l'aléa sur les enjeux directs et indirects. Par ailleurs, ces ouvrages ont une valeur patrimoniale pour les populations locales. La solution la plus souvent retenue pour l'heure reste donc l'absence d'entretien des ouvrages.

IV.4 Vers des plages de dépôt plus sélectives

En l'absence de critères de conception et d'une compréhension suffisante des mécanismes qui régissent le fonctionnement des plages de dépôt, la prudence dictait la mise en place d'ouvrages à la conception sécuritaire, piégeant trop, plutôt que trop peu. Cependant, la situation a beaucoup changé lors des dernières décennies : les enjeux environnementaux et l'importance de la continuité sédimentaire sont soulignés dans tous les documents de gestion des risques et des milieux aquatiques ; des effets secondaires indésirables ont été observés à l'aval de nombreuses plages de dépôt nécessitant de nouveaux ouvrages et efforts d'entretien (Brochot et al. 2003). Par ailleurs, le milieu académique n'a pas cessé d'étudier l'hydraulique torrentielle et le fonctionnement de ces ouvrages. Nous défendons l'idée que la science est aujourd'hui suffisamment mature pour proposer des critères de conception visant à une plus grande sélectivité dans la fonction à assurer par les plages de dépôts (Piton and Recking 2016a, 2016b, Schwindt et al. 2017a, 2017b, 2018). Par ailleurs, les retours d'expérience sur des ouvrages existants seront une source d'information supplémentaire pour la définition de ces critères. La mise à jour en cours de l'inventaire de Gruffaz (1996) a pour ambition de faire ressortir cette expérience acquise par les praticiens.

Les effets secondaires et les coûts de curage des ouvrages de rétention incitent à affiner les études de compréhension des dysfonctionnements hydrauliques et morphologiques du chenal à l'origine du risque (Piton et al. 2018b) : excès de volume solide ? Capacité de transport solide insuffisante ? Embâcle par les flottants ou obstruction par des blocs conduisant à un dépôt régressif ? Une fois ces analyses fines menées, des ouvrages nouveaux ou existants, qui à première vue auraient eu une fonction de rétention, pourraient être adaptés en pièges à blocs ou à flottants, ou en ouvrages de régulation et éventuellement amener à une modification des cartes aléas. A minima, il peut être souvent envisagé de mettre en place un orifice de fond permettant le transit de la charge sédimentaire liée aux crues de magnitude suffisamment limitée pour ne pas menacer les enjeux. Les travaux récents de Schwindt et al. (2017a, 2017b, 2018) donnent des lignes directrices très claires sur la façon de concevoir un ouvrage transparent aux petites crues mais forçant néanmoins la rétention des crues majeures. Ces recommandations ont d'ailleurs été confirmées par les observations de terrain de Piton et al. (2018a). En s'appuyant sur ces travaux récents et en cours, Irstea et l'ONF-RTM travaillent actuellement, dans le cadre d'un

groupe de travail européen, à l'édition d'un guide de recommandations pour la conception des plages de dépôts et pièges à flottants.

V CONCLUSION

Les torrents de montagne français sont aménagés par des milliers de barrages et seuils de correction torrentielle. Le rôle de ces ouvrages, dont l'origine remonte souvent à plus d'un siècle, est parfois sorti des mémoires. Les plages de dépôt se sont plus récemment placées en complément, voire partiellement en alternative à certains ouvrages. L'expérience montre d'ailleurs que très peu de communes ont investi dans la correction active alors que les plages de dépôts et endiguements réalisés sous maîtrise d'ouvrage communale sont très nombreux. Le présent article rappelle l'émergence des deux techniques et les rôles finalement très divers que ces structures assez semblables peuvent jouer. Il faut retenir qu'une technique ne saurait remplacer complètement l'autre et que ces ouvrages sont complémentaires. On se gardera donc de faire des généralités quant à la pertinence de la correction active face à la protection passive en rappelant que Scipion Gras (1857) soulignait déjà que chaque torrent mérite une étude approfondie qui permettra de déterminer le panel de techniques le plus adapté à la correction de ce dernier. C'est l'ambition des Études de Bassin de Risques (EBR) que l'ONF RTM réalise en Forêt domaniale RTM (plus d'une centaine depuis 2012).

VI REMERCIEMENTS

Cet article a été rédigé à l'invitation de la SHF suite à l'attribution du Prix Jean Valemblois de Mécanique des Fluides 2017 de la Société Hydrotechnique de France à son premier auteur. Ce dernier tient à remercier la SHF pour cette distinction et pour son travail de société savante. Le travail de G.P. a été financé par plusieurs projets Européens, celui travail d'écriture de cet article en particulier ayant été financé par le projet NAIAD du programme H2020 Innovation Action de la Commission Européenne.

VII RÉFÉRENCES

- Anchierri, L. 1966. Les crues du torrent de Pontamafrey en 1965. *Revue de géographie alpine* 54:15–42.
- Andréassian, V. 2004. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology* 291:1–27.
- von Aretin, J. G. 1808. Über Bergfälle und die Mittel, denselben vorzubeugen, oder wenigstens ihre Schädlichkeit zu vermindern mit vorzüglicher Rücksicht auf Tirol. Fischerischen Buchhandlung, Innsbruck.
- Astrade, L., N. Jacob-Rousseau, J.-P. Bravard, F. Allignol, and L. Simac. 2011a. Detailed chronology of mid-altitude fluvial system response to changing climate and societies at the end of the Little Ice Age (Southwestern Alps and Cévennes, France). *Geomorphology* 133:100–116.
- Astrade, L., E. Ployon, and S. Veyrat-Charvillon. 2011b. Les données laser terrestre à haute résolution pour le suivi de la charge de fond dans les tronçons torrentiels, retours d'expériences. Pages 107–118 in *Images et modèles 3D en milieux naturels. Coll Edytem*.
- Brochot, S.; Duclos, P. & Bouzit, M. 2003. L'évaluation économique des risques torrentiels: intérêts et limites pour les choix collectifs de prévention. *Ingénieries, N° Spécial*, 53-68
- 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. Librairie Polytechnique, Paris.

- Bernard, C. 1927. Cours de restauration des montagnes. 788 pp. Ecole normale des eaux et forêts.
- Böll, A. 1997. Wildbach- und Hangverbau. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft (WSL), Birmendorf.
- Boncompain, I. 2011. Accidentologie des ouvrages hydrauliques RTM Retours d'expériences. 42 pp. Direction Technique RTM.
- 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* 9:70–120.
- Brandt, S. A. 2000. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena* 40:375–401.
- Bravard, J.-P. 2002. Le "traitement" des versants dans le département de la Drôme: Des inondations de 1840 à la loi du 27 juillet 1860. *Annales des ponts et chaussées*. 37–43
- Breton, P. 1867. Mémoire sur les barrages de retenue de graviers dans les gorges des torrents. Paris.
- Brugnot, G. 2002. Développement des politique forstières et naissance de la restauration des terrains en montagne. *Annales des ponts et chaussées*. 23–30
- Carladous, S. 2017. Approche intégrée d'aide à la décision basée sur la propagation de l'imperfection de l'information dans le processus d'expertise - application à l'efficacité des mesures de protection torrentielle. Thèse de doctorat. AgroParisTech, Ecole des Mines de Saint-Etienne
- Carladous, S., M.-P. Michaud, J.-M. Tacnet, and Q. Delvienne. 2014. 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). START-it-uP project
- Carladous, S., G. Piton, A. Recking, F. Liebault, D. Richard, J. M. Tacnet, D. Kuss, F. Philippe, Y. Quefféléan, and O. Marco. 2016a. Towards a better understanding of the today French torrents management policy through a historical perspective. Page 12011 *E3S Web Conf*.
- Carladous, S., G. Piton, J. Tacnet, F. Philippe, R. Nepote-Vesino, Y. Quefféléan, and O. Marco. 2016b. Protection against natural hazards in French mountains: historical analysis of actions and decision contexts in public forests. Pages 34–42 *13th INTERPRAEVENT Conf. Proc.*
- Chen, J. G., X. Q. Chen, W. Y. Zhao, and Y. You. 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*.
- Clauzel, L., and A. Poncet. 1963. Barrages filtrants et corréction torrentielle par ségrégation des matériaux charriés. *Revue Forestière Française* 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). Pages 373–378 *Palaeofloods, Historical Floods and Climatic Variability: Applications in Flood Risk Assessment*. CSIC, Madrid (Proceedings of the PHEFRA Workshop, Barcelona, 16-19th October, 2002).
- Cœur, D., and M. Lang. 2008. Use of documentary sources on past flood events for flood risk management and land planning. *Comptes Rendus - Geoscience* 340:644–650.
- Conesa-Garcia, C., F. López-Bermudez, and R. Garcia-Lorenzo. 2007. Bed stability variations after check dam construction in torrential channels (South-East Spain). *Earth Surface Processes and Landforms* 32:2165–2184.
- Delsigne, F., P. Lahousse, C. Flez, and G. Guiter. 2001. Le Riou Bourdoux: Un monstre alpin sous haute surveillance. *Revue forestière française* 53:527–541.
- Demontzey, P. 1882. Traité pratique du reboisement et du gazonnement des montagnes. 528 pp. Ministère de l'agriculture et du commerce et des travaux publiques, Paris.
- Deymier, C., J. M. Tacnet, and N. Mathys. 1995. Conception et calcul de barrages de correction torrentielle 287 p. Cemagref Grenoble Pegr.
- Díaz, V., J. Mongil, and J. Navarro. 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* 14:2045–2056.
- Duile, J. 1826. Über Verbauung der Wildbäche in Gebirgs-Ländern, vorzüglich in der Provinz Tirol und Vorarlberg. 180 p. Rauch.
- Van Effenterre, C. 1982. Les barrage perméables de sédimentation. *Revue Forestière Française* 5:87–93.
- Egholm, D. L., M. F. Knudsen, and M. Sandiford. 2013. Lifespan of mountain ranges scaled by feedbacks between landsliding and erosion by rivers. *Nature* 498:475–478.
- Esmaili Nameghi, A., A. Hassanli, and M. Soufi. 2008. A study of the influential factors affecting the slopes of deposited sediments behind the porous check dams and model development for prediction. *Desert* 12:113–119.
- Evette, A., S. Labonne, F. Rey, F. Liebault, O. Jancke, and J. Girel. 2009. History of bioengineering techniques for erosion control in rivers in western europe. *Environmental Management* 43:972–984.
- Fabre, J.-A. 1797. Essai sur la théorie des torrens et des rivières. 342 p. Bidault Libraire, Paris.
- Ferro, V. 2013. Check dams, morphological adjustments and erosion control in torrential streams. Pages 33–62 in C. Conesa-Garcia and M. A. Lenzi, editors. Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, NY.
- Frisi, P. 1770. A Treatise on Rivers and Torrents; with the Method of Regulating Their Course and Channels. 226 p. J. Weale, London.
- Galia, T., V. Škarpich, J. Hradeck, and Z. Pribyla. 2016. Effect of grade-control structures at various stages of their destruction on bed sediments and local channel parameters. *Geomorphology* 253:305–317.
- 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. 112 p. Charles Vellot, Grenoble.
- Gras, S. 1857. Etudes sur les torrents des Alpes. 108 p. F.Savy, Paris.
- Gruffaz, F. 1996. Etude de description et analyse des plages de dépôt torrentilles réalisées dans les Alpes et Pyrénées Françaises. RTM.
- Hampel, R. 1975. Bedeutung wechselnder Geschiebebelastung für Geschiebebilanzen der Wildbachverbauungen. *INTERPRAEVENT Conference proceedings*. 65–71
- Iroume, A., and J. Gayoso. 1991. La pendiente de los depositos en los torrentes del cerro Divisadero, Coyhaique, Chile. *Bosque* 12:37–42.
- Jaeggi, M. N. R. 1992. Dynamics of Gravel-Bed Rivers. Pages 593–605 in P. Billi, R. Hey, C. Thorne, and P. Tacconi, editors. John Wiley and Sons, Chichester.
- Kaibori, M., and Y. Tokudome. 1994. Distinctive Examples and Problems to be Solved on the Accumulation Gradient at Check-dams. *Sabo Gakkaishi* 47:30–34.
- Kalaora, B., and A. Savoye. 1986. La forêt pacifiée. Sylviculture et sociologie au XIXe siècle. L'Harmattan, France.
- Kostadinov, S. 1993. Possibility of Assessment of the Slope of Siltation Based on the Some Hydraulic Characteristics of the Torrential Flows. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering* 45:28–33.
- Kostadinov, S., N. Dragovic, M. Zlatic, and M. Todosijevic. 2011. Natural effect of classical check dams in the torrents of the river toplica drainage basin. *Fresenius Environmental Bulletin* 20:1102–1108.
- Kouliniski, V., ARTELIA, and RTM. 2011. Étude sur modèle réduit de la plage de dépôt du Chagnon. Commune de Vars.

- Kuss, C. 1900a. Restauration et conservation des terrains en montagne. Les Torrents glaciaires. 88 p. Imprimerie Nationale.
- Kuss, C. 1900b. Restauration et conservation des terrains en montagne. Éboulements, glissements et barrages. 61 p. Imprimerie Nationale.
- Lange, D., and G. Bezzola. 2006. Schwemmholz - Probleme und Lösungsansätze . Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule (VAW) Zürich, ETH-Zentrum - Zürich.
- Lefort, P. 2018. *Morphodynamique fluviale - Approches théorique et expérimentale - A l'usage des étudiants, ingénieurs et gestionnaires des cours d'eau*, 225 p.
- 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*. 41:57–64.
- Liébault, F., P. Clément, H. Piégay, and E. Zahnd. 2010. Gestion du risque ou gestion de l'environnement? Le cas des massifs du Diois et des Baronnies, Préalpes du Sud, France in *Risques et territoires, Interroger et comprendre la dimension locale de quelques risques contemporains*. (T. Coanus, J. Comby, F. Duchêne, and E. Martinais, editors.) Lavoisier. 47–57
- Liébault, F., B. Gomez, M. Page, M. Marden, D. Peacock, D. Richard, and C. M. Trotter. 2005. Land-use change, sediment production and channel response in upland regions. *River Research and Applications* 21:739–756.
- Liébault, F., and H. Piégay. 2002. Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of Southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms* 27:425–444.
- Liébault, F., H. Piégay, P. Frey, and N. Landon. 2008. Tributaries and the Management of Main-Stem Geomorphology. *River Confluents, Tributaries and the Fluvial Network*. John Wiley Sons, Ltd. 243–270
- Lilin, C. 1986. Histoire de la restauration des terrains en montagne au 19e siècle. Cah. ORSTOM, sér. Pédol 32:139–145.
- Liu, C.-M. 1992. The effectiveness of check dams in controlling upstream channel stability in northeastern Taiwan. Pages 423–428 *Proc. of the Chengdu Symposium on Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions*. IAHS.
- López, J. L. 2014. Respuesta Morfodinámica A La Construcción De Presas De Retención De Sedimentos En Ríos De Montaña. Page 53.
- MA, 1969. Modification de l'instruction relative à la Restauration et à la Conservation des Terrains en Montagne et à la régularisation du régime des eaux. Ministère de l'Agriculture, Direction des forêts. Paris, F2/3 N°346
- Maita, H. 1993. Influence of heterogeneous sediment transport on the function of sediment control of a check dam. Pages 277–277 *Sediment Problems: Strategies for Monitoring, Prediction and Control Yokohama Symp. Conf. Proc. IAHS*.
- Marsh, G. P. 1864. Man and Nature; or, Physical geography as modified by human action. Charles Scribner, New York.
- Messines du Sourbier., J. 1964. Enquête sur la conservation et la restauration des terrains de montagne. . Administration des eaux et forêts, Paris.
- Meunier, M. 1989. Essai de synthèse des connaissances en érosion et hydraulique torrentielle. *La Houille Blanche* 5:361–376.
- Mougin, P. 1900. Restauration et conservation des terrains en montagne - consolidation des berges par dérivation d'un torrent (torrent de Saint Julien). 39 p. Imprimerie Nationale.
- Mougin, P. 1931. La restauration des Alpes. Ministère de l'Agriculture, Direction générale des eaux et des forêts, Eaux et génie rural, Paris, France.
- Nichols, M. H., V. O. Polyakov, M. A. Nearing, and M. Hernandez. 2016. Semiarid watershed response to low-tech porous rock check dams. *Soil Science* 181:275–282.
- Piton, G., S. Carladous, A. Recking, F. Liébault, J. Tacnet, D. Kuss, Y. Quefféléan, and O. Marco. 2017. Why do we build check dams in Alpine streams? An historical perspective from the French experience. *Earth Surface Processes and Landforms* 42:91–108.
- Piton, G., and A. Recking. 2016a. Design of sediment traps with open check dams. I: hydraulic and deposition processes. *Journal of Hydraulic Engineering* 142:1–23.
- Piton, G., and A. Recking. 2016b. Design of sediment traps with open check dams. II: woody debris. *Journal of Hydraulic Engineering* 142:1–17.
- Piton, G., and A. Recking. 2016c. Closure to “Design of Sediment Traps with Open Check Dams. I: Hydraulic and Deposition Processes” by Guillaume Piton and Alain Recking. *Journal of Hydraulic Engineering* 142:07016009.
- Piton, G., and A. Recking. 2016d. Effects of check dams on bed-load transport and steep slope stream morphodynamics. *Geomorphology* 291:94–105.
- Piton, G., and A. Recking. 2017. The concept of travelling bedload and its consequences for bedload computation of mountain streams. *Earth Surface Processes and Landforms* 42 , 1505-1519
- Piton, G.; Fontaine, F.; Bellot, H.; Liébault, F.; Bel, C.; Recking, A. & Hugerot, T. 2018a Direct field observations of massive bedload and debris flow depositions in open check dams in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 40:1-8
- Piton, G.; Recking, A. & Tacnet, J. 2018b. An attempt to classify malfunctions of steep channel flows justifying building of open check dams or other torrent control works. *Proc. of the 5th IAHR Europe Congress*, 377-378
- Philippe, F.; Carladous, S.; Tacnet, J.-M. & Bouvet, P. Taking into account protective works in land-use planning for mountain torrential floods: state of the art of present French practices; *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 2016, 7, 12003
- Poncet, A. 1995. Restauration et conservation des terrains en montagne. 1000 p. Office National des Forêts.
- Porto, P., and J. Gessler. 1999. Ultimate bed slope in Calabrian streams upstream of check dams: Field study. *Journal of Hydraulic Engineering* 125:1231–1242.
- Recking, A., P. Leduc, F. Liébault, and M. Church. 2012. A field investigation of the influence of sediment supply on step-pool morphology and stability. *Geomorphology* 139-140:53–66.
- Recking, A., D. Richard, and G. Degoutte. 2013. Torrents et rivières de montagne: Dynamique et aménagement. . Editions Quae, Antony.
- Remaître, A., T. W. J. Van Asch, J.-P. Malet, and O. Maquaire. 2008. Influence of check dams on debris-flow run-out intensity. *Natural Hazards and Earth System Science* 8:1403–1416.
- Reueuve, P. 1955. L'évolution de la technique de correction torrentielle. *Revue Forestière Française*:689–693.
- Rinaldi, M., and A. Simon. 1998. Bed-level adjustments in the Arno River, central Italy. *Geomorphology* 22:57–71.
- Rinaldi, M., C. Simoncini, and H. Piégay. 2009. Scientific design strategy for promoting sustainable sediment management: the case of the Magra River (Central-Northern Italy). *River Research and Applications* 25:607–625.
- SedAlp. 2015. Work Package 6 - Interactions with structures. . Alpine Space European project.

Schwindt S., Franca M.J. and Schleiss A. J., 2017a. Effects of lateral and vertical constrictions on flow in rough steep channels with bedload. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(12):04017052.

Schwindt, S.; Franca, M.; De Cesare, G. & Schleiss, A. 2017b Analysis of mechanical-hydraulic bedload deposition control measures *Geomorphology*, 295:467-479

Schwindt S., Franca M.J., Reffo A. and Schleiss A. J. (2018) Sediment traps with guiding channel and hybrid check dams improve controlled sediment retention. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18:647-668

Sodnik, J., M. Martincic, M. Mikoš, and A. Kryżanowski. 2014. Are Torrent Check-Dams Potential Debris-Flow Sources? Pages 485–488 in G. L. et al., editor. *Engineering Geology for Society and Territory (IAEG Congress proceedings)*. Springer International Publishing Switzerland.

Surell, A. 1841. Etude sur les torrents des Hautes Alpes (1st edition). 280 p. Librairie des corps impériaux des ponts et chaussées et des mines, Paris.

Tétréau, 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., F. Liébault, A. Loye, D. Laigle, and M. Jaboyedoff. 2012. Sediment budget monitoring of debris-flow and bedload transport in the Manival Torrent, SE France. *Natural Hazards and Earth System Science* 12:731–749.

Theule, J., F. Liébault, D. Laigle, A. Loye, and M. Jaboyedoff. 2015. Channel scour and fill by debris flows and bedload transport. *Geomorphology* 243:92–105.

Thiéry, E. 1891. Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement. 443 p. Librairie Polytechnique, Paris.

Todosijevi, M., and S. Kostadinov. 2006. Effects of Transversal Structures in the Torrents of the River Drina Catchment. Pages 23–26 BALWOIS Conf. Water Observation and Information System for Decision Support. Ministry of Environment and Physical Planning of Republic of Macedonia, Skopje.

Vischer, D. L. 2003. Histoire de la protection contre les crues en Suisse, Des origines jusqu'au 19e siècle. OFEG, Série Eaux.

White, S., J. M. Garcia-Ruiz, C. Marti, B. Valero, M. P. Errea, and A. Gómez-Villar. 1997. The 1996 Biescas campsite disaster in the Central Spanish Pyrenees, and its temporal and spatial context. *Hydrological Processes* 11:1797–1812.

Woolhiser, D. A., and A. T. Lenz. 1965. Channel gradients above gully-control structures. *Journal of the Hydraulics Division* 91:165–187.

Von Zallinger, F. S. 1779. Abhandlung von den Ueberschwemmungen in Tyrol. kk Hofbuchdr.

Zeng, Q. L., Z. Q. Yue, Z. F. Yang, and X. J. Zhang. 2009. A case study of long-term field performance of check-dams in mitigation of soil erosion in Jiangjia stream, China. *Environmental Geology* 58:897–911.