

# CHAPITRE IV TRANSPORT SEDIMENTAIRE ET AJUSTEMENTS MORPHOLOGIQUES

**Auteurs :**

**Yves Le Bissonnais,**

**Simon Dufour,**

Anne-Julia Rollet

<b>CHAPITRE IV TRANSPORT SEDIMENTAIRE ET AJUSTEMENTS MORPHOLOGIQUES .....</b>	<b>1</b>
<b>IV.1 ANALYSE DU CORPUS BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>4</b>
<b>IV.2 EFFET D'UNE RETENUE .....</b>	<b>6</b>
IV.2.1 Evolution dans une retenue : stockage de l'eau et des sédiments .....	6
IV.2.1.a- Rappel sur les enjeux et sur les processus.....	6
IV.2.1.b- Méthodes mises en œuvre dans les articles .....	7
IV.2.1.b.i- Pour l'évaluation de l'effet sur les régimes hydrologiques .....	7
IV.2.1.b.ii- Pour l'évaluation de l'effet sur le piégeage des sédiments.....	7
IV.2.1.c- Effets observés, données disponibles, déterminants et indicateurs.....	7
IV.2.1.c.i Modification des caractéristiques hydrologiques.....	7
Les paramètres hydrologiques affectés .....	8
L'influence du type d'infrastructure .....	9
IV.2.1.c.ii Effets sur le transfert des sédiments .....	11
IV.2.1.d- Analyse critique ou discussion .....	12
IV.2.2 Hydromorphologie dans le réseau hydrographique aval.....	13
IV.2.2.a-Rappel sur les enjeux et sur les processus.....	13
IV.2.2.b- Méthodes mises en œuvre en hydromorphologie .....	13
IV.2.2.c- Effets observés, données disponibles, déterminants et indicateurs.....	13
IV.2.2.c.i- Les différents types d'ajustements.....	13
Généralités .....	13
Évolution verticale du lit mineur.....	15
Evolution en plan de la bande active .....	16
IV.2.2.c.ii- Les contraintes aux ajustements .....	17
La granulométrie du lit.....	19
La végétation riveraine .....	20
L'incidence des affluents.....	21
IV.2.2.c.iii- Temporalité, extension spatiale et amplitude des ajustements.....	21
Les échelles temporelles .....	22
Les échelles spatiales .....	23
L'amplitude des ajustements .....	24
Le cas de petits ouvrages .....	24
<b>IV.3 EFFET CUMULE DES RETENUES .....</b>	<b>25</b>
IV.3.1 Caractéristiques du corpus analysé (disponible) .....	25
IV.3.2 Concepts, Démarche et Méthodes pour aborder le cumul .....	25

<i>IV.3.2.a- Le piégeage des sédiments</i> .....	25
<i>IV.3.2.b-L'ajustement morphologique à l'aval</i> .....	27
IV.3.3 Données et observations disponibles. Déterminants et indicateurs .....	28
<i>IV.3.3.a- Effet cumulé sur le régime hydrologique</i> .....	28
<i>IV.3.3.b- Effet cumulé sur le piégeage des sédiments</i> .....	29
<i>IV.3.3.c- Effet cumulé sur l'hydromorphologie</i> .....	30
IV.3.4 Impact des vidanges, relargage de sédiments et arasements de barrages sur les flux sédimentaires .....	32
IV.3.5 Analyse critique et perspectives pour l'évaluation de l'impact cumulé .....	33
Références bibliographiques.....	35

## IV.1 ANALYSE DU CORPUS BIBLIOGRAPHIQUE

L'analyse bibliométrique porte sur un corpus de 60 références issues du Web of science. Ces références ont été sélectionnées sur la base de la lecture du titre et du résumé par Yves Le Bissonnais, Simon Dufour, experts de la thématique « transport solide », à partir d'une liste de références, issues du Web of science, répondant aux requêtes suivantes sur la période de publication 1975-2015:

- TS=((pond\* or lake\* or dam\* or reservoir\*) AND (sediment\* or "bed load") AND ("channel morphology" or "river bed morphology" or "stream morphology" or "channel erosion")) 217 résultats
- TI=((pond\* or lake\* or dam\* or reservoir\* or impoundment\* or weir\* ) AND (sediment\* or "bed load\*")) AND TI=((channel\* or "river bed\*" or stream\*) and (\*morphology\* or erosion\* or adjustment\*)) 8 résultats
- TS=(pond\* or lake\* or dam or dams\* or reservoir\* or IMPOUNDMENT\* or weir\* or tank\*) AND TS=(sediment\* or erosion\* or bed\* or transport\*) AND TS>(\*morphology\* and (river\* or channel\* or stream\* or water \*or fluv\*)) 2329 résultats
- TS=((tank\*) AND (sediment\* or "bed load\*")) AND TS=((channel\* or "river bed\*" or stream\*) and (\*morphology\* or erosion\* or adjustment\*)) 26 résultats

Une requête TI porte sur le titre, une requête TS porte sur le titre, l'abstract et les mots clés auteurs et les mots clés du WOS.

La majorité de ces articles concernent des grands barrages\*<sup>1</sup> et des retenues\* sur cours d'eau et la question du cumul est rarement abordée. Par contre l'analyse des références des articles les plus pertinents renvoie à des références plus anciennes ou non sélectionnées par la requête, que nous avons également parcourues. Dans ces références complémentaires, certaines concernent les versants (farm dams) et d'autres les effets cumulatifs. Nous nous sommes également appuyés pour cette étude sur le travail bibliographique issu des thèses de Anne-Julia Rollet et Jan Thompson portant respectivement sur la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage sur l'Ain et sur l'impact et la gestion des petites retenues agricoles en Nouvelle Zélande (ces dernières références n'ont pas été prises en compte dans l'analyse bibliométrique).

L'analyse bibliométrique suivante s'appuie sur la fonction « analyze » du Web of science, puis traitée avec un tableur Excel. Les graphiques portant sur les mots clés ont été réalisés avec le logiciel Matheo Analyzer. Il faut noter que la taille relativement réduite du corpus analysé (60 références) limite la portée de l'interprétation des résultats bibliométriques.

---

<sup>1</sup> Les termes signalés par un astérisque \*sont définis dans un glossaire en fin de rapport.

La répartition des références par date de publication (Figure 1) montre un pic au milieu des années 2000 : plus de 50% du corpus analysé a été publié en 2004 et 2009. La baisse ultérieure et le nombre relativement limité de références sur la période 2010-2015 est plutôt surprenant, mais nous n'avons pas d'explication de cette tendance.

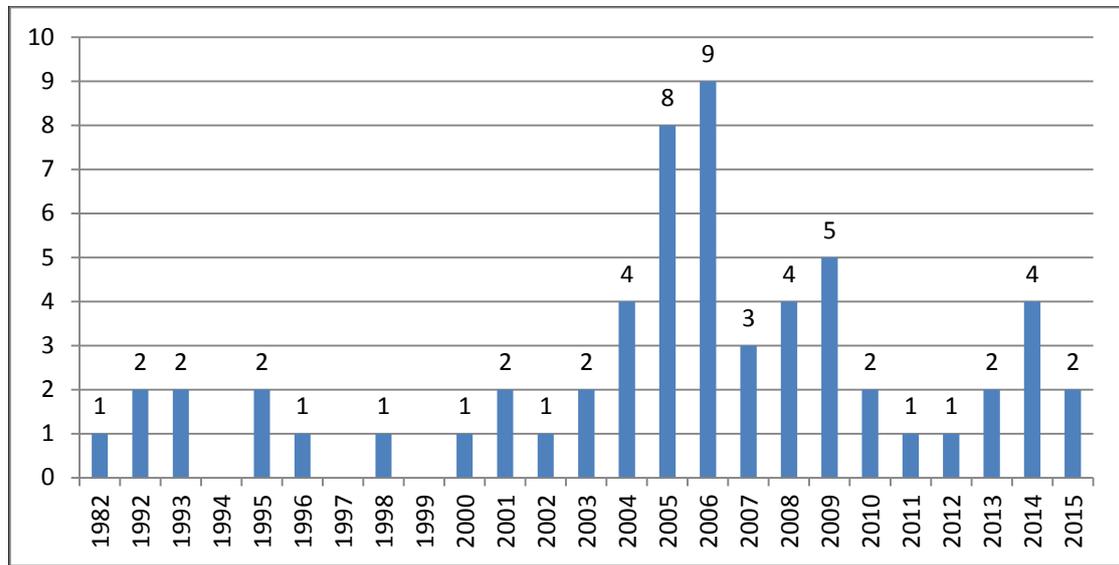


Figure 1 : Répartition des références par date de publication.

Les pays d'origine des auteurs de ces articles (Figure 2) sont en tout premier lieu les USA avec près de 50% des références, puis on trouve ensuite un groupe de 4 pays avec Espagne, Chine, Angleterre, Australie avec chacune 10% des articles analysés. Cette répartition est conforme avec la dominance classique des Etats Unis en matière de publications scientifiques en général, mais aussi probablement l'importance de la thématique des retenues dans ce pays. Notons également l'absence de références d'auteurs français dans ce corpus.

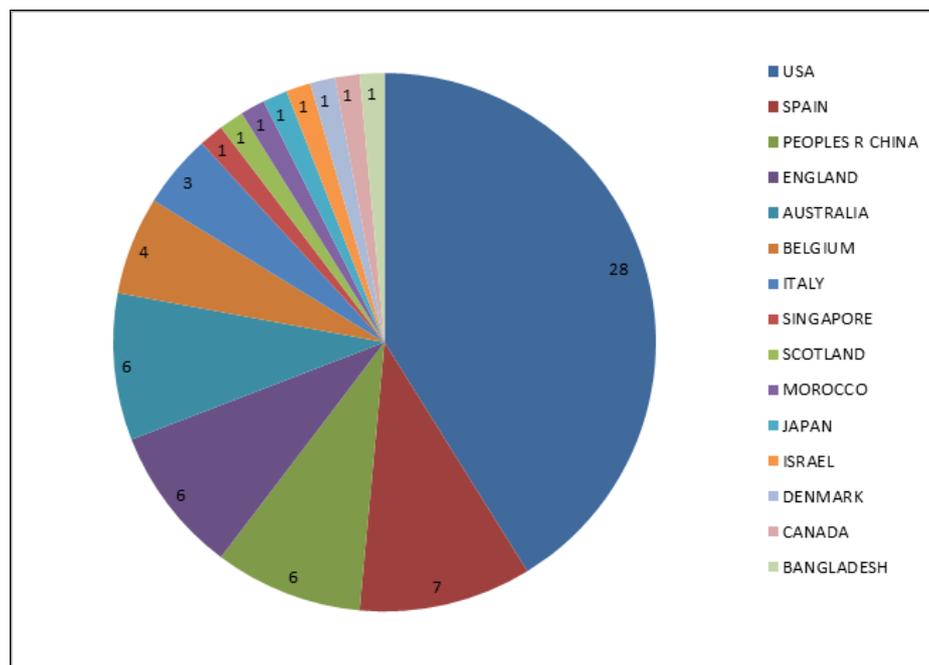


Figure 2 : Répartition des auteurs par pays.

En ce qui concerne la représentation des titres de revues (Figure 3), on observe une nette domination de la revue « Geomorphology », principale revue sur le sujet, qui publie l'essentiel des références trouvées sur l'ajustement\* hydro-morphologique des cours d'eau, vient ensuite une série de revues couvrant les domaines de l'hydrologie appliquée (« Regulated Rivers Research Management » devenue en 2002 « River Research and Applications ») et générale, ainsi que quelques revues généralistes et pluridisciplinaires en géographie /science de la terre.

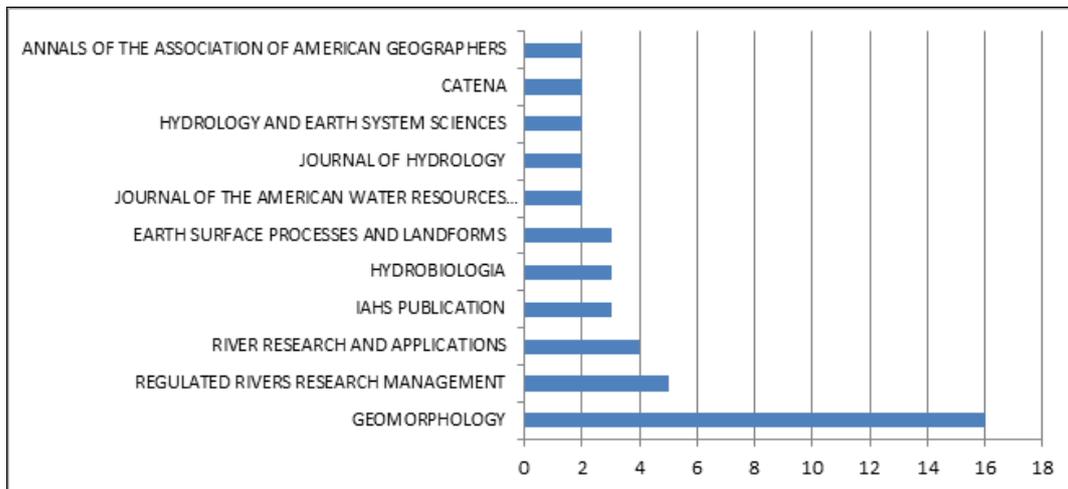


Figure 3 : Répartition des références par principaux titres de revue.

## IV.2 EFFET D'UNE RETENUE

### IV.2.1 Evolution dans une retenue : stockage de l'eau et des sédiments

#### IV.2.1.a- Rappel sur les enjeux et sur les processus.

Pour analyser les effets d'une retenue sur le devenir des sédiments et sur la morphologie des cours d'eau, il faut commencer par analyser les effets des retenues sur les variables de contrôle du transport sédimentaire, à savoir d'une part les caractéristiques hydrologiques, et d'autre part, les concentrations et débits solides. Dans un second temps, il convient d'étudier l'impact de ces effets sur les variables d'ajustement morphologique du réseau hydrographique en aval de la retenue.

Lorsque l'on parle de débit solide, il convient de rappeler la distinction entre sédiments fins et grossiers, ou sur le plan des mécanismes, entre transport de MES et transport de fond. S'il n'y a pas de seuil de diamètre absolu entre les deux puisque la différence entre les deux mécanismes dépend aussi de l'énergie hydraulique (vitesse, turbulence...), on considère que les sédiments grossiers correspondent aux fractions granulométriques allant des sables moyens (>500µm) aux blocs. Précisons également que dans la littérature scientifique, les chiffres des taux d'exportation / de sédimentation sont la plupart du temps globaux et ne font presque jamais la distinction entre fin et grossier.

### ***IV.2.1.b- Méthodes mises en œuvre dans les articles***

#### **IV.2.1.b.i- Pour l'évaluation de l'effet sur les régimes hydrologiques**

L'effet de petits barrages sur les volumes de l'écoulement annuel est généralement estimé en utilisant des mesures directes sur le terrain, des analyses de bilan hydrologiques et/ou d'autres techniques de modélisation, la plupart des études récentes utilisant une approche de modélisation. La modélisation des impacts de petits barrages sur les volumes de débits liquides implique généralement l'ajout d'un composant de stockage à un modèle pluie-débit existant. La méthode la plus simple utilisée est un scénario de réservoirs et déversements, avec des barrages agricoles agissant comme un réservoir supplémentaire dans le bassin versant (par exemple, comme indiqué dans l'adaptation du modèle pluie-débit IHACRES par (Schreider, Jakeman *et al.*, 2002). Les modèles distribués caractérisent l'emplacement et le volume de stockage des barrages dans le bassin versant et simulent le routage des flux provenant des bassins à l'exutoire du bassin versant (pour plus de détail cf. chapitre hydrologie).

#### **IV.2.1.b.ii- Pour l'évaluation de l'effet sur le piégeage des sédiments**

Diverses méthodes existent pour estimer l'efficacité du piégeage, notamment celles basées sur des indices de sédimentation, ou des ratios de la capacité du réservoir sur les entrées ou de la capacité du réservoir sur l'aire du bassin versant (par exemple (Brown, 1944) ; (Brune, 1953) ; (Heinemann, Holt *et al.*, 1973) ; (Heinemann, 1981)). Ces méthodes ont généralement été développées sur les grands réservoirs et ont été jugées valides pour les moyennes et les prévisions à long terme. Cependant, les petits réservoirs ont généralement des caractéristiques géométriques et hydrauliques différentes de ceux sur lesquels les méthodes d'estimation ont été fondées.

Un modèle numérique pour les calculs de l'efficacité des pièges sur les retenues de moins de 1 ha a été développé par (Verstraeten et Poesen, 2001) mais il n'a pas encore été beaucoup utilisé. La mesure directe de carottes de sédiments peut être utilisée pour déduire des valeurs d'efficacité de piège, ou encore la bathymétrie diachronique, mais le processus d'interprétation "reste difficile et contestable" (Verstraeten et Poesen, 2001). La diversité dans les méthodes de mesure peut expliquer, avec la diversité des caractéristiques des bassins versants, la gamme des valeurs de taux de piégeage des sédiments observée pour des petits réservoirs.

L'échelle temporelle de mesure peut également affecter les résultats. Une forte variabilité saisonnière et annuelle de l'efficacité du piégeage a été observée dans certains bassins versants. Par exemple, (Dendy et Cooper, 1984) ont constaté une efficacité moyenne de piégeage de 77% dans un réservoir de 1 ha sur une période de deux ans, avec des valeurs mensuelles variant entre 9 et 100%. D'autres variables influent sur l'efficacité du piégeage comme les volumes de ruissellement lors des événements extrêmes et les caractéristiques de la couverture végétale des sols (Heinemann, Holt *et al.*, 1973), ainsi que la taille, la forme et l'emplacement de la retenues (Yorke, Stamer *et al.*, 1985).

### ***IV.2.1.c- Effets observés, données disponibles, déterminants et indicateurs***

#### **IV.2.1.c.i Modification des caractéristiques hydrologiques**

Les caractéristiques hydrologiques modifiées sont très nombreuses et dépendent de multiples facteurs, souvent liés aux fonctions initiales des ouvrages, aux caractéristiques techniques des aménagements (taille,

morphométrie du réservoir...) ou aux modes de gestion des débits retenus (Brandt, 2000). Les impacts des grands ouvrages sont bien connus et quantifiables, alors que les petites retenues ont généralement été considérées comme peu impactantes sur les plans social et environnemental (Mantel, Hughes *et al.*, 2010). Les cas sont très variables, depuis un barrage qui ne relâche plus d'eau du tout, comme cela peut être le cas d'ouvrages construits pour l'irrigation, jusqu'à d'autres, qui ne modifient que très légèrement les écoulements préexistants, tels que les barrages au fil de l'eau ou à débordement (Csiki et Rhoads, 2010) ou des retenues collinaires dont la petite taille n'est pas suffisante pour le stockage des débits de crue. Ainsi, dans le cas du barrage au fil de l'eau de Livingston sur la Trinity River (Texas), (Phillips, Slattery *et al.*, 2005) ne constatent aucune modification significative des pics de crues annuels ou des débits moyens annuels. Seule une augmentation des débits d'étiage, phénomène courant à l'aval des barrages, mais atténué ici par une augmentation des précipitations depuis la construction de l'infrastructure, est mise en lumière.

Les barrages et retenues sont construits majoritairement pour l'une ou l'autre de ces fonctions : contrôle des inondations, production hydroélectrique, irrigation, alimentation en eau (industrielle ou publique). Même si leurs fonctions diffèrent, ils entraînent en général une perte d'eau dans le chenal, principalement due à l'évaporation des eaux de surface dans les réservoirs ou à l'irrigation ((Ibanez et Prat, 2003) ; (Graf, 2005) ; (Brandt, 2000)). Cependant, dans des cas d'ouvrages complexes dérivant les écoulements vers d'autres bassins versants, la diminution des débits à l'aval d'un barrage peut s'accompagner de perturbations dans les bassins versants voisins qui voient leur débit augmenter (Sammut et Erskine, 1995). Le débit moyen annuel initial de la Kemano River (Canada) a ainsi été multiplié par 2,4 durant les 10 premières années après son aménagement en 1954, et triplé sur une période de 30 ans (Church, 1995).

### ***Les paramètres hydrologiques affectés***

Pour déterminer quelles sont les caractéristiques hydrologiques principalement affectées à l'aval des barrages, (Magilligan et Nislow, 2005) ont utilisé l'IHA (*Indicators of Hydrologic Alteration*) établi par The Nature Conservancy (Richter, Baumgartner *et al.*, 1996) à partir de l'étude de différents types de régimes hydrologiques et climatiques, sur l'ensemble des Etats Unis (21 sites). Ce modèle utilise des débits moyens journaliers et calcule 32 indices décrivant le régime hydrologique, groupés en 5 catégories : (i) amplitude, (ii) amplitude et durée des conditions extrêmes annuelles, (iii) périodicité (*Timing*) de ces conditions extrêmes annuelles, (iv) fréquence et durée des pulsations fortes et faibles, (v) taux et fréquences des variations de débits. Chacun de ces indices peut être insensible aux effets des régulations, mais ils ont été définis pour prendre en compte la plupart des perturbations hydrologiques correspondant à des impacts écologiques potentiels. Ces auteurs ont ainsi démontré que les barrages ont des effets sur l'ensemble de la gamme des caractéristiques hydrologiques mesurées par l'IHA. De même, sur la Snowy River en aval de l'aménagement hydro-électrique de Snowy Mountains (Australie), (Erskine, Terrazzolo *et al.*, 1999) cité par (Rollet, Piegay *et al.*, 2014) ont observé une réduction considérable des débits moyens annuels, mensuels et journaliers, ainsi que les pics de crue.

Si les caractéristiques hydrologiques modifiées sont nombreuses et variables selon les cas étudiés, les événements extrêmes (étiages et crues) sont les principaux paramètres affectés, à la fois, quantitativement (amplitude) et qualitativement (variabilité temporelle).

Le changement le plus commun concerne **l'amplitude et la fréquence des débits extrêmes**, maximum et minimum. (Magilligan et Nislow, 2005) ont, par exemple, noté que dans la majorité des cas étudiés, les débits minimum de 1 à 90 jours augmentent significativement après la construction de barrages, alors que les débits maximum de 1 à 7 jours sont considérablement réduits (réduction de 55 % du débit journalier maximum annuel). D'autres auteurs ont également observé ce phénomène (Sherrard et Erskine, 1991) cité par (Gilvear, 2004) constatent ainsi une réduction de 94 % des débits moyens journaliers et des pics de crue instantanés à l'aval du barrage de Mangrove Creek en Australie. Sur la Green River (États-Unis), bien que le débit moyen annuel reste inchangé en aval du barrage de Flaming Gorge, l'amplitude des crues a été fortement réduite

(Grams et Schmidt, 2005). De même, sur la Fortun River (Australie), une réduction de l'ordre de 35 % de la fréquence des crues de grande amplitude a été observée après régulation (Fergus, 1997).

Si ces débits extrêmes sont affectés quantitativement, **ils le sont également qualitativement**, particulièrement dans le cas du fonctionnement par éclusées, où les ouvrages électriques s'adaptent à une demande énergétique réglée sur différents pas de temps (Bravard et Petts, 1993).

Les modifications hydrologiques concernent également les débits moyens. Par exemple, (Magilligan et Nislow, 2005) ont constaté une augmentation de la variabilité des hydrogrammes sur l'ensemble du territoire nord-américain, particulièrement significative au niveau des débits moyens journaliers. A l'échelle quotidienne, les besoins hydroélectriques entraînent une première variabilité entre des débits diurnes importants et des débits nocturnes plus faibles. De plus, des fluctuations plus brutales au niveau des débits diurnes sont fréquemment constatées (Petts, 1984). Dans le cas de la rivière North Tyne, en aval du barrage de Kielder, des variations de hauteur d'eau supérieures à 0,6 mètre sont ainsi enregistrées au moment des pics de production hydroélectrique (Sear, 1995). L'ampleur de ces fluctuations peut être atténuée par des ouvrages de compensation, comme celui de Seyssel, sur le Haut-Rhône, en aval du barrage de Génissiat, qui commande le fonctionnement d'une chaîne d'éclusées à l'aval (Bravard et Petts, 1993).

Enfin, à l'échelle annuelle, les grands réservoirs sont susceptibles d'imposer des modalités d'écoulement saisonnier très différentes des modalités naturelles (Bravard et Petts, 1993). Ils reconstituent généralement leurs stocks d'eau durant les saisons pluvieuses pour les utiliser lors des saisons plus sèches. Ce phénomène est essentiellement visible à l'échelle des débits moyens mensuels, les débits printaniers tendant à diminuer alors que les débits automnaux ou hivernaux augmentent ((Fergus, 1997) ; (Assani, Gravel *et al.*, 2005) ; (Magilligan et Nislow, 2005)). Dans le cas de la Fortun River, où l'ensemble des débits de crue ont été réduits, les crues d'automne ont été moins affectées que les crues de printemps ou d'été (mai à juillet) (Fergus, 1997).

### *L'influence du type d'infrastructure*

Si les perturbations des écoulements engendrées par les barrages sont aujourd'hui relativement bien connues, il demeure délicat d'établir un lien entre leur intensité et le type d'infrastructure à l'origine de ces modifications. Cette relation est en effet masquée par d'autres paramètres (différences de climats ou de gestion des opérations) qui interdisent toute forme de généralisation (Magilligan et Nislow, 2005). Ces auteurs ont cependant dégagé trois règles principales en fonction du paramètre hydrologique considéré :

- **la réduction des pics de crue**, l'impact le plus courant, est indépendante des types de barrage ou des régions hydrologiques considérées. L'amplitude des crues après régulation semble principalement liée aux conditions de remplissage du réservoir précédent les crues. Si l'évènement se produit lorsque les réservoirs sont pleins, elles ne seront que faiblement écrêtées. Cette situation est par exemple rencontrée sur la Fortun River (Norvège) lors de crues automnales (Fergus, 1997) ;
- **l'augmentation de la variabilité temporelle des débits** tend en revanche plutôt à se produire dans les régions hydro-climatiques caractérisées par une seule saison de forte hydraulité (fonte des neiges par exemple), ponctuée alors de périodes de stockage et de lâchers dans le cadre de production hydroélectrique ou du contrôle des crues ;
- les **modifications des débits mensuels** semblent être plus dépendantes des types de barrage que les autres paramètres. Pour les petits barrages, dont l'objectif principal est le contrôle des inondations (ex : Crooked Creek en Pennsylvanie), les régimes d'écoulement diffèrent peu avant et après les régulations. En revanche, les ouvrages ayant pour fonction unique (ou principale) la production hydroélectrique affectent visiblement les débits mensuels sur une grande partie de l'année. Ainsi, dans le cas de la Trinity River (Californie), aménagée pour l'irrigation et la production hydroélectrique, seul le débit mensuel d'octobre semble peu modifié (Magilligan et Nislow, 2005).

Les résultats des études sur **petites retenues** sont également variés et sont influencés par les caractéristiques locales de captage des eaux de ruissellement, de volume d'eau stockée et de volume d'eau extraite. Cependant, les études montrent en général une diminution du volume annuel des écoulements, une diminution des débits de pointe et du débit d'étiage, une augmentation de la durée et la fréquence des étiages et une diminution de la variabilité des flux par rapport à la situation avant retenue (par exemple (Frickel, 1972); Srikanthan et Neil, 1989; (Tarboton et Schulze, 1991)). Les changements de régime des écoulements peuvent également conduire à des flux à des périodes qui étaient auparavant sèches (Kennon, 1966). Cette régulation des flux va diminuer le volume annuel des écoulements en raison de l'infiltration supplémentaire et des pertes par évaporation. En Australie, les pertes par évaporation de l'eau stockée peuvent atteindre 70% (Neal, Shephard *et al.*, 2000) et sur la zone des plaines de Ruataniwha en Nouvelle-Zélande, il a été estimé que l'infiltration et l'évaporation peuvent conduire à des pertes de 50% du stockage total des retenues sur une saison d'été (McGuinness, 1984). Le prélèvement de l'eau des retenues ajoute encore à la perte globale des écoulements. (Finlayson, Nevill *et al.*, Neal, Shephard *et al.*, 2000).

Les résultats d'études de terrain aussi bien que de modélisation indiquent que des retenues agricoles peuvent réduire significativement l'écoulement, bien que les volumes varient selon les conditions spécifiques de captage. (Thompson, 2012) a recensé des résultats de réductions mesurées et modélisées liées à la construction de petites retenues. La comparaison directe entre les études est difficile à faire du fait des différences de présentation des données et des résultats selon les études. Cependant, les études montrent des réductions de volumes variant de zéro à 40 % du flux annuel moyen ou médian (dans des conditions de climat moyennes). Il faut noter que les études sur les retenues les plus petites ont été entreprises dans des régions arides ou semi-arides, ce qui induit probablement un biais en faveur de pertes plus importantes. La majorité des études en Australie sont basées sur le même modèle TEDI (Tools for Estimating Farm Dam Impacts; (Merz, 2004). La variabilité climatique et la saisonnalité ont également une influence sur la régulation des régimes de flux. Les petits barrages ont une influence sur les flux plus importante pendant les saisons sèches et plus forte les années sèches que les années moyennes. (Savadamuthu, 2003) a trouvé une réduction maximale des flux de 72 % pour un été sec (comparé à une réduction de 7 % en hiver) dans le captage Finnis Supérieur de l'Australie-Méridionale. Stephens (1964) a trouvé que l'influence des retenues agricoles sur l'écoulement était faible dans les parties humides du Texas, tandis que les effets étaient importants dans les zones sèches du Texas, particulièrement pour les années de sécheresse. (Mcmurray, 2006) trouve un résultat similaire par modélisation pour des retenues agricoles en Australie du sud.

A côté de la diminution globale des volumes d'écoulement annuels, les retenues agricoles affectent la variabilité de flux en diminuant des pics de crues (Tarboton et Schulze, 1991). (Frickel, 1972) a mesuré une réduction de 45 % du pic de crue dans un captage au Montana où 75 % de l'aire d'alimentation est contrôlés par des réservoirs.

À moins qu'une structure de contournement n'existe pour permettre à l'écoulement de contourner le barrage quand le flux est au-dessous d'un certain volume, des petites retenues agricoles stockent la totalité de l'écoulement amont jusqu'à ce que la retenue soit pleine. (Neal *et al.*, 2000) ont constaté que la présence de retenues agricoles augmente la fréquence, la durée et la variabilité des étiages. Les retenues agricoles retardent également en aval le flux au début de la saison humide quand les retenues se remplissent lentement (Mcmurray, 2006).

Les modélisations utilisant TEDI ont montré des diminutions aussi bien des Q10 que des Q90 (Neal *et al.*, 2000). Dans la plupart des cas, la diminution relative du Q90 est plus importante que la diminution du Q10. Ceci est probablement lié au fait que les fortes précipitations se produisent pendant la saison d'hiver. Dans ces cas, des flux maximaux arrivent quand les retenues sont pleines ce qui limite leur influence sur les débits forts (Neal *et al.*, 2000). Les résultats seraient probablement différents dans des zones où des fortes précipitations se produisent pendant toute l'année.

### IV.2.1.c.ii Effets sur le transfert des sédiments

La présence de barrages de toutes tailles au sein d'un bassin versant perturbe le mouvement des sédiments par piégeage dans des réservoirs, réduisant ainsi le flux total de sédiments à l'exutoire d'un bassin ((Olley et Wallbrink, 2004) ; (Yang, Milliman *et al.*, 2011)). Le volume total des sédiments déposés dans un réservoir dépend de l'érosion brute en amont du bassin, de la proportion de sédiments arrivant au réservoir et des caractéristiques de sédimentation des sédiments à l'intérieur du réservoir. Dans la majorité des cas, la tête du bassin versant fournit plus de 75 % de la charge\* de fond des cours d'eau (Church, 2002) ; (Arp, Schmidt *et al.*, 2007). La proportion de sédiments venant de l'amont du bassin versant ne doit cependant pas être surestimée et il est nécessaire de considérer d'autres facteurs responsables de cette fourniture sédimentaire. Ainsi dans les cas où le bétail a un accès direct à la retenue, l'érosion des berges par le bétail peut augmenter les taux de sédimentation dans la retenue. Dans certaines conditions, des apports éoliens et les sédiments provenant de l'érosion des berges par le battillage peuvent également contribuer aux apports de sédiments dans la retenue. (Lloyd, Bishop *et al.*, 1998) ont estimé que 37%, 41% et 85% respectivement des sédiments dans les trois retenues de leur étude proviennent de l'érosion des berges de la retenue.

La production de sédiments et son transport depuis la zone source jusqu'à son point de dépôt dépendent de nombreuses variables, notamment les caractéristiques de précipitations, la géologie, la topographie et l'occupation du sol. L'essentiel du transport des sédiments dans un bassin versant se produit pendant les épisodes pluvieux les plus importants (Yorke *et al.*, 1985). La production de sédiments sera plus élevée dans les bassins versants agricoles (par rapport aux bassins versants boisés), car une plus grande proportion de la superficie totale est couverte par un sol nu, cultivé, et des pâturages (Neil et Mazari, 1993). Une étude néo-zélandaise par (Fahey et Marden, 2000) a ainsi trouvé que l'apport de sédiments depuis des pâturages était environ 2,5 fois plus grand que depuis une forêt de plantation. De nombreuses autres études indiquent des rapports allant jusqu'à 10 ou 20 fois plus de sédiments émis pour des sols nus ou en culture peu couvrante par rapport à des couverts permanents (Cerdan, Govers *et al.*, 2010). Les bassins les plus grands auront un piégeage des sédiments plus important et des taux d'exportation des sédiments proportionnellement plus faibles par rapport aux petits bassins versants (Cooke et Doornkamp, 1990).

Les barrages non équipés de rampes à sédiments interrompent partiellement ou, dans la plupart des cas concernant la charge de fond, totalement le transfert de cette charge vers l'aval ((Sherrard et Erskine, 1991) ; (Ibanez, Prat *et al.*, 1996) ; (Phillips, Slattery *et al.*, 2005) ; (Vericat et Batalla, 2006)) et coupent ainsi les connexions entre les cours aval et leur bassin versant. A l'échelle mondiale, plus de 50 % des flux sédimentaires des bassins régulés sont piégés par des barrages (Vorosmarty, Meybeck *et al.*, 2003). L'effet « point dur » des ouvrages en travers affecte avant tout le transport par charriage mais aussi le transport en suspension ((Petts, 1980) ; (Kondolf, 1997)). Les éléments charriés qui transitent dans le chenal sont totalement bloqués ((Ibanez *et al.*, 1996) ; (Vericat et Batalla, 2006)) et, dans le même temps, la forte réduction des vitesses d'écoulement en amont des ouvrages est à l'origine d'une rupture de charge favorisant le dépôt des particules fines par décantation. Le transport de la charge en suspension peut ainsi être réduit de 65 % (Nilsson, 1976) voire 90 % (Vericat et Batalla, 2006) et seules les particules les plus fines, qui restent en suspension dans la colonne d'eau, atteignent l'aval de l'ouvrage. La sursédimentation observable en amont de certains ouvrages mène à un engrèvement progressif de la retenue – et à son éventuel colmatage par les particules fines – entraînant une diminution de sa capacité de stockage. Selon (Buttling et Shaw, 1973), ce comblement peut réduire la capacité d'une retenue de 1% par an, ce qui à terme favorise l'augmentation de la fréquence des débordements. Si le piégeage des sédiments se produit principalement dans les retenues, les ouvrages en travers du chenal (ex. seuils de moulin) peuvent également favoriser le stockage des sédiments fins dans la plaine alluviale (Schenk et Hupp, 2009).

Le taux de piégeage dépend ainsi 1) de la granulométrie des sédiments transportés entrant dans la retenue et 2) du temps de séjour de l'eau, lui-même dépendant des caractéristiques de l'écoulement et de la géométrie du chenal (Verstraeten et Poesen, 2001). Il résulte également dans une certaine mesure des caractéristiques de

l'ouvrage (état général, présence de brèches...), mais aussi de la réalisation et de la fréquence d'éventuels curages. L'influence de **la taille des ouvrages sur cette capacité** est relativement discutée. (Ibanez *et al.*, 1996) estiment que la plupart des gros ouvrages piègent plus de 99 % de la charge totale alors que (Williams et Wolman, 1984) indiquent que les plus petites retenues présentent de plus faibles valeurs. (Vanoni, 1975) estime que la plupart des grands réservoirs piègent plus de 90% de la charge de sédiments entrant, et des études ultérieures sur les grands barrages ont situé ce chiffre entre 50 et 100% (par exemple (Williams et Wolman, 1984), (Olley et Wasson, 2003), (Toniolo, Parker *et al.*, 2007)).

De la même façon, des études sur des structures plus petites montrent une gamme similaire de valeurs d'efficacité de piégeage. (Cooper et Knight, 1990) ont ainsi résumé trois études sur des petits réservoirs comme ayant une efficacité du piège de 60 à 100%. Dans une étude de petits barrages agricoles au Zimbabwe et en Tanzanie, il a été constaté que les réservoirs piègent la quasi-totalité de la charge de sédiments entrant (Lawrence, 2004). Cependant, certains auteurs ont observé des valeurs faibles pour les petits ouvrages. Ainsi, (Yorke *et al.*, 1985) ont constaté une efficacité combinée de seulement 35% pour 6 réservoirs avec des barrages de 2 à 4 m de hauteur sur la rivière Schuylkill, Pennsylvania. De même, (Srikanthan et Neil, 1989) ont estimé l'efficacité du piégeage de petits barrages agricoles dans deux bassins versants en Nouvelle-Galles du Sud, en Australie, à 47% et 59%, bien que la présence d'un grand barrage à la sortie de bassin versant ait accru l'efficacité du piégeage (89%). Une étude plus récente menée dans la même région de la Nouvelle-Galles du Sud mais par modélisation a conduit à des résultats similaires, avec des barrages agricoles dont l'efficacité du piégeage a été estimée à 64% (Verstraeten et Prosser, 2008). Ainsi, selon (Csiki et Rhoads, 2010) l'accumulation sédimentaire en amont des ouvrages de faible hauteur, est très variable : dans certains cas elle est inexistante, dans d'autres, le piégeage se poursuit jusqu'à ce que l'ouvrage soit « plein » et que la cote du lit en amont rejoigne la cote de la crête de l'ouvrage. En aval des ouvrages en travers, les écoulements présentent classiquement un déficit sédimentaire potentiellement fort. Les petits ouvrages, de type seuils en rivière, sont moins limitants que les barrages en matière de transport solide puisqu'ils restituent quasiment en permanence une partie (au moins) des sédiments en suspension. Dans le cas des rivières où le transport en suspension est majoritaire, le déficit sédimentaire en aval est donc atténué (Magilligan, Salant *et al.*, 2006). De plus, si les ouvrages sont « pleins », une partie du charriage peut même être restituée vers l'aval. D'une certaine manière ces ouvrages deviennent alors de fait « transparents » au transport solide. Par exemple, (Capanni, 2011) n'a observé aucun stockage récent en amont d'un barrage ancien (plus de 130 ans) de 4 m de haut situé sur un fleuve côtier du Var.

La **gestion des ouvrages** est également à prendre en compte. Ainsi, certains grands ouvrages sont conçus de manière à rester perméables au débit solide (Van Effenterre, 1982) ; (Phillips, Slattery *et al.*, 2005); (Rollet, 2007). Outre la bonne circulation du flux sédimentaire, la transparence des ouvrages aux sédiments peut s'avérer capitale dans le cadre du turbinage des eaux (Le Gourières, 2009). Selon la dimension des ouvrages, différentes mesures d'accompagnement ou modes de gestion peuvent permettre, dans une certaine mesure, de restaurer le débit solide des cours d'eau ((Grier, 2003) ; (Bouvard, 2004)) : chasse ou vidange de la retenue lors des périodes de crue, hydrocurage ou curage mécanique des retenues, dévasement par pompage, mise en place de canaux de dérivation des sédiments. Les retenues collinaires peuvent également être curées (Mathieu *et al.*, 2000), elles sont aussi parfois abandonnées et revégétalisées.

#### ***IV.2.1.d- Analyse critique ou discussion***

Un grand nombre d'études existent et conduisent à des résultats convergents, malgré la variété des situations et de la taille des retenues étudiées, pour décrire l'effet individuel des retenues sur la modification des régimes hydrologiques et le piégeage des sédiments. Ainsi, le taux de piégeage peut être considéré comme proche de 100% en ce qui concerne les matériaux grossiers transportés par charriage ou saltation, alors qu'il est plus variable pour les MES, bien que le plus souvent supérieur à 90%, sauf pour certains types d'ouvrages (en dérivation ou seuil à débordement permanent) ou pour des gestions spécifiques (retenues de loisir toujours

pleines par exemple) pour lesquels les valeurs de piégeage peuvent être inférieures. Aucune étude n'aborde la question des sédiments biogéniques du point de vue quantitatif. Ils représentent toutefois certainement en général une proportion tout à fait minoritaire en termes de masse de sédiments. Selon l'usage et le mode de gestion de la retenue, une partie des sédiments piégés peut être relarguée volontairement lors d'épisodes de vidange, de chasse ou de curage. À la diversité des modifications dans les variables de contrôle répondent différents ajustements morphologiques.

## IV.2.2 Hydromorphologie dans le réseau hydrographique aval

### IV.2.2.a-Rappel sur les enjeux et sur les processus

Dans la mesure où les retenues modifient les débits liquides et stockent des sédiments, il est logique qu'elles modifient le fonctionnement morphologique des tronçons fluviaux situés en aval. Pour que cette modification soit importante, il faut (1) que la modification des débits affecte les débits morphogènes et les débits de mise en mouvement des particules, (2) que les retenues bloquent la charge de fond (c'est-à-dire les sédiments d'une taille équivalente à celle qui compose le lit en aval) et (3) que les tronçons aval possèdent une capacité d'ajustement. Les débits liquides dont il sera question dans la suite de cette partie désignent uniquement les débits morphogènes, qui seuls importent pour l'ajustement morphologique du cours d'eau.

Rappelons qu'à l'échelle d'un tronçon fluvial, si les quantités de sédiments (constitutifs de la charge de fond) entrants et sortants sont identiques, le tronçon est considéré comme en équilibre sédimentaire. Si les quantités entrantes dans le tronçon sont supérieures aux quantités sortantes, alors le bilan sédimentaire positif et cela se traduit par une accumulation des matériaux dans le lit qui induit un exhaussement\*. Si les quantités entrantes sont inférieures aux quantités sortantes, le bilan sédimentaire est négatif (situation de déstockage sédimentaire). La conséquence principale de ce bilan négatif est l'incision du lit du cours d'eau.

### IV.2.2.b- Méthodes mises en œuvre en hydromorphologie

L'ajustement morphologique des cours d'eau en aval de retenues a été principalement analysé par le développement de modèles conceptuels des ajustements potentiels (Marren, Grove *et al.*, 2014), par des analyses diachroniques de la forme (largeur, style fluvial) des cours d'eau sur la base de photographies aériennes (Lyons, Pucherelli *et al.*, 1992) et par la combinaison de données *in situ* (mesures topographiques répétées) et de modèles de transport solide (Salant, Renshaw *et al.*, 2006).

### IV.2.2.c- Effets observés, données disponibles, déterminants et indicateurs

#### IV.2.2.c.i- Les différents types d'ajustements

##### Généralités

La grande variabilité des réponses morphologiques reflète la complexité des interactions entre le degré d'altération des régimes de crue, de la fréquence des crues capables de transporter les sédiments et de la quantité de sédiments entrant dans le chenal par rapport aux volumes piégés dans les réservoirs ((Petts, 1979); (Williams et Wolman, 1984); (Lyons, Pucherelli *et al.*, 1992); (Gaeuman *et al.*, 2005); (Kondolf et Larson, 1995); (Kondolf, 1997); (Friedman, Osterkamp *et al.*, 1998); (Brandt, 2000); (Phillips, Slattery *et al.*, 2005)).

Historiquement, l'étude de l'impact morphologique des barrages a été menée en très grande majorité sur les grands ouvrages, et ceux de faible hauteur ont fait l'objet de moins d'attention et d'une façon plus récente ((Poff et Hart, 2002) ; (Skalak, Pizzuto *et al.*, 2009) ; (Csiki et Rhoads, 2010)). De plus, l'impact des ouvrages a surtout été étudié sur le chenal, la prise en compte de la plaine alluviale est plus récente (Marren, Grove *et al.*, 2014). Or celle-ci est également influencée par les ouvrages, notamment dans le sens d'une diminution de l'accrétion\* et du remaniement latéral.

Les ajustements géomorphologiques peuvent aussi concerner différentes parties du système fluvial qui vont répondre sur différents lapses de temps et à différents degrés (Brandt, 2000). A la fin des années 1970, un premier modèle conceptuel, fondé sur quatre scénarios, élaboré à partir du schéma conceptuel de (Schumm, 1969), présente les différents états ajustés du chenal résultant de différentes combinaisons de modifications des débits liquides et solides (Figure 4) (Petts et Gurnell, 2005).

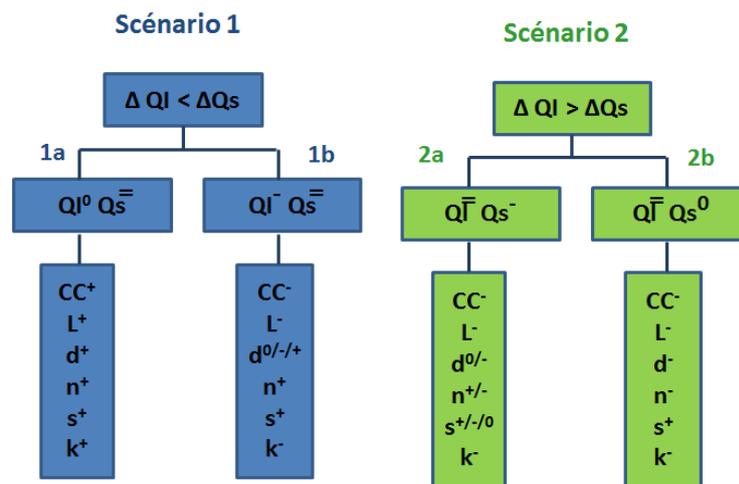


Figure 4 : Style d'ajustement du chenal à l'aval d'un barrage en réponse aux modifications relatives des écoulements (Ql) et des entrées de sédiments (Qs), lorsque la métamorphose fluviale est dominée par une réduction de la charge solide, scénario 1, et une réduction des débits, scénario 2. Les conditions extrêmes sont représentées dans les cas 1a et 2b et l'ensemble des configurations (1a, 1b, 2a, 2b) représentent des séquences hypothétiques de changements du chenal en aval d'un barrage. A noter cependant que l'importance des modifications du chenal est décroissante vers l'aval ainsi que l'impact du barrage sur les débits liquides et solides. Les indices indiquent l'importance des ajustements : 0, pas de changements significatifs, +, accroissement, - réduction et = réduction majeure. Les variables morphologiques sont : CC-capacité du chenal (i.e. la dimension de la section mouillée), L-largeur, d-profondeur, n-rugosité, s-pente et k-capacité de transport, (d'après Petts et Gurnell, 2005 basé sur Schumm, 1969).

**Le scénario 1** caractérise un cours d'eau enregistrant une forte variation de la charge sédimentaire et/ou avec une faible réduction des débits de crue par le barrage. Dans ce cas, l'installation de la végétation est lente et sa croissance est minimale. Dans des cas extrêmes (**scénario 1a**), particulièrement dans des cours d'eau à charge sableuse, l'eau claire relâchée par les barrages entraîne l'incision du chenal. Cependant, dans la plupart des cas, les ouvrages affectent l'amplitude des crues (**scénario 1b**). Ainsi, et spécialement dans le cas de rivières à méandres et à charge grossière, le cours d'eau connaît une augmentation de sa pente à la suite de l'incision de son lit, alors que la sédimentation latérale contribue à la construction de nouvelles terrasses dont l'altitude est inférieure aux précédentes, réduisant ainsi la largeur du chenal.

**Le scénario 2** illustre les impacts des barrages sur les cours d'eau dont la variation de charge sédimentaire est limitée, mais où le laminage des crues est très significatif. Dans ce cas, l'ajustement du chenal est caractérisé par une réduction de largeur et de **la capacité de transport**. Celle-ci correspond au débit solide maximum compte tenu des caractéristiques moyennes de ces sédiments et des conditions hydrauliques.

Une succession des scénarios (1a-1b-2a-2b) peut être observée, à l'aval d'un barrage, le long d'un même tronçon. Elle peut être également recomposée, par exemple sur des tronçons comportant des berges facilement érodées (2b-1a-1b-2a-2b) ou encore à l'aval d'affluents (1b-2b-2a-1b).

Dans des contextes très particuliers, certains auteurs ont pu étudier séparément les effets liés aux modifications des débits liquides d'une part et des débits solides d'autre part. Ainsi (Church, 1995) est-il parvenu à analyser les effets induits uniquement par la modification des débits sur la *Peace River* (Canada). Celle-ci a été aménagée en 1967 pour la production hydroélectrique, dans un contexte où la fourniture sédimentaire n'avait pas été fortement altérée, mais où les pics de crues ont été fortement réduits bien que le débit moyen annuel soit inchangé. Les compétences de transport étant devenues quasiment nulles à la suite de l'écrêtement des pics de crue, aucune incision du lit n'a été constatée. Dans les secteurs à charge de fond grossière, l'auteur observe une stabilisation du tronçon à l'aval du barrage et une accumulation de granulats à la jonction des principaux affluents entraînant la formation d'un profil en escalier. Dans les secteurs sableux de ce même cours d'eau, le sable pouvant encore être transporté, l'auteur observe à la fois un exhaussement et une rétraction\* du chenal par accumulations latérales. (Baker *et al.*, 2011) ont étudié l'impact de retenues de diversion et la réduction de débit consécutif sur 13 cours d'eau de montagne dans les Rocky Mountains aux USA. La réduction des capacités de transport en aval des ouvrages a conduit dans tous les cas à une accumulation de sédiments fins en aval (Baker, Bledsoe *et al.*, 2011).

A l'inverse, (Phillips, Slattery *et al.*, 2005) ont pu examiner les effets de la réduction d'apports en sédiments alors que les conditions d'écoulements sont inchangées. L'incision, l'élargissement et la diminution de la pente du lit du chenal, ainsi que l'augmentation de la taille des sédiments, sont évidents sur 60 km de cours d'eau.

Les ajustements affectent ainsi à la fois l'évolution verticale et latérale des lits fluviaux.

### ***Évolution verticale du lit mineur***

La mobilité verticale regroupe les processus d'incision, à condition que les écoulements restent suffisants pour maintenir une capacité de transport, ou d'exhaussement du lit lorsque les débits régulés restent inférieurs aux entrées de sédiments provenant de l'érosion latérale et des affluents ((Williams et Wolman, 1984) ; (Church, 1995)). (Wolman, 1967) suggère que la fluctuation des réponses des chenaux est liée à l'amplitude des modifications des écoulements. Il observe ainsi que si le rapport entre les débits morphogènes, avant et après régulation, égale ou excède 0,9, les cours d'eau connaissent une incision, alors que s'il est inférieur à 0,75, les lits s'exhausseront. Les réponses sont cependant variables sur un même cours d'eau selon les secteurs, mais aussi en fonction de la résistance du chenal et, donc, du temps nécessaire au passage d'un cycle d'incision à un cycle d'exhaussement et inversement.

L'incision d'un cours d'eau est particulièrement développée lorsque les ouvrages sont trop petits pour jouer un rôle sur l'écrêtement des crues, mais suffisamment conséquents pour piéger les sédiments, les capacités de transport du cours d'eau sont maintenues mais les apports de sédiments sont considérablement réduits. A la suite de (Galay, 1983) et de (Williams et Wolman, 1984), (Kondolf, 1997) a ainsi décrit le phénomène de « *Hungry water* » : l'expression de l'énergie excédentaire des eaux relâchées par les barrages dans le chenal se traduit par une incision et un pavage progressif du lit, qui concernent au moins les sections proches du barrage. L'accroissement de la taille médiane des particules sur un site peut dépasser un facteur 100, selon la taille et le nombre de grosses particules présentes sur le site (Williams et Wolman, 1984). Ce processus d'enfoncement se poursuit jusqu'à ce que la conjugaison de plusieurs facteurs stabilise le lit du chenal : rencontre de points durs tels que les seuils ou les affleurements de substratum, aboutissement des processus de pavage, contrôle par le niveau de base en aval (présence d'océan, de lac, de barrage...), réduction des compétences des écoulements (réduction des pentes suite aux incisions progressives, élargissement du chenal...), apports suffisants de

sédiments, développement de la végétation (Williams et Wolman, 1984). Il en résulte ainsi typiquement un rétrécissement du chenal.

### ***Evolution en plan de la bande active***

De nombreuses études, théoriques, expérimentales ou *in situ* ont montré que la modification des taux de sinuosité (dans le cas de rivières à méandres), la diminution de la variabilité des largeurs ou de la mobilité en plan pouvaient être la première réponse d'un chenal à la construction d'un barrage ((Church, 1995) ; (Sear, 1995) ; (Friedman *et al.*, 1998) ; (Gaeuman, Schmidt *et al.*, 2005) ; (Phillips, Slattery *et al.*, 2005)). La rétraction du chenal a été, par exemple, de l'ordre de 10 à 30 % en moyenne sur la Green River (États-Unis) (Grams et Schmidt, 2005). Ces derniers auteurs montrent que l'ampleur de cette rétraction n'est pas linéairement corrélée à la distance aval au barrage, mais est liée au degré de réduction des pics de crue induite par le barrage, à la modification des apports sédimentaires et aux caractéristiques géomorphologiques locales. Dans leur étude de cas, le chenal ne s'est pas incisé et la rétraction est liée en partie aux dépôts de sédiments fins formant des incrustations dans la plaine alluviale et en partie aux dépôts abandonnés avant le barrage, stabilisés à présent par le développement de la végétation. De même, (Sherrard et Erskine, 1991) observent qu'à l'aval du barrage de Mangrove Creek (Australie), sur un cours d'eau sablo-graveleux, la contraction du chenal est le résultat de la formation de bancs dans le chenal, rapidement stabilisés par la colonisation rapide et le développement d'une végétation arbustive (*Leptospermum polygalifolium*). (Friedman *et al.*, 1998) présentent également le cas de cours d'eau des grandes plaines où les deux processus dominants sont la rétraction et la perte de mobilité latérale. Le premier processus s'exprime préférentiellement dans le cas de rivières en tresses, alors que le second caractérise les rivières à méandres à charge sableuse. Dans des contextes de rivière à méandres où les berges sont cohésives, les processus d'incision engendrent souvent une stabilisation latérale du lit, et donc une réduction des apports latéraux de sédiments dans le reste du cours d'eau (Friedman *et al.*, 1998). Les deux phénomènes s'entretiennent ainsi par un processus de rétroaction positive.

(Brandt, 2000) propose de synthétiser l'ensemble des ajustements possibles à l'aide d'une typologie des effets morphologiques des barrages en neuf classes (Figure 5).

	charge < capacité	charge = capacité	charge > capacité
QI réduits	Cas 1 	Cas 2 	Cas 3 
QI non modifiés	Cas 4 	Cas 5 	Cas 6 
QI augmentés	Cas 7 	Cas 8 	Cas 9 

Figure 5 : Schémas des ajustements morphologiques possibles sur des sections en travers après une modification des débits liquides (QI), et de la relation entre la charge disponible dans le chenal et les capacités de transport de ce dernier. Les traits gris correspondent aux sections en travers avant la construction du barrage, et les noirs après. A noter que dans le cas 1, il se peut que l'incision ne se produise pas si la réduction du débit ne permet plus ni l'érosion, ni le transport du matériel du lit (d'après Brandt, 2000a).

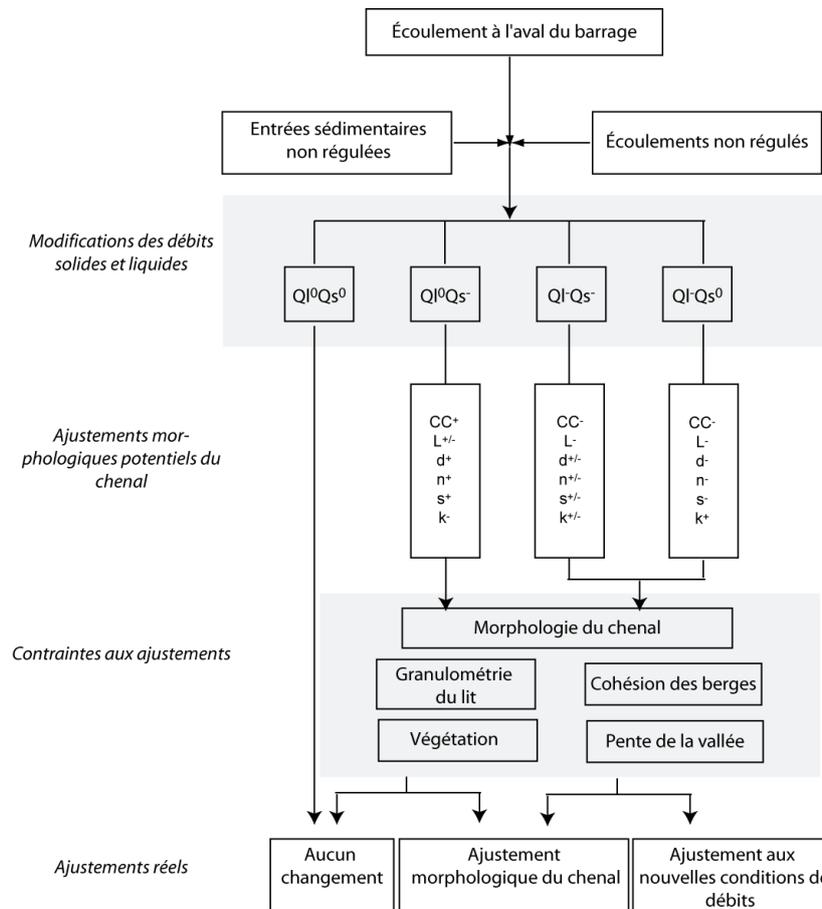
Cette classification est établie à partir de deux entrées différentes, la nature de la modification des écoulements et le rapport entre la charge disponible et la capacité de transport. Il apparaît cependant que, pour chaque correspondance, plusieurs ajustements sont possibles, ce qui tend à démontrer que d'autres paramètres sont à intégrer, tels que la distribution granulométrique des sédiments entrant dans le système ou la sensibilité des berges et du lit à l'érosion.

Pour conclure, les interactions complexes des différents processus en œuvre couplées à la diversité des bassins versants rendent difficiles l'établissement d'un seul modèle simple de réponse morphologique des cours d'eau à la régulation. Ainsi, dans certains contextes, notamment dans les secteurs de faible énergie, les ajustements sont parfois limités voire négligeables (Magilligan, Haynie *et al.*, 2008) et, dans de nombreux cas, les changements intervenus après la régulation par de grands ouvrages montrent des résultats opposés ; (Ligon, Dietrich *et al.*, 1995) ont ainsi documenté une métamorphose d'un chenal en tresse vers un chenal unique alors que (Merritt et Cooper, 2000) ont observé l'inverse, où un cours d'eau profond à méandres a adopté un style en tresses 37 ans après aménagement d'ouvrage.

#### IV.2.2.c.ii- Les contraintes aux ajustements

Hormis la relation entre  $Q_s$  et  $Q_l$ , de nombreux facteurs, internes et externes au chenal, ont potentiellement la capacité d'orienter ou d'influencer l'ajustement morphologique des cours d'eau (Grams et Schmidt, 2005). Susceptibles de limiter ou de favoriser les ajustements potentiels, ceux-ci ont été intégrés dans un schéma

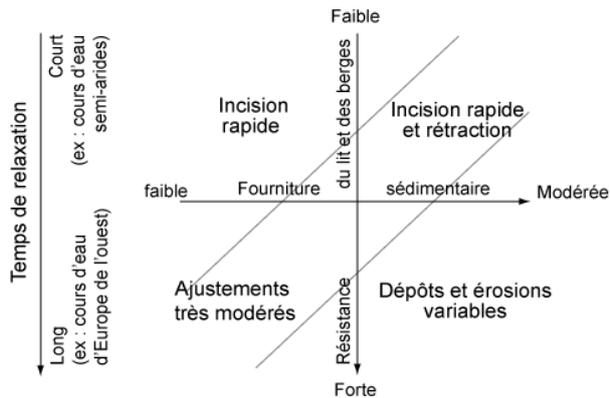
antérieur proposé par (Petts, 1979) permettant le passage de l'analyse des ajustements potentiels à l'analyse des ajustements réels (Figure 6).



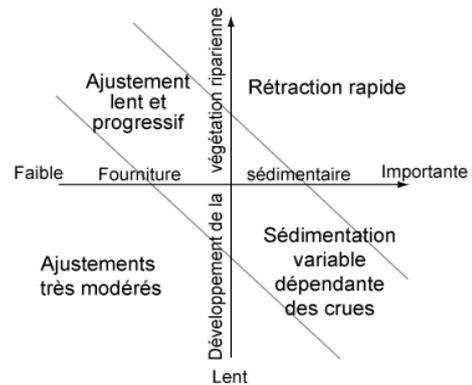
**Figure 6 : Conséquences de la construction d'un barrage sur les ajustements des lits des cours d'eau (d'après Petts, 1979). Les indices indiquent l'importance des ajustements : 0, pas de changements significatifs, +, accroissement, - réduction et = réduction majeure. CC correspond à la capacité du chenal, L à la largeur, d à la profondeur, n à la rugosité, à la pente et k à la capacité de transport.**

Ces facteurs concernent la nature des sédiments alluviaux du cours d'eau, la localisation des secteurs de fourniture sédimentaire, la présence ou l'absence de végétation, la géologie d'un bassin versant, le style fluvial, la géométrie du chenal, la taille du barrage, le nombre d'ouvrages et leurs règles de fonctionnement (à savoir s'il s'agit d'un barrage servant de réservoir pour l'irrigation, ou visant à la production hydroélectrique...), ou encore les conditions initiales avant perturbation. Ainsi, des modifications similaires des débits liquides et/ou solides peuvent entraîner différents ajustements sur les sections successives d'un même tronçon (Figure 7).

A) Réponse du chenal à une importante réduction des entrées sédimentaires



B) Réponse du chenal à une importante réduction des écoulements



C) Réponse du chenal à une importante réduction des écoulements à l'aval d'un affluent

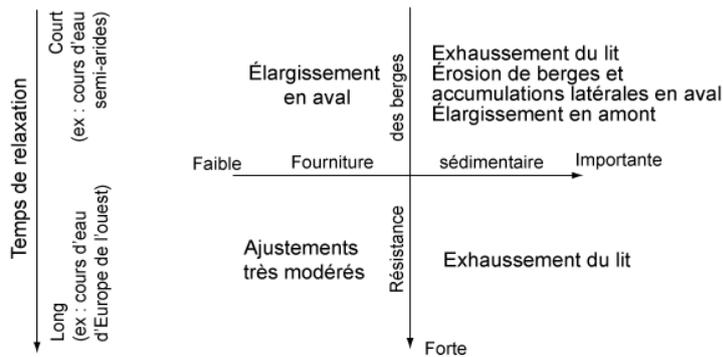


Figure 7 : Évolution du lit en réponse aux modifications des débits liquides et solides dans différentes régions géographiques, après la construction d'un barrage. Ces évolutions sont caractérisées par des temps de relaxation (ou d'ajustement) variables, et influencées par le volume des apports sédimentaires, par la résistance des berges et du lit à l'érosion et par la croissance de la végétation (d'après Petts et Gurnell, 2005).

Nous ne détaillerons ici que trois des principaux facteurs : la granulométrie du lit, la végétation et la présence d'affluents.

### La granulométrie du lit

La taille des particules composant le lit joue un rôle crucial dans la nature des ajustements ((Gaeuman *et al.*, 2005) ; (Salant, Renshaw *et al.*, 2006)). En observant les différences en termes de réponse à une même fluctuation des débits liquides sur la Lower Duchesne River (États-Unis), (Gaeuman *et al.*, 2005) ont constaté que les tronçons sableux ont eu tendance à répondre rapidement à toutes les perturbations par un changement rapide de l'élévation du fond du chenal, l'ajustement de la largeur intervenant ensuite. Ce dernier paramètre est en revanche majeur sur les tronçons à charge grossière. Dans ce contexte, le lit ne s'exhausse que dans le cas d'importantes fournitures sédimentaires très localisées, résultant notamment de l'érosion des berges, dont la granulométrie est semblable à celle des particules composant le fond du lit. L'incision ne se produit alors que durant les fortes crues. Les secteurs à charge grossière sont donc plus résistants à l'incision

que les secteurs sableux, les débits nécessaires à la mise en mouvement du sédiment étant beaucoup moins fréquents.

Le pavage progressif du lit contribue également à ralentir les processus d'ajustements, les débits liquides devenant incompétents pour la mise en mouvement des sédiments de surface (Sear, 1995).

### La végétation riveraine

Dès le début des années 1960, des auteurs constatent que la régulation des débits permet le développement de stades arbustifs et arborescents favorisant la stabilisation des dépôts, le piégeage des sédiments et ainsi le rétrécissement du chenal ((Schumm, 1969) ; (Church, 1995) ; (Fergus, 1997) ; (Merritt et Cooper, 2000)). Ces processus sont surtout observés dans le cas de chenaux larges et peu profonds avant la construction des barrages, que l'on rencontre souvent dans les milieux semi-arides (Williams et Wolman, 1984). La végétation joue un rôle actif dans la modification des chenaux à travers toute une gamme de processus (Figure 8) (Gurnell et Petts, 2002). Schématiquement, ce rôle est contrôlé d'une part par les caractéristiques de la végétation (vitesse de croissance, résistance à l'arrachement, capacité de dispersion, etc.) et d'autre part par la dynamique hydromorphologique (régime des crues, puissance fluviale, etc.).

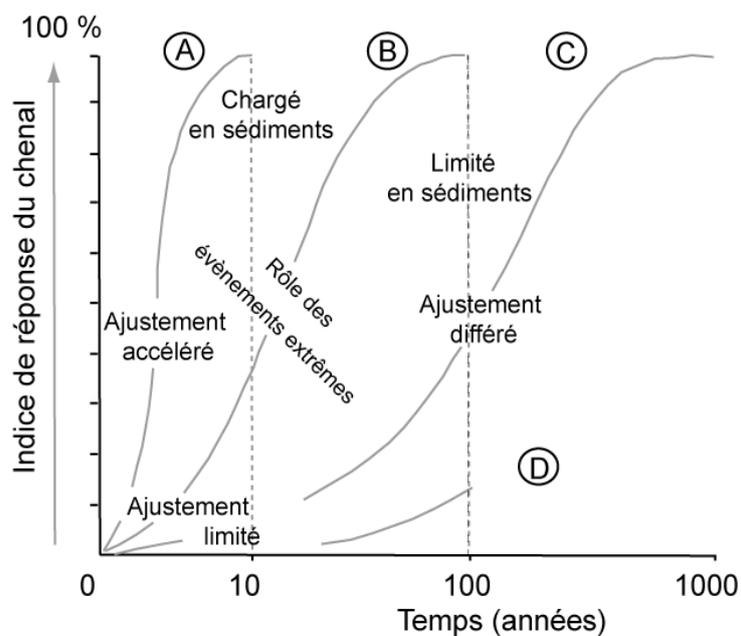


Figure 8 : Trajectoire de la métamorphose fluviale en lien avec la colonisation et la croissance végétale (d'après Gurnell et Petts, 2002).

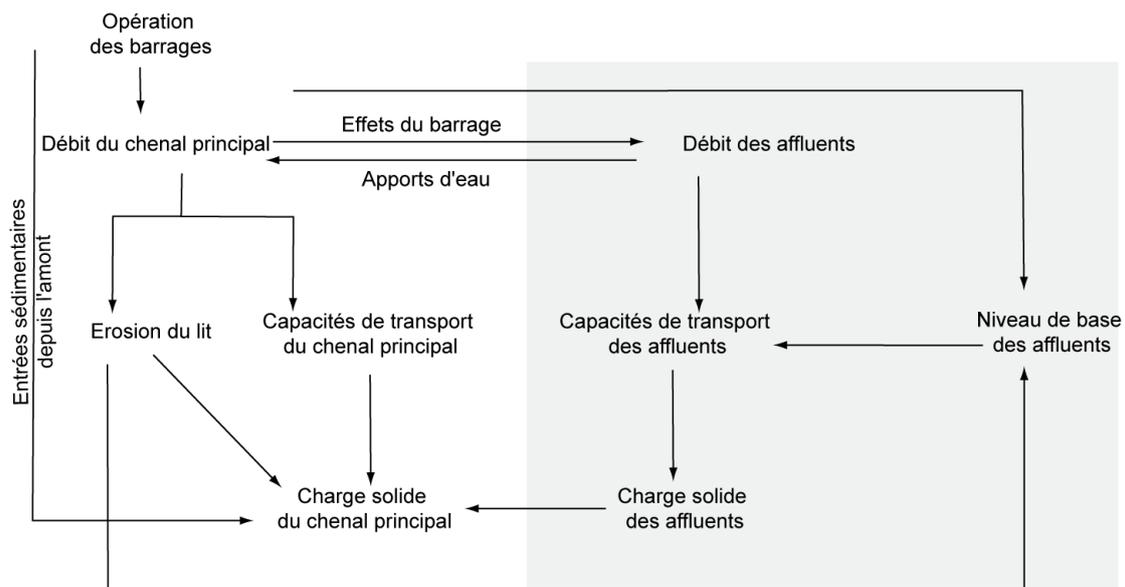
Dans le **cas A** (Figure 8), le changement est rapide et facilité autant par la reprise de croissance rapide de la végétation ligneuse à partir de bois flotté (souvent des arbres entiers) que par la croissance des propagules présentes dans les sédiments fins déposés dans les zones de retour d'eau, ou dans les zones abritées par les dépôts ligneux. Le développement de la végétation joue un rôle important en influençant les modèles de sédimentation et d'érosion pendant la métamorphose fluviale.

Dans le **cas B**, le bois flotté est mort et son seul impact est de favoriser les dépôts de sédiments contribuant au développement des propagules abritées par les accumulations de bois.

Dans le **cas C**, le développement de la végétation est limité à quelques graines dispersées et à des fragments de végétation capables de reprendre leur croissance. Les modifications dans le chenal sont dominées par les processus géomorphologiques. Dans le cas D, les changements dans le chenal liés à une réduction des débits liquides sont très lents et connaissent de faibles ajustements, les dimensions du chenal avant régulation, relique de l'état antérieur, sont maintenues.

### *L'incidence des affluents*

Les affluents, s'ils sont aussi concernés par ces ajustements, peuvent avoir également un impact important sur le chenal affecté par un barrage ((Benn et Erskine, 1994) ; (Olive et Olley, 1997) ; (Phillips, 2003) ; (Grams et Schmidt, 2005) ; (Marston, Mills *et al.*, 2005)) (Figure 9). (Marston *et al.*, 2005) ont pu observer sur la Snake River un accroissement de la sinuosité et de la mobilité latérale à proximité des principaux affluents alors que sur le reste du linéaire, ils constatent une stabilisation du tracé et une diminution de la sinuosité. Ils expliquent cette instabilité à l'aval immédiat des affluents par un déclin de la compétence du courant, les dépôts de la charge amenée par les affluents permettant alors une diffuence des écoulements et le maintien du profil en long.



**Figure 9 : Modèle conceptuel montrant la complexité des interrelations entre les facteurs géomorphologiques clés du chenal principal et de ses affluents à l'aval d'un barrage (d'après Phillips, 2003).**

De même, la formation de rapides sur la Colorado River a été expliquée par une réduction de l'amplitude des crues à la suite de la construction du Hoover Dam, beaucoup de sédiments étant apportés depuis des affluents à crues éclair (Dolan, Howard *et al.*, 1974).

### IV.2.2.c.iii- Temporalité, extension spatiale et amplitude des ajustements

Dans un même tronçon de cours d'eau, la réponse du chenal est complexe et variable dans le temps et l'espace (Figure 10). Elle peut être plus ou moins importante en fonction du degré des perturbations.

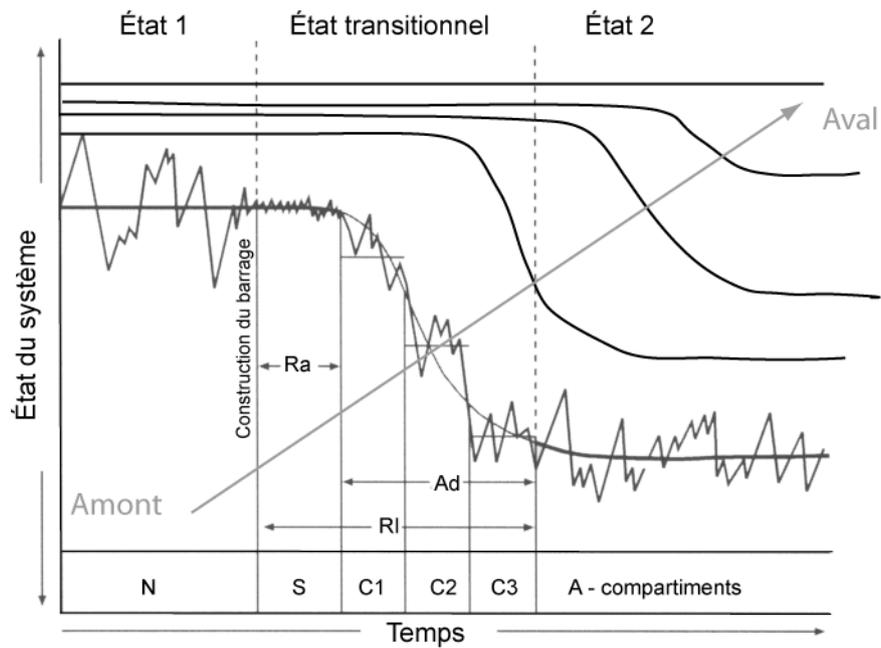


Figure 10 : Trajectoire hypothétique de la métamorphose fluviale à la suite de la construction d'un barrage (d'après Petts et Gurnell, 2005, complété).

La modification du système, d'un système naturel (N) jusqu'à un système ajusté (A), passe par une période de relaxation (RI), qui comprend elle-même une phase de réaction (Ra) et une phase d'ajustement (Ad). La période de relaxation comprend une série d'états transitionnels (Figure 10). Ceux-ci incluent une phase d'accommodation (S), durant laquelle les débits solides et/ou liquides sont modifiés mais les formes fluviales n'ont pas encore changé, ainsi qu'une phase de modification du chenal (C1 à C3), durant laquelle la morphologie du cours d'eau s'ajuste aux modifications des écoulements et de la charge solide (Petts et Gurnell, 2005).

### Les échelles temporelles

Même si, dans la plupart des cas, nous manquons de données relatives à l'état du cours d'eau avant la mise en fonction de l'ouvrage, (Williams et Wolman, 1984) considèrent que les changements se produisent dès le début de la construction d'un barrage et non à partir de la date officielle d'inauguration. Les temps de réaction et de relaxation dans un système dépendent tous les deux de l'amplitude et de la fréquence des débits morphogènes ainsi que des conditions initiales du chenal avant la construction d'un barrage (Petts et Gurnell, 2005).

L'estimation du temps nécessaire à l'ajustement d'un cours d'eau en aval d'un barrage dépend principalement de trois éléments :

- **Le type de modification des débits** (qui dépend lui-même, entre autres, du mode de gestion de la retenue) : lorsque les écoulements sont accrus, les ajustements se produisent plus rapidement (quelques années) que lorsqu'ils sont diminués (décennies ou siècle), le temps d'ajustement correspondant alors au temps nécessaire à la végétalisation de la bande active (Church, 1995). Cette échelle de temps des ajustements va être visiblement influencée si la fréquence des débits morphogènes s'accroît ou décroît.
- **Le type de cours d'eau** : le temps d'ajustement sur les rivières à sable peut être plus précoce que sur d'autres cours d'eau, compte tenu de l'importance des volumes transportés et de la rapidité de la fixation et de la croissance de la végétation. Dans le cas des rivières gravelo-sableuses, les

changements en fonction du temps peuvent être décrits par une simple relation hyperbolique (Williams et Wolman, 1984).

- **Le type d'ajustement** et/ou la variable d'ajustement considérée (Figure 11) : le temps de relaxation, pour un ajustement total, est compris entre 4 et 230 ans dans le cas d'un rétrécissement du chenal et jusqu'à 500 ans dans le cas d'un élargissement (Williams et Wolman, 1984). L'échelle de temps, pour l'ajustement des styles ou de la pente, est plus longue - de l'ordre du millénaire - car il nécessite le transport d'importants volumes de sédiments (Church, 1995).

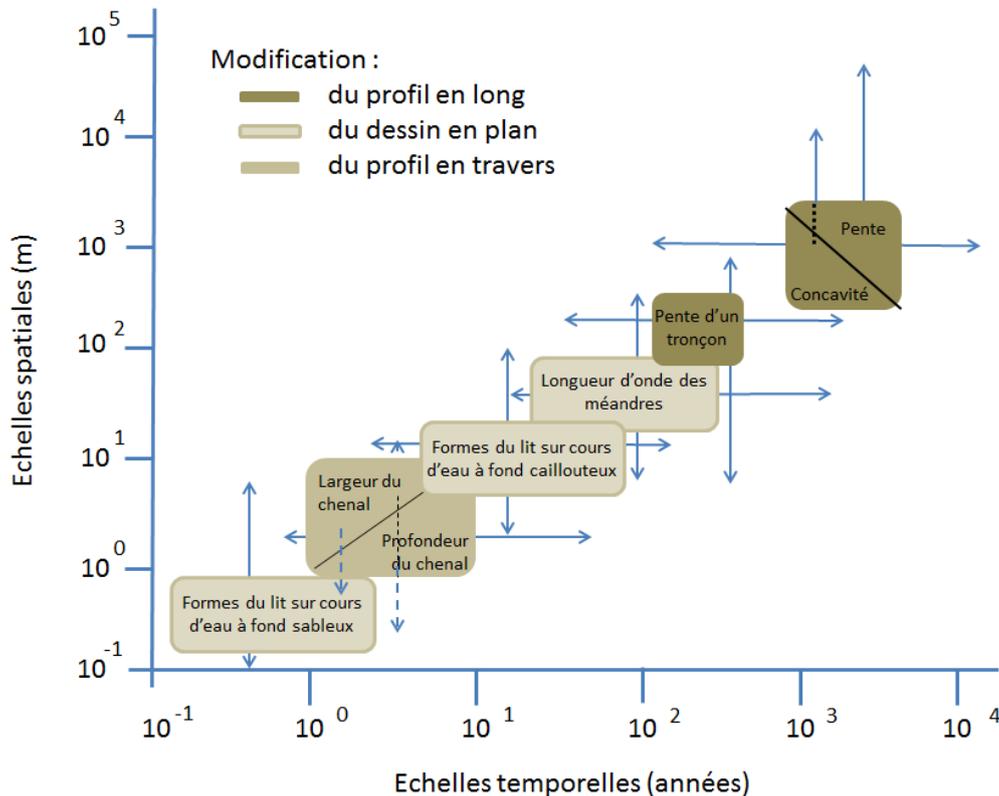


Figure 11 : Échelles spatiales et temporelles de l'ajustement des formes fluviales (d'après Knighton, 1984).

Dans le cas de processus d'incision, il est plus difficile de prévoir le temps d'ajustement, sa variabilité étant plus grande. Dans la plupart des cas, l'incision est plus importante lors de la première décennie puis devient asymptotique. (Surian et Rinaldi, 2003) sont parvenus à cette conclusion concernant les cours d'eau italiens affectés par différentes activités anthropiques. Ils ont ainsi observé des temps de réaction courts et des ajustements (incision, et/ou rétraction) plus intenses au début de la perturbation qui se ralentissent ensuite, devenant progressivement asymptotiques. Cette valeur est cohérente avec le fait que la taille des particules assurant le pavage du lit se stabilise généralement entre 1 et 10 ans après la construction d'un ouvrage (Williams et Wolman, 1984). Une fois le fond du lit pavé, l'incision est nécessairement stoppée, ou au moins, fortement ralentie.

Les processus d'exhaussement, en revanche, sont beaucoup plus lents car ils requièrent l'introduction et/ou la redistribution d'importants volumes de sédiments.

### Les échelles spatiales

(Phillips, Slattery *et al.*, 2005) ont cherché à définir les paramètres susceptibles de contrôler l'extension des processus d'érosion. Un des plus importants est la distance à partir de laquelle l'influence du barrage sur la géométrie du chenal devient mineure par rapport aux autres facteurs. Au-delà d'une certaine distance au

barrage, les effets des modifications de l'hydrologie, de l'hydraulique ou des fournitures sédimentaires s'atténuent, voire disparaissent, l'influence de la morphologie locale du chenal ou de la vallée redevenant plus importante. Cela concerne particulièrement les rivières de plaines côtières où les effets des retours d'eau deviennent de plus en plus importants en direction de l'aval. Ces distances « limites » varient de 50 à 120 km en aval du barrage, les effets du déficit sédimentaire devenant ensuite insignifiants (Phillips, Slattery *et al.*, 2005). Il reste cependant à déterminer si les secteurs au-delà de cette limite ne seront jamais affectés ou si la réponse ne s'est pas encore propagée au-delà après 35 ans d'observation, ce qui, dans ce cas, représente une vitesse de propagation de 1,4 à 3,4 km/an. La plupart des valeurs issues de la littérature varie entre 0 et 2 km/an, et atteint sur certains cours d'eau 29 km/an, voire 42 km/an juste après la construction du barrage (Williams et Wolman, 1984). Ainsi, (Gregory et Park, 1974) avaient observé une vitesse de propagation d'au moins 1,3 km/an à la suite d'une réduction des capacités de transport du chenal d'environ 50 %, puis de 0,73 km/an en aval du barrage de Clatworthy dans le bassin de la Tone (Angleterre). Sur la Colorado River (États-Unis), le tronçon affecté par les processus de pavage atteignait près de 10 km, de 20 km puis de 70 km à respectivement 1, 3 et 7 ans après la construction du barrage Hoover (Williams et Wolman, 1984), ce qui représente des vitesses de propagation du phénomène de l'ordre de 10 à 6 km/an.

### ***L'amplitude des ajustements***

L'amplitude des ajustements n'est pas nécessairement corrélée à la distance au barrage, mais dépend du niveau d'altération du régime hydrologique, de la réduction des pics de débit, des apports sédimentaires et des caractéristiques géomorphologiques locales ((Sherrard et Erskine, 1991) ; (Grams et Schmidt, 2005)). L'étude de la Deschute River (États-Unis) a ainsi démontré que, sur les systèmes à faibles apports de sédiments et à faible capacité de transport solide, l'armurage, l'incision et les changements morphologiques à l'aval d'un barrage sont faibles (Fassnacht, McClure *et al.*, 2003).

Tout comme son extension, l'amplitude du processus d'incision dépend de multiples facteurs ((Galay, 1983) ; (Olive et Olley, 1997)) tels que la granulométrie du lit (présence ou absence de pavage), la présence de matériel cohésif ou de végétation dans le chenal, l'érosion de berge (apports de sédiments suffisants ou non pour contrecarrer le déficit), la gestion des débits (réduction ou non de la fréquence des débits supérieurs au débit dominant) ou encore l'existence ou non d'ouvrages d'ingénierie.

L'amplitude des incisions est, dans la majorité des cas, plus importante immédiatement à l'aval des barrages et décroît progressivement ensuite (Williams et Wolman, 1984). L'amplitude observée est généralement comprise entre 1 et 7 mètres sur des périodes de 3 à 30 ans.

### ***Le cas de petits ouvrages***

Si le cas des petits ouvrages reste largement moins documenté que celui des grands barrages, quelques études se sont particulièrement intéressées aux effets morphologiques en aval des petits ouvrages. Ainsi en Virginie (USA), la taille médiane des sédiments composant le fond du lit a doublé par rapport à celle du cours d'eau libre voisin, ce qui laisse penser que se sont produits des processus d'incision et de pavage du lit (Chilton, Hackler *et al.*, 2004). Il n'y avait dans cette étude aucune indication relative à l'extension spatiale ou du temps nécessaire pour cet ajustement. Un résultat relativement opposé a été trouvé dans le cadre de l'application d'un modèle en New South Wales, où (Verstraeten et Prosser, 2008) ont indiqué une diminution des taux d'érosion en aval due à une modification des régimes d'écoulement après la simulation de la construction d'un petit barrage agricole. Le modèle WATEM/SEDEM (Van Oost, Govers *et al.*, 2000) a ainsi prédit une réduction de 14% des taux d'érosion à l'aval et un changement vers une situation de déficit sédimentaire sans dépôt immédiat en aval de l'ouvrage. Ce résultat serait dû à la combinaison d'une réduction de la capacité de

transport à l'aval, d'une réduction des apports de sédiments et d'une augmentation du piégeage dans la retenue (Verstraeten et Prosser, 2008).

Au sein du corpus étudié, deux études seulement rapportant des changements hydromorphologiques liés à des petits barrages ont été trouvées. Dans une étude, la sinuosité a augmenté de 6 % en amont d'un barrage de 1.5 m dans l'Ohio au cours d'une période de 33 ans (Evans, Huxley *et al.*, 2006). Les changements en amont ont été attribués aux réajustements du gradient du cours d'eau et au dépôt de sable et de gravier. Après arasement du barrage, la sinuosité a diminué et les dépôts ont été remobilisés par le cours d'eau. Une deuxième étude a constaté qu'un projet hydroélectrique composé de deux petits barrages (10 m de haut) avec une diversion fluviale laissant 10 % de flux annuel moyen dans le canal principal a abouti à une modification des habitats piscicoles en aval, en comparaison des biefs amont des barrages (Anderson, Freeman *et al.*, 2006). Ces changements ont été associés à la baisse des vitesses de courant dans les biefs aval.

Les effets de petits barrages sur la morphologie n'ayant pas été beaucoup étudiés, il peut être utile de discuter des changements théoriques attendus à l'aval pour une diminution du flux et le transport de sédiments. Warner (1983) a examiné l'influence de déversoirs sur la Rivière Nepean, en Australie et a constaté que les cours d'eau ont répondu différemment selon la géologie sous-jacente. Après régulation par un barrage les biefs étaient devenus plus profonds dans les gorges de grès, mais plus larges et moins profonds dans le schiste argileux et les zones alluviales. Ceci suggère que la réponse fluviale puisse être plus complexe que celle proposée par des relations théoriques.

## IV.3 EFFET CUMULE DES RETENUES

### IV.3.1 Caractéristiques du corpus analysé (disponible)

La bibliographie abordant explicitement l'effet cumulé des retenues sur le transport sédimentaire et l'hydromorphologie est très réduite : environ une dizaine d'articles, qui concernent souvent soit des grands barrages en série le long de grands fleuves ((Hu, Yang *et al.*, 2009) ; (Kummu, Lu *et al.*, 2010) ; (Huang, Lee *et al.*, 2012) ; (Ibáñez, Diaz *et al.*, 2013) ; (Yang et Lu, 2014) ; (Juracek, 2015)) ; soit des réseaux de petites retenues collinaires ((Verstraeten et Poesen, 2001) ; (Boix-Fayos, De Vente *et al.*, 2008), (Verstraeten et Prosser, 2008) ; (Juracek, 2015)). Un article traitant de l'effet cumulé de lac naturels de montagne sur le transport sédimentaire et la morphologie a aussi été analysé (Arp, Schmidt *et al.*, 2007).

### IV.3.2 Concepts, Démarche et Méthodes pour aborder le cumul

Les méthodes mises en œuvre afin d'évaluer l'impact cumulé des retenues dépendent des objectifs de ces études.

#### IV.3.2.a- Le piégeage des sédiments

Les études qui portent sur l'estimation de la modification des flux sédimentaires à large échelle ont été réalisées soit sur la base d'estimation des volumes piégés souvent à partir de mesures bathymétriques diachroniques dans un certain nombre de bassins, soit sur la base de modèles distribués d'érosion. (Yang et Lu, 2014) ont inventorié les méthodes de modélisation du piégeage de sédiments pour des retenues isolées ou cumulées (Tableau 1) :

Tableau 1 : Méthodes de quantification du piégeage de sédiments, retenues isolées ou cumul (d'après Yang et Lu, 2014).

Modèle	Zone d'étude	Références	Remarques
<b>Modélisation du piégeage pour les réservoirs individuels</b>			
Ratio Capacité-surface du bassin versant	A petite échelle ou de réservoirs individuels	Brown (1944)	Modèle empirique
Ratio capacité –flux entrant annuel	A petite échelle ou de réservoirs individuels	(Brune, 1953)	Modèle empirique. Données hydrologiques requises
Indice de sédimentation	A petite échelle ou de réservoirs individuels	(Churchill, 1948)	Modèle empirique. Données hydrologiques requises
Modèles théoriques	A petite échelle ou de réservoirs individuels	(Camp, 1945) (Ward, Haan <i>et al.</i> , 1977)	Basé sur les principes de sédimentation et conditions de décharge variables
<b>Modélisation du piégeage cumulé</b>			
Echelle continentale	Ensemble du bassin	(Vörösmarty <i>et al.</i> , 2003); (Kummu <i>et al.</i> , 2010); (Ran, Lu <i>et al.</i> , 2013)	Mesure de l'interception globale ou à l'échelle de bassin. Données hydrologiques nécessaires
<b>Modélisation du taux de sédimentation multi- réservoirs</b>			
Modèle semi-quantitatif	Echelle nationale	(De Vente <i>et al.</i> , 2005)	Moins de données nécessaires
Modèle mathématique	Echelle de l'État	(Minear et Kondolf, 2009)	Prise en compte des pièges en amont. Données sédimentation nécessaires.
<b>Modèles boîte noire</b>	Systèmes multi-réservoirs	(Labadie, 2004); (Garg, Asce <i>et al.</i> , 2010)	Inconvénient de la "boîte noire"

(Yang et Lu, 2014) ont aussi développé et appliqué une méthode pour calculer les taux de sédimentation des réservoirs dans le système multi-réservoirs du fleuve Yangtsé tout en tenant compte de l'effet de l'apport de sédiments réduit en raison de pièges en amont sur 1358 des réservoirs grands et moyens. Ils ont ensuite utilisé des inférences statistiques pour évaluer les taux de sédimentation de 42.000 petits réservoirs. Les résultats indiquent que les sédiments annuels accumulés dans les réservoirs du Yangtsé (691 (± 93,7) millions de tonnes (Mt), le sont majoritairement dans les réservoirs les plus importants. Malgré la grande quantité de sédiments piégés par des réservoirs, la réduction de la charge annuelle de sédiments à l'exutoire était simplement de 305 Mt au cours des 60 dernières années.

(Kummu, Lu *et al.*, 2010) ont cherché à évaluer l'efficacité de piégeage (TE=trap efficiency) des réservoirs existants et prévus dans le Bassin du Mékong en utilisant la méthode de (Brune, 1953) (Ratio : capacités sur flux entrant annuel). Les réservoirs existants ont une TE de 15-18% et si tous les réservoirs planifiés étaient construits, ce chiffre passerait à 51-69%. Toutefois, en raison de la forte hétérogénéité de l'apport de sédiments spécifiques dans les différentes parties du bassin, la charge de sédiments piégés (TSL) pourrait être

encore plus élevée. Les barrages traditionnels existants et prévus dans la partie chinoise de la rivière ont le plus grand impact sur la charge de sédiments de rivière (SL) car plus de 60% de la charge en sédiment du bassin provient de ce tronçon du fleuve. Les trois réservoirs existants dans cette partie du bassin ont un potentiel pour piéger chaque année environ 32-41 Mt de sédiments. Si l'ensemble des huit barrages est construit, la TE passera à 78-81%, et potentiellement 70-73 Mt, soit plus de 50% de la charge totale de sédiments du bassin (~140 Mt) sera piégée chaque année.

(Ran *et al.*, 2013) ont utilisé le même type d'approche que (Kummu, Lu *et al.*, 2010) pour évaluer le piégeage cumulé en sédiment à l'échelle de l'ensemble du bassin du fleuve jaune. Ils utilisent également la méthode de Brune pour évaluer la capacité de piégeage individuelle des retenues, et s'appuient sur la télédétection pour l'inventaire des retenues du bassin versant et sur les enregistrements hydro-sédimentaires des stations de mesure existantes. Avec des taux de piégeage supérieurs à 80 % pour tous les sous-bassins, les réservoirs dans le bassin fluvial peuvent théoriquement piéger la plupart des sédiments atteignant le réseau hydrographique. Pour l'ensemble du bassin du Fleuve Jaune, le taux de piégeage de 95.2 % suggère que l'effet cumulé des réservoirs modifie significativement l'émission de sédiments vers l'océan. Le taux de sédimentation annuel récent démontre que la capacité de stockage totale diminue de 0.6 % par an. Dans une perspective globale, la sédimentation des réservoirs dans le bassin du Fleuve Jaune représente environ 12 %-15 % du taux de sédimentation moyen mondial tel qu'il a été estimé par (Vörösmarty *et al.*, 2003).

(Minear et Kondolf, 2009) ont développé un modèle (3W) basé sur des feuilles de calcul qui intègre à la fois : le piégeage par les barrages en amont et la diminution du piégeage des sédiments au fur et à mesure que les réservoirs se remplissent, deux facteurs qui avaient été ignorés dans les précédents modèles de sédimentation pour la modélisation de réservoirs multiples. L'approche se compose de deux parties : (1) la détermination de la production de sédiments par région géomorphologique, à partir des taux de sédimentation connus mesurés dans les réservoirs et disponibles dans les bases de données nationales et (2) l'application de ce taux de piégeage des sédiments aux réservoirs non mesurés dans chaque région. Le modèle utilise l'équation de Brown [1944] pour calculer le taux de piégeage à un pas de temps annuel à la place de celle de (Brune, 1953) car contrairement à cette dernière, elle ne nécessite pas de données sur les flux liquides. Pour chaque retenue mesurée, l'aire d'alimentation est corrigée par la présence éventuelle de retenues amont.

(Garg et Jothiprakash, 2010) ont développé des méthodes statistiques pour modéliser l'évolution temporelle de la capacité de piégeage des retenues. En fait, dans leur étude qui porte sur deux grands bassins du nord de l'Inde, le taux de piégeage est toujours supérieur à 99% et la variabilité temporelle est inférieure à 1%.

Les modèles distribués comme WATEM / SEDEM ont par exemple été utilisés par ((Boix-Fayos, De Vente *et al.*, 2008) ; (Verstraeten et Prosser, 2008)). WATEM / SEDEM est un modèle distribué raster qui se compose essentiellement de trois composants principaux : (1) l'évaluation de la perte de sol, (2) l'évaluation de la capacité de transport des sédiments, et (3) le routage des sédiments. Ce type de modèle semble bien adapté à l'évaluation de l'effet cumulé des retenues sur les transferts de sédiments.

### ***IV.3.2.b-L'ajustement morphologique à l'aval***

Les méthodes d'analyse de l'ajustement de l'effet cumulé se partagent en deux catégories : observations des effets et/ou modélisation de l'ajustement. La première catégorie mobilise les mêmes approches que l'évaluation de l'effet d'une retenue, mais appliquées à plus large échelle. Par exemple, afin d'analyser l'influence cumulée de huit barrages hydroélectriques le long de la River Aragon (Espagne) sur la morphologie du chenal (mobilité latérale, verticale, surface des formes fluviales) et la dynamique des sédiments, (Ibáñez, Diaz *et al.*, 2013) ont mobilisé des outils SIG, des photographies aériennes, des observations de terrain et des mesures hydrologiques. Trois périodes (début, milieu et fin du XXe siècle) ont été analysées pour distinguer les effets des changements dans l'utilisation des terres, de l'aménagement de grands réservoirs en amont et des petits barrages hydro-électriques (majoritairement en dérivation sur des méandres à l'aval). De même, (Arp,

Schmidt *et al.*, 2007), afin d'étudier l'impact cumulé de lacs naturels d'origine glaciaire sur l'hydromorphologie dans la région des Sawtooth Mountains (Idaho, USA), ont recueilli des données sur la forme des chenaux situés sur 33 tronçons de rivières dans toute la région. De fait, ils ont comparé la forme des chenaux et établi des relations avec les caractéristiques des bassins versants et avec la présence de lacs, de prairies (lacs remplis), ou des traces d'anciens lacs. Les approches de modélisation prédictive des ajustements morphologiques à l'aval d'un réseau hydrographique concerné par une multitude des retenues sont peu nombreuses. En effet, s'il existe de nombreux modèles conceptuels permettant de « prédire » l'évolution du lit en fonction de l'évolution des facteurs de contrôle à l'aval d'un ouvrage, il semble que, en l'état, aucune solution simple n'existe pour évaluer l'effet spécifique des barrages (par rapport aux autres facteurs de contrôle), ni pour évaluer l'effet des barrages situés hors du réseau hydrographique (Alcayaga, 2013). (Alcayaga, 2013) a développé une méthode qui couple l'estimation du potentiel d'altération du transport sédimentaire sur un tronçon en comparant avant/après la mise en place d'un barrage sur le réseau et un modèle analytique d'ajustement. Cette approche permet de travailler à large échelle, et potentiellement d'intégrer la notion de cumul (même si l'auteur ne le fait pas explicitement). Cependant, les capacités de prédiction de cette approche sont trop faibles pour en faire une méthode efficace. Les limitations du modèle qui semblent les plus importantes à l'auteur sont :

- a) « la difficulté pour estimer la production sédimentaire des versants qui transite ensuite comme charge de fond,
- b) la nécessité de prendre en compte des contraintes locales et d'intégrer de la connaissance experte spécifique,
- c) le modèle suppose un équilibre dynamique de la morphologie fluviale avant les perturbations,
- d) le modèle ne donne pas d'indication sur le temps de réponse, c'est-à-dire sur la durée de la période transitoire nécessaire pour retrouver un nouvel équilibre dynamique,
- e) le modèle n'est pas capable de reproduire d'éventuelles déviations des trajectoires. Les trajectoires originellement prédites peuvent être déviées par des processus de régulation ; par exemple l'incision pourra être arrêtée ou ralentie par la formation d'une couche de pavage ou bien par la superposition des altérations depuis d'autres sources d'altération qui ont été introduites postérieurement »

### IV.3.3 Données et observations disponibles. Déterminants et indicateurs

#### IV.3.3.a- Effet cumulé sur le régime hydrologique

Bien qu'une seule petite retenue ne puisse avoir à elle seule un effet très important sur le régime des eaux, l'effet cumulatif de nombreuses retenues dans un bassin versant peut aboutir à un impact significatif sur le débit en aval (Finlayson, Nevill *et al.*, 2008).

(Meigh, 1995) a constaté, en utilisant un modèle développé pour les bassins versants au Botswana, qu'un petit nombre de grands barrages a eu un impact plus faible sur les volumes de débit en aval par rapport à un grand nombre de petits barrages avec la même capacité totale. Ceci est expliqué par le fait que le total des pertes par évaporation est inférieur pour les grands barrages, qui ont tendance à être construits avec une forme plus efficace (Meigh, 1995). D'autres résultats de modélisation ont montré une plus grande diminution du débit annuel moyen lorsque les barrages sont placés en aval dans le bassin versant. Les barrages en aval auraient une aire d'alimentation amont plus grande, ce qui entraîne un remplissage plus fréquent et des pertes totales par évaporation supérieures. L'étude a conclu que les volumes de flux de bassin versant seraient moins touchés avec des barrages placés préférentiellement dans les parties amont du bassin versant, avec une préférence pour quelques grands barrages plutôt que nombreux petits barrages. Cependant, cette dernière

recommandation ne concerne que l'impact sur les volumes d'eau et non sur d'autres indicateurs environnementaux (Meigh, 1995). Cette distinction est importante, car (Bosch et Allan, 2008) ont constaté que les prédictions des modèles de qualité de l'eau en aval ont montré une plus grande amélioration avec un grand nombre de petits étangs\* plutôt que d'un petit nombre de grands étangs (du même volume total).

### ***IV.3.3.b- Effet cumulé sur le piégeage des sédiments***

L'effet cumulé des millions de petites retenues artificielles, ainsi que des dizaines de milliers de grands barrages installés sur les petits et grands cours d'eau, a profondément modifié le paysage hydrologique des Etats-Unis ainsi que les conditions de transport de sédiments ((Renwick, Smith *et al.*, 2005) ; (Juracek, 2015)). Cette altération n'a fait que s'accroître sur la période 1950-2000 (Graf, 2005). Ainsi, les réservoirs ont continué à piéger les sédiments, bien que certains aient vu leur capacité de stockage se réduire par sédimentation (Batten et Hindall, 1980). (Renwick, Smith *et al.*, 2005) ont examiné le rôle des petites retenues dans le budget de sédiments du sous-continent. Un récent inventaire basé sur une imagerie par satellite de 30 m révèle environ 2,6 millions retenues, tandis que l'extrapolation à partir d'un échantillon de cartes topographiques 1: 24.000 suggère que le total pourrait atteindre 8-9 millions. Ces retenues capturent environ 21% de la superficie totale de drainage des États-Unis, représentant 25% du total de l'érosion en nappe et en rigoles. Les auteurs ont estimé la sédimentation totale dans ces petites retenues à l'aide de trois méthodes différentes. Deux d'entre elles sont basées sur des estimations des taux de sédimentation spécifiques (sédimentation par unité de surface de drainage) dans des bassins, tandis que l'autre est basée sur les taux d'érosion dans les zones tributaires. Les estimations varient de 0,43 à  $1,78 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ . En comparant ces chiffres aux estimations de l'érosion sur versant, ils concluent que les petites retenues d'eau sont un puits de sédiments plus important que ce qui était considéré jusqu'ici.

(Mathieu et Subra-Durand, 2000) ont réalisé un inventaire et une analyse de l'envasement des retenues sur l'ensemble du département de la Haute Garonne afin de préconiser des solutions touchant la gestion des retenues collinaires en les intégrant dans le bassin versant concerné. Ils rapportent que près de 70% des 240 retenues inventoriées présentent des problèmes d'envasement et constatent qu'à l'origine, les aménageurs n'avaient pas prévu cet envasement des ouvrages, ni dans la conception (absence de bassin de décantation, développement des cultures de printemps qui favorisent l'érosion en climat à orages de printemps), ni dans le choix du site (en aval des zones à risque d'érosion). Pour les nouvelles implantations, il sera impératif de prendre ce problème en compte.

(Verstraeten et Prosser, 2008) ont utilisé le modèle distribué d'érosion WATEM-SEDEM combiné à une estimation empirique des taux de piégeage des retenues (Verstraeten et Poesen, 2000), pour modéliser les variations des taux de l'érosion des versants et des transferts de sédiments depuis la colonisation européenne en fonction des changements d'occupation du sol et des aménagements cumulés de retenues collinaires ou de barrage dans le bassin de Murrumbidgee, Australie. Le modèle a été calibré pour les écosystèmes australiens en utilisant les données de taux de sédimentation dans 26 petits barrages agricoles. Les résultats des simulations permettent de discuter des effets relatifs et cumulés du changement d'utilisation des terres, des retenues collinaires agricoles et des barrages sur le transfert des sédiments aux rivières. Ils montrent en particulier que les changements dans l'érosion des versants et dans les taux de piégeage des sédiments ne sont pas similaires, illustrant la réponse non-linéaire du bassin versant. Dans l'état actuel de l'occupation du sol l'alimentation en sédiments du réseau rivière est 370% plus élevé par rapport à la période pré-européenne, mais les retenues agricoles ont réduit cette production de sédiments à 2,5 fois les valeurs pré- 19<sup>ième</sup> siècle. Le rôle des grands réservoirs est encore plus important car ils réduisent le transfert de sédiments en aval à son niveau pré-européen, compensant ainsi complètement l'augmentation des taux d'érosion sur le versant liée à la mise en culture des terres. Cependant, les auteurs indiquent que d'autres processus, comme l'érosion des

berges et les dépôts de sédiments des plaines inondables, seraient à incorporer dans WATEM / SEDEM pour modéliser l'ensemble du bilan de sédiments d'un bassin fluvial. Le fait que ces processus ne sont pas actuellement intégrés ne permet pas d'obtenir une évaluation complète de l'impact des changements d'utilisation des terres et de la construction de retenues agricoles. Cela peut expliquer les écarts entre la réponse du bassin versant modélisé dans cette étude et les mesures de terrain.

(Boix-Fayos *et al.*, 2008) ont aussi utilisé le modèle d'érosion WATEM-SEDEM pour simuler six scénarios d'occupation du sol dans le sud de l'Espagne : les situations de 1956, 1981 et 1997, chacune avec et sans retenues. La couverture forestière a été multipliée par 3 avec une diminution de 2.5 fois des terres agricoles entre 1956 et 1997. En plus 58 retenues ont été construites dans le bassin versant dans les années 1970 en accompagnement des travaux de reboisement. Dans un scénario sans barrage, les changements d'utilisation des terres entre 1956 et 1997 entraînent une diminution progressive de l'apport de sédiments de 54%. Dans un scénario sans changement d'occupation du sol mais avec retenues, environ 77% des sédiments sont retenus derrière les barrages. Les relevés de terrain ont montré que parmi les 58 retenues, 72% sont effectivement envasées et 81% d'entre elles présentent des traces d'érosion en aval. Le lit majeur a diminué et beaucoup de barres latérales ont été colonisées par la végétation. Un déplacement latéral du chenal est également observé. L'apport de sédiments a diminué en raison de la réduction des sources diffuses de sédiments liée à la réduction des zones agricoles arides et des pâturages, et de la rétention des sédiments derrière barrages. (Boix-Fayos *et al.*, 2007).

(Vericat et Batalla, 2006) ont constaté que le transport solide total dans la basse vallée de l'Ebre (dont 40 % de charge de fond) ne représente plus que 3 % de sa valeur du début du 20e siècle ; 90 % des sédiments fins et 100 % des sédiments grossiers sont piégés dans les barrages de Mequinzena et Riba-Roja, les sédiments actuellement transportés ne provenant que de l'incision du lit et des érosions des berges.

(Olley et Wallbrink, 2004) ont trouvé une relation entre des baisses de production de sédiments du bassin versant et l'augmentation du nombre de retenues agricoles.

Les effets combinés de l'accumulation d'ouvrages de dimensions réduites sur le linéaire d'un cours d'eau peuvent s'avérer autant, voire plus, impactants pour les débits liquide et solide que les effets d'un seul ouvrage de taille conséquente (Thoms et Walker, 1993).

### ***IV.3.3.c- Effet cumulé sur l'hydromorphologie***

Sur la rivière Aragon en Espagne (Ibiate, Diaz *et al.*, 2013) ont observé que la largeur de la bande active et la migration des chenaux ont subi une nette diminution sur la période 1927-2010. Si cette évolution a démarré avec les changements d'occupation du sol, sa vitesse a augmenté après la construction d'un grand réservoir en amont. Les changements les plus récents sont intervenus avec la mise en service des petits barrages hydro-électriques dans les années 1990, en particulier dans leur tronçons les plus à l'aval. Les changements observés sont interprétés comme une conséquence de la réduction des débits, du piégeage transitoire des sédiments et de la réactivation du transport des sédiments après que les réservoirs se sont remplis ainsi que par l'impact sur l'hydrologie des crues. Cette évolution morphologique peut avoir une influence sur les milieux riverains. Ainsi, ((Bombino, Gurnell *et al.*, 2008) ; (Bombino, Gurnell *et al.*, 2009)) ont étudié la réponse de la végétation riveraine à l'installation de retenues le long des rivières méditerranéennes éphémères et ont montré des changements importants dans la forme et la structure de la végétation riveraine qui semblaient liés aux changements dans l'hydraulique de flux et la nature des sédiments fluviaux. Ils ont étudié les propriétés des sédiments du lit et de la végétation riveraine le long de transects immédiatement en amont, en aval et entre trois barrages de retenue le long d'un seul torrent. Une végétation riveraine plus diversifiée et plus développée a été fortement associée à des proportions plus élevées de sédiments de subsurface. Des corrélations positives entre les trois paramètres synthétiques de végétation et le pourcentage de sédiments fins et la capacité de rétention d'eau estimée dans les sédiments sous la surface ont été trouvées dans tous les transects. Ces

résultats montrent un effet local potentiellement positif de la présence de retenues par augmentation de la diversité des milieux, du moins dans certains cas particuliers (en milieu méditerranéen aride, cours d'eau à très forte énergie).

L'étude de (Arp, Schmidt *et al.*, 2007) sur l'influence de lacs naturels montre que les distributions spatiales de la taille des sédiments et de l'ajustement hydromorphologique des chenaux au sein d'un réseau hydrographique sont bien expliquées par la localisation des sources (versants et affluents) et des puits de sédiments (lacs) en amont. Ainsi, les tronçons de l'ensemble de la région sont significativement différenciés par leur position dans le paysage par rapport aux lacs et aux prairies, et l'analyse de l'effet des lacs sur les flux en aval de ceux-ci suggère une récupération à 50 pour cent des flux à 2-4 km en aval, mais un rétablissement complet qui peut nécessiter 20 km en aval. Ces résultats suggèrent que les puits de sédiments comme les lacs, en plus de sources comme les affluents, sont des contrôles locaux importants sur les réseaux hydrographiques en montagne. Ces auteurs proposent un modèle conceptuel de l'évolution hydromorphologique qui se produit en aval dans un bassin versant sans (A) et avec (B) un lac (Figure 12). Ils suggèrent que l'étude de la réponse hydromorphologique à l'influence des lacs et prairies naturelles peut fournir un aperçu de la façon dont les réservoirs d'origine humaine sont susceptibles d'affecter les systèmes fluviaux à long terme. Ce modèle conceptuel pourrait être mobilisé pour évaluer l'impact de retenues sur l'hydromorphologie.

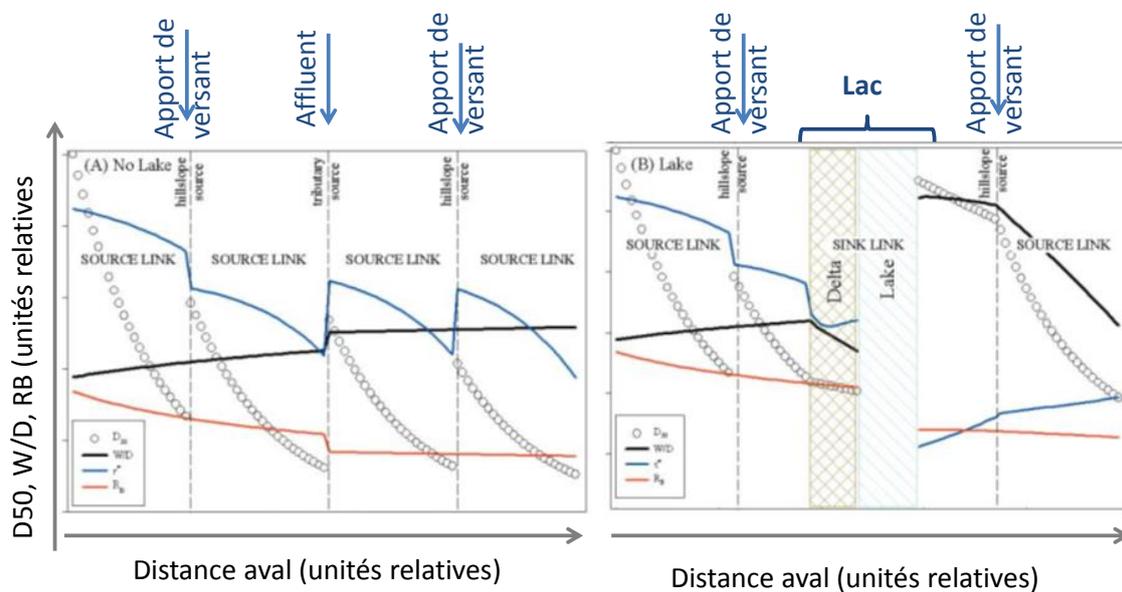


Figure 12 : Evolution hydromorphologique le long d'un cours d'eau selon qu'il comporte (B) ou pas (A) un lac (Arp *et al.*, 2007). D50 est la taille médiane des sédiments du lit, W / D est le rapport largeur-profondeur du chenal,  $\tau^*$  est la contrainte de cisaillement sans dimension au débit max pour le D50, et RB est le ruissellement max.

## IV.3.4 Impact des vidanges, relargage de sédiments et arasements de barrages sur les flux sédimentaires

Ces questions nécessiteraient des recherches bibliographiques spécifiques et nous ne faisons ici que les évoquer rapidement, en particulier dans le contexte des retenues hydro-électriques.

Lors des vidanges de barrages, (Poirel, Vindimian *et al.*, 1994) l'ouverture de la vanne de fond, étape de très faible durée, correspond à l'établissement d'un nouveau régime hydraulique. Cela se traduit par un changement de composition de l'eau en aval, par l'entraînement des sédiments situés immédiatement devant une vanne de fond. Le passage du culot correspond au moment où la retenue est pratiquement vide et où la rivière recrée son lit dans les sédiments de la retenue. C'est l'étape de risque maximum avec apport d'eau interstitielle venant du ressuyage des vases, caractérisée par l'entraînement hydraulique de sédiments, l'effondrement de talus non encore consolidés et des relargages de composés chimiques. La durée de cette étape est relativement brève, quelques heures à quelques jours. Lors du passage du culot et plus rarement à l'ouverture de la vanne de fond les sédiments exportés vers l'aval induisent de fortes teneurs en matières en suspension. Ces teneurs élevées en matières en suspension sont à l'origine de problèmes rencontrés lors des vidanges, notamment pour la faune benthique et piscicole de l'aval (Poirel *et al.*, 1994). L'étape d'assec, de durée très variable selon les travaux envisagés sur l'ouvrage, se caractérise par un risque lié au passage des crues dans une retenue vide, qui peuvent provoquer des entraînements hydrauliques importants de sédiments. Des crues importantes sont observées dans quelques cas et ont pu engendrer des problèmes d'environnement avec des entraînements conséquents de sédiments. Les concentrations en MES sont parfois beaucoup plus élevées que lors du passage du culot et peuvent être dommageables pour la faune à l'aval (effet léthal immédiat et colmatage du lit de la rivière à plus long terme).

Le pic de MES se transfère quelquefois en s'amplifiant car l'augmentation de débit dans un tronçon habituellement court-circuité provoque le nettoyage et l'érosion des berges. L'expérience de vidange de retenues EDF a permis d'identifier trois étapes possible de fortes concentrations en MES dans la rivière en aval. La première de courte durée au moment de l'ouverture de la vanne de fond, la seconde d'une durée de plusieurs heures lors de l'évacuation des dernières réserves d'eau du lac (passage du culot), et la troisième lorsque le lac est à sec, et que le cours d'eau creuse son lit dans la vase et que les précipitations peuvent éroder le sédiment mis à nu.

Un second type de vidanges, dénommées vidanges totales par chasses des retenues en période de crue, est expérimenté par EDF. Utilisées dans les retenues à fort taux d'envasement ces vidanges ont pour objectif l'évacuation des MES accumulées, par des actions de chasse lors de crue, afin de profiter d'un phénomène de dilution. (Poirel *et al.*, 1994) indiquent lors de ce type d'action, que les concentrations maximales instantanées en MES sont de 1,5 à 10 fois moins élevées que lors de vidanges classiques. Cependant les flux de MES exportés sont beaucoup plus importants.

(Jansson et Erlingsson, 2000) observent l'exportation de 663 000 tonnes de sédiments lors de chasses. Cette masse équivaut à 71,4 % des apports par les tributaires mesurés depuis la dernière chasse et est nettement supérieure à la rétention de MES mesurée durant cette période (133 000 tonnes). Les chasses entraînent alors une érosion profonde du fond du réservoir pouvant mobiliser des dépôts de sédiments plus anciens.

(Asaeda et Rashid, 2012) ont étudié l'impact du relargage de sédiments au Japon dans une région de montagne: Ils constatent que le relargage de sédiments et leur déposition ultérieure aboutissent à la colonisation par des plantes herbacées. Une fois qu'une succession de plantes herbacées est établie, cela peut intensifier l'accumulation de dépôts de sable. La morphologie du lit à l'aval est donc progressivement modifiée.

## IV.3.5 Analyse critique et perspectives pour l'évaluation de l'impact cumulé

En matière de transport solide et d'ajustement morphologique des cours d'eau, l'analyse de la littérature scientifique fait apparaître un déficit de connaissance important concernant l'effet cumulé des retenues. Ce déficit semble notamment lié au fait que la très grande majorité des références ne portent que sur un type particulier de retenues (les retenues, le plus souvent assez grandes, sur cours d'eau). Même parmi celles-ci, la question du cumul est très peu traitée. De plus, l'analyse de ces références démontre que si l'effet des retenues sur les flux sédimentaires est globalement univoque (dans le sens du stockage des sédiments quasiment total pour les sédiments grossiers, plus variable plus les sédiments fins), l'effet sur les ajustements morphologiques aval est très variable. Cette variabilité s'explique par le fait que la nature et l'ampleur de l'ajustement dépendent d'une part de la modification relative des facteurs de contrôle que sont les flux liquides et les flux solides, et d'autre part des conditions locales au sein desquels l'effet se manifeste (pente du tronçon, capacité d'ajustement du cours d'eau, présence d'aménagement locaux, présence de végétation, etc.). La multiplicité des combinaisons possibles rend difficile l'établissement de modèles prédictifs performants.

Sur le plan opérationnel, l'analyse de la littérature permet de souligner l'importance de prendre en compte le contexte sédimentaire de chaque bassin versant pour analyser l'effet cumulé des retenues. Schématiquement, il convient de distinguer au moins 2 contextes : les bassins où la production et le transfert de sédiments sont importants depuis les versants vers le réseau hydrographique, et les réseaux hydrographiques connaissant un déficit sédimentaire.

- **Dans les bassins où la production et le transfert de sédiments sont importants depuis les versants vers le réseau hydrographique**, si le flux important de sédiments est un problème de gestion (envasement des retenues, colmatage des frayères), les retenues pourraient plutôt avoir un rôle positif en réduisant ces problèmes par stockage des sédiments dans les retenues. Les quelques études abordant la question de l'effet cumulé des retenues sur le transport/piégeage des sédiments semblent indiquer que cet effet cumulé est quantitativement relativement proche de la somme des effets individuels, mais que la distribution spatiale dépend de la position relative et des caractéristiques des retenues. En effet, si les rétroactions entre retenues voisines semblent assez limitées, des interactions sont clairement mises en évidence. Dans le cas de retenues en série sur un cours d'eau, c'est le signal d'entrée (i.e. l'apport en sédiments) dans la retenue aval qui peut être modifié dans le sens d'une réduction du fait de la présence de retenues amont. De fait, la retenue aval va continuer à avoir un taux de piégeage important mais son remplissage effectif va être ralenti du fait d'une entrée plus faible de sédiments. Ainsi, une retenue amont « protège » une retenue aval de l'envasement en réduisant les flux entrants de sédiments : c'est d'ailleurs la fonction principale des retenues collinaires construites en amont des grands barrages réservoirs au Maghreb. Donc, l'estimation des taux d'envasement des retenues doit tenir compte de la présence de retenues en amont ; c'est l'objectif et tout l'intérêt du modèle développé par (Minear et Kondolf, 2009). Par contre, sur le plan de la continuité écologique et des habitats, une retenue supplémentaire introduit un risque de discontinuité.
- **Pour les réseaux hydrographiques connaissant un déficit sédimentaire** (quelles que soient les causes : extraction, piégeage amont, etc.) avec des enjeux associés (fragilisation des ouvrages d'art, déconnexion des zones humides, dégradation des habitats aquatiques, etc.), les retenues ont un effet plutôt négatif. Dans ce contexte, la question du cumul est secondaire : c'est surtout la position de chaque retenue au sein du bassin qui est importante. Est-ce que celle-ci génère une nouvelle discontinuité entre le tronçon déficitaire et les zones de production ? Si oui, son impact est sensible (d'autant plus que la zone produit beaucoup de sédiments), sinon, son impact est probablement faible voire négligeable.

L'effet cumulé des retenues sur cours d'eau peut également être lié à la densité d'ouvrages. En effet, le contrôle d'une retenue sur l'hydromorphologie aval peut s'exercer sur plusieurs km. Si la densité de retenues dépasse un certain seuil cela peut donc conduire à une «artificialisation» complète du linéaire des cours d'eau. Cependant, la longueur de cette influence directe dépend de nombreux facteurs, ce qui rend difficile la proposition de valeurs de référence en l'état actuel des connaissances.

En matière de méthodes et d'outils, l'examen de la littérature scientifique permet de distinguer schématiquement 3 catégories.

Premièrement, il existe des outils pour identifier les contextes indiqués ci-dessus (i.e. excès de production sédimentaire, déficit sédimentaire). En effet, de nombreux territoires de gestion ont déjà fait l'objet de diagnostics physiques et, lorsque ce n'est pas le cas, il est possible de s'appuyer sur des démarches telles que le Système Relationnel d'Audit de l'Hydro-morphologie (SYRAH) développé par Irstea qui produit une information spatialisée des risques d'altération du fonctionnement hydrologique et morphologique des masses d'eau (Valette, Piffady *et al.*, 2012).

Deuxièmement, il existe des outils pour estimer le piégeage dans les retenues, notamment basées sur des indices de sédimentation, ou des ratios de la capacité du réservoir sur les entrées ou de la capacité du réservoir sur l'aire du bassin versant. Ces méthodes ont généralement été développées sur les grands réservoirs et ont été jugées valides pour les moyennes et les prévisions à long terme. Cependant, les petits réservoirs ont généralement des caractéristiques géométriques et hydrauliques différentes de ceux sur lesquels les méthodes d'estimation ont été fondées. Un modèle numérique a également été développé afin de calculer l'efficacité du piégeage par les retenues de moins de 1 ha (Verstraeten et Poesen, 2001) mais il n'a pas encore été beaucoup utilisé. Notons que ces méthodes sont souvent plus utilisées pour analyser la production des versants que pour évaluer l'impact des retenues.

Troisièmement, il existe des modèles pour anticiper l'ajustement morphologique des cours d'eau. Les modèles conceptuels sont très bien développés et complets, mais les modèles prédictifs sont peu performants (Alcayaga, 2013), notamment à cause du fait que l'ajustement d'un tronçon dépend de la combinaison des effets amont (ex. Retenues) et locaux (extractions, endiguement).

Pour conclure, l'analyse bibliographique permet de souligner qu'il existe probablement une marge de progrès scientifique très importante sur la question de l'évaluation des effets cumulés des retenues sur la dimension hydro-morphologique des cours d'eau (amélioration des modèles existants, etc.).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alcayaga, H. (2013). Impacts morphologiques des aménagements hydroélectriques à l'échelle du bassin versant, Université de Grenoble.
- Anderson, E. P., M. C. Freeman et C. M. Pringle (2006). "Ecological consequences of hydropower development in Central America: Impacts of small dams and water diversion on neotropical stream fish assemblages." *River Research and Applications* 22(4): 397-411.
- Arp, C. D., J. C. Schmidt, M. A. Baker et A. K. Myers (2007). "Stream geomorphology in a mountain lake district: hydraulic geometry, sediment sources and sinks, and downstream lake effects." *Earth Surface Processes and Landforms* 32(4): 525-543.
- Asaeda, T. et M. H. Rashid (2012). "The impacts of sediment released from dams on downstream sediment bar vegetation." *Journal of Hydrology* 430: 25-38.
- Assani, a. a., É. Gravel, T. Buffin-bélangier et a. G. Roy (2005). "Impacts des barrages sur les débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec ( Canada )." *Journal of Water Science* 18(1): 103-127.
- Baker, D. W., B. P. Bledsoe, C. M. Albano et N. L. Poff (2011). "Downstream effects of diversion dams on sediment and hydraulic conditions of rocky mountain streams." *River Research and Applications* 27(3): 388-401.
- Batten, W. et S. M. Hindall (1980). *Sediment Deposition in the White River Reservoir, Northwestern Wisconsin*, US Government Printing Office.
- Benn, P. C. et W. D. Erskine (1994). "Complex channel response to flow regulation: Cudgegong River below Windamere Dam, Australia." *Applied Geography* 14(2): 153-168.
- Boix-Fayos, C., J. De Vente, M. Martinez-Mena, G. G. Barbera et V. Castillo (2008). "The impact of land use change and check-dams on catchment sediment yield." *Hydrological Processes* 22(25): 4922-4935.
- Bombino, G., A. M. Gurnell, V. Tamburino, D. A. Zema et S. M. Zimbone (2008). "Sediment size variation in torrents with check dams: Effects on riparian vegetation." *Ecological Engineering* 32(2): 166-177.
- Bombino, G., A. M. Gurnell, V. Tamburino, D. A. Zema et S. M. Zimbone (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* 34(7): 1011-1021.
- Bosch, N. S. et J. D. Allan (2008). "The influence of impoundments on nutrient budgets in two catchments of Southeastern Michigan." *Biogeochemistry* 87(3): 325-338.
- Bouvard, M. (2004). *Transport des sédiments dans les ouvrages hydrauliques*, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées.
- Brandt, S. A. (2000). "Classification of geomorphological effects downstream of dams." *Catena* 40(4): 375-401.
- Bravard, J. et G. Petts (1993). "Interférences avec les interventions humaines." *Hydrosystèmes fluviaux*, Paris, Masson, coll. *Ecologie* 24: 233-253.
- Brown, C. B. (1944). "Discussion of sedimentation in reservoirs." Witzig, B.J. (Ed.), *Transactions of the American Society of Civil Engineers*: 1493-1500.
- Brune, G. M. (1953). "Trap efficiency of reservoirs." *Trans. Am. Geophys. Union* 34,12.

- Buttling, S. et T. Shaw (1973). Predicting the rate and pattern of storage loss in reservoirs. Transactions of the Eleventh International Congress of Large Dams, Madrid, Spain.
- Camp, T. R. (1945). "Sedimentation and the design of settling tanks." *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* 71: 445-486.
- Capanni, R. (2011). Étude et gestion intégrée des transferts sédimentaires dans le système Gapeau/rade d'Hyères, Aix Marseille 1.
- Cerdan, O., G. Govers, Y. Le Bissonnais, K. Van Oost, J. Poesen, N. Saby, A. Gobin, A. Vacca, J. Quinton, K. Auerswald, A. Klik, F. Kwaad, D. Raclot, I. Ionita, J. Rejman, S. Rousseva, T. Muxart, M. Roxo et T. Dostal (2010). "Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data." *Geomorphology* 122(1-2): 167-177.
- Chilton, R. L., M. M. Hackler, S. R. Smith, D. R. Orvos et R. K. R. Ambers (2004). "A small dam with a big impact : Geomorphology and ecology of two second-order streams in central Virginia." *Geological society of America Abstracts* 36 (2), 63.
- Church, M. (1995). "Geomorphic response to river flow regulation - case-studies and time-scales." *Regulated Rivers-Research & Management* 11(1): 3-22.
- Church, M. (2002). "Geomorphic thresholds in riverine landscapes." *Freshwater Biology* 47(4): 541-557.
- Churchill, M. (1948). Discussion of "Analysis and use of reservoir sedimentation data". Proceedings of the Federal Interagency Sedimentation Conference. Bureau of Reclamation, US Department of the Interior, Washington, DC.
- Cooke, R. et J. Doornkamp (1990). *Geomorphology in environmental management* 2nd ed Oxford University Press, Oxford.
- Cooper, C. M. et S. S. Knight (1990). "Nutrient trapping efficiency of a small sediment detention reservoir." *Agricultural Water Management* 18(2): 149-158.
- Csiki, S. et B. L. Rhoads (2010). "Hydraulic and geomorphological effects of run-of-river dams." *Progress in Physical Geography* 34(6): 755-780.
- Dendy, F. E. et C. M. Cooper (1984). "Sediment trap efficiency of a small reservoir." *Journal of Soil and Water Conservation* 39(4): 278-280.
- Dolan, R., A. Howard et A. Gallenson (1974). "Man's Impact on the Colorado River in the Grand Canyon: The Grand Canyon is being affected both by the vastly changed Colorado River and by the increased presence of man." *American Scientist* 62(4): 392-401.
- Erskine, W. D., N. Terrazzolo et R. F. Warner (1999). "River rehabilitation from the hydrogeomorphic impacts of a large hydro-electric power project: Snowy River, Australia." *Regulated Rivers-Research & Management* 15(1-3): 3-24.
- Evans, J. E., J. M. Huxley et R. K. Vincent (2006). "Historical changes in channel sinuosity upstream of a low-head dam, Huron River, North-central Ohio." *Geological society of America Abstracts* 38 (4), 20.
- Fahey, B. et M. Marden (2000). "Sediment yields from a forested and a pasture catchment, coastal Hawke's Bay, North Island, New Zealand." *Journal of hydrology New Zealand* 39(1): 49-63.
- Fassnacht, H., E. M. McClure, G. E. Grant et P. C. Klingeman (2003). "Downstream Effects of the Pelton-Round Butte Hydroelectric Project on Bedload Transport, Channel Morphology, and Channel-Bed Texture, Lower Deschutes River, Oregon." *A Peculiar River*: 169-201.
- Fergus, T. (1997). "Geomorphological response of a river regulated for hydropower: River Fortun, Norway." *Regulated Rivers-Research & Management* 13(5): 449-461.

- Finlayson, B., J. Nevill et T. Ladson Cumulative Impacts in Water Resource Development.
- Frickel, D. G. (1972). "Hydrology and effects of conservation structures, Willow Creek basin, Valley County, Montana 1954-1968." US Geological Survey Water-Supply Paper 1532-G, US Geological Survey.: 42p-42p.
- Friedman, J. M., W. R. Osterkamp, M. L. Scott et G. T. Auble (1998). "Downstream effects of dams on channel geometry and bottomland vegetation: Regional patterns in the Great Plains." *Wetlands* 18(4): 619-633.
- Gaeuman, D., J. C. Schmidt et P. R. Wilcock (2005). "Complex channel responses to changes in stream flow and sediment supply on the lower Duchesne River, Utah." *Geomorphology* 64(3-4): 185-206.
- Galay, V. J. (1983). "Causes of river bed degradation." *Water Resources Research* 19(5): 1057-1090.
- Garg, V., S. M. Asce et V. Jothiprakash (2010). "Modeling the Time Variation of Reservoir Trap Efficiency." *Journal of Hydrologic Engineering* 15(12): 1001-1015.
- Gilvear, D. J. (2004). "Patterns of channel adjustment to impoundment of the upper River Spey, Scotland (1942-2000)." *River Research and Applications* 20(2): 151-165.
- Graf, W. L. (2005). "Geomorphology and American dams: The scientific, social, and economic context." *Geomorphology* 71(1-2): 3-26.
- Grams, P. E. et J. C. Schmidt (2005). "Equilibrium or indeterminate? Where sediment budgets fail: Sediment mass balance and adjustment of channel form, Green River downstream from Flaming Gorge Dam, Utah and Colorado." *Geomorphology* 71(1-2): 156-181.
- Gregory, K. J. et C. Park (1974). "Adjustment of river channel capacity downstream from a reservoir." *Water Resources Research* 10(4): 870-873.
- Grier, M. (2003). "Impact environnemental des seuils en riviere. Etude bibliographique."
- Gurnell, A. M. et G. E. Petts (2002). "Island-dominated landscapes of large floodplain rivers, a European perspective." *Freshwater Biology* 47(4): 581-600.
- Heinemann, H., R. Holt et D. Rausch (1973). "Sediment and nutrient research on selected corn belt reservoirs." *Man-Made Lakes: Their Problems and Environmental Effects*: 381-386.
- Heinemann, H. G. (1981). "A new sediment trap efficiency curve for small reservoirs." *Water Resources Bulletin* 17(5): 825-830.
- Hu, B. Q., Z. S. Yang, H. J. Wang, X. X. Sun, N. S. Bi et G. G. Li (2009). "Sedimentation in the Three Gorges Dam and the future trend of Changjiang (Yangtze River) sediment flux to the sea." *Hydrology and Earth System Sciences* 13(11): 2253-2264.
- Huang, S.-L., Y.-C. Lee, W. W. Budd et M.-C. Yang (2012). "Analysis of Changes in Farm Pond Network Connectivity in the Peri-Urban Landscape of the Taoyuan Area, Taiwan." *Environmental Management* 49(4): 915-928.
- Ibanez, C. et N. Prat (2003). "The environmental impact of the Spanish National Hydrological Plan on the lower Ebro River and delta." *International Journal of Water Resources Development* 19(3): 485-500.
- Ibanez, C., N. Prat et A. Canicio (1996). "Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro river and its estuary." *Regulated Rivers-Research & Management* 12(1): 51-62.
- Ibáñez, A., E. Díaz, A. Ollero, V. Acín et D. Granado (2013). "Channel response to multiple damming in a meandering river, middle and lower Aragon River (Spain)." *Hydrobiologia* 712(1): 5-23.
- Jansson, M. B. et U. Erlingsson (2000). "Measurement and quantification of a sedimentation budget for a reservoir with regular flushing." *Regulated Rivers: Research & Management* 16(3): 279-306.

- Juracek, K. E. (2015). "The aging of America's reservoirs: in-reservoir and downstream physical changes and habitat implications." *Journal of the American Water Resources Association* 51(1): 168-184.
- Kennon, K. W. (1966). Hydrologic effects of small reservoirs in Sandstone Creek watershed: 44-44.
- Knighton, D. (1984). "Fluvial Form and Process." Edward Arnold, Baltimore, MD.
- Kondolf, G. M. (1997). "Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channels." *Environmental Management* 21(4): 533-551.
- Kondolf, G. M. et M. Larson (1995). "Historical channel analysis and its application to riparian and aquatic habitat restoration." *Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Ecosystems* 5(2): 109-126.
- Kummu, M., X. X. Lu, J. J. Wang et O. Varis (2010). "Basin-wide sediment trapping efficiency of emerging reservoirs along the Mekong." *Geomorphology* 119(3-4): 181-197.
- Labadie, J. W. (2004). "Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review." *Journal of water resources planning and management* 130(2): 93-111.
- Lane, E. W. (1955). "Importance of fluvial morphology in hydraulic engineering." *Proceedings (American Society of Civil Engineers)*; v. 81, paper no. 745.
- Lawrence, P. (2004). "Guidelines for predicting and minimising sedimentation in small dams."
- Le Gourières, D. (2009). *Les petites centrales hydroélectriques: conception et calcul*, Éd. du Moulin Cadiou.
- Ligon, F. K., W. E. Dietrich et W. J. Trush (1995). "Downstream ecological effects of dams." *BioScience* 45(3): 183-192.
- Lloyd, S. D., P. Bishop et I. Reinfelds (1998). "Shoreline erosion: A cautionary note in using small farm dams to determine catchment erosion rates." *Earth Surface Processes and Landforms* 23(10): 905-912.
- Lyons, J. K., M. J. Pucherelli et R. C. Clark (1992). "Sediment transport and channel characteristics of a sand-bed portion of the green river below flaming gorge dam, Utah, USA." *Regulated Rivers-Research & Management* 7(3): 219-232.
- Magilligan, F. J., H. J. Haynie et K. H. Nislow (2008). "Channel adjustments to dams in the Connecticut River Basin: Implications for forested mesic watersheds." *Annals of the Association of American Geographers* 98(2): 267-284.
- Magilligan, F. J. et K. H. Nislow (2005). "Changes in hydrologic regime by dams." *Geomorphology* 71(1-2): 61-78.
- Magilligan, F. J., N. L. Salant, C. E. Renshaw, K. H. Nislow, A. Heimsath et J. M. Kaste (2006). Evaluating the impacts of impoundment on sediment transport using short-lived fallout radionuclides. *Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems*. J. S. Rowan, R. W. Duck and A. Werritty. Wallingford, Int Assoc Hydrological Sciences. 306: 159-165.
- Mantel, S. K., D. A. Hughes et N. W. J. Muller (2010). "Ecological impacts of small dams on South African rivers Part 1: Drivers of change - water quantity and quality." *Water Sa* 36(3): 351-360.
- Marren, P. M., J. R. Grove, J. A. Webb et M. J. Stewardson (2014). "The Potential for Dams to Impact Lowland Meandering River Floodplain Geomorphology." *Scientific World Journal*: 24.
- Marston, R. A., J. D. Mills, D. R. Wrazien, B. Bassett et D. K. Splinter (2005). "Effects of Jackson Lake Dam on the Snake River and its floodplain, Grand Teton National Park, Wyoming, USA." *Geomorphology* 71(1-2): 79-98.
- Mathieu, C. et M. Subra-Durand (2000). "Erosion hydrique en Haute-Garonne vue à travers la sédimentation dans les retenues collinaires Etat des lieux et perspectives d'action *Etudes et Gestion des Sols*." 7: 231-247.

- McGuinness, J. M. (1984). "Ruataniwha Plains water resources report Hawkes Bay Catchment Board & Regional water Board, Napier."
- McMurray, D. (2006). Impact of Farm Dams on Streamflow in the Tod River Impact of Farm Dams on Streamflow in the Tod River Catchment , Eyre Peninsula South Australia: 52p-52p.
- Meigh, J. (1995). "The impact of small farm reservoirs on urban water supplies in Botswana." *Natural Resources Forum* 19(1): 71-83.
- Merritt, D. M. et D. J. Cooper (2000). "Riparian vegetation and channel change in response to river regulation: A comparative study of regulated and unregulated streams in the Green River Basin, USA." *Regulated Rivers-Research & Management* 16(6): 543-564.
- Merz, S. K. (2004). Estimating Available Water in Catchments using Sustainable Diversion Limits: Farm Dam Demand Factors, Report prepared for the Department of Sustainability and Environment.
- Minear, J. T. et G. M. Kondolf (2009). "Estimating reservoir sedimentation rates at large spatial and temporal scales: A case study of California." *Water Resources Research* 45.
- Neal, B. P., P. Shephard, K. A. Austin et R. J. Nathan (2000). "The Effect of Catchment Farm Dams on Streamflows - Victorian Case Studies." *Proc., Hydro 2000, 3rd International Hydrology and Water Resources Symposium*(1): 836-841.
- Neil, D. T. et R. K. Mazari (1993). "Sediment yield mapping using small dam sedimentation surveys, southern tablelands, New-South-Wales." *Catena* 20(1-2): 13-25.
- Nilsson, B. (1976). "The influence of man's activities in rivers on sediment transport." *Hydrology Research* 7(3): 145-160.
- Olive, L. J. et J. M. Olley (1997). "River regulation and sediment transport in a semiarid river: the Murrumbidgee River, New South Wales, Australia." *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences* 245: 283-290.
- Olley, J. et P. Wallbrink (2004). Recent trends in turbidity and suspended sediment loads in the Murrumbidgee River, NSW, Australia. Sediment Transfer through the Fluvial System. V. Golosov, V. Belyaev and D. E. Walling. Wallingford, Int Assoc Hydrological Sciences: 125-129.
- Olley, J. M. et R. J. Wasson (2003). "Changes in the flux of sediment in the Upper Murrumbidgee catchment, Southeastern Australia, since European settlement." *Hydrological processes* 17(16): 3307-3320.
- Petts, G. E. (1979). "Complex response of river channel morphology subsequent to reservoir construction." *Progress in Physical Geography* 3(3): 329-362.
- Petts, G. E. (1980). "Long-term consequences of upstream impoundment." *Environmental Conservation* 7(4): 325-332.
- Petts, G. E. (1984). *Impounded rivers: perspectives for ecological management*, John Wiley.
- Petts, G. E. et A. M. Gurnell (2005). "Dams and geomorphology: Research progress and future directions." *Geomorphology* 71(1-2): 27-47.
- Phillips, J. D. (2003). "Toledo Bend reservoir and geomorphic response in the lower Sabine River." *River Research and Applications* 19(2): 137-159.
- Phillips, J. D., M. C. Slattery and Z. A. Musselman (2005). "Channel adjustments of the lower Trinity River, Texas, downstream of Livingston Dam." *Earth Surface Processes and Landforms* 30(11): 1419-1439.

- Poff, N. L. et D. D. Hart (2002). "How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal." *Bioscience* 52(8): 659-668.
- Poirel, A., E. Vindimian et J. Garric (1994). "Gestion et vidange de réservoirs." Mesures prises pour préserver l'environnement et retour d'expérience d'une soixantaine de vidanges. Commission Internationale des Grands Barrages, 18ème Congrès des Grands Barrages, Durban: 321-349.
- Ran, L., X. X. Lu, Z. Xin et X. Yang (2013). "Cumulative sediment trapping by reservoirs in large river basins: A case study of the Yellow River basin." *Global and Planetary Change* 100: 308-319.
- Renwick, W. H., S. V. Smith, J. D. Bartley et R. W. Buddemeier (2005). "The role of impoundments in the sediment budget of the conterminous United States." *Geomorphology* 71(1-2): 99-111.
- Richter, B. D., J. V. Baumgartner, J. Powell et D. P. Braun (1996). "A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems." *Conservation Biology* 10(4): 1163-1174.
- Rollet, A.-J. (2007). Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage: le cas de la basse vallée de l'Ain, Université Jean Moulin-Lyon III.
- Rollet, A. J., H. Piegay, S. Dufour, G. Bornette et H. Persat (2014). "Assessment of consequences of sediment deficit on a gravel river bed downstream of dams in restoration perspectives: application of a multicriteria, hierarchical and spatially explicit diagnosis." *River Research and Applications* 30(8): 939-953.
- Salant, N. L., C. E. Renshaw et F. J. Magilligan (2006). "Short and long-term changes to bed mobility and bed composition under altered sediment regimes." *Geomorphology* 76(1-2): 43-53.
- Sammut, J. et W. D. Erskine (1995). "Hydrological impacts of flow regulation associated with the upper nepean water-supply scheme, NSW." *Australian Geographer* 26(1): 71-86.
- Savadamuthu, K. (2003). Surface water assessment of the Upper Finnis Catchment, Department of Water, Land and Biodiversity Conservation.
- Schenk, E. R. et C. R. Hupp (2009). "Legacy Effects of Colonial Millponds on Floodplain Sedimentation, Bank Erosion, and Channel Morphology, Mid-Atlantic, USA." *Journal of the American Water Resources Association* 45(3): 597-606.
- Schreider, S. Y., a. J. Jakeman, R. a. Letcher, R. J. Nathan, B. P. Neal et S. G. Beavis (2002). "Detecting changes in streamflow response to changes in non-climatic catchment conditions: farm dam development in the Murray-Darling basin, Australia." *Journal of Hydrology* 262(1-4): 84-98.
- Schumm, S. A. (1969). "River metamorphosis." *Journal of the Hydraulics division* 95(1): 255-274.
- Sear, D. A. (1995). "Morphological and sedimentological changes in a gravel-bed river following 12 years of flow regulation for hydropower." *Regulated Rivers-Research & Management* 10(2-4): 247-264.
- Sherrard, J. et W. D. Erskine (1991). "Complex response of a sand-bed stream to upstream impoundment." *Regulated Rivers: Research & Management* 6(1): 53-70.
- Skalak, K., J. Pizzuto et D. D. Hart (2009). "Influence of Small Dams on Downstream Channel Characteristics in Pennsylvania and Maryland: Implications for the Long-Term Geomorphic Effects of Dam Removal1." *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 45(1): 97-109.
- Srikanthan, R. et D. Neil (1989). "Simulation of the effect of farm dams on sediment yield from two small rural catchments." *Australian Journal of Soil and Water Conservation (Australia)*.
- Surian, N. et M. Rinaldi (2003). "Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy." *Geomorphology* 50(4): 307-326.

- Tarboton, K. C. et R. E. Schulze (1991). "The ACURU modelling system for large catchment water resources management." *Hydrology for the Water Management of Large River Bas* 2025(201): 1-14.
- Thompson, J. C. (2012). *Impact and Management of Small Farm Dams in Hawke's Bay, New Zealand*.
- Thoms, M. C. et K. F. Walker (1993). "Channel changes associated with two adjacent weirs on a regulated lowland alluvial river." *Regulated Rivers: Research & Management* 8(3): 271-284.
- Toniolo, H., G. Parker et V. Voller (2007). "Role of ponded turbidity currents in reservoir trap efficiency." *Journal of Hydraulic Engineering-Asce* 133(6): 579-595.
- Valette, L., J. Piffady, A. Chandesris et Y. Souchon (2012). "SYRAH-CE: description des données et modélisation du risque d'altération de l'hydromorphologie des cours d'eau pour l'Etat des lieux DCE." Rapport final, Pôle Hydroécologie des cours d'eau Onema-Irstea Lyon, MALY-LHQ, Lyon.
- Van Effenterre, C. (1982). "Les barrages perméables de sédimentation." *Revue Forestière Française*, 1982, 5, fascicule thématique "Restauration des terrains en montagne".
- Van Oost, K., G. Govers et P. Desmet (2000). "Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage." *Landscape Ecology* 15(6): 577-589.
- Vanoni, V. A. (1975). "Sedimentation Engineering." American Society of Civil Engineers, Reston.
- Vericat, D. et R. J. Batalla (2006). "Sediment transport in a large impounded river: The lower Ebro, NE Iberian Peninsula." *Geomorphology* 79(1-2): 72-92.
- Verstraeten, G. et J. Poesen (2000). "Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield." *Progress in Physical Geography* 24(2): 219-251.
- Verstraeten, G. et J. Poesen (2001). "Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments in a temperate humid climate." *Geomorphology* 40(1-2): 123-144.
- Verstraeten, G. et I. P. Prosser (2008). "Modelling the impact of land-use change and farm dam construction on hillslope sediment delivery to rivers at the regional scale." *Geomorphology* 98(3-4): 199-212.
- Vorosmarty, C. J., M. Meybeck, B. Fekete, K. Sharma, P. Green et J. P. M. Syvitski (2003). "Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments." *Global and Planetary Change* 39(1-2): 169-190.
- Ward, A., C. Haan et B. Barfield (1977). performance of sediment detention structures. *Proceedings International Symposium on Urban Hydrology, hydraulics and Sediment Control*.
- Williams, G. P. et M. G. Wolman (1984). "Downstream effects of dams on alluvial rivers."
- Wolman, M. G. (1967). "Two problems involving river channel changes and background observations." *Quantitative geography. Part II: Physical and cartographic topics*: 67-107.
- Yang, S. L., J. D. Milliman, P. Li et K. Xu (2011). "50,000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta." *Global and Planetary Change* 75(1-2): 14-20.
- Yang, X. et X. X. Lu (2014). "Estimate of cumulative sediment trapping by multiple reservoirs in large river basins: An example of the Yangtze River basin." *Geomorphology* 227: 49-59.
- Yorke, T. H., J. K. Stamer et G. L. Pederson (1985). Effects of low-level dams on the distribution of sediment, trace metals, and organic substances in the lower Schuylkill River basin, Pennsylvania, USGPO.