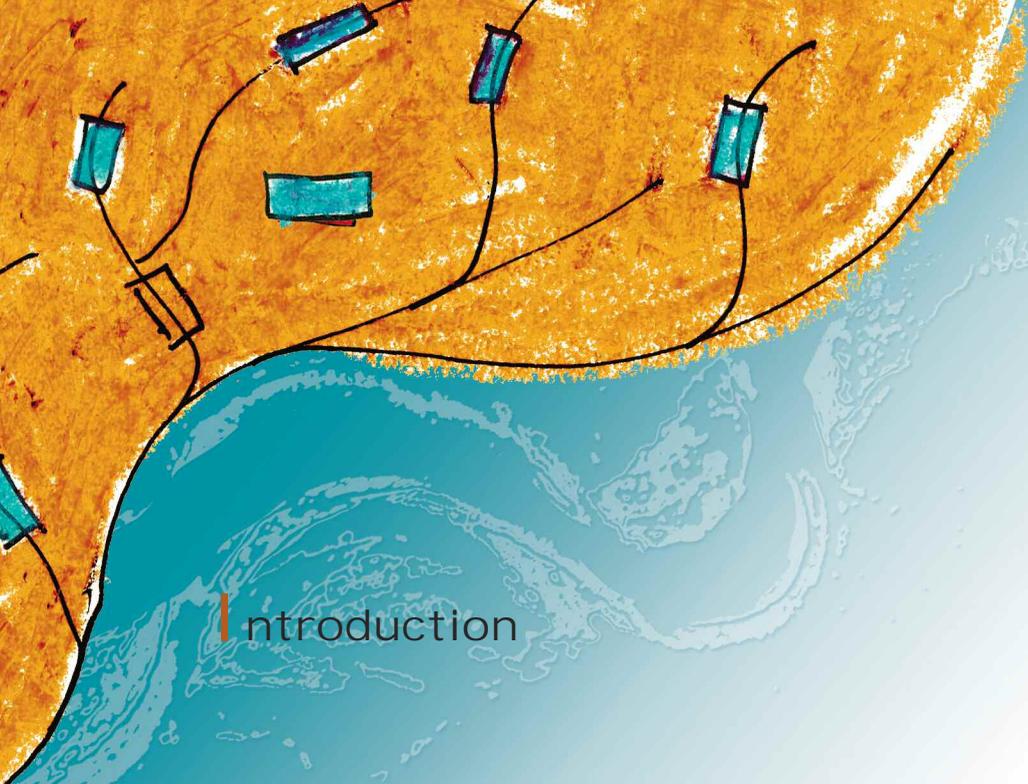


Effets cumulés des retenues sur le transport sédimentaire et l'hydromorphologie des cours d'eau

- 70 ■ Introduction
- 71 ■ Effet d'une retenue sur le devenir des sédiments et la morphologie des cours d'eau
- 76 ■ Effets cumulés des retenues sur le transport sédimentaire et l'hydromorphologie des cours d'eau
- 78 ■ Analyse critique et perspectives pour l'évaluation opérationnelle de l'impact cumulé



Introduction

L'effet des retenues sur le transport sédimentaire et l'hydromorphologie des cours d'eau est essentiellement abordé dans la littérature scientifique pour les grands ouvrages, le plus souvent isolés, sur des lits majeurs. Rares sont les références abordant les ouvrages en versant, ou l'impact cumulé des ouvrages. Ce chapitre s'appuie donc sur des connaissances relatives à des retenues plus importantes que celles qui constituent l'objet de l'expertise, et tente autant que possible d'identifier les connaissances, méthodes et outils qui sont transposables dans le cadre de l'expertise : si les processus mis en jeu sont essentiellement les mêmes, les ordres de grandeur, et la hiérarchie entre les processus dominants sont différents.

Ce chapitre présente tout d'abord l'influence d'une seule retenue sur le transport sédimentaire, les effets induits sur le cours d'eau aval, et les outils et concepts disponibles pour les aborder, éléments nécessaires à aborder avant de passer au cas d'un ensemble de retenues, qui a fait l'objet d'un intérêt moindre dans la littérature scientifique.



Effet d'une retenue sur le devenir des sédiments et la morphologie des cours d'eau

L'effet d'une retenue sur le devenir des sédiments et la morphologie des cours d'eau résulte de l'influence de la retenue sur deux variables de contrôle de ces processus que sont **les caractéristiques hydrologiques des écoulements, et les concentrations et débits solides**. Une fois ces effets considérés, on peut examiner leur influence sur les variables **d'ajustement* morphologique du réseau hydrographique** en aval de la retenue. L'influence d'une retenue sur le régime hydrologique a été abordée au chapitre précédent : elle diminue globalement les volumes écoulés et les pics de crue, d'une façon qui varie en fonction de ses caractéristiques propres, de celles du bassin versant qui la supporte, et des usages de l'eau qu'elle stocke.

Une retenue piège les sédiments....

En ralentissant l'écoulement et diminuant sa capacité de transport, l'un des effets de premier ordre d'une retenue est de constituer un piège pour les sédiments. Cet effet peut être mesuré directement par bathymétrie diachronique, ou analyse de carottes de sédiments ; l'analyse de ces données est toutefois réputée difficile et contestable, en particulier du fait de l'hétérogénéité spatiale et temporelle importante de ces dépôts au sein des retenues. Il peut également être estimé par modélisation numérique, ou via le recours à des indices de sédimentation, ou des ratios basés sur la capacité des retenues et l'aire du bassin versant ou les flux entrants estimés. Ces indices ont été mis au point pour de grandes retenues, et sont considérés valides en moyenne ou sur le long terme. Pourtant, une forte variabilité saisonnière et annuelle de l'efficacité du piégeage peut parfois être observée, selon l'occurrence des événements extrêmes, les caractéristiques de la couverture végétale des sols ou les caractéristiques de la retenue.

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, des caractéristiques de sédimentation des sédiments à l'intérieur du réservoir ainsi que de la production interne de sédiments biogènes dans certaines retenues par décantation des résidus particuliers de la production primaire. Dans la majorité des cas, la tête du bassin versant fournit plus de 75 % de la charge de fond* des cours d'eau ; l'accès du bétail aux berges, ou le batillage peuvent toutefois provoquer l'érosion des berges et contribuer significativement aux flux de sédiments entrant dans 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 des 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. Les bassins agricoles ont en général une production de sédiments plus élevée que les bassins versants boisés, et parmi les sols cultivés, les sols nus ou à culture peu couvrante peuvent avoir un taux d'exportation (production de sédiments par unité de surface) 10 à 20 fois plus élevé que les sols à couverture permanente. L'érosion des berges est susceptible de constituer une source importante de sédiment même dans des bassins à forte couverture végétale. Par ailleurs, les petits bassins versants ont en général un taux d'exportation plus élevé que les bassins versants plus vastes, où le taux de dépôt « interne » est plus fort.

Le piégeage des sédiments dans la retenue dépend de leur granulométrie, de la taille de la retenue, de la vitesse des écoulements en son sein. On peut distinguer **la charge de fond**, ou sédiments grossiers, pour laquelle le taux de piégeage est proche de 100 %, et **la charge en suspension**, ou sédiments fins, pour laquelle le taux de piégeage est plus variable. Il n'y a pas de seuil de diamètre absolu entre ces deux fractions, puisque la différence entre les deux mécanismes dépend aussi de l'énergie hydraulique (vitesse, turbulence...). Pour fixer les idées, on peut considérer que les sédiments grossiers correspondent aux fractions granulométriques allant des sables moyens (>500 µm) aux blocs. Les taux d'exportation ou de sédimentation cités dans la littérature sont globaux, et ne font quasiment jamais la distinction entre sédiments grossiers et fins, alors que, du point de vue de l'écologie, les classes granulométriques grossières sont primordiales pour les biocénoses aquatiques et le maintien des communautés biologiques. À l'inverse la fraction considérée comme géochimiquement active est inférieure à 60 ou 50 µm selon les auteurs. On peut ainsi considérer que, en l'absence d'équipement favorisant leur transparence au transport solide (dérivation, rampe à sédiment), les grands ouvrages piègent de 50 à 100 % de la charge de sédiments entrant, et déconnectent ainsi partiellement ou complètement l'amont du bassin versant de son aval pour ce qui concerne le transport sédimentaire. Certaines études portant sur de plus petites structures donnent des chiffres équivalents (60 à 100 %), d'autres aboutissent à des efficacités moindres (35 à 60 %) pour des retenues dont le barrage est peu élevé (2 à 4 m). Pour certains de ces petits ouvrages, le taux de dépôt est tel qu'ils peuvent parfois se combler en quelques dizaines d'années et devenir transparents pour le transport solide.

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.

... et modifie la morphologie du cours d'eau aval de façon complexe

En modifiant à la fois les flux liquides et solides à son aval, une retenue est susceptible de modifier le fonctionnement morphologique des tronçons de cours d'eau situés en aval. Pour que cette modification soit importante il faut que la modification des débits affecte les débits morphogènes¹⁸ et les débits de mise en mouvement des particules, qui seront les seuls débits considérés dans la suite de ce chapitre, 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, que les tronçons aval possèdent une capacité d'ajustement.

L'ajustement morphologique des cours d'eau peut être analysé par des analyses diachroniques de la forme (largeur, style fluvial) des cours d'eau sur la base de photographies aériennes, par la combinaison de données *in situ* (mesures topographiques répétées) et de modèles de transport solide, ou par l'utilisation de modèles conceptuels des ajustements potentiels. L'impact morphologique des barrages a surtout été étudié pour de grands ouvrages, et principalement pour ce qui concerne le chenal d'écoulement ; la prise en compte de la plaine alluviale est plus récente, bien que son évolution soit également influencée par les ouvrages.

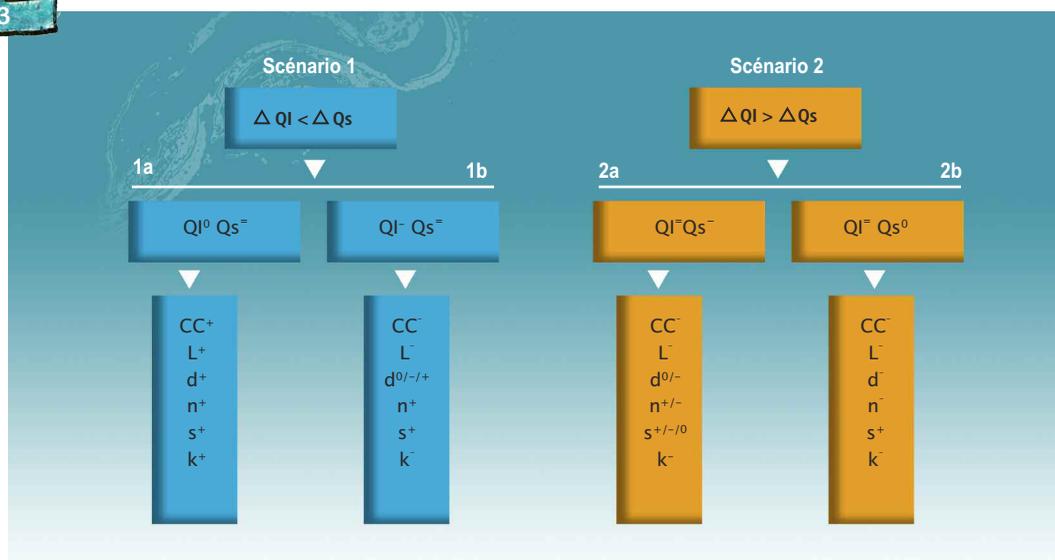
De façon générale, à l'échelle d'un tronçon fluvial, si les quantités de sédiments (constitutifs de la charge de fond) entrants et sortants sont identiques, le tronçon est considéré comme en équilibre sédimentaire. Si les quantités entrantes dans le tronçon sont supérieures aux quantités sortantes, le bilan sédimentaire est positif, ce qui 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. La Figure 13 résume ainsi un des premiers modèles conceptuels, qui présente les différents états ajustés du chenal résultant de différentes combinaisons de modifications des débits liquides et solides.

■ **Le scénario 1** caractérise un cours d'eau enregistrant une forte diminution 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 aussi 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.

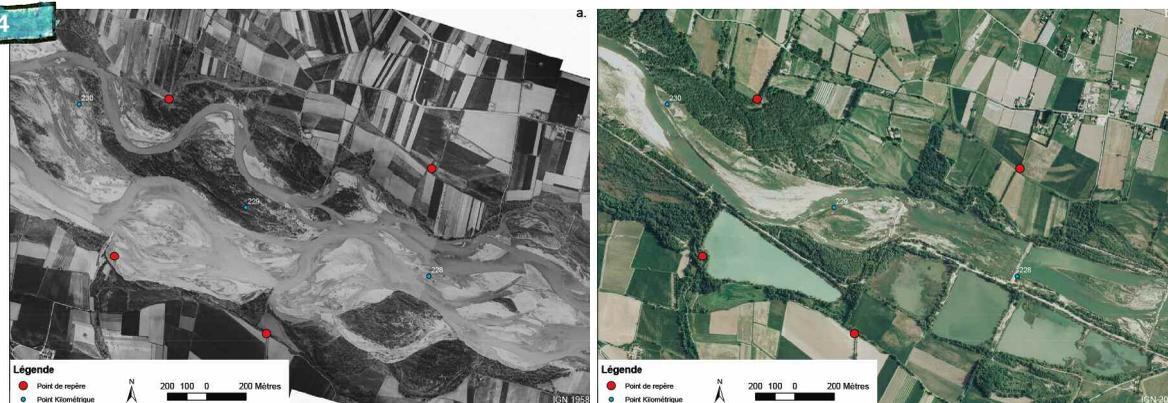
Les ajustements affectent les lits fluviaux à la fois dans leurs évolutions verticales et latérales. **La mobilité verticale** va conduire selon le cas à une incision et un pavage progressif du lit (accroissement de la taille médiane des particules constituant le lit du cours d'eau), ou au contraire à un exhaussement quand les débits modifiés restent inférieurs aux entrées de sédiments provenant de l'amont du cours d'eau, de l'érosion latérale et des affluents. Le processus d'incision pourrait se produire quand le rapport entre les débits morphogènes avant et après aménagement/régulation excède 0,9 et le processus d'exhaussement quand il est inférieur à 0,75. **La mobilité latérale** se traduit par 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 (Figure 14). La rétraction* du chenal s'accompagne souvent du développement de végétation, qui contribue en retour à stabiliser le lit.

Figure 13



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) représente des séquences hypothétiques de changements du chenal en aval d'un barrage. À 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 (c.-à-d. 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).

Figure 14



Évolution du lit de la Durance entre 1958 et 1998, liée à l'extraction des sédiments et à la construction du barrage de Serre Ponçon. (D'après Chapuis et Collomb 2012)¹⁹.

19 - 2012 Chapuis M., Collomb D. – La cicatrization des rivières méditerranéennes françaises après les grandes perturbations de la deuxième moitié du XX^e siècle : réponses des systèmes fluviaux et stratégies de gestion. Exemples de la Durance, du Var, de la Cèze, Revue Méditerranée (liste AERES du 13/02/2013), vol. 118, pp. 65–74.

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. En effet, outre la relation entre les débits solides et liquides et leurs variations, de nombreux facteurs sont susceptibles d'influencer l'ajustement morphologique d'un cours d'eau : la nature de ses sédiments alluviaux, la localisation des secteurs de fourniture sédimentaire, la présence ou non de végétation, la géologie du bassin versant, le style fluvial (rectiligne, à méandres, à tresses, à anastomoses), la géométrie du chenal, le fonctionnement des affluents. **La granulométrie du lit** joue un rôle crucial dans la nature des ajustements : les tronçons sableux ont tendance à répondre rapidement aux perturbations par un changement rapide de l'élévation du fond du chenal, l'ajustement de la largeur n'intervenant qu'ensuite, alors qu'il constitue la variable d'ajustement majeure sur les tronçons à charge grossière. La végétation joue un rôle actif dans la modification des chenaux, rôle 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.). Selon le cas, le développement de la végétation sera rapide et influera en retour sur la sédimentation et l'érosion pendant l'ajustement du lit qui se déroulera sur une dizaine d'années, ou au contraire se déroulera sur un temps long (de l'ordre de la centaine d'années ou plus), de façon modérée, de sorte que les modifications dans le chenal resteront dominées par les processus géomorphologiques. **Les affluents** peuvent également influencer l'ajustement du lit s'ils sont dans la zone concernée par celui-ci, selon leur contribution propre en termes de débits liquides et solides.

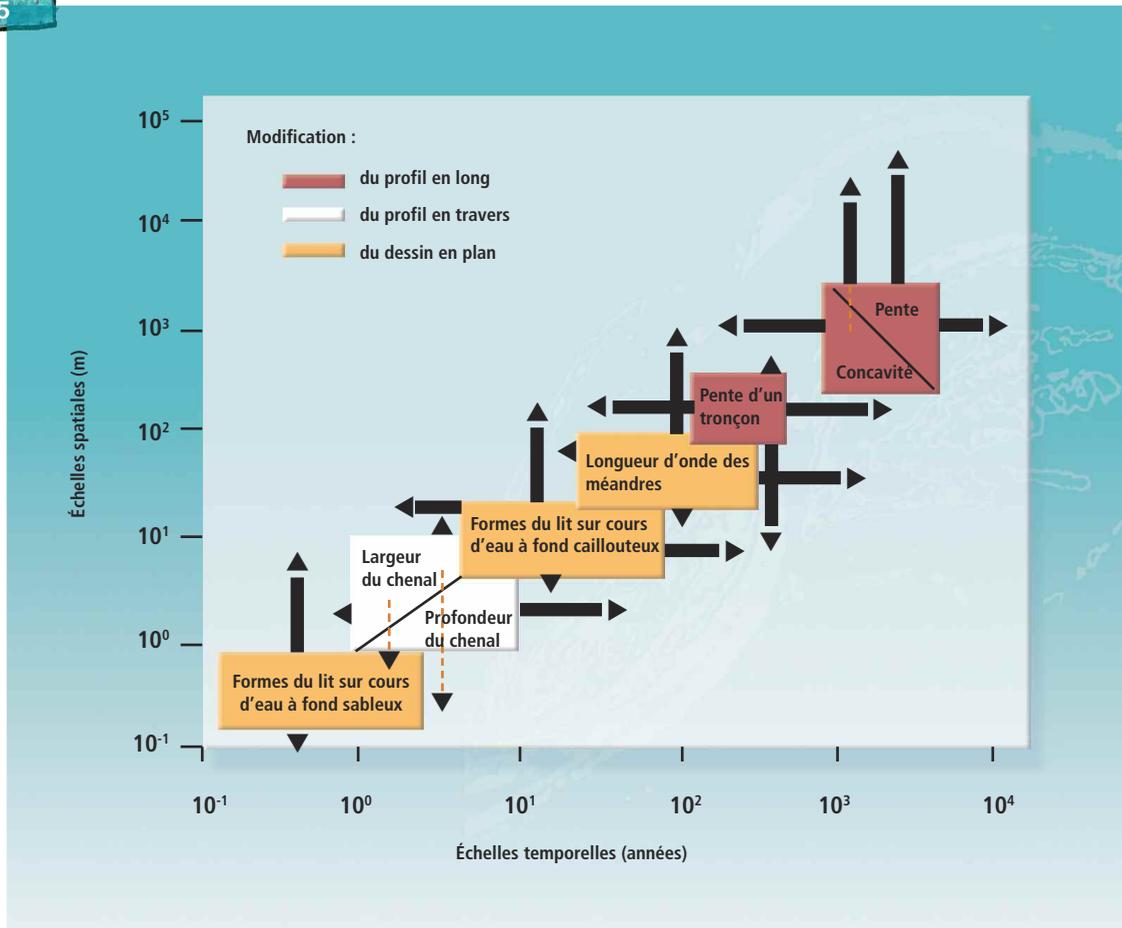
Un aspect important de l'ajustement morphologique d'un chenal est sa réponse complexe et variable à la fois dans le temps et dans l'espace, et que son amplitude dépend de nombreux facteurs. L'évolution du système se produit en effet au cours d'une phase de relaxation, plus ou moins longue, constituée d'une suite d'états transitionnels correspondant à un ajustement progressif de la morphologie du cours d'eau en réponse aux modifications des écoulements et de la charge solide.

Du point de vue de **l'échelle temporelle**, les ajustements se produisent plus rapidement si les débits sont augmentés (quelques années) plutôt que diminués (décennies ou siècles), cette échelle de temps étant par ailleurs influencée par l'évolution de la fréquence des débits morphogènes. Les rivières à sable montrent également un ajustement plus rapide que les autres cours d'eau. Enfin, un rétrécissement du chenal est également en général plus rapide qu'un élargissement, l'évolution du style ou de la pente étant encore plus lente, comme cela est résumé sur la Figure 15.

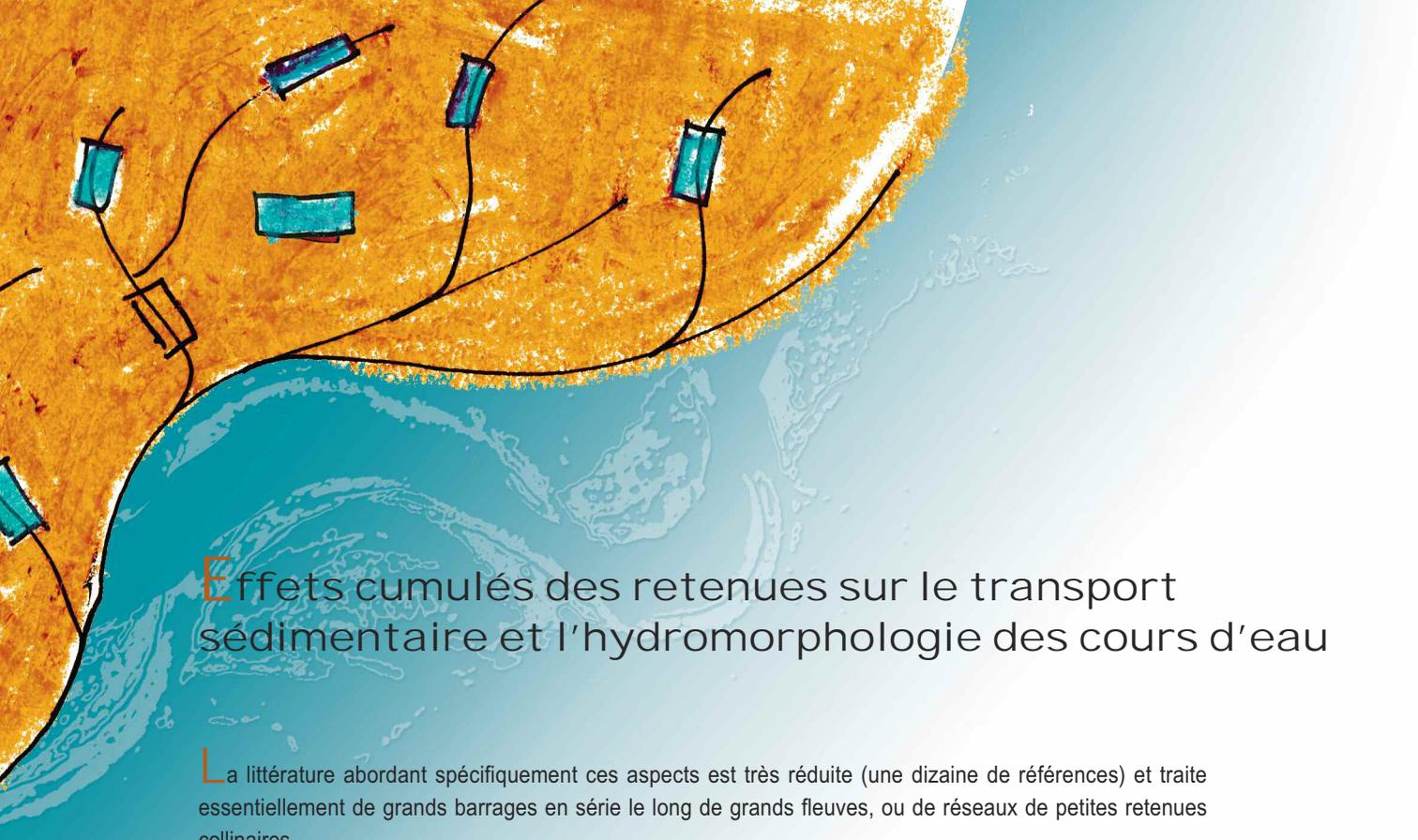
Pour ce qui concerne **l'échelle spatiale**, la distance à partir de laquelle l'influence du barrage s'atténue semble être de l'ordre de 50 à 120 km pour les grands ouvrages abordés dans la littérature, avec une progression des ajustements en général de l'ordre de 0 à 2 km/an, pouvant atteindre quelques dizaines de km/an dans quelques rares cas. L'amplitude des ajustements varie quant à elle en fonction de nombreux facteurs autres que la distance à l'ouvrage : 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 contrebalancer le déficit), la gestion des débits.

Les petits ouvrages n'ont été que très peu abordés dans la littérature : les phénomènes observés sont similaires à ceux qui sont cités plus haut, mais les données sont trop peu nombreuses pour avancer des ordres de grandeur en fonction de situations.

Figure 15



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



Effets cumulés des retenues sur le transport sédimentaire et l'hydromorphologie des cours d'eau

La littérature abordant spécifiquement ces aspects est très réduite (une dizaine de références) et traite essentiellement de grands barrages en série le long de grands fleuves, ou de réseaux de petites retenues collinaires.

Effets cumulés sur le piégeage des sédiments

En se référant aux définitions et concepts présentés dans le paragraphe sur les différents types d'effets cumulés (page 37), on peut dire que les effets cumulés sur le piégeage des sédiments sont plutôt homotypiques (piégeage quasi-systématique des sédiments) et que le processus peut être, selon la position relative des différentes retenues, soit additif (retenues sur des tributaires différents) soit infra-additif (retenues en cascades : la retenue amont piège une partie des sédiments qui auraient été piégés dans la retenue aval). Mais ces effets sont à la fois directs et indirects (une retenue peut entraîner une reprise d'érosion à l'aval, produisant des sédiments pouvant à leur tour être piégés dans une autre retenue). La modification des flux sédimentaires à large échelle est évaluée à partir d'estimations des volumes piégés réalisées en se basant sur des mesures bathymétriques diachroniques dans un certain nombre de bassins, ou en utilisant des modèles distribués d'érosion. Une approche courante consiste à mesurer ou estimer (via des modèles conceptuels simples, comme vu page 71) le piégeage dans certaines retenues, et transposer ces résultats aux autres réservoirs. Certains modèles intègrent le piégeage des sédiments par les barrages situés en amont, ainsi que la diminution du piégeage des sédiments quand les réservoirs se remplissent. Le modèle WATEM / SEDEM, modèle distribué raster, se compose ainsi essentiellement de trois composants principaux :

- l'évaluation de la perte de sol ;
- l'évaluation de la capacité de transport des sédiments ;
- et le routage des sédiments.

Il est le seul à avoir été utilisé pour l'évaluation de l'effet cumulé des petites retenues collinaires, et semble actuellement un des mieux adaptés à cet objectif, les autres modèles abordés ayant été appliqués sur de très grands bassins (comme les bassins du barrage des Trois Gorges, ou du fleuve Jaune). Ce modèle serait toutefois à compléter par la représentation d'autres processus, comme l'érosion des berges et les dépôts de sédiments des plaines inondables.

Les observations et modélisations réalisées montrent que globalement, l'occupation agricole des sols entraîne une érosion fortement accrue des versants (augmentation de 370 % par exemple sur un bassin australien entre la période pré-européenne et la période actuelle), qui peut être en grande partie contrebalancée par la présence des retenues (2,5 fois pour l'exemple cité), notamment pour ce qui concerne la fraction grossière. Cette dynamique temporelle pose donc la question de la définition de l'état de référence. Les retenues ont tendance à s'ensaver de façon significative, parfois à un rythme élevé, dans les contextes érosifs, ce qui n'est pas toujours anticipé au moment de leur aménagement. Aux États-Unis par exemple, le nombre des retenues est estimé entre 2,6 et 8-9 millions (selon les méthodes d'inventaire), et il est estimé que 21 % de la superficie totale du pays,

représentant 25% du total de l'érosion en nappe et rigole, est drainée par des retenues, où la sédimentation est totale. Cette évaluation fait des petites retenues un puits de sédiments significatif. Une autre étude combinant simulations et observations dans le sud de l'Espagne indique, d'une part, que les changements d'utilisation des terres peuvent entraîner une modification importante de l'apport de sédiments, et d'autre part, que les retenues piègent plus de 77 % des sédiments et sont majoritairement envasées, 81 % d'entre elles présentant par ailleurs des traces d'érosion en aval. On a observé, également en Espagne, 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 XX^e siècle ; 90 % des sédiments fins et 100 % des sédiments grossiers sont piégés dans deux barrages, les sédiments actuellement transportés ne provenant que de l'incision du lit et des érosions des berges.

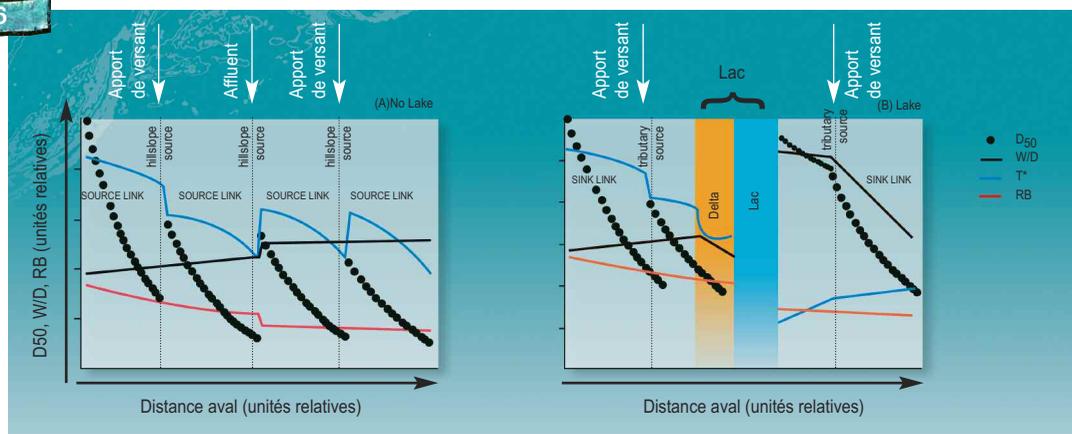
Effets cumulés sur l'ajustement morphologique du cours d'eau

Là aussi, l'analyse des ajustements se base soit sur l'observation des effets, avec des méthodes analogues à celles citées en page 72 et appliquées à plus large échelle, soit sur de la modélisation. 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 qu'en l'état aucune solution simple n'existe pour évaluer l'effet spécifique des retenues par rapport aux autres facteurs de contrôle, ni pour évaluer l'effet des retenues situés hors du réseau hydrographique. Il s'agit bien ici d'effets indirects et multivariés, et la mise en œuvre de tels modèles se heurte notamment à la difficulté à :

- estimer la production sédimentaire des versants qui transite ensuite comme charge de fond ;
- prendre en compte d'éventuelles déviations des trajectoires prédites, ou à intégrer de la connaissance experte spécifique ou des contraintes locales spécifiques ;
- prendre en compte le fait que le système n'était déjà pas forcément à l'équilibre du point de vue morphologique avant les perturbations ;
- rendre compte des temps de réponse du système.

Les effets observés dans les rares études disponibles pour l'analyse vont dans le sens d'une diminution de la largeur de la bande active et de la migration des chenaux du cours d'eau, qui peut s'accompagner du développement d'une végétation riveraine dont la forme et la structure* diffèrent de celles de la végétation préexistante, le cas échéant. Compte tenu du manque de données disponibles, il peut être intéressant de considérer l'analogie entre ces systèmes de bassins versants équipés de retenues et des bassins versants comportant des lacs naturels en montagne. Les distributions spatiales de la taille des sédiments et de l'ajustement hydromorphologique des chenaux au sein d'un réseau hydrographique y sont bien expliquées par la localisation dans le paysage des sources (versants et affluents) et des puits de sédiments (lacs) en amont, qui apparaissent ainsi comme des contrôles locaux importants sur les réseaux hydrographiques en montagne. Le modèle conceptuel de l'évolution hydromorphologique qui se produit en aval dans un bassin versant sans et avec un lac présenté sur la Figure 16 pourrait ainsi être adapté au contexte de retenues d'origine anthropique, et être mobilisé pour évaluer leur impact cumulé sur l'hydromorphologie.

Figure 16



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, T^* est la contrainte de cisaillement sans dimension au débit max pour le D50, et RB est le ruissellement max.



Analyse critique et perspectives pour l'évaluation opérationnelle de l'impact cumulé

On constate un déficit de connaissance important concernant l'effet cumulé des retenues sur le transport solide et l'ajustement morphologique des cours d'eau, lié d'une part au fait que l'essentiel de la littérature scientifique sur le sujet traite des grands ou très grands ouvrages sur cours d'eau, et d'autre part au fait que la question du cumul n'est quasiment pas abordée. De plus, 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 mais toujours important pour 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 (débit morphogène) et les flux solides**, et d'autre part des conditions locales au sein desquelles l'effet se manifeste (pente du tronçon, capacité d'ajustement du cours d'eau, présence d'aménagements 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 deux contextes :

- **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 entraîne 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. **En première approche cet effet cumulé est quantitativement relativement proche de la somme des effets individuels**, mais la distribution spatiale des sédiments stockés 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 : l'estimation des taux d'envasement des retenues doit tenir compte de la présence de retenues en amont, celles-ci « protégeant » les retenues aval de l'envasement. Sur le plan de la continuité écologique et des habitats en revanche, une retenue supplémentaire introduit un risque de discontinuité ;
- **pour les réseaux hydrographiques connaissant un déficit sédimentaire** 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 cas la position de chaque retenue au sein du bassin est importante, selon qu'elle génère ou non une nouvelle discontinuité entre le tronçon déficitaire et les zones de production**. Si oui, son impact sera d'autant plus sensible que sa zone d'alimentation produit beaucoup de sédiments, sinon, son impact sera probablement faible voire négligeable.

La densité des retenues influe également sur l'effet cumulé, selon que la distance entre retenues dépasse la longueur d'influence ou non. Dans le cas contraire, on peut aboutir à une « artificialisation » complète du linéaire des cours d'eau. Cette longueur d'influence directe dépend toutefois de nombreux facteurs, ce qui rend difficile

la proposition de valeurs de référence en l'état actuel des connaissances. Des études sur les longueurs de biefs perturbés à l'aval d'une retenue selon les différentes configurations, et donc sur l'impact d'une nouvelle retenue en fonction de sa distance à une retenue existante, restent nécessaires.

Trois catégories d'outils et de méthodes sont disponibles dans ce domaine : ceux qui relèvent de la première permettent de **caractériser le contexte hydromorphologique**, et notamment d'identifier si le bassin considéré est plutôt en excès ou déficit de sédimentaire. De nombreux territoires de gestion ont déjà fait l'objet de diagnostics physiques. En France, on peut également 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. La 2^e catégorie d'outils sert à **estimer le piégeage dans les retenues**. Ils sont souvent basés 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, **développés surtout pour de grands réservoirs** et des prévisions à long terme. Un modèle numérique a été développé pour des retenues de moins d'un ha mais n'a pas encore été beaucoup utilisé. Les modèles pour **anticiper l'ajustement morphologique des cours d'eau** constituent la troisième catégorie d'outils : les modèles conceptuels sont très bien développés et complets, mais les modèles prédictifs sont peu performants, du fait notamment de la complexité de la combinaison des effets et facteurs amont et locaux.

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.). Par ailleurs, le fait qu'une grande partie des études analysées porte sur de grands ouvrages plaide pour des études spécifiques aux petites retenues, et notamment sur la sélectivité granulométrique du piégeage en fonction de la taille et de la position des retenues, ou sur le devenir des éléments biogènes, qui ne sont pas abordés dans la littérature, et pourraient expliquer en partie le fait que les taux de piégeage soient en général un peu plus faibles sur les petites retenues que sur les grands barrages.

Le cas particulier des vidanges

L'expertise n'aborde pas spécifiquement le cas des vidanges. Toutefois, compte tenu de l'influence significative que peuvent avoir ces événements, au regard de leur faible durée, il paraît important de les évoquer.

Influence des vidanges sur le transport de sédiments

L'ouverture de la vanne de fond lors des vidanges induit un nouveau régime hydraulique, qui entraîne les sédiments situés devant la vanne de fond. Le passage de culot correspond ensuite au moment où la retenue est presque vide et où la rivière recrée son lit dans les sédiments de la retenue. Cette étape assez brève, de quelques heures à quelques jours, avec apport d'eau interstitielle venant du ressuyage des vases, représente la période de risque maximal, caractérisée par l'entraînement hydraulique de sédiments, l'effondrement de talus non encore consolidés et des relargages de composés chimiques déterminant des pics de concentration souvent exceptionnels notamment en ce qui concerne les nutriments. L'étape d'assec, de durée très variable, se caractérise par un risque lié au passage des crues dans la retenue vide, qui peuvent provoquer des entraînements hydrauliques importants de sédiments : les concentrations en matières en suspension (MES) peuvent alors être plus élevées que lors du passage du culot et être dommageables pour la faune à l'aval (effet létal 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.

Effets des opérations de vidanges sur les biocénoses

Les conséquences écologiques potentielles des vidanges sur le milieu n'ont, semble-t-il, suscité que peu d'intérêt dans la littérature académique. Les travaux disponibles sont essentiellement axés sur les retenues hydroélectriques même si des retenues présentant d'autres types d'usages ont été prises en compte de manière plus sporadique.

Les vidanges, par les changements physico-chimiques qu'elles génèrent, peuvent avoir potentiellement des conséquences sur les biocénoses à la fois sur le court et le long terme. De plus, la possibilité de contaminations toxiques induites par ces vidanges est parfois évoquée, dans la littérature scientifique, pour aborder l'impact de ces opérations de gestion sur les compartiments biotiques. Les organismes aquatiques sont fortement affectés par les vidanges, qui entraînent des mortalités quasi-systématiques, dont les plus visibles concernent les poissons et les crustacés (écrevisses). On peut supposer que les organismes de plus petite taille sont également impactés par ces vidanges mais leur mortalité est évidemment beaucoup plus discrète. La directive cadre sur l'eau préconise notamment un seuil de teneur en MES de 25 mg/L destiné à préserver la vie piscicole dans les eaux douces alors que lors des opérations de vidange, les teneurs en MES dépassent fréquemment 10 g/L. Les vidanges ont également des impacts immédiats particulièrement forts sur les communautés de macroinvertébrés benthiques. Plusieurs suivis réalisés quelques kilomètres en aval de retenue montrent des diminutions d'abondance de 90 % ou plus, une richesse* taxonomique fortement affectée avec des taxons particulièrement sensibles aux vidanges comparativement à la situation pré-vidange. Cependant, plusieurs travaux s'accordent également à montrer la forte résilience des communautés d'invertébrés après la vidange avec un retour à leur structure initiale dans les quelques semaines ou mois suivant la vidange. *A contrario*, les vidanges ont des impacts beaucoup plus durables sur les populations de poissons et leurs habitats (dépôts de fines, colmatage interstitiel des substrats et/ou des frayères).