



© Béatrice Leblanc-Istéa

Conclusion



Cette expertise a confirmé que les effets des retenues sur les écosystèmes aquatiques sont réels, complexes, diversifiés, d'intensité variable. En stockant et détournant de l'eau, les retenues modifient la répartition naturelle et les chemins des flux d'eau et de matière transportée. Elles influencent ainsi les régimes d'écoulement, le transfert de sédiments, de nutriments et de contaminants, en allongeant notamment les temps de séjour de l'eau, et modifiant ses caractéristiques physico-chimiques, les conditions d'interactions entre composés transportés, et l'intensité de la production primaire, avec des impacts écologiques associés.

Effets d'une retenue isolée

L'analyse des effets d'une retenue seule s'est avérée une étape indispensable à la démarche préalable à l'analyse des effets cumulés de plusieurs retenues. Cette étape a permis de faire le point sur la compréhension des processus en jeu, de révéler de multiples interactions entre ces processus et d'identifier de nombreux facteurs d'influence. Elle a permis de préciser certains ordres de grandeur, par exemple pour les pertes par infiltration ou par évaporation, deux composantes du bilan hydrique de la retenue dont la phase exploratoire avait montré qu'elles étaient entachées d'une grande incertitude. La retenue joue un rôle de réacteur, lié à l'établissement de conditions lenticques, qui découple l'amont et l'aval du cours d'eau (ou le versant et le cours d'eau, en cas de retenue collinaire). Celui-ci modifie à la fois l'amplitude, la nature (changement de spéciation pour certains éléments) et la dynamique temporelle des flux transmis vers l'aval, et peut affecter de façon significative le fonctionnement du tronçon de cours d'eau situé à l'aval, du point de vue hydrologique, morphologique, physico-chimique, et écologique.

Deux compartiments sont ainsi à considérer pour appréhender l'effet d'une retenue : **le nouveau milieu aquatique créé par la retenue et le cours d'eau**, aval plus ou moins directement récepteur mais également amont pour la biologie.

Les conditions établies au sein de la retenue favorisent certains processus biologiques, physiques et chimiques. La retenue constitue une zone d'évaporation accrue, parfois d'infiltration significative, et toujours un piège à sédiments. Ce peut être aussi un lieu privilégié pour la dénitrification, ou la dégradation de certaines molécules phytosanitaires, le développement de l'eutrophisation, l'émission de gaz à effet de serre, et la constitution de stocks difficiles à gérer de phosphore, d'éléments trace métalliques (ETM) ou de pesticides, susceptibles d'être remobilisés et relargués sur le long terme. Le risque d'eutrophisation mérite une attention particulière : il est généralisé dans tous les bassins versants, notamment du fait des sols inondés, peut mettre en péril divers usages du plan d'eau, et peut jouer vis-à-vis des autres polluants un rôle d'amplificateur, ou

d'atténuateur. Du point de vue biotique également, la retenue représente un nouveau milieu, susceptible d'abriter un nouveau cortège d'espèces, distinct de celui du cours d'eau et qui pourra alors coloniser le réseau hydrographique et interagir avec les espèces en place. Si les retenues peuvent constituer des habitats favorables à certaines espèces patrimoniales, elles peuvent se révéler en revanche particulièrement favorables à l'implantation de très nombreuses espèces à problème, notamment des espèces exotiques présentant un caractère invasif.

La présence d'une retenue influence l'ensemble des caractéristiques fonctionnelles du cours d'eau aval, en modifiant à la fois l'amplitude, la dynamique, la nature et la temporalité des flux, qu'il s'agisse de l'hydrologie, du transport solide et de l'ajustement morphologique du lit du cours d'eau que sa modification induit, ou des caractéristiques physico-chimiques de l'eau. Ces modifications des conditions abiotiques en aval de la retenue entraînent des changements des communautés vivantes, dépendant des traits biologiques et écologiques des espèces. L'eutrophisation lorsqu'elle se développe peut se propager vers l'aval à travers des modifications de la biodisponibilité du phosphore et du rapport N/P.

Par ailleurs, en générant un obstacle parfois infranchissable, et donc en réduisant ou empêchant les échanges d'individus entre sous-populations, une retenue implantée sur le cours d'eau est susceptible de générer des impacts écologiques bien en amont de son emprise physique. Ces impacts incluent notamment la perte de diversité génétique (dérive génétique) et le déclin à long terme conduisant le cas échéant à l'extinction des populations isolées.

Les effets induits par une retenue sont très contexte-dépendants, influencés notamment par **la conjonction des trois composantes décrites ci-après**, qui sont étroitement liées.

■ **Les flux entrants dans la retenue.** Ceux-ci sont déterminés par le bassin versant d'alimentation de la retenue : géomorphologie, sols, fonctionnement hydrologique, climat (pluie, évaporation), occupation du sol et pratiques culturales, position de la retenue par rapport au cours d'eau.

■ **Les caractéristiques propres de la retenue :** taille, morphologie, volume et dynamique de prélèvement (selon usages), mode de restitution de l'eau, qui influent sur le devenir des flux entrants (et des éléments chimiques déjà présents). Pour ce qui concerne les caractéristiques physico-chimiques, le temps de résidence de l'eau dans la retenue est un paramètre clé.

■ **Le mode de restitution de l'eau à l'aval**, le cas échéant : fonctionnement par débordement, profondeur de la prise d'eau, maintien ou non d'un débit réservé. En cas de restitution, l'influence de la retenue dépend de l'importance des flux et concentrations de l'eau restituée par rapport à ceux du cours d'eau aval, c'est-à-dire là encore de la position de la retenue par rapport au réseau hydrographique du bassin versant considéré (à l'amont ou à l'aval du bassin, connectée directement au cours d'eau ou non - retenue collinaire -), de l'existence d'un débit réservé ou d'une dérivation, de la présence ou non d'affluents ou apports importants plus en aval, mais aussi de la vulnérabilité du milieu.

Les interactions complexes et non linéaires qui existent entre ces trois composantes rendent difficile une transposition directe des résultats de la littérature, d'autant que les contextes géographiques, climatiques et d'occupation du sol qu'elle aborde sont souvent assez éloignés des situations que l'on peut trouver sur le territoire métropolitain. Pour les mêmes raisons, les indicateurs qui ont pu être élaborés, soit directement sur les effets d'une retenue sur une variable donnée, soit par exemple reliant surface et capacité d'une retenue ne peuvent être transposés directement. Le Tableau 7 (page suivante) résume les différents types d'impacts pouvant s'exprimer dans ou à l'aval de la retenue. Si les grandes tendances sont connues, il est difficile de quantifier directement les effets d'une retenue sur une caractéristique fonctionnelle donnée du milieu aquatique à partir des seuls résultats issus de la littérature. Par ailleurs, il faut souligner que les aspects relatifs à la gestion de la retenue tels que les usages de l'eau et la dynamique de prélèvement, le mode de restitution de l'eau, ou l'existence d'un débit réservé, ne sont quasiment jamais évoqués dans la littérature consacrée aux retenues. Pourtant, l'analyse des déterminants de l'effet d'une retenue montre l'importance de ces facteurs, rejoignant en cela les résultats de la phase exploratoire ayant précédé l'expertise.

Tableau

7

Différents types d'impacts (1^{er}, 2^e et 3^e ordres, tels que présentés en introduction) dans et à l'aval de la retenue. D'après Bergkamp et al., 2000)

Position par rapport au barrage	Catégorie d'impact	Impact
Amont (dans la retenue)	Impact du 1 ^{er} ordre	Modification du régime thermique, risque de désoxygénation
		Accumulation de sédiment dans le réservoir, inondation des sols
		Changement des caractéristiques physico-chimiques de l'eau
	Impact du 2 ^e ordre	Eau souterraine autour du réservoir
		Plancton et périphyton
		Croissance de macrophytes aquatiques risque eutrophisation
Impact du 3 ^e ordre	Invertébrés, poissons, oiseaux et mammifères	
Aval	Impact du 1 ^{er} ordre	Débits journaliers, saisonniers et annuels
		Flux de sédiment réduits
		Évolution de la morphologie du chenal, de la plaine d'inondation, et du delta côtier
		Nappe souterraine dans la zone riparienne
		Température de l'eau, pollution thermique
	Impact du 2 ^e ordre	Formation de glace
		Plancton et périphyton
		Croissance de macrophytes aquatiques
		Végétation riparienne
	Impact du 3 ^e ordre	Flux de carbone, distorsion du cycle
		Invertébrés, poissons, oiseaux et mammifères
		Impacts estuariens
		Impacts marins

Effets cumulés des retenues

L'effet cumulé des retenues n'est que rarement abordé dans la littérature scientifique, mise à part en hydrologie où les études sont un peu plus nombreuses. De plus, les retenues abordées dans la littérature sont ainsi quasiment toujours des retenues sur cours d'eau. Ce constat a conduit à interroger également la littérature relative aux grands ouvrages, aux lacs, aux zones humides ou mares, qui ont plus souvent donné lieu à des travaux scientifiques sur le cumul. En conséquence, selon les différents ensembles de caractéristiques fonctionnelles (relatives à l'hydro(géo)logie, le transport solide, la physico-chimie, et l'écologie), les plans d'eau considérés différent par leur contexte géographique (climat, relief notamment) et leur nature (retenue artificielle ou plan d'eau naturel, usage, taille ...), et sont pour certains assez éloignés des retenues concernées par cette expertise, telles que définies en introduction. Cet élargissement des types de plans d'eau considérés est apparu nécessaire pour progresser dans la réflexion, au moins du point de vue méthodologique. Par ailleurs, force est de constater que les travaux qui traitent de la question du cumul sont souvent de nature conceptuelle, et que leurs enseignements sont donc le plus souvent méthodologiques. Quand des résultats, issus d'observations ou de modélisations sont disponibles, il convient, plus encore que pour les retenues seules, de s'interroger, au cas par cas, sur la possibilité de les transposer, en fonction du contexte environnemental et structurel et du paramètre considéré.

Un point qui ressort comme essentiel, pour l'ensemble des éléments considérés, **est la répartition des retenues au sein du bassin versant, la connectivité hydrologique et écologique**²⁴ entre les retenues, les zones du bassin versant et les différents tronçons du réseau hydrographique concernés.

24 - Connectivité entendue comme le degré de connexion entre les entités considérées. Elle englobe le degré de ramification du réseau hydrographique, la distance entre retenues et leur positionnement ou non sur le cours d'eau, le degré de fragmentation du réseau hydrographique induit par les retenues.

Les impacts des retenues se cumulent d'amont en aval pour l'hydrologie, avec une réduction des flux tout au long du réseau hydrographique et jusqu'à la mer. Cette influence sur un cours d'eau peut toutefois être « diluée » en progressant vers l'aval, avec les apports d'autres zones au fonctionnement moins anthropisé. **Ce point rappelle l'importance de l'échelle à laquelle est effectuée l'évaluation des effets cumulés des retenues.** Ceux-ci peuvent en effet varier fortement selon la taille du bassin versant considéré dans certains contextes : bassin versant constitué de zones très contrastées, dont les effets pourront se compenser.

Pour ce qui concerne le transport solide, les retenues constituent dans la plupart des cas des pièges à sédiments, notamment pour ce qui concerne la charge grossière. Toutefois, le déficit en sédiment induit en aval peut parfois, selon le contexte et si le substrat le permet, conduire à une incision du lit qui compense en partie ce déficit. Dans l'ensemble toutefois, un réseau de retenues limite la propagation des sédiments à l'aval.

Pour les éléments chimiques, pour lesquels l'eau constitue un vecteur, l'influence d'un réseau de retenues sur le cours d'eau aval est plus complexe, et peut s'exprimer à la fois en termes de concentrations, de spéciation et de flux, selon que l'on s'intéresse à un effet cumulé sur les flux à l'échelle du bassin versant tout entier (qui peuvent s'additionner comme en hydrologie) et/ou aux effets sur la qualité de l'eau (spéciation et concentrations) dans le milieu aquatique en aval. Une notion importante pour évaluer l'effet cumulé est la distance d'influence. Ce terme désigne pour une variable caractérisant la qualité physico-chimique de l'eau, la distance nécessaire à l'aval de chaque retenue pour que la variable considérée revienne au niveau qu'elle aurait sans la retenue. Elle est typiquement de quelques dizaines de mètres pour la teneur en oxygène dissous, mais peut atteindre plusieurs centaines de mètres pour la température. Si la distance entre deux retenues est supérieure à cette distance d'influence, il n'y a pas d'interaction entre les effets induits par chaque retenue. Sinon, il faut tenir compte de ces interactions, et les effets peuvent se propager de l'amont à l'aval. La connectivité hydrologique entre les retenues est donc aussi déterminante. La distance d'influence varie avec la variable considérée, l'importance de sa modification dans la retenue, le mode de restitution de l'eau, et l'évolution de la variable vers l'aval, liée notamment soit à des processus physiques et chimiques soit des conditions hydrologiques : alimentation diffuse du cours d'eau ou présence d'affluents. Cette notion est pertinente pour la température, la teneur en oxygène dissous et les concentrations des nutriments ou contaminants. Elle ne s'applique pas dès lors que l'on considère les flux.

Le cas de l'écologie est plus complexe. La présence de retenues déconnecte au moins pour partie les différents tronçons de cours d'eau du bassin versant mais génère en revanche de nouvelles connexions entre habitats courants et milieux stagnants, et affecte ainsi la dynamique de dispersion des espèces. Là aussi, l'influence d'un réseau de retenues dépend donc du fait que certains affluents (voire d'autres structures paysagères comme des haies, forêts humides...) maintiennent ou non de façon suffisante une connexion pour permettre les échanges nécessaires au maintien des espèces (métapopulations et métacommunautés).

De plus, la présence des retenues affectent la temporalité de l'hydrosystème : les flux transférés dans le système (eau, nitrate, différentes formes du phosphore, sédiments grossiers) évoluent non seulement pour ce qui est du cumul (à l'échelle annuelle par exemple), mais aussi en ce qui concerne la dynamique temporelle. Cette évolution est liée notamment aux dynamiques de remplissage de la retenue et de prélèvement dans la retenue pour l'eau, à la dynamique des crues pour les sédiments, et à la dynamique saisonnière pour les paramètres physico-chimiques. Cette évolution peut parfois se traduire par un effet de décalage dans le temps, par un amortissement de la variabilité temporelle, ou au contraire son accentuation. L'amplitude du signal est également souvent affectée. En présence de plusieurs retenues, ces évolutions, atténuations/amplifications, sont à raisonner à l'échelle du paysage et leurs conséquences sur les organismes évaluées.

L'expertise a mis en évidence la nécessité de prendre en compte les **temps longs** dans l'analyse, qu'il s'agisse de l'ajustement morphologique des cours d'eau, de la mobilité de certains éléments chimiques stockés comme le phosphore, les ETM ou les pesticides, ou l'évolution des populations des organismes liés au milieu aquatique. Ces processus sont en effet susceptibles de s'exprimer sur plusieurs dizaines d'années. De la même façon, l'évolution conjointe de l'emprise des retenues sur le bassin, des usages des sols (occupation du sol, pratiques agricoles), et du fonctionnement du bassin versant qui en résulte, à la fois quant au comportement hydrologique et d'exportation de sédiments, de nutriments ou de polluants est un phénomène qui doit s'exprimer sur des échelles de temps moyennes à longues. Toujours sur le temps long, il existe visiblement des effets d'héritage, c'est-à-dire que la disparition des retenues n'implique pas nécessairement la disparition immédiate de leurs impacts, qui semblent au contraire pouvoir perdurer parfois plusieurs décennies voire siècles. Toutes ces questions relatives aux temps longs ne sont quasiment pas abordées dans la littérature.

En lien avec cette notion de durée et d'évolution sur les temps longs, il apparaît nécessaire de revenir périodiquement sur les évaluations d'effets cumulés, afin de les actualiser en intégrant les évolutions constatées des déterminants du fonctionnement du bassin (notamment l'évolution des usages des sols, mais aussi s'il y a lieu du climat) et l'évolution de l'état du milieu aquatique : **l'évaluation des effets cumulés doit être un processus itératif.**

Des besoins de données et de recherche en suspens

L'expertise n'a pas pu mettre en évidence d'indicateurs d'effets cumulés ou de seuils (tels que par exemple de densité de retenues) qui seraient applicables en l'état pour déterminer si un bassin est ou non déjà trop équipé en retenues. Elle a par contre permis d'identifier des métriques qu'il apparaît important d'inclure dans des études génériques d'impact et d'évaluation d'effets cumulés, comme par exemple les variations longitudinales de proportions des différentes classes d'invertébrés. Ceci permettrait d'identifier des discontinuités ou des gradients dans ces métriques le long du réseau hydrographique, pour mieux caractériser l'effet des retenues sur ces composantes en fonction du contexte, et pouvoir à terme aller jusqu'à une démarche prédictive.

Le besoin d'acquisition de données a été identifié à deux niveaux complémentaires :

- un effort sur la caractérisation des retenues (taille, morphologie, position dans le bassin versant et par rapport au cours d'eau, usage, mode de restitution de l'eau) doit être réalisé et les données capitalisées, comme cela avait déjà été souligné au cours de la phase exploratoire de l'expertise. En effet, si cet effort a déjà été réalisé sur certains bassins, il n'est pas achevé partout. Les techniques de télédétection offrent dans ce domaine des solutions qui évoluent très rapidement, leur utilisation demande toutefois des moyens et des compétences qui ne sont pas toujours disponibles dans le domaine opérationnel ;

- il est nécessaire de continuer à alimenter les connaissances sur les relations cause-effet des retenues sur les différentes caractéristiques fonctionnelles du cours d'eau, celles-ci n'étant pour l'instant que partielles dans le contexte hexagonal. En particulier, il apparaît nécessaire **d'étudier de façon conjointe l'ensemble des caractéristiques fonctionnelles, leurs interactions et leur réponse à la présence de retenues sur quelques bassins versants « atelier » aux caractéristiques contrastées.** Seule une telle démarche semble à même de permettre d'élaborer un ensemble organisé et quantifié de connaissances sur l'effet cumulé des retenues sur l'ensemble des caractéristiques fonctionnelles des cours d'eau, et de permettre ainsi d'aboutir au développement de modèles, d'outils et d'indicateurs validés, transposables dans des contextes proches et qui pourront contribuer à une prise de décision éclairée. Les études déjà existantes sur les réseaux de lacs, zones humides, grandes retenues ou mares pourront fournir des éléments méthodologiques, ainsi que suggérer des indicateurs dont l'adaptation au contexte des retenues peut être utile. Par ailleurs, l'expertise n'a pas permis de progresser dans les connaissances relatives à l'influence du mode de gestion des retenues sur leurs effets. Ainsi, bien que les résultats de la phase exploratoire aient conduit à supposer une forte influence du mode de gestion (existence ou non d'un débit réservé, mode de restitution de l'eau – surverse ou prise de fond -, dynamique de prélèvement – liées à l'occupation du sol et aux pratiques agricoles -, pratique de la substitution des prélèvements), la bibliographie est restée muette sur cet aspect. L'acquisition de données de référence sur ce point est donc essentielle.

Le recours à la modélisation apparaît nécessaire pour formaliser et organiser les connaissances et permettre d'investiguer des scénarios, relatifs à l'implantation de retenues et à leur gestion par exemple, ou pour explorer la variabilité interannuelle des situations sur un bassin. La démarche de modélisation est confrontée à la difficulté classique d'adéquation entre données disponibles et niveau de sophistication nécessaire pour les modèles à mobiliser. Ainsi, on a vu par exemple que plusieurs types de modèles hydrologiques existent, différant notamment par la représentation de la spatialisation des retenues qui leur est associée. Les conclusions relatives aux autres caractéristiques fonctionnelles de l'hydrosystème abordées dans cette expertise (écologie, physico-chimie, ...) suggèrent qu'une approche complètement distribuée serait utile, pour pouvoir rendre compte des interactions entre les différentes retenues. Les résultats de l'expertise ne permettent pas pour l'instant de déterminer quel type de modélisation il est nécessaire de mettre en œuvre selon les contextes. L'utilisation de différents types de modèles et l'évaluation des incertitudes associées, sur des bassins où les données disponibles permettent cet exercice, semblent nécessaire pour progresser dans cette démarche.

Échelles de temps et d'espace : deux notions clés pour l'évaluation des effets cumulés

Les échelles spatiale et temporelle auxquelles mener l'évaluation d'effets cumulés doivent permettre d'englober l'ensemble des effets attendus. Du point de vue de l'échelle spatiale, des considérations théoriques sur les évaluations d'effets cumulés insistent, comme cela avait été suggéré à l'issue de la phase exploratoire, sur l'intérêt de mener une démarche à **deux échelles emboîtées**, permettant de considérer avec plus d'attention certaines zones du bassin, plus sensibles ou *a priori* sujettes à une pression plus forte, tout en ayant une vision d'ensemble du fonctionnement du bassin. Par exemple, selon cette proposition, **une étude relative à un projet donné** s'appuierait sur une **étude préalable, réalisée à l'échelle du grand bassin englobant** (échelle du SAGE par exemple), et qui permettrait de caractériser globalement son fonctionnement hydrologique, d'identifier les zones où les enjeux biologiques, de qualité de l'eau, d'usages, sont importants, ainsi que celles où les pressions qui s'exercent (prélèvements en eau, occupation du sol, autre type de pression anthropique) sont fortes. Des études plus poussées pourraient être menées sur ces zones fragilisées. L'étude relative à un nouveau projet s'appuierait sur ces éléments de contexte, qui permettraient de mieux cerner les méthodes à mettre en œuvre et les enjeux à considérer.

Certains effets peuvent s'exprimer sur des temps longs, comme l'ajustement géomorphologique des cours d'eau, le stockage-relargage du phosphore ou de certains contaminants, ou l'évolution de certaines populations, selon la dynamique des espèces considérées. Ils peuvent aussi s'exprimer à des échelles spatiales larges, avec notamment des apports réduits d'eau et de sédiments jusqu'à la mer ou l'émission de GES à l'échelle planétaire : si une étude d'effets cumulés relative à un ensemble de projets donnés ne peut aller jusqu'à ces échelles, il convient toutefois de ne pas négliger ces aspects.

La question de l'échelle renvoie à celle de la gouvernance. Les études convergent sur l'importance qu'une évaluation d'effets cumulés soit menée par une entité exerçant à une échelle dépassant celle des projets considérés. Ceci permet d'assurer, sur une vaste zone, la transparence et l'homogénéité du choix des composantes de l'environnement que l'on souhaite préserver, ainsi que des métriques et seuils utilisés pour déterminer si les effets sont acceptables. Une telle démarche permet aussi une acquisition de données de façon harmonisée, gage qu'elles pourront être capitalisées, partagées et remobilisées.

L'expertise s'est focalisée sur les effets cumulés des retenues sur l'environnement. Elle n'a pas traité les dimensions économique et sociale associées à leurs usages. Les résultats permettent d'alimenter l'étude des usages, services et dys-services écosystémiques associés à l'hydrosystème modifié par les retenues, et ainsi d'objectiver l'évaluation de l'intérêt global de ces ouvrages sur un bassin versant, qui inclut les dimensions économique et sociale.