

Partenariat 2011 – Dynamique physique – Action 23-24 Restauration



Barrages et seuils : principaux impacts environnementaux

Rapport final

Y. Souchon (1), V. Nicolas (2)

*(1) Laboratoire d'hydroécologie quantitative,
UR Milieux Aquatiques, écologie, pollutions, Cemagref
Pôle Etudes & Recherche "Hydroécologie des cours d'eau"
Onema/Cemagref, Lyon*

(2) Onema, Direction de l'action scientifique et technique, Vincennes

Novembre 2011

Les auteurs

Yves Souchon
Directeur de recherche
yves.souchon@cemagref.fr
Laboratoire d'hydroécologie quantitative,
UR Milieux Aquatiques, écologie, pollutions, Cemagref
Pôle Etudes & Recherche "Hydroécologie des cours d'eau"
Onema/Cemagref, Lyon

Véronique Nicolas
Chargée de mission
veronique.nicolas@onema.fr
Onema, Direction de l'action scientifique et technique, Vincennes

Les correspondants

Onema : *Véronique Nicolas DAST veronique.nicolas@onema.fr*

Cemagref : *Yves Souchon*

<i>Droits d'usage :</i>	<i>accès libre</i>
<i>Couverture géographique :</i>	<i>France métropolitaine</i>
<i>Niveau géographique</i>	<i>National</i>
<i>Niveau de lecture</i>	<i>Professionnels, experts</i>
<i>Nature de la ressource :</i>	<i>Document</i>

Barrages et seuils : principaux impacts environnementaux

Rapport final

Yves Souchon, Véronique Nicolas

SOMMAIRE

1	Introduction.....	4
2	Impacts d'un ouvrage transversal, barrage ou seuil.....	6
2.1	Les conséquences en amont de l'aménagement constitué par le barrage et la retenue d'eau qu'il crée.	7
2.2	Les effets induits localement par la création d'une retenue	8
2.3	L'ouvrage, ses caractéristiques et ses modalités de gestion	9
2.4	Les effets aval	9
2.5	Les effets distants	16
3	Impacts de plusieurs ouvrages.....	18
4	Considérations plus globales.....	19
5	Discussion.....	20
6	Références.....	22
7	Annexe 1.....	25
8	Annexe 2.....	26

1 Introduction

La nécessité de limiter les dommages à la nature se traduit depuis les années 1970 par des lois visant à atténuer les impacts des projets d'aménagement. Pour ce faire, des « études d'impact environnemental » sont devenues obligatoires préalablement à la réalisation de travaux, d'aménagements ou d'ouvrages qui, par l'importance de leurs dimensions ou leurs incidences sur le milieu naturel, pourraient porter atteinte à ce dernier.

Dans l'esprit de la loi Grenelle 1, les procédures de décision publique doivent désormais permettre de « privilégier les solutions respectueuses de l'environnement, en apportant la preuve qu'une décision alternative plus favorable à l'environnement est impossible à coût raisonnable ». L'approbation ou l'autorisation d'un projet ne peut donc intervenir que si **aucune autre alternative réalisable moins pénalisante pour l'environnement n'est possible au regard des enjeux en présence**. Compte tenu des connaissances scientifiques et techniques déjà acquises, il est désormais admis que « tout n'est pas compensable ». **Les atteintes aux enjeux environnementaux majeurs doivent donc être, en priorité, évitées.**

Par ailleurs, la Directive Cadre Européenne sur l'Eau établit un **cadre pour la protection** des eaux intérieures de surface, des eaux de transition, des eaux côtières et des eaux souterraines, qui :

- a) **prévienne** toute dégradation supplémentaire, **préserve** et **améliore** l'état des **écosystèmes aquatiques** ainsi que, en ce qui concerne leurs besoins en eau, des **écosystèmes terrestres et des zones humides qui en dépendent** directement;
- b) promeuve une **utilisation durable** de l'eau, fondée sur la **protection à long terme** des ressources en eau disponibles.

Les objectifs requis pour les eaux de surface portent sur l'atteinte du bon état des masses d'eau, consistant en un bon (ou très bon) état écologique et un bon état chimique ainsi que sur la non-dégradation de l'état des eaux. S'agissant des eaux de surface, cela correspond à l'expression de **la qualité de la structure et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques associés aux eaux de surface**. L'appréciation de l'état d'une masse d'eau et de sa non dégradation passe donc par une analyse de l'impact sur les différents éléments de qualité susceptibles d'être modifiés par la construction d'un nouvel aménagement.

Les barrages et les seuils en rivières sont des infrastructures qui, par construction, modifient les flux liquides, les flux solides, les flux de matières et d'organismes et le régime thermique des cours d'eau sur lesquels ils sont implantés. Il s'en suit des transformations des fonctions générales de ces cours d'eau ayant de nombreux liens avec les services écosystémiques qu'ils assurent (régulation des flux sédimentaires, hydriques, organiques, régulation thermique, dépollution, biodiversité, équilibres dynamiques des zones aval fluviales et côtières...) ¹.

¹ Les **bénéfices écosystémiques** recouvrent :

- la capacité d'assimilation et de transformation de la matière organique et des nutriments,
- le lissage des épisodes de crues et d'étéiages,
- le stockage temporel de l'eau, permettant ce lissage,
- la création et le rajeunissement régulier d'habitats fonctionnels et leurs inter-communications,
- une plus grande biodiversité potentielle,

Barrages, seuils : impacts environnementaux. Y.Souchon, V.Nicolas

Ces transformations peuvent générer des altérations dont l'intensité est fonction de l'intensité de **distorsion des cycles** hydro-sédimentaires et thermiques, de **l'effet barrière** vis-à-vis des différents habitats nécessaires à l'accomplissement des cycles vitaux des organismes aquatiques, mais est aussi reliée à la nature et à la taille des ouvrages (hauteur du barrage, configuration de la retenue, des prises d'eau et de restitution, des modalités d'exploitation) ainsi qu'à leur localisation au sein du le réseau hydrographique et à leur nombre cumulé sur les cours d'eau.

Les études d'impact de ces ouvrages doivent par conséquent tenir compte de ces éléments, les apprécier compartiment par compartiment, puis dans leur ensemble. Il est de plus nécessaire de les accompagner d'une évaluation dans un cadre spatial large, d'une part à l'échelle du site d'implantation en liaison avec les aménagements voisins et la région, d'autre part à l'échelle du bassin jusqu'à l'exutoire vers la façade maritime, de façon à bien maîtriser l'ensemble de la chaîne de causalité et les impacts distants éventuels, ceci afin de s'assurer que les impacts pris en compte ne se limitent pas aux seuls impacts directs et indirects dus au projet mais intègrent également l'évaluation des effets cumulés². La zone considérée pour l'évaluation de ces effets doit être celle concernée par les enjeux environnementaux liés au projet. Par ailleurs, l'état initial réalisé par le maître d'ouvrage sur le site qui sera impacté doit permettre de tenir compte des impacts cumulés issus de projets antérieurs, quel que soit leur maître d'ouvrage.

La présente note reprend et discute ces éléments, en considérant d'abord le cas générique d'un seul ouvrage, puis celui d'une chaîne d'ouvrages et enfin les impacts potentiels sur le milieu estuarien et côtier. De façon plus prospective et plus large, s'en suit une discussion sur diverses autres facettes qu'il serait nécessaire de prendre en compte dans un raisonnement d'aménagement du territoire, en particulier celles concernant les fortes probabilités de changements, climatiques ou socio-économiques par exemple, à moyen et long terme, qui ne devraient pas être négligées. Une étude d'impact moderne devrait être en mesure de gérer cette information complexe, en s'appuyant si besoin sur de la cartographie et de la modélisation.

- une plus grande résistance et résilience des espèces et des milieux aux épisodes climatiques plus contrastés et plus sévères prévisibles dans les prochaines années sous influence du changement global,
- des paysages améliorés.

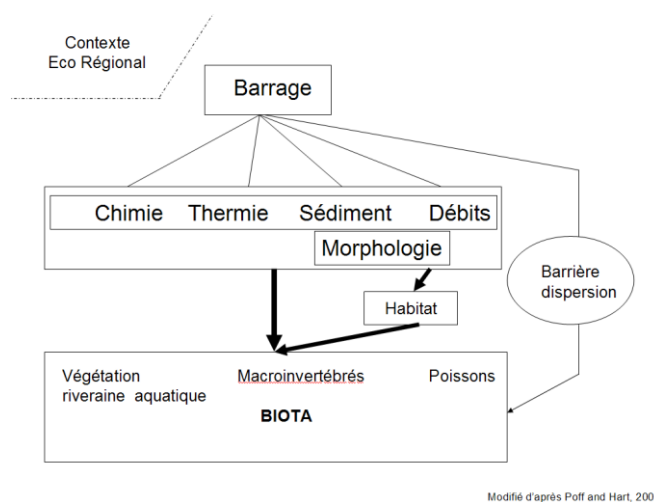
² Conformément à l'article L 122-1 du code de l'environnement, ainsi que du projet de doctrine nationale sur la séquence « Eviter – Réduire – Compenser » en cours d'élaboration par le MEEDDTL

Barrages, seuils : impacts environnementaux. Y.Souchon, V.Nicolas

2 Impacts d'un ouvrage transversal, barrage ou seuil

Les différents impacts potentiels de l'implantation d'un barrage peuvent se décomposer entre compartiments abiotiques (débits, sédiments, chimie et thermie) et biotiques (organismes aquatiques) (fig.1a et b) :

a



b

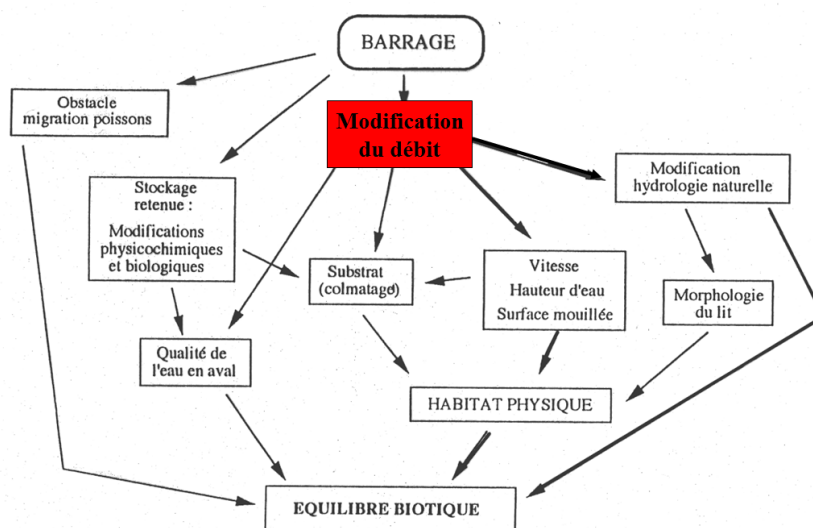


Figure 1. Influence des barrages sur les compartiments abiotiques et biotiques des cours d'eau
1 a. Principaux compartiments susceptibles d'être influencés.

1 b. Effets potentiels plus détaillés des modifications aval de débit (in Valentin et Souchon, 1993).

Par ailleurs, l'influence des barrages ne se limite pas à leur seule emprise sur le lit d'un cours d'eau, mais entraînent des modifications en amont et en aval de l'ouvrage.

Dans ces conditions, il est important de s'intéresser à :

- différents compartiments, biotiques et abiotiques
- différents secteurs (amont, aval)

L'étude d'impact d'un ouvrage doit considérer :

2.1 Les conséquences en amont de l'aménagement constitué par le barrage et la retenue d'eau qu'il crée.

On se focalisera ici essentiellement sur les **conséquences biotiques** : on pense aux exemples connus des salmonidés grands migrateurs, avec des phases adultes aux milieux de vie bien distincts de ceux de leur reproduction et de leur premier développement, ce qui nécessite que ces différents biotopes ne soient pas fragmentés et communiquent facilement entre eux. Mais il ne faut pas négliger non plus les salmonidés résidents (ex. Truite fario) qui obéissent à des schémas voisins sur une moindre amplitude spatiale : les têtes de bassin servent de frayères et de nourricerie et les zones plus aval, dès que les hauteurs d'eau deviennent plus grandes, d'habitat pour les adultes, en dehors de la période de reproduction. Les espèces de macroinvertébrés benthiques utilisent aussi ces biotopes de façon dynamique, ceux qui appartiennent à l'ordre des insectes ont des facultés de recolonisation des bassins par la phase adulte aérienne ; ce n'est pas le cas des crustacés et des mollusques, ces derniers dépendant des poissons pour la dissémination de leurs larves³.

Du fait des modifications d'habitats générées par l'implantation d'un ouvrage, l'écosystème connaît une transformation, et souvent les espèces en place sont également modifiées. On assiste ainsi progressivement à une multiplication d'habitats lentiques, au cortège d'espèces réduit et à une banalisation progressive de la biodiversité.

Or, la DCE et d'autres textes (Directive Habitat Faune Flore et réglementations sur les espèces protégées) ont inscrit le choix et des engagements pour conserver la biodiversité existante. Aussi, on ne saurait se contenter d'un argument qui se limiterait à compter un nombre d'espèces présentes avant et après impact.

Aussi, l'analyse devra s'attacher à prendre en compte les altérations possibles des cycles vitaux des organismes aquatiques ou fortement dépendants de la rivière après inventaire du potentiel biologique des espèces natives.

Compte tenu des enjeux biodiversité de plus en plus pris en considération, il sera également nécessaire de voir dans quelle mesure l'aménagement pourrait nuire à la faune en place d'oiseaux, de batraciens et de mammifères. Différents documents de l'Onema, de l'ONCFS,

³ Les mollusques produisent des larves en nombre (jusqu'à plus de 500 000 ind./m² dans un cours d'eau des USA Culp et al., 2011). Ces larves encore appelées glochidies sont pour de nombreuses espèces des ectoparasites obligés des poissons, se fixant par exemple sur les branchies : cette stratégie assure la dissémination des mollusques, bien entendu si les poissons hôtes ne sont pas confinés à des portions réduites et fragmentées des cours d'eau.

des SDAGE (en p. l'inventaire des réservoirs biologiques), de Natura 2000, etc... aideront les experts à traiter l'ensemble de ce chapitre.

Un autre risque d'impact en amont d'un aménagement qui est a souligné est lié au développement toujours possible dans la retenue d'espèces exotiques, invasives ou non, dont il s'agit de prévoir l'éventuel développement vers l'amont et une concurrence potentielle avec les organismes autochtones.

2.2 Les effets induits localement par la création d'une retenue

- Abiotiques :

Les processus physiques et leur dynamique qui caractériseront le fonctionnement de la retenue dépendent de ses dimensions (sa géométrie en plan, en long et en travers), de la nature du bassin versant et de sa fourniture en eau, sédiments fins et grossiers, et en éléments chimiques, en particulier en nutriments (azote et phosphore).

Il s'agira ici d'apprécier le **taux de renouvellement des masses d'eau**, les risques éventuels de **stratification thermique**, d'accumulation de sédiments et d'enrichissement en nutriments. On s'interrogera sur la probabilité d'accumulation de toxiques dans les sédiments fins, en fonction de l'analyse du bassin versant.

Dans le cas d'une retenue destinée à restituer des débits en aval, le comportement de la retenue (variation de niveaux) et l'évolution de sa qualité conditionne la qualité chimique et écologique des masses d'eau en aval certains phénomènes peuvent être de grande ampleur. En particulier, en fin de campagne, les marnages saisonniers peuvent conduire à restituer des eaux du « culot » de la retenue avec des risques graves de dégradation de la qualité de l'eau et du milieu en aval.

Du point de vue des habitats, il conviendra d'évaluer les risques d'ennuiement de zones remarquables (zones de repos ou d'alimentation d'espèces protégées, frayères, zones humides, ...). On caractérisera les habitats nouvellement créés, comme la nature et la pente des zones rivulaires et les variations saisonnières de remplissage qui les conditionneront. Le remplacement des faciès d'écoulement naturels par un plan d'eau, souvent de grande longueur, devra être apprécié de manière quantitative et relié au fonctionnement biologique.

- Biotiques :

En fonction du bilan d'entrée des nutriments, il sera important de caractériser le **risque d'eutrophisation de la masse d'eau** (développement d'une biomasse algale saisonnière, pouvant contenir des cyanobactéries, en fonction des dynamiques planctoniques qui s'installeront et évolueront dans le temps, et qui peuvent s'accompagner de phases anoxiques lors de la mort des cellules phyto-planctoniques) ; compte-tenu des divers paramètres incriminés, ce sont des phénomènes qui se modélisent mal. Une attitude de bon sens

consistera à raisonner par analogie si des situations de retenues déjà en place ont déjà pu être analysées en ce sens.

Les communautés des autres organismes aquatiques, macroinvertébrés et poissons seront modifiées radicalement ; ne s'installeront que certaines espèces propres aux milieux lents, en nombre plus faible (perte de biodiversité et banalisation du peuplement). La nouvelle composition faunistique dépendra des nouvelles conditions chimiques, thermiques, et de la nature des habitats. Nous avons également signalé plus haut le risque d'apparition d'espèces exotiques, profitant de conditions nouvelles défavorables aux espèces autochtones et plus favorables pour elles : certaines de ces exotiques peuvent être envahissantes, il existe plusieurs exemples pour les végétaux aquatiques (ex. Jussie).

2.3 L'ouvrage, ses caractéristiques et ses modalités de gestion

L'implantation d'un barrage crée automatiquement une accumulation de sédiments et un obstacle à la migration longitudinale des organismes aquatiques, fonction essentielle de l'accomplissement de l'ensemble de leur cycle vital.

Aussi, une étude d'impact se doit d'apprécier correctement **ces deux éléments** : comment la configuration de l'ouvrage et ses équipements (vannages et dispositifs de franchissement) permettent-ils d'assurer respectivement un transit des sédiments fins et grossiers et la circulation des organismes aquatiques (en p. franchissabilité à la montaison et à la dévalaison pour les poissons) ? Selon quelles modalités de gestion et à quelle période ?

Cette finesse d'analyse est indispensable pour bien apprécier la **vulnérabilité du système récepteur** en fonction des différentes sensibilités des phases biologiques : à titre d'exemple, on comprend aisément qu'un relargage de sédiments fins en période de reproduction est pénalisant pour les organismes qui déposent leurs œufs dans le substrat ou pour ceux qui y vivent en phase larvaire.

Selon la vocation et l'usage de la retenue, les effets des marnages journaliers ou saisonniers sont à analyser. Ils sont de nature à changer radicalement les évolutions classiques des eaux de la retenue.

2.4 Les effets aval

- Abiotiques

La variable majeure à analyser est le **régime hydrologique du cours d'eau** et les modifications induites, car cette variable gouverne les autres dynamiques (Souchon, 1994 ; Baran, 2007 ; Poff et Zimmerman, 2010).

Il s'agit alors de caractériser ce régime dans **toutes ses dimensions** : durée, intensité, fréquence et saisonnalité. Les modifications de régime sont liées à l'usage des aménagements, le cas échéant aux nouveaux usages induits, qui signent de nouveaux régimes souvent très typés (fig. 2 et fig. 3).

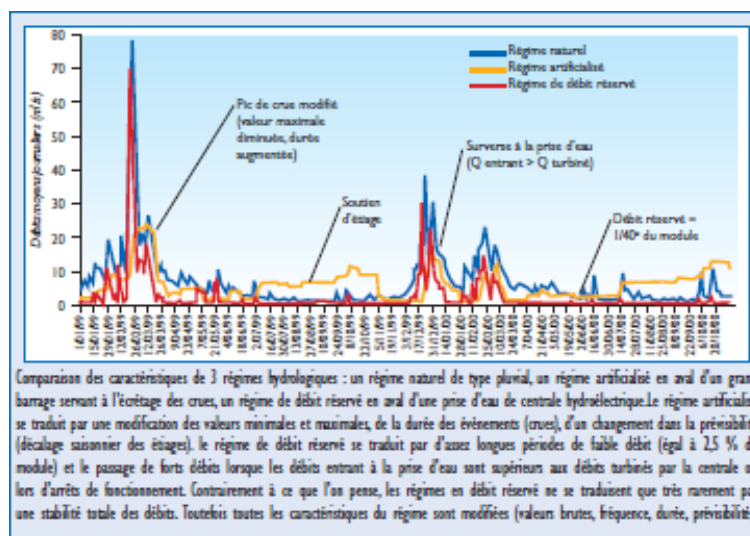


Figure 2. Modifications des régimes hydrologiques des cours d'eau en fonction des usages des barrages (in Baran, 2007)

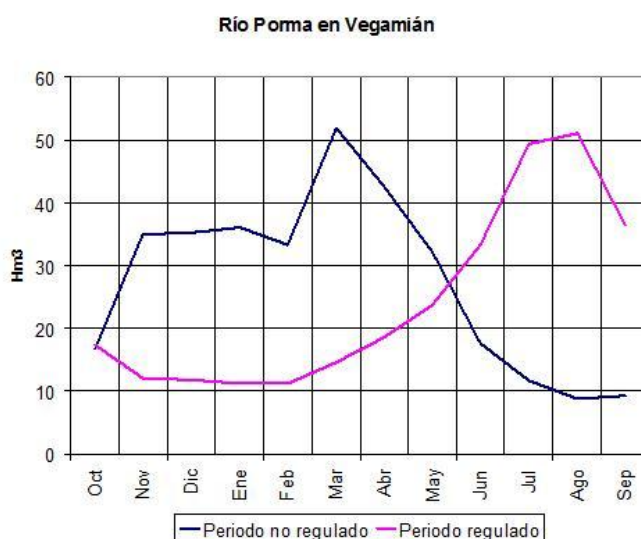


Figure 3 : Régime de la rivière Porma (Espagne) affecté par le barrage Juan Benet (irrigation), à deux périodes distinctes, une première sans régulation (1942-1968), une seconde en phase d'exploitation (1969-2004). In Forecaster European project :

http://forecaster.deltares.nl/index.php?title=Hydrological_regime_modification

Concernant l'usage irrigation (fig. 3), on notera grâce à ce cas documenté **l'inversion très nette du régime hydrologique**, avec captures des hautes eaux hivernales et soutien des débits à partir du mois de mai, le tout avec un lissage des événements hydrologiques.

Dès lors, les conséquences dont il faudra apprécier l'impact environnemental concernent :

- **l'écrêtement des crues hivernales** qui jouent un rôle important vis-à-vis de l'hydrogéologie (recharge des nappes), de la géomorphologie (formatage de la matrice de substrat, entretien et recréation des formes, Malavoi et Bravard, 2010), de la ripisylve (phases d'inondation et d'exondation pour la sélection d'espèces adaptées,

processus de dénitrification) et des cycles biologiques (ex. phases de migration de reproduction des salmonidés en fin d'automne-hiver : débits d'attrait, auto curage des zones de graviers/frayères, volumes d'habitat),

- **l'instauration d'un étiage artificiel** en période hivernale, ou son aggravation dans le cas de cours d'eau à régime nival, qui réduit les habitats disponibles, en période critique pour les cycles biologiques de certaines espèces,
- **l'instauration d'un débit soutenu** en période printanière et estivale, qui peut être en déphasage avec les cycles biologiques des espèces autochtones d'un point de vue thermique ou hydraulique (hauteurs d'eau, vitesses, forces tractrices).

La deuxième variable d'intérêt concerne le **sédiment et sa dynamique d'entraînement**. Le piégeage des matériaux dans la retenue peut conduire à un déficit sédimentaire grossier à l'aval d'un ouvrage et généralement à l'incision du lit mineur (fig. 4), à l'augmentation de la taille du substrat et au phénomène de pavage (élimination des fractions fines et moyennes à force tractrice égale, qui sont bloquées par les ouvrages et n'équilibrent plus le flux continu de matériaux). Dans le même temps, la réduction des débits hivernaux et l'écrêtement des petites crues fréquentes concourent à limiter le transport de sédiments fins transférés par le bassin versant aval de l'ouvrage ; ce sédiment fins a tendance à s'accumuler, limitant par là-même la conductivité hydraulique, l'habitat disponible (dépôts de fines sur et dans la matrice de substrat), la qualité de l'eau (Waters, 1995).

C'est un phénomène majeur à évaluer dans une étude d'impact : d'abord en raisonnant par analogie avec des situations observables (même région, mêmes ouvrages et modalités de gestion), ensuite en se projetant dans le futur. Une modélisation hydromorphologique aidera à quantifier le phénomène : scénarios de gestion hydrologique croisés avec la morphologie des cours d'eau et la géométrie hydraulique à l'aval des ouvrages, examen des substrats en place, des débits de plein bord par tronçon, des évolutions des forces tractrices, calcul des débits d'entraînement des fines pour en tirer des enseignements pour la gestion future (par ex. fréquence et intensité de crues à maintenir dans le cours d'eau). Ces études doivent être mises en œuvre en ayant à l'esprit de recueillir des variables qui font sens pour l'habitat des organismes aquatiques (faciès et substrats ; largeurs, vitesses, hauteurs en fonction des débits) ; à titre d'exemple pour la méthodologie nous proposons l'étude de Baker et al. (2011, Annexe 1).

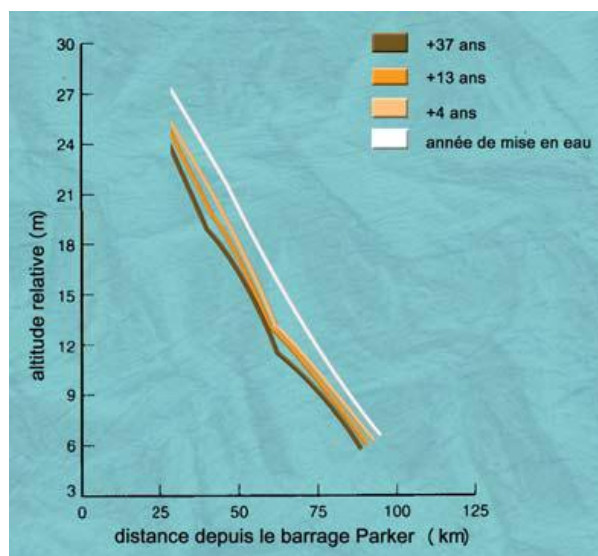


Figure 4. Incision du Colorado en aval du barrage Parker (in Williams et Wolman, 1984).

La composante fine de sédiment stockée par l'ouvrage peut aussi s'avérer problématique lorsqu'elle est rejetée à l'aval, cela dépendant des modalités de gestion des ouvrages : il faudra s'intéresser à la façon dont ce problème sera géré : volumes, concentrations, périodes et durée. Il conviendra d'être attentif aux éventuels problèmes toxiques ou organiques pouvant se surajouter : ce dernier risque ayant en principe été évalué par l'analyse générale du bassin versant émetteur et par celle de la physico-chimie de la retenue.

La troisième variable clé est la **température**, qui conditionne notamment la vitesse des réactions chimiques et biochimiques et donc les équilibres physico-chimiques, ainsi que les phases des cycles biologiques. Des modifications de régime thermique en décalage par rapport au régime originel du cours d'eau sont toujours possibles, soit en $dT^{\circ}C$ chaud, si le volume de la retenue est grand, avec des surfaces plus grandes soumises à l'insolation et déversement aval d'eau de surface, soit en $dT^{\circ}C$ plus froid, dans un cas de stratification et de soutirage du débit rejeté. Les variations de température à l'aval d'un plan d'eau s'inscrivent à la fois dans un cycle journalier et saisonnier.

L'appréciation de la variation du régime thermique pourra s'appuyer sur de la modélisation, car c'est un paramètre qui s'y prête.

Enfin, il convient d'apprécier les modifications de **qualité physico-chimique de l'eau**. En fonction des enjeux, il sera nécessaire de recourir à une modélisation des paramètres chimiques, ce qui permet de comparer différents scénarios de risque et de gestion associée.

- Biotiques

Nous inscrivons ici la notion d'**habitat aquatique**, espace physique nécessaire aux organismes pour accomplir leur cycle vital : dans les cours d'eau, on décrit cet espace par ses composantes hydrauliques dépendantes des débits, hauteur d'eau et vitesse de courant et morphologiques (substrat).



Figure 5 : L'habitat, interface entre hydromorphologie et biologie (Malavoi et Souchon, 2010)

Les modifications d'habitat sont centrales dans l'appréciation de la sévérité des modifications induites par un ouvrage. Les exigences d'habitat des principales espèces aquatiques sont connues et il est par conséquent possible d'en modéliser les évolutions in situ en fonction des débits délivrés : il existe une bonne capacité d'expertise dans ce domaine développé en France depuis les années 80 (Souchon et al., 1989 ; Valentin et Souchon, 1993 ; Lamouroux et Capra, 2002 ; Lamouroux et Souchon, 2002), avec des logiciels d'application à diffusion libre⁴.

L'étude d'impact doit proposer un **choix judicieux de sites** pour apprécier cette sensibilité d'habitat en fonction des débits, à des distances échelonnées par rapport à l'ouvrage en fonction de l'architecture du réseau de cours d'eau (effet immédiat, effet distant après arrivée d'un affluent important, effet distant en fonction des fournitures d'eau intermédiaires s'il s'agit d'un aménagement à usage irrigation).

Il est envisageable de modéliser les habitats sur un réseau « coulant » au sens géomatique du terme, grâce à une plateforme de modèles⁵, certes à manipuler par des experts avertis.

Le cas particulier d'un ouvrage géré pour produire de l'électricité de pointe et qui occasionne des éclusées fréquentes (oscillation quotidienne des débits évoluant entre le débit réservé réglementaire et le débit pleins bords), **n'est pas développé ici.**

S'agissant des impacts sur les **composantes floristiques et faunistiques**, ils résultent de l'interaction complexe entre les différents paramètres abiotiques mentionnés précédemment et leur degré de modification, et des interactions biotiques nouvellement créées (ex. modifications trophiques engendrant des conditions favorables pour des organismes racleurs d'algues sur le substrat, ces algues étant favorisées par une hauteur d'eau diminuée et une moindre dynamique hydraulique, remplaçant des organismes se nourrissant à base de matière organique de type litière produite par les ripisylves).

De façon qualitative, il est possible de faire des prévisions d'impact sur les biocénoses, en mobilisant des connaissances écologiques, en raisonnant à partir de cas analogues proches documentés ou en s'appuyant sur la bibliographie. Plusieurs documents de référence existent (Petts, 1984 ; Dynesius et Nilsson, 1992 ; Poff et Zimmerman, 2010). Ces deux derniers

⁴ <http://www.cemagref.fr/le-cemagref/lorganisation/les-centres/lyon/ur-maly/laboratoire-dynamiques-indicateurs-et-modeles-en-ecohydrologie>

Logiciels EVHA, Estimhab

<http://innovation.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/Innovation/logiciels/LAMMI/Guide%20Utilisateur%20LA MMI.pdf>

Logiciel Lammi

⁵ <http://www.cemagref.fr/le-cemagref/lorganisation/les-centres/lyon/ur-maly/laboratoire-dynamiques-indicateurs-et-modeles-en-ecohydrologie/logiciels/RHT>

Plateforme Estimkart

Barrages, seuils : impacts environnementaux. Y.Souchon, V.Nicolas

auteurs analysent 165 publications de la littérature internationale, signalent les difficultés de généralisation des effets, mais montrent une tendance évidente à l'augmentation du risque écologique très corrélée à celle de l'amplitude de modification des débits. La littérature emploie de plus en plus le terme **d'homogénéisation des biocénoses**, qu'il faut entendre comme **banalisation**, pour qualifier les effets cumulés de différentes pressions dont celle exercée par les barrages (Rahel, 2002 ; Décamps, 2011).

Bien qu'il soit difficile d'extrapoler à partir d'études de cas dispersées dans le monde, il semble que les effets sur la réduction de la densité des espèces existant avant un ouvrage soient d'autant plus marqués que la réduction de débit est forte et que corrélativement des conditions monotones et stables de faible débit se soient installées pendant de longues durées (O'Keefe and DeMoor, 1988; Dudgeon, 1992; Petts and Bickerton, 1994; Englund and Malmqvist, 1996, cités par Rader et Belish, 1999). Dans une étude sur des cours d'eau de tête de bassin des montagnes rocheuses dans le Colorado (USA), ces derniers auteurs ont comparé les effets de diverses intensités de prélèvements d'eau, depuis un signal hydrologique quasiment inchangé jusqu'à un prélèvement quasi-total 11 mois sur 12 : dans le dernier cas, ils ont mesuré une diminution de la diversité et une communauté d'invertébrés composées essentiellement de chironomidés, d'ostracodes et d'éphémères électives des marges peu courantes de ces cours d'eau.

Dans une autre étude nord américaine, Miller et al., (2010) ont échantillonné douze cours d'eau de l'Oregon et de Washington (USA) présentant des prélèvements toujours supérieurs à 75% du débit. Cette réduction de débit s'accompagnait d'augmentations de la biomasse algale, du dépôt de fines, et des températures minimums. Ils ont révélé des changements au niveau de l'expression des traits spécifiques (c'est-à-dire stratégies vitales, préférences écologiques et adaptations morphologiques) notamment ceux signant des modifications et des réductions d'habitat et des changements fonctionnels trophiques.

Dans d'autres régions comme celles à fort endémisme telle l'Espagne, les espèces autochtones ne peuvent plus ou mal supporter la concurrence d'espèces introduites plus généralistes et limnophiles (électives de milieux plus lents), ce qui diminue d'autant la capacité des milieux aquatiques à maintenir une communauté équilibrée, dynamique et adaptable d'organismes autochtones (García de Jalón et al., 1992 ; Morillo et al., 2002).

L'évaluation **quantitative** est plus complexe à réaliser : il faut avoir recours à des métriques comme la composition taxonomique, la richesse, la diversité, l'équitabilité, l'abondance, la structure en âge (poissons), mais aussi aux notions plus récentes de traits écologiques et fonctionnels (traduction des connaissances sur la biologie et l'écologie des espèces sous forme de profils codifiés : affinité pour telle ressource alimentaire, type de reproduction etc.). Poff et Zimmerman (2010) indiquent que les réponses des macroinvertébrés aux régimes hydrologiques altérés sont mixtes, leur abondance et leur diversité pouvant augmenter ou diminuer. Les métriques qualifiant la végétation riparienne ont le même comportement. Mais attention à l'interprétation, le nombre de taxons peut d'abord augmenter par ajout d'espèces nouvelles dans le système, sans élimination des espèces préexistantes, mais ce phénomène peut s'avérer temporaire. Ensuite quand les conditions de perturbation s'établissent plus durablement, ou se font plus sévères, c'est plutôt à une diminution à laquelle on doit s'attendre. Ceci plaide pour la double analyse proposée, celle de l'évolution des paramètres abiotiques et celle des paramètres biotiques, avec des métriques significatives. Les poissons,

par contre réagissent négativement, comme le montrent les métriques, abondance, diversité et taux démographique.

Les connaissances dans ce domaine tireraient bénéfice de cas bien documentés sur la durée et donc de retours d'expérience, encore très peu pratiqués. Cette culture est naissante dans les communautés d'experts du milieu aquatique, l'Onema a par exemple défini un protocole standard de suivi des opérations de restauration des cours d'eau (dont les arasements d'ouvrages) qui se développent à l'échelon national (Malavoi et Souchon, 2011).

A ce titre, on peut également souligner l'absence quasi généralisée de suivis prescrits dans les actes d'autorisation délivrés dans le cadre des études d'impact. Citons comme exemple le bassin Adour-Garonne où seulement 7% des autorisations prévoient un suivi écologique des retenues, et parmi elles moins de la moitié des suivis sont réalisés.

L'étude d'impact doit nécessairement préciser les modalités essentielles et pertinentes pour assurer un suivi des impacts. Pour cela, il convient de préciser les protocoles et indicateurs pressentis pour mesurer les impacts résiduels des aménagements. Ce suivi est nécessaire pour aider à rectifier les modalités de gestion ultérieures.

Considérations sur la notion d'état écologique des masses d'eau

Cette notion a été introduite récemment lors de la mise en œuvre de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (2000) : elle repose sur une batterie d'indicateurs biologiques algues/diatomées, macrophytes, macroinvertébrés et poissons. Chacun est étalonné au niveau européen dans une bande qui tient compte de la distribution statistique des valeurs d'indices au sein d'une gamme définie de pressions tant indirectes (ex. occupation du sol), que directes (ex. barrages). Une procédure statistique définit l'affectation dans les catégories, très bon, bon, etc., en fonction de l'écart par rapport à un état de référence. Le bon état écologique entérine des situations déjà anthropisées et **n'obéit pas à une logique dure de conservation de la nature**.

Afin d'améliorer les expertises, les indices biologiques connaissent actuellement des ajustements importants quant à leur standardisation, leur pertinence et leur **faculté de diagnostic**. S'agissant des données, les efforts de redéfinition et parfois de densification des réseaux de mesure porteront plutôt leurs fruits au 2^{ème} round à partir de 2013, car une certaine durée d'enregistrement de la donnée est nécessaire pour qu'elle exprime autre chose que la variabilité climatique naturelle. Enfin il faut aussi avoir à l'esprit que la densité actuelle des points de ce réseau n'est que d'un point par 35 km² ou par 150 km de cours d'eau.

Toutes ces considérations montrent que ces données qui ont une évidente importance statistique pour rendre compte des situations diverses rencontrées à l'échelon national et de leur évolution dans le temps, **ne sont par contre pas suffisantes** pour analyser l'impact local d'un aménagement ou d'un usage donné. C'est par exemple le cas de l'IPR (Indice Poisson Rivière)⁶, dont la notice de présentation et d'utilisation (CSP, 2006) précise bien que cet indice n'est pas adapté aux études d'impact (cf. page 5).

⁶ http://www.onema.fr/IMG/pdf/Outil_de_calcul_indice_poissons_riviere-3.pdf

Aussi, l'analyse des caractéristiques de la biocénose aquatique (végétation, macroinvertébrés benthiques, poissons) et des autres groupes d'espèces inféodés à ces milieux (cas de certains insectes, amphibiens, reptiles, mammifères, oiseaux) ne peut être conduite dans une étude d'impact par la seule utilisation d'indicateurs biologiques (IBD, IBGN, ...).

Il conviendra aussi d'analyser les caractéristiques des peuplements en termes de composition et de structure, voire de biomasse et d'indiquer la présence de zones de croissance, de sites de reproduction ou d'aires de repos nécessaires à l'accomplissement du cycle de vie de ces espèces.

2.5 Les effets distants

Ce paragraphe pointe la nécessité de conduire une évaluation large, qui ne se limiterait pas aux seuls effets amont aval proches d'un ouvrage ; il existe très souvent des effets distants :

- **dans les cours d'eau et au-delà dans ceux avec lesquels ils sont en relation au sein du même bassin**, les modifications des différents flux évoquées peuvent avoir des répercussions lointaines qu'il faut analyser. Ce peuvent être des effets sur la morphologie, par manque de renouvellement et d'apport de substrat grossier : il existe des exemples bien connus d'érosion progressive (s'ajoutant à l'érosion régressive), suite à des extractions de granulats dans le lit mineur (ex. effondrement du pont de Tours sur la Loire, dans les années 1980). Ces phénomènes d'incision ont des conséquences physiques sur les relations entre nappe phréatique et cours d'eau, entre niveaux respectifs du lit principal et des annexes, avec des coûts sociétaux induits non négligeables (AEP, stabilisation d'ouvrages,...). D'un point de vue des fonctionnements écologiques, il faut retenir que toute réduction des épaisseurs de sédiments grossiers, toute limitation des relations latérales liées au rythme hydrologique (expansion/retrait de l'eau dans la plaine d'inondation) réduisent l'efficacité des processus de « digestion »/transformation de la matière organique et des nutriments, voire dépollution partielle et les circulations d'organismes nécessaires à leur cycle vital.

Ici encore, tout est question de proportion, d'intensité d'altération, qu'il convient d'apprécier par un raisonnement plus global que celui communément appliqué.

Par ailleurs, à une époque où se pose la question des mesures d'atténuation envisageables par rapport aux scénarios de changement climatique, il serait également utile de connaître le bilan thermique général le long des réseaux hydrographiques (T°C maximales atteintes, durées de dépassement) et voir en quoi des masses d'eau se réchauffant dans des retenues jouent ou non sur le bilan général. Pour simplement avoir quelques chiffres en tête pour de petits cours d'eau, l'existence d'une ripisylve permet de tamponner la température du cours d'eau de 1 à 5 °C, par rapport à des portions dénudées en fonction des saisons (Broadmeadow et al., 2011), ce qui représente un fort potentiel de modulation des échauffements.

Inversement, l'effet de surface en eau peut favoriser les phénomènes d'évaporation estivale ; ils peuvent atteindre des pertes de 1 à 4 l/s/ha de plan d'eau selon la géométrie ou le contexte de la retenue. Des cumuls importants de petits plans d'eau peuvent ainsi influencer significativement l'hydrologie de certains bassins versants.

C'est pourquoi, on s'interrogera sur les effets potentiels cumulés d'échauffement de l'eau, qui dépendent également des débits laissés dans les hydrosystèmes, par rapport à certaines limites d'usages comme celles relatives au refroidissement des circuits des centrales nucléaires.

Enfin, en fonction des usages pour lesquels les ouvrages seraient construits, il est indispensable de réaliser un bilan chimique, concernant les nutriments et les xénobiotiques supplémentaires pouvant être entraînés dans les cours d'eau récepteurs et les nappes.

- dans les estuaires et les zones côtières

On rappelle ici simplement qu'une étude d'impact devrait également tenir compte des incidences sur les milieux de transition et le milieu marin côtier.

Dans le principe, il faudrait apprécier en quoi les nouvelles configurations d'aménagement jouent sur les différents bilans de flux et de concentrations pour ces milieux récepteurs, avec une attention toute particulière à apporter au bilan sédimentaire (notion d'apport suffisant à raisonner), aux périodes éventuellement critiques (ex. bouchon vaseux) avec leur durée associée et au bilan chimique.

Les différents compartiments ciblés dans le texte qui précède sont résumés visuellement dans le Tableau I :

Barrages	Evaluation des impacts														
Compartiment	Flux liquide	Flux solide		Morphologie	Hydraulique	Flux chimiques	Thermie	Habitats		Trophie	Végétation		Minvertébrés	Poissons	Fctt général
Echelle		fin	grossier					macro	més/micro		riveraine	aquatique			
Bassin amont	X	X	X			X									X
Cours d'eau amont	X	X	X			X	X	X en p. frayères					X	X	
Retenue				X	X		X	X		X	X	X			X
Ouvrage		X Stockage	X		X										
Cours d'eau aval	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Modifications régime			Armurage Pavage		Modélisation	Modélisation	Q, q, saison	Modélisation						
Bassin aval	X	X	X			X	X			X					X
Estuaire Côtes	X	X	X			X	X			X					X

Tableau I. Tableau de bord des thématiques à couvrir dans une étude d'impact relative à l'implantation de nouveaux barrages.

3 Impacts de plusieurs ouvrages

Nous abordons ici une question essentielle, qui est celle du cumul d'impacts au sein des bassins. Les cours d'eau des pays industrialisés sont déjà dotés d'un grand nombre d'ouvrages transversaux. Le recensement national en cours ou ROE (Référentiel des Obstacles à l'Écoulement 2011, Onema) fait état de plus de 60 000 ouvrages géoréférencés, ce qui correspond en moyenne générale pour la France métropolitaine à une densité linéaire de 1 ouvrage tous les 3,8 km des 230 000 km de réseau documentés pour les besoins de la DCE. A titre de comparaison, la Suisse a recensé 2 obstacles par km dans le canton de Berne à 11 dans le canton de Zürich (Woolsey et al., 2005).

Il devient essentiel de caractériser l'impact hydrologique cumulé des chaînes d'ouvrages sur les bassins versants, afin d'apprécier l'impact surajouté par tout nouvel aménagement en projet : nous n'avons pas trouvé beaucoup d'études publiées sur ce thème.

L'étude de Galea et al. (2005) nous fournit quelques ordres de grandeur intéressants sur les cumuls existants et leurs effets hydrologiques : elle concerne des retenues collinaires du Sud Ouest destinées à l'irrigation. Le sous-bassin du Tescou totalise 184 retenues individuelles dont le volume théorique cumulé s'élève à 4,3 Mm³, qui interceptent environ un tiers (92 km²) de sa superficie (287 km²). Pour celui de la Séoune (463 km²) près de 160 retenues collinaires sont dénombrées, qui représentent un volume de stockage théorique de 6,5 Mm³, pour une superficie interceptée d'environ un quart du sous-bassin (122 km²). Le coefficient d'écoulement moyen d'hiver y diminue respectivement en moyenne de 42 % et 31 % entre l'état «naturel» et l'état anthropisé actuel. De manière générale, les crues de la saison hiver des deux sous-bassins sont fortement réduites en pointe et volume par l'ensemble des petites retenues, avec les impacts probables sur la dynamique morphologique évoqués ci-avant. On comprend bien ici que ce n'est pas l'effet individuel d'une petite retenue qui importe mais bien l'effet cumulé de l'ensemble des équipements d'un bassin qui finissent par modifier de façon nette le patron saisonnier d'écoulement.

D'un point de vue écologique, les situations avec plusieurs ouvrages sur un bassin s'accompagnent d'une fragmentation des habitats, dont les effets peuvent se traduire par l'élimination des certaines espèces de poissons de toute une partie du linéaire, par la fragmentation des populations en plusieurs sous-populations s'isolant génétiquement⁷, ou par la réduction de la taille des stocks résiduels et plus généralement par une perte de résilience (cf exemple documenté pour la truite fario sur la Bidassoa, Espagne Basque, Gosset et al., 2006).

Il ne faudrait pas pour autant réduire l'impact de multiples barrages aux seuls aspects de fragmentation pour les populations de poissons. D'autres processus sont susceptibles d'être impactés et cela dépend de la configuration spatiale d'implantation des équipements : il est de plus en plus reconnu que les têtes de bassin (jusqu'au rang 3, grossièrement jusqu'à des cours d'eau de 10 m de large en moyenne (+/- 2 m) jouent un rôle majeur dans les processus de transformation des nutriments et de la matière organique du bassin versant intercepté ; ces

⁷ Les progrès de la génétique et des outils mis au point, qui deviennent de plus en plus accessibles, et ceux des techniques de marquage électronique des individus, sont extrêmement prometteurs pour mieux quantifier à l'avenir l'impact de ces phénomènes de fragmentation.

Barrages, seuils : impacts environnementaux. Y.Souchon, V.Nicolas

cours d'eau représentent 75 % du linéaire du réseau hydrographique, d'où leur poids dans ce bilan). Ces processus impliquent le substrat, les échanges avec la nappe d'accompagnement, les ripisylves. Une dégradation de ces zones obère d'autant ces capacités naturelles de production d'une eau de qualité, utilisable par exemple pour un usage d'eau potable. Ce point est détaillé dans Souchon (2011).

Les mêmes processus de transformation et d'assimilation de matière continuent à se produire dans des cours d'eau plus grands, avec une dynamique dépendante de la nature du substrat du fond et des berges et de la relation avec la nappe phréatique et des relations avec les annexes fluviales

Les ouvrages et leurs retenues cumulées sur un linéaire créent autant de milieux ralentis avec des modifications des peuplements aquatiques, d'intérêt généralement plus banal pour la biodiversité. Dans les portions intermédiaires, non ennoyées directement par ces ouvrages, il existe également un effet négatif des ouvrages sur les communautés de poissons et leurs traits écologiques (Wang et al., 2011).

Enfin, compte-tenu des multiples paramètres en jeu, il faut situer l'étude d'impact dans une analyse territoriale générale du contexte qui prendrait également en compte les synergies négatives potentielles avec d'autres pressions (réchauffement des eaux, déplétion des corridors ripariens, trop forte chenalisation des cours d'eau, flux de xénobiotiques plus concentrés en période de basses eaux, etc.)

4 Considérations plus globales

La complexification des enjeux liés aux milieux, la conciliation des usages, la prise en considération des besoins futurs, les réflexions sur la résilience et l'adaptabilité nécessaires des systèmes aux changements globaux futurs difficiles à quantifier, se traduisent dans un certain nombre de directives nouvelles, mais interrogent aussi les pratiques professionnelles. J.L. Chaussade, Président de Suez, déclarait récemment lors de la présentation du livre « De l'eau et des hommes »⁸ rédigé sous la direction de J.C. Lefeuvre à l'Unesco « nous devons passer d'une ère où nous considérons que l'eau était facile à une ère d'eau fragile ».

En 2005, dans son exposé à l'Académie d'Agriculture, C. Lévêque insistait sur les réflexions de la Commission Mondiale des Barrages (CMB, 2000) qui tirait des bilans parfois mitigés de certaines logiques d'aménagement : « la CMB souligne également que les grands barrages conçus à des fins d'irrigation n'ont pas, dans l'ensemble, atteint les objectifs fixés et ont été économiquement moins rentables que prévu ».

Par conséquent, avant ou parallèlement à une évaluation environnementale, c'est une analyse holistique des conséquences d'aménagements nouveaux qu'il faut conduire.

Par ailleurs, cette réflexion d'ensemble ne peut échapper à une prise en compte des changements physiques futurs liés aux prévisions de changements globaux : quels régimes hydriques et thermiques nouveaux, quelles tensions, quelles durées, quelles mesures

⁸ http://www.oieau.fr/IMG/pdf/BLAD_De_l_eau_et_des_hommes_.pdf

d'adaptation ? L'académie des sciences a produit récemment un document⁹ sur ce thème, mais différents exercices prospectifs qui analysent les scénarios tendanciels de débit et de température (Aqua 2030¹⁰, Explore 2070¹¹) sont également en cours.

Concernant l'avenir des systèmes de production agricole, en lien avec des sécheresses récurrentes, l'Inra a produit en 2006 une réflexion qui participe au questionnement holistique évoqué ci-avant¹².

Enfin, on peut souligner que dans le cas où des impacts négatifs résiduels demeurent après les phases d'évitement et de réduction pour l'implantation de nouveaux aménagements, le projet ne pourra être approuvé ou autorisé que s'il est démontré que le projet justifie une raison impérative d'intérêt public majeur. Cette notion d'intérêt public majeur renvoie à un **intérêt à long terme du projet, qui apporte un gain significatif pour la collectivité, du point de vue socio-économique ou environnemental**. Pour que la raison impérative d'intérêt public majeur du projet puisse être retenue, l'intensité du gain collectif doit être d'autant plus importante que l'atteinte aux enjeux environnementaux est forte. L'intérêt public majeur d'un projet ne peut être définitivement établi par l'autorité administrative qu'au regard des impacts environnementaux et du gain collectif suffisamment analysés et mis en balance.

5 Discussion

Dans son acception la plus large, une étude d'impact devrait évaluer l'ensemble des impacts attendus dans le temps, du court (années suivant la construction de l'ouvrage) au long terme (50, 100 ans), et déterminer la réversibilité ou non de ces impacts dans le cas de projets futurs de restauration.

D'un point de vue spatial, nous avons tout au long du texte rappelé la nécessité d'envisager différentes échelles emboîtées, depuis l'amont et l'aval immédiat des ouvrages, jusqu'à l'exutoire vers la mer, en situant bien les enjeux de bassin et de territoire.

Une des variables majeures à analyser avec la plus grande attention est le **débit** dans toutes ses caractéristiques de régime, tant elle régit l'ensemble des autres dynamiques. Kondolf et al. (2008), forts de nombreuses expériences de réhabilitation des cours d'eau montrent de façon convaincante que toutes les tentatives « périphériques », telles que l'ajout de substrat déficitaire, la facilitation du franchissement pour les poissons, majoritairement réalisées à des échelles très locales, ne suffisent pas à restaurer convenablement des situations biologiques : ils concluent que seules des actions concernant le débit sa quantité et sa variabilité seraient à même d'y parvenir, sans toutefois occulter les conditions de qualité physico-chimiques et écologiques du milieu.

⁹ <http://www.academie-sciences.fr/activite/rapport/rapport261010.pdf>

¹⁰ <http://www.aqua2030.fr/front-page>

¹¹ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Explore-2070-Eau-et-changement.html>

¹² http://www.inra.fr/l_institut/expertise/expertises_realisees/secheresse_et_agriculture_rapport_d_expertise

Enfin, en accord avec McCullough (2010), il est nécessaire d'appliquer en permanence la meilleure science disponible pour satisfaire les objectifs ambitieux tant du Clean Water Act aux USA¹³ que la DCE en Europe et bien avoir comme ligne de conduite l'esprit de ces textes plutôt que leur lettre : on sait que les outils et procédures déployés au premier round de la DCE sont grandement perfectibles et de toutes façons doivent être complétés quant à la maille de leur déploiement actuel et aux métriques indicatives pour réellement répondre à des questions d'impact.

Nous ne sommes pas entrés dans les détails des méthodes mobilisables, des documents existent (ex. Baril et al., 2006), mais nous ne saurions trop insister sur tout le bénéfice qui pourrait être tiré d'exercices de simulation avec différents scénarios spatialisés, en mobilisant des modèles, comme suggéré à plusieurs reprises dans le corps du texte.

¹³ The Clean Water Act (CWA, 1972) is the key US law for water quality protection. Its goal is to 'restore and maintain the chemical, physical, and biological integrity of the Nation's waters' and to fully protect the most sensitive beneficial uses.

Barrages, seuils : impacts environnementaux. Y.Souchon, V.Nicolas

6 Références

Baker D. W., Bledsoe, B. P., Albano . M., Poff N. L., 2011. Downstream effects of diversion dams on sediment and hydraulic conditions of rocky mountain streams. *River Research and Applications*, 27: 388–401.

Baran P., 2007. Le débit élément clé de la vie des cours d'eau. Bilan des altérations et des possibilités de restauration. Editions Onema ; Focus, édition avril 2007. 20 p.

Accédé août 2011

http://www.onema.fr/IMG/pdf/debit_onema.pdf

Baril D., Auxière J.P., Brun J.C., Cruz O., Dumont B., Leveau P., Malavoi J.R., 2006. Milieu aquatique. Etat initial et prévision d'impact dans les documents d'incidence. Collection CSP, Mise au Point, 316 p.

Accédé août 2011

<http://www.onema.fr/IMG/pdf/milieux-aquatique-integral.pdf>

Broadmeadow, S. B., J. G. Jones, et al. (2011). The influence of riparian shade on lowland stream water temperatures in southern England and their viability for brown trout. *River Research and Applications* 27(2): 226-237.

Culp J.J., Wendell R. Haag, D. Albrey Arrington, and Thomas B. Kennedy. 2011. Seasonal and species-specific patterns in abundance of freshwater mussel glochidia in stream drift. *Journal of the North American Benthological Society*, 30(2):436-445. 2011.

Décamps H., 2011. River networks as biodiversity hotlines. *C.R. Biologies Académie des sciences*, 334, 420-434.

Dynesius, M., Nilsson. C. 1994. Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third of the world. *Science*, 266: 753-762.

Galéa G., B. Vasquez-Paulus, B. Renard et P. Breil. 2005. L'impact des prélèvements d'eau pour l'irrigation sur les régimes hydrologiques des sous bassins du Tescou et de la Séoune (bassin Adour-Garonne, France). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 18 (3), 273-305.

<http://id.erudit.org/iderudit/705560ar>

García de Jalón, D., M. González del Tánago y C. Casado. 1992. Ecology of regulated rivers in Spain: An overview. *Limnetica*, 8: 161-166.

Gosset C., Rives J., Labonne J. 2006. Effect of habitat fragmentation on spawning migration of brown trout (*Salmo trutta* L.). *Ecology of Freshwater Fish*. 15: 247–254.

Kondolf, G., P. Angermeier, et al. (2008). Projecting cumulative benefits of multiple river restoration projects: an example from the Sacramento-San Joaquin River system in California. *Environmental Management*. 42(6): 933-945.

Lamouroux, N. and H. Capra (2002). Simple predictions of instream habitat model outputs for target fish populations. *Freshwater Biology* 47(8): 1543-1556.

Lamouroux, N. and Y. Souchon (2002). Simple predictions of instream habitat model outputs for fish habitat guilds in large streams. *Freshwater Biology* 47(8): 1531-1542.

Lévêque C. 2005. Les conséquences des barrages sur l'environnement. Séance du 19 mai 2005 à l'Académie D'Agriculture.

http://www.academie-agriculture.fr/detail-colloque_30.html

http://www.academie-agriculture.fr/mediatheque/seances/2005/Colloque/20050519presentation6_integral.pdf

Malavoi J.R., Bravard J.P., 2010. *Éléments d'hydromorphologie fluviale*. Onema. Comprendre pour agir. 224 p.

Malavoi, J.R. and Souchon, Y. (2010). *Éléments pour une harmonisation des concepts et des méthodes de suivi scientifique minimal. Volets hydromorphologie - hydroécologie*. Pôle Hydroécologie des cours d'eau Onema-Cemagref Lyon MAEP-LHQ, 82 p.

Malavoi J.R., Garnier C.C., Landon N., Recking A., Baran P., 2011. *Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière*. Onema. Comprendre pour agir. 216 p.

McCullough, D. A. (2010). Are Coldwater Fish Populations of the United States Actually being Protected by Temperature Standards? *Freshwater Reviews* 3(2): 147-199.

Miller S. W., Wooster David and Li J.L. 2010. Does species trait composition influence macroinvertebrate responses to irrigation water withdrawals: evidence from the intermountain West, Usa. *River Research and Applications*, 26: 1261–1280.

Morillo, M., A. Gimenez and D. Garcia de Jalón. 2002. Evolución de las poblaciones piscícolas del río Manzanares aguas abajo del embalse de El Pardo (Madrid). *Limnetica*, 17: 13–26.

Nilsson, C. K. Berggren. 2000. Alterations of Riparian Ecosystems caused by River regulation. *BioScience*, 50(9): 783-792.

Petts, G.E. 1984. *Impounded Rivers*. John Wiley & sons, Chichester.

Poff N.L., Zimmerman J.K.H. 2010. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform environmental flows science and management. *Freshwater Biology* 55: 194-205.

Rader R. B., Belish T.A., 1999. Influence of mild to severe flow alterations on invertebrates in three mountain streams. *Regulated Rivers: Research and Management*, 15: 353–363.

Rahel, F. J. (2002). Homogenization of freshwater faunas. *Annual Reviews Ecology and Systematics* 33: 291-315.

Souchon, Y. (1994). Hydrodynamique et écologie. Principes théoriques et modèles applicables à la gestion des cours d'eau à migrateurs. *Revue de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne - Ecologie et Gestion* 60, 9-14.

Souchon, Y. (2011). Pistes de progrès sur le thème restauration - Quoi et comment restaurer à la bonne échelle ? Pôle Hydroécologie des cours d'eau Onema-Cemagref Lyon MAEP-LHQ, 36 p.

Souchon, Y., F. Trocherie, et al. (1989). Les modèles numériques des microhabitats des poissons : application et nouveaux développements. *Revue des Sciences de l'Eau* 2(4): 807-830.

Valentin S., Souchon Y., 1993. Conséquences écologiques du débit réservé sur l'habitat des poissons. Journées nationales d'études petits barrages AFEID- GIGB, Bordeaux, 2-3 février 1993, In Degoutte G. 1994, Petits barrages, recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi, Cemagref Editions 379-390. Ré-édition In Degoutte G. 2002, Petits barrages, recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi. Comité français des grands barrages. Uniquement sous disque numérique.

Wang, L., D. Infante, et al. (2011). Effects of dams in river networks on fish assemblages in non-impoundment sections of rivers in Michigan and Wisconsin, USA. *River Research and Applications* 27(4): 473-487.

Waters, T. F. (1995). *Sediment in streams: Sources, biological effects, and control*. Bethesda, Maryland, American Fisheries Society. Monograph 7, 251 p.

Williams, G. P. and M. G. Wolman (1984). Downstream effects of dams on alluvial rivers. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 1286).

Woolsey, S., C. Weber, T. Gonser, E. Hoehn, M. Hostmann, B. Junker, C. Roulier, S. Schweizer, S. Tiegs, K. Tockner & A. Peter. 2005. Guide du suivi des projets de revitalisation fluviale. Publication du projet Rhône-Thur. Eawag, WSL, LCH-EPFL, VAW-ETHZ, 113 p.

Accédé août 2011

http://www.wsl.ch/land/products/rhone-thur/fr/docs/guide_suivi.pdf

7 Annexe 1.

Tableau I. Caractéristiques physiques de cours d'eau du Colorado étudiés (régime nival, altitude > 2300 m).

Figure 2. Comparaison des tronçons amont et aval des ouvrages : la partie droite du graphique correspond à des situations pénalisées où le dépôt de fines est aggravé par la gestion hydrologique (captages compris entre 23 % et 99 %)

Extraits de Baker et al. (2011)

Table I. Study site sample times and conditions

Site code	Site name	Basin area (km ²)	Summer	Fall	Visit code	Above/ below diversion	Flowrate, Q (l/s)	Bed slope, S ₀ (m/m) (%)	Wetted width (m)	Median sediment size, d ₅₀ (mm)	% Slow (pool) habitat					
BCO ^a	Billie Creek One	2.80	x		BCO_1	Above	41.3	7.2	2.03	20.6	16					
						Below	0.4	4.7	0.69	10.9	32					
BCT ^a	Billie Creek Two	2.21	x		BCT_1	Above	37.9	2.7	1.78	19.6	0					
						Below	0.5	3.3	1.39	13.5	47					
BOB	Bobtail Creek	14.28		x	BOB_2	Above	73.2	3.3	3.81	68.7	0					
						Below	2.9	4.6	2.20	78.4	55					
CAN	South Fork Canadian River	4.89	x		CAN_1	Above	178.8	1.7	3.68	24.8	39					
						Below	138.4	1.3	3.52	5.1	5					
				x	CAN_2	Above	36.8	1.7	2.66	24.8	44					
						Below	10.7	1.3	2.31	5.1	16					
CUR	Current Creek	1.08	x		CUR_1	Above	36.0	14.5	2.31	124.0	15					
						Below	3.3	15.7	1.34	54.3	58					
				x	CUR_2	Above	5.8	14.5	2.28	124.0	0					
						Below	2.1	15.7	1.39	54.3	30					
FOX	Fox Creek	94.68	x		FOX_1	Above	66.9	1.4	4.56	11.8	15					
						Below	2.8	2.9	1.92	41.6	44					
						GRZ	Little Grizzly Creek	27.38	x	GRZ_1	Above	358.5	2.4	5.87	116.0	0
											Below	243.3	2.1	4.56	91.9	13
HAG	Haggerty Creek	19.70	x		GRZ_2	Above	67.6	2.4	4.10	116.0	4					
						Below	5.5	2.1	2.36	91.9	60					
				x	HAG_1	Above	332.4	2.9	7.28	96.7	18					
						Below	138.0	3.3	4.31	61.0	0					
MIN	North Fork Miners Creek	6.35	x		HAG_2	Above	70.5	2.9	6.30	96.7	11					
						Below	2.3	3.3	2.58	61.0	40					
				x	MIN_1	Above	101.6	10.4	4.33	50.3	29					
						Below	38.1	10.0	1.81	54.7	72					
NFR	North French Creek	16.89	x		MIN_2	Above	13.1	10.4	3.91	50.3	43					
						Below	1.7	10.0	1.63	54.7	70					
				x	NFR_1	Above	368.9	3.7	8.06	103.4	2					
						Below	0.3	3.1	2.29	119.7	46					
RAN	Ranch Creek	8.08	x		NFR_2	Above	110.6	3.7	6.85	103.4	9					
						Below	7.0	3.1	2.56	119.7	17					
				RAN_1	Above	180.9	10.6	3.41	38.8	69						
					Below	138.2	7.1	3.25	99.1	8						
SMN	Steelman Creek	9.38		x	SMN_2	Above	52.6	6.3	3.67	99.3	0					
						Below	7.5	3.9	2.78	77.5	27					
STL	St. Louis Creek	34.15	x		STL_1	Above	670.9	1.9	6.34	75.9	2					
						Below	224.7	1.8	5.64	76.1	3					
				x	STL_2	Above	190.8	1.9	5.80	75.9	0					
						Below	102.4	1.8	5.30	76.1	0					

^aBillie Creek One (BCO) and Billie Creek Two (BCT) are two separate upstream branches of the main stem of Billie Creek.

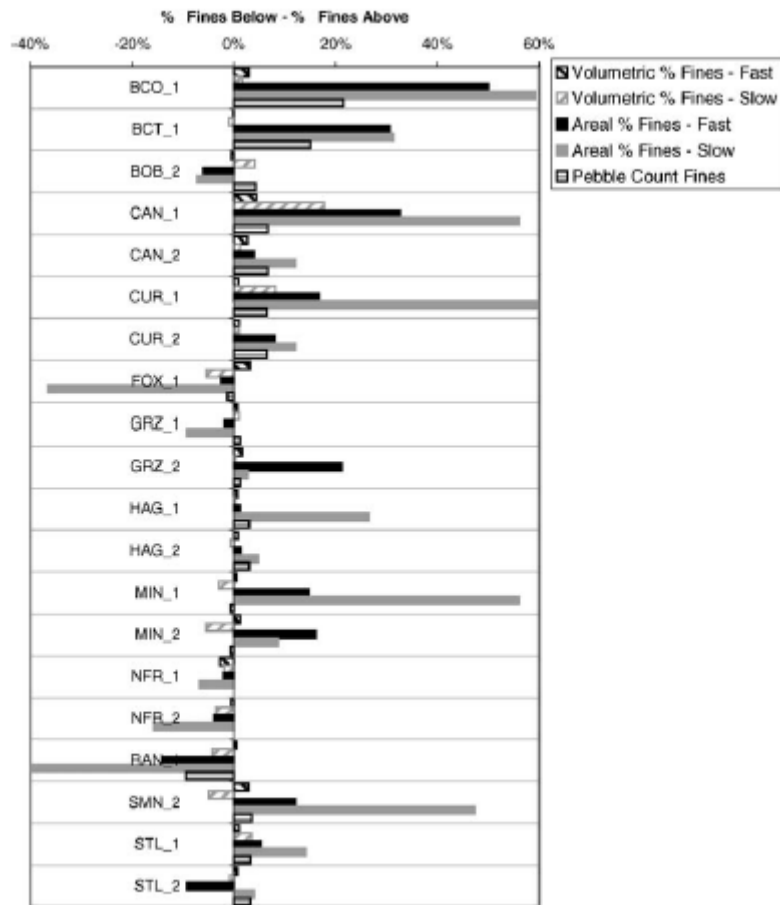


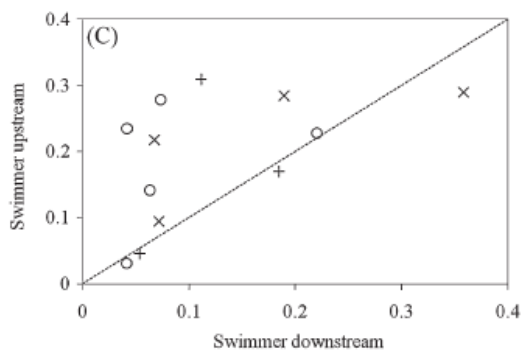
Figure 2. Difference in per cent fines between downstream diverted reach and upstream reference reaches

8 Annexe 2

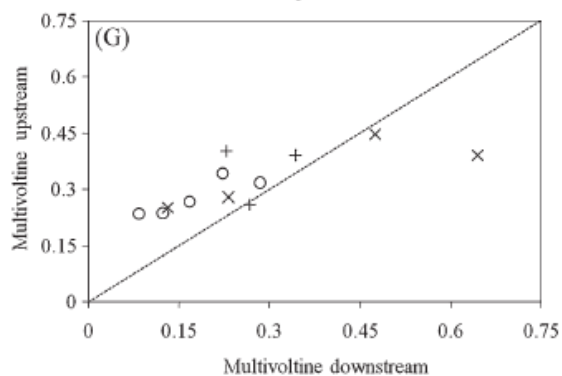
D'après Miller et al., (2010)

Traits spécifiques des macroinvertébrés discriminés entre l'amont et l'aval d'ouvrages de prélèvement d'eau (> 75 % Q), 12 cours d'eau, Oregon et Washington (USA)

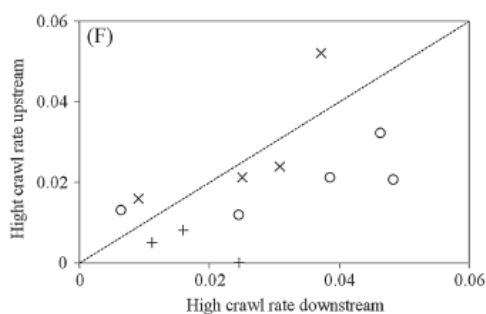
La proportion de nageurs (swimmer) diminue fortement à l'aval (Graphique C)



La proportion d'espèces multivoltines (plusieurs cycles de reproduction annuels) augmente à l'aval pour les portions médianes des cours d'eau échantillonnés (X) (Graphique G)



La proportion d'espèces à locomotion rampante augmente à l'aval (Graphique F)



Onema
Hall C – Le Nadar
5 square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.onema.fr

Cemagref
Parc de Tourvoie
BP 44,
92163 Antony cedex
01 40 96 61 21
www.cemagref.fr