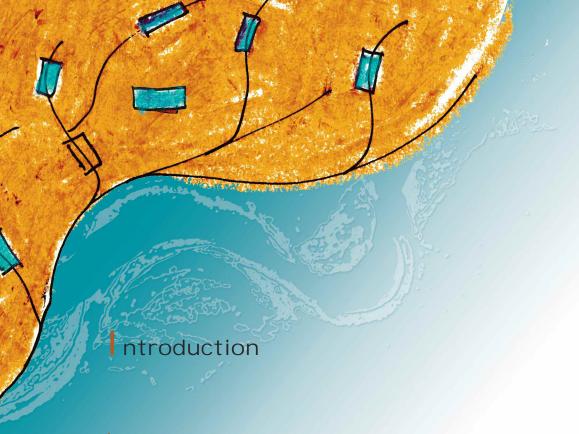


Effets cumulés des retenues sur les caractéristiques physico-chimiques des cours d'eau

- 84 Introduction
- 86 Effet d'une retenue sur la qualité physico-chimique
- 90 Effets cumulés des retenues sur les caractéristiques physico-chimiques des cours d'eau
- 98 Conclusion



a « qualité physico-chimique » d'une eau est une notion classiquement associée à la gestion environnementale des milieux aquatiques et des ressources en eau associées (AEP). Elle exprime les effets attendus de sa composition sur les divers usages de l'eau et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Elle intervient en particulier dans l'évaluation de l'état écologique d'une masse d'eau de la DCE. Elle s'apprécie à travers un ensemble de paramètres physiques et chimiques (température, turbidité, pH, concentrations dissoutes et particulaires, minérales et organiques, macro ou micropolluants, etc.), plus ou moins interdépendants et comparés à des normes environnementales plus ou moins étayées par des connaissances sur la réponse des écosystèmes aquatiques.

Ce chapitre aborde l'effet des retenues sur les caractéristiques physico-chimiques et les espèces chimiques suivantes : température, teneurs en oxygène dissous, azote, phosphore, métaux lourds, pesticides, gaz à effet de serre que nous considérons comme des paramètres clé du fonctionnement des milieux aquatiques et de la qualité des eaux.

Dans un premier temps la bibliographie a été analysée en considérant séparément chacun de ces paramètres. Ce choix est justifié par la diversité des processus biophysicochimiques affectant chacun d'entre eux et par conséquent la diversité de leurs déterminants. Les publications scientifiques sont d'ailleurs souvent dédiées à une seule variable de qualité de l'eau, ou les associent parfois deux par deux (température et oxygène, azote et phosphore...).

Par ailleurs non seulement les processus de transformations bio-géo-chimiques sont très variés et spécifiques à chaque variable, mais le comportement des différentes espèces chimiques varie fortement selon qu'elles sont essentiellement sous forme dissoute ou bien sous forme particulaire (notamment par adsorption sur des particules solides), avec parfois, dans certaines conditions, possibilité de changement de phase entre dissous et particulaire.

Or ces variables sont soumises à de nombreuses interactions, soit parce qu'elles participent ensemble à certains processus de transformation biophysicochimique, soit parce qu'elles influencent conjointement la qualité biologique du milieu aquatique. De plus, un effet positif sur un paramètre peut s'accompagner d'un effet négatif sur un autre. Il est donc important de les considérer simultanément pour évaluer l'effet cumulé des

retenues sur la qualité physico-chimique et biologique de l'eau. Par ailleurs, bien que ces variables soient affectées par des processus variés, ceux-ci sont sous la dépendance d'un petit nombre de processus (d'ordres 1 et 2 sur la Figure 3, page 32), essentiellement liés à l'établissement de conditions lentiques créées par une retenue.

Pour ne pas alourdir ce texte, l'effet d'une retenue isolée sur chacun de ces paramètres est abordé en annexe III, page 139. Ce chapitre aborde plutôt, dans un premier temps, l'influence d'une retenue sur la qualité physico-chimique globale du cours d'eau, en croisant les effets principaux sur les différentes espèces chimiques.

Il aborde ensuite **l'effet cumulé des retenues sur les caractéristiques physico-chimiques des cours d'eau**, de façon le plus souvent théorique comme on le verra.

Les études analysées portent le plus souvent sur des barrages en cours d'eau, de volume important ; les petites retenues, et *a fortiori* les retenues collinaires ne sont que très peu abordées dans la littérature.

L'analyse s'appuie également sur les acquis de la limnologie, les processus en jeu dans les lacs naturels et dans les retenues artificielles étant pour partie similaires, même si plusieurs différences interdisent de transposer tels quels les effets observés :

- la construction d'une retenue s'accompagne d'une submersion et d'une destruction de milieux terrestres qui peuvent aussi avoir un rôle sur la qualité physico-chimique de l'eau ;
- les réservoirs artificiels présentent de plus fortes fluctuations du niveau d'eau (marnage), liées aux saisons ou à leur gestion ;
- la sortie de la retenue, contrairement au lac, peut être située plus en profondeur dans la colonne d'eau, ce qui peut entraîner un relargage d'eau, avec des caractéristiques d'eaux profondes, et de sédiments à l'aval.

Iffet d'une retenue sur la qualité physico-chimique de l'eau

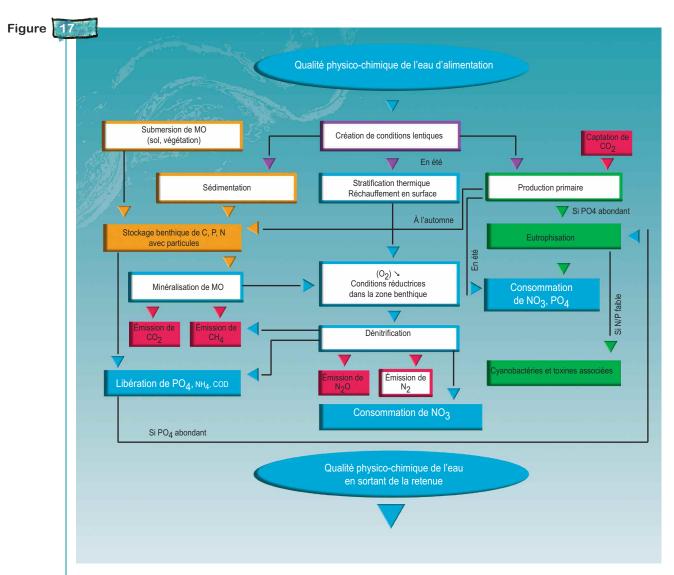
l'alimente. Selon son usage, il peut être aussi important de se focaliser sur cette évolution dans la retenue elle-même que sur les conséquences sur le cours d'eau en aval lorsque l'eau y est restituée.

L'effet d'une retenue sur la qualité de l'eau est d'abord lié à des processus physiques qui caractérisent le passage de conditions d'écoulements rapides (conditions lotiques ; alimentation par le cours d'eau ou par ruissellement de surface) à des conditions lentiques dans la retenue puis éventuellement de nouveau lotiques dans le cours d'eau aval.

Les principaux effets potentiels d'une retenue sur le devenir de C, N, P sont résumés sur la Figure 17, en lien avec les conditions lentiques qui s'établissent au sein de la retenue et qui entraînent :

- la sédimentation des particules solides, minérales ou organiques, contenues dans l'eau d'alimentation. Le phosphore, les éléments traces métalliques (ETM), des cations, certains pesticides peuvent être partiellement associés à ces particules et se déposent dans le même temps. Les particules organiques, quoique généralement plutôt légères, peuvent se déposer en partie, participant à la séquestration du carbone et apportant des nutriments sous forme organique. À cette matière organique (MO) allochtone s'ajoutent généralement de la MO autochtone issue de la production primaire, et de la MO du sol et de la végétation submergés. Toutes ces substances chimiques sont alors stockées dans la retenue sur un plus ou moins long terme. Cependant, si les conditions deviennent anoxiques à la base de la colonne d'eau, les transformations bio-géo-chimiques en milieu réducteur peuvent entraîner leur mobilisation sous forme gazeuse ou dissoute dans la colonne d'eau (CH₄, NH₄⁺, PO₄³⁻...);
- une possible stratification thermique de la colonne d'eau, dans les retenues profondes, du fait du rééquilibrage de la température de l'eau avec la température de l'air (réchauffement) dans les couches de surface en été. Dans les retenues peu profondes, toujours en été, la température de l'eau stockée dans la retenue et non renouvelée a tendance à augmenter, ce qui diminue la solubilité de l'oxygène dans l'eau. Outre l'apparition de conditions réductrices dans le fond de la retenue et ses conséquences citées ci-dessus, l'anoxie favorise la dénitrification, c'est-à-dire la transformation du nitrate en gaz, inerte comme N₂ ou à effet de serre comme N₂O. La stratification contrôle les gradients d'oxygène, mais aussi les phénomènes de diffusion, mélange et sédimentation des éléments dissous et particulaires d'une couche à l'autre ainsi que la production primaire et la minéralisation de MO dans la colonne d'eau (Figure 33 en annexe III, page 140) ; on observe ainsi une zonation verticale des éléments dissous, fortement liée aux phénomènes de stratification thermique et de gradient d'oxygène. Deux types de structures trophiques se construisent sur ces bases, à partir des décomposeurs bactériens ou fongiques, ou à partir des producteurs primaires. Les éléments nutritifs tels que N et P et les contaminants suivent les phénomènes de diffusion (fraction dissoute) ou de sédimentation (fraction particulaire);

un développement éventuel de la production primaire (phytoplancton, végétation). Il se produit surtout au printemps et en été, lorsque les nutriments sont abondants et dans les couches superficielles de la colonne d'eau où les conditions de température et de lumière lui sont favorables. Si PO₄3- est abondant, cela peut conduire à une eutrophisation. En consommant ces nutriments, la production primaire entraîne une diminution des concentrations de NO₃⁻ et PO₄³. L'eutrophisation entraîne une augmentation de biomasse et donc de MO à l'automne, dont la minéralisation va accentuer la consommation d'oxygène et les conditions réductrices dans la zone benthique. Les ions PO₄³-ainsi libérés vont à leur tour entretenir l'eutrophisation (n° de page). Le déficit de NO₃peut être pallié par la fixation de N2. Cette situation favorise les cyanobactéries ayant cette possibilité.



Principaux effets potentiels d'une retenue sur le devenir de C, N, P à l'intérieur de la retenue. Les couleurs utilisées distinguent les compartiments, flux et processus concernant la phase dissoute dans la colonne d'eau (en bleu), la phase solide sédimentaire (en orange), la phase gazeuse (en rouge) et la biomasse (en vert). Ces effets potentiels sont associés aux conditions lentiques et n'intègrent pas les effets lors de changement de régime hydraulique (crue, brassage lié au vent, curage, vidange...).

L'établissement des conditions lentiques dans la retenue, ou de façon générale les conditions hydrodynamiques dans la retenue, constitue l'une des clés de fonctionnement des retenues vis-à-vis de la qualité de l'eau. Un faible renouvellement de l'eau augmente le temps de résidence, ce qui peut favoriser la sédimentation et le stockage de certains éléments, la stratification thermique et l'anoxie, et donc certaines transformations bio-géo-chimiques dans la colonne d'eau. En retour, en cas de flux entrants importants et rapides, ou sous l'effet du vent, le brassage de la colonne d'eau et la remise en suspension des particules sédimentées peut entraîner un renouveau de mobilité des espèces chimiques associées aux particules ou un relargage de certains composés initialement concentrés dans le milieu interstitiel benthique. Le brassage peut aussi avoir un effet sur l'homogénéisation de la colonne d'eau réduisant la stratification thermique et les gradients d'oxygène, ainsi que sur la diffusion des éléments dans la colonne d'eau et à l'interface avec l'atmosphère. Enfin le phénomène de marnage, par définition très accentué dans les retenues, induisant des alternances de conditions anoxiques et oxiques en bordure de retenue, favorise encore plus la mobilisation des espèces chimiques associées aux sédiments (P, ETM, pesticides...). Si l'établissement de conditions lentiques conditionne l'essentiel des processus d'évolution de la qualité physico-chimique de l'eau dans la retenue, l'expression de ces processus et leur intensité vont dépendre aussi de nombreux déterminants : à la fois les caractéristiques morphologiques propres de la retenue (taille, forme, profondeur), son environnement (occupation du sol, hydrologie) dans le bassin versant et son alimentation qui déterminent les flux entrants, sa gestion qui détermine les flux sortants, le climat régional et local et sa variabilité temporelle, sans oublier l'occupation du sol ennoyé et le temps écoulé depuis la submersion. Tous ces déterminants jouent à des degrés divers selon les variables physico-chimiques et les processus de transfert et de transformation associés.

Les conditions hydrodynamiques peuvent présenter une forte variabilité à toutes les échelles de temps, en particulier de la saison. Les inversions de température d'une saison à l'autre peuvent entraîner la stratification de la colonne d'eau, notamment dans les retenues profondes. La saison est aussi déterminante dans le développement cyclique de la production primaire (effet température, lumière) consommant des nutriments au printemps et en été, sénescente en automne, stockée sous forme de MO ou éventuellement décomposée, permettant le relargage de nutriments. L'oxygène dissous peut être affecté à la fois par la respiration, la photosynthèse et la décomposition de cette production primaire. Les phénomènes de diffusion, mélange et de sédimentation des éléments dissous et particulaires d'une couche à l'autre dans la colonne d'eau dépendent des phénomènes de stratification thermique et donc de l'emplacement de la thermocline et du métalimnion qui varient saisonnièrement.

Un déterminant de l'évolution de plusieurs des variables physico-chimiques évoqués ci-dessus, largement cité dans la bibliographie, est le temps de résidence de l'eau dans la retenue. Celui-ci varie toutefois d'une façon complexe, tant dans le temps que spatialement dans la retenue, et les indicateurs habituellement utilisés (rapport du volume de la retenue sur le flux d'eau entrant, ou rapport de l'aire de la retenue sur l'aire du bassin versant drainé), s'ils donnent un ordre de grandeur utile, ne peuvent rendre compte de cette variabilité.

Tous ces effets qui se manifestent dans la retenue ont aussi des **conséquences sur la qualité de l'eau dans le réseau hydrographique aval,** dans le cas où la retenue est située sur un cours d'eau ou y est connectée temporairement ou de façon permanente. Les conséquences dans le cours d'eau récepteur sont fonction de l'importance relative des flux sortants par rapport aux flux dans le cours d'eau, et restent plus ou moins visibles de manière significative vers l'aval en fonction des nouveaux flux entrants. Pour certaines variables (température, oxygène dissous) l'effet de la retenue peut s'annuler au-delà d'une certaine distance dans le cours d'eau, en lien notamment avec les turbulences engendrées par le retour aux conditions lotiques, et au fur et à mesure que les nouveaux apports au cours d'eau se mélangent aux flux sortants. Pour d'autres éléments (N, P...) l'effet de la retenue reste plus ou moins visible selon l'importance relative des flux sortants par rapport aux flux dans le cours d'eau et à la présence d'affluents.

Le cas particulier de l'eutrophisation

L'eutrophisation est un changement trophique des écosystèmes aquatiques. Elle est due à un enrichissement en nutriments dont résulte une transformation de la structure* et du fonctionnement de la biocénose, et qui se manifeste par un accroissement de la productivité, une accumulation de la biomasse et une perturbation globale de la qualité des eaux. L'eutrophisation des retenus est dite « culturale » : elle est produite par des apports d'eaux enrichies en nutriments d'origine domestique, agricole ou agro-industrielle et se développe en quelques décennies, voire quelques années. Elle diffère donc radicalement du lent vieillissement naturel d'un plan d'eau dû au comblement et produisant des symptômes partiellement analogues à l'échelle du millénaire.

Un accroissement de la teneur en nutriments assimilables stimule la productivité végétale de la zone trophogène (Figure 40 en annexe III, page 148). Le phosphore assimilable (SRP, soluble reactive phosphorus) est très généralement, en milieu lentique, le facteur limitant de cette évolution. Cet effet « fertilisant » génère une accumulation de biomasse végétale dès que la production primaire en excès n'est plus régulée par sa consommation dans le réseau trophique (Figure 34 en annexe III, page 141). La MO synthétisée et non consommée sédimente et sa décomposition contribue, au niveau des couches d'eau profondes, à une désoxygénation qui aboutit parfois à l'anoxie de l'interface eau-sédiment. Cette anoxie entraîne la réduction du fer et la libération en solution d'une partie du phosphore associé aux oxydes de fer dans les sédiments. L'eutrophisation peut alors être auto-entretenue par ce nouvel apport de phosphore dissous (charge interne) et l'état eutrophe stabilisé. Dans certaines situations, la surproduction végétale stimulée par le phosphore aboutit à une carence relative en azote qui peut favoriser le développement de cyanobactéries fixatrices de N₂. Les cyanobactéries, formes végétales très mal consommées, finissent par proliférer quoiqu'il en soit, même en condition d'azote non limitant, favorisées par l'ombrage créé par la surproduction phytoplanctonique. Elles sont potentiellement productrices de toxines affectant le système nerveux ou digestif chez l'homme et leur développement peut constituer un risque majeur pour les usages de l'eau (AEP, agroalimentaire et baignade notamment).

ffets cumulés des retenues sur les caractéristiques physico-chimiques des cours d'eau

La question des effets cumulés des retenues sur la qualité de l'eau est rarement traitée et de manière inégale selon les variables. Les quelques travaux disponibles s'intéressant au devenir de l'azote et du phosphore seront d'abord présentés. L'émission des gaz à effet de serre par les retenues, pouvant devenir un problème émergent lié au nombre important de retenues sur la planète, est évoquée dans l'encadré 6, page 100. Compte tenu du faible nombre de références portant sur l'effet cumulé des retenues, l'attention a également été portée aux publications présentant des approches plus conceptuelles sur l'effet cumulé de zones humides et de lacs. Ces publications ne s'appuient pas sur des données observées et ne sont pas spécifiques d'une variable plus que d'une autre.

Effets cumulés des retenues sur le devenir de l'azote

Les méthodes mises en œuvre pour étudier l'effet cumulé des retenues sur le devenir de l'azote s'appuient soit sur des mesures, en plusieurs points du réseau hydrographique et parfois au sein des retenues, soit sur de la modélisation, avec des modèles capables de représenter une succession de réservoirs sur le réseau hydrographique, et une représentation plus ou moins détaillée de l'influence des retenues sur l'azote. C'est essentiellement la « rétention » de N par dénitrification qui est mise en avant, terme utilisé dans la littérature mais impropre puisqu'il s'agit d'une exportation sous forme gazeuse dans l'atmosphère.

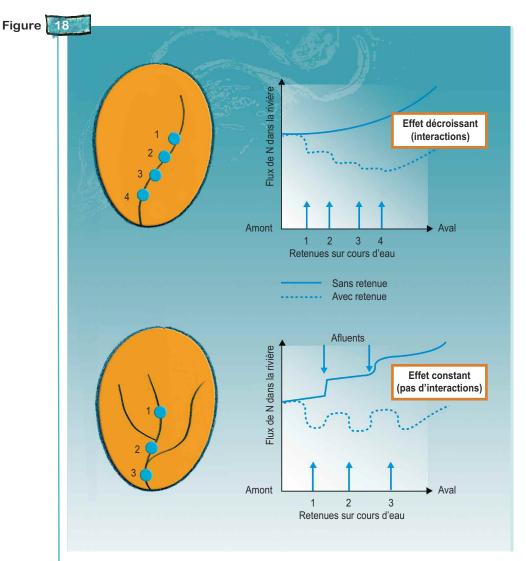
Certaines études se contentent de mesures à l'exutoire de bassins versants, et cherchent des corrélations entre d'une part les abattements observés et d'autre part les caractéristiques des bassins versants étudiés et des plans d'eau qu'ils contiennent. D'autres utilisent les mesures réalisées sur une retenue pour en déduire l'effet des autres retenues présentes sur le bassin versant, et les inclure dans une modélisation à l'échelle du bassin versant.

Les études basées sur de la modélisation permettent d'explorer des scénarios d'implantation des retenues. Elles montrent que les réservoirs placés à l'aval près de l'exutoire sont plus efficaces que ceux placés à l'amont et que de nombreux petits réservoirs sont plus efficaces sur la rétention de N qu'un seul de grande taille. Certaines études concluent que la présence de barrages augmente la variabilité interannuelle des flux de nutriments, alors que d'autres arrivent à la conclusion inverse. Lorsque la dénitrification s'y réalise, l'efficacité des réservoirs pour réduire la charge en N semble plus élevée que celle des lacs, car les rapports aire drainée/aire du réservoir y sont plus élevés que pour les lacs, les vitesses apparentes de transfert dans les sédiments plus grandes et les charges moyennes entrantes plus importantes.

Dans le cas où **quelques réservoirs sont situés en série sur une même rivière,** le réservoir amont peut avoir un effet significatif sur la rétention de N. En effet, l'intensité de la dénitrification est fonction des concentrations en azote, ce qui conduit à une rétention de N qui décroit progressivement d'un réservoir à l'autre vers l'aval. Ce phénomène est amplifié par l'effet tampon de chaque réservoir sur la variabilité temporelle de la qualité

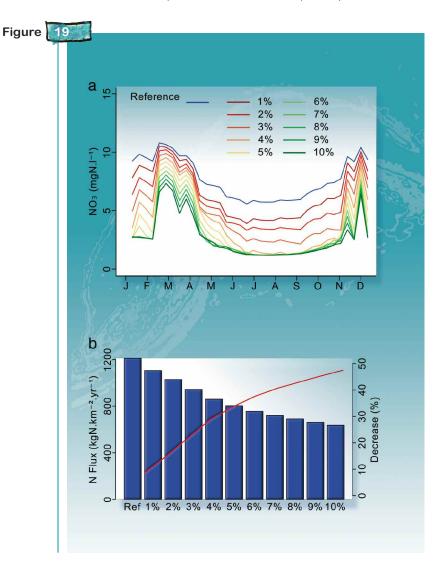
physico-chimique de l'eau qui le traverse. D'un réservoir à l'autre vers l'aval, la stratification verticale de la colonne d'eau est moins nette puisqu'elle est liée aux variations saisonnières de la température dans le flux d'eau entrant par comparaison avec les eaux du lac, variations qui sont tamponnées au passage dans les réservoirs de l'amont. La stratification thermique verticale de la colonne d'eau s'accompagne d'une stratification des teneurs en oxygène dissous, qui gouvernent le processus de dénitrification. D'où l'importance de la profondeur d'où sont issus les flux sortants, et aussi de la distance entre les réservoirs, qui permet ou non de tamponner de manière durable la variabilité temporelle de la qualité physico-chimique de l'eau. Une forte saisonnalité, liée en été aux blooms algaux et aux conditions bio-géo-chimiques (température et pH élevés, anoxie) qui favorisent l'absorption biologique d'azote et la dénitrification, est observée, plus marquée également dans les réservoirs amont.

Il ressort de cette analyse que l'estimation de l'effet cumulé de retenues sur le devenir de l'azote doit tenir compte de leur répartition sur le bassin (Figure 18) : dans le cas de retenues situées en série, proches, sur le même cours d'eau, il faut tenir compte des interactions entre retenues, alors que pour des retenues distribuées de façon moins dense sur le réseau hydrographique, ou hors réseau hydrographique, elles peuvent être considérées comme indépendantes les unes des autres et leur effet cumulé sur le flux de N considéré comme simplement additif.



Effet (conceptuel) de la position des retenues dans le bassin versant sur les flux d'azote dans le cours d'eau : a- retenues en série proches ; b- retenues en série espacées ou en présence d'affluents.

La Figure 19 illustre ainsi, sur un sous bassin de la Seine, que la rétention de nitrate augmente avec la surface du bassin occupée par des retenues mais plafonne au-delà d'un certain seuil, qui reflète les interactions entre retenues, dès lors que leur nombre augmente et qu'elles se rapprochent les unes des autres sur le réseau hydrographique. Du point de vue de la modélisation à mettre en œuvre, la représentation de l'influence des retenues sur les flux d'azote doit être en cohérence avec les données disponibles, mais aussi avec le modèle hydrologique sous-jacent : un modèle hydrologique non distribué ne permettra de représenter que l'effet d'une retenue équivalente unique, un modèle spatialement explicite permettra de représenter une retenue par maille (qui, dans certaines applications analysées, atteignent 50 km²). Un modèle semi-distribué, comme SWAT, permet de représenter différentes retenues sur un sous bassin, qui constitue sa maille de base, en les répartissant sur des sous-unités hydrologiques homogènes, mais, celles-ci n'étant pas hydrologiquement connectées entre elles, les interactions entre retenues sur un même sous bassin versant ne peuvent être représentées. Le choix du modèle à appliquer sur un bassin versant pour évaluer l'effet cumulé des retenues sur les transferts d'azote doit donc être pertinent au vu de l'intérêt que l'on porte aux interactions entre les retenues.



a. Variation saisonnière de la concentration en nitrate à l'exutoire du sous bassin versant de l'Orgeval pour l'année hydrologique 2006, en fonction de la proportion d'étangs (en %) dans le bassin versant.

b. Flux annuel d'azote à l'exutoire du bassin de l'Orgeval en fonction du pourcentage de la surface du bassin versant couverte par des étangs (année 2006). La réduction correspondante est figurée sur la ligne rouge. (Passy 2012).

Effets cumulés des retenues sur le devenir du phosphore

Les études montrent que la multiplication de barrages résulte en la création d'une charge interne en phosphore très importante dans l'hydrosystème, ce qui peut représenter un problème pour le relargage à venir de cette charge. Certaines séries de lacs naturels connectés conduisent à un accroissement des concentrations en P assimilable de l'amont à l'aval, dû aux transformations bio-géo-chimiques qui s'opèrent en milieu lentique, alors que d'autres séries engendrent au contraire une baisse attribuable à une prédominance des fonctions de rétention. L'effet saisonnier observé est plus marqué pour l'azote que pour le phosphore. Dans une chaine de

lacs connectés, si des mesures sont prises pour réduire les flux de P entrants, leurs conséquences sur la qualité de l'eau (eutrophisation) sont maximales à l'amont et en été, et diminuent vers l'aval, du fait d'un poids croissant des recyclages internes vers l'aval. Les différences entre retenues et lacs naturels (charge interne créée par les inondations, variabilité des marnages – synchrones ou non -, type de restitution de l'eau – éventuellement hypolimnique -) ne permettent pas une transposition directe des résultats acquis sur ces derniers. Certaines questions semblent ainsi devoir être abordées pour pouvoir progresser sur cette problématique :

- Quel est l'effet incrémental sur les flux de phosphore ? Quels sont les fonctionnements additifs, linéaires, soumis à des seuils ? On peut penser par exemple au rapport N/P et au développement de cyanobactéries.
- Y-a-t-il dans le réseau hydrographique un lieu où un réservoir serait à l'optimum entre fonctions de rétention et de transformation ? Quelle doit être la distance interbarrages pour permettre la récupération ?
- Quelles sont les différences d'impact liées à la position des réservoir(s) dans l'hydrosystème (ordre du cours d'eau) ? Quels paramètres ou métriques pour rendre compte des effets liés à la position ?
- À volume égal, vaut-il mieux, du point de vue risque d'eutrophisation, de nombreux petits réservoirs en tête de bassin ou un gros plus bas ?
- Quel couplage y a-t-il à l'échelle paysage avec l'usage des sols et les flux de phosphore associés ? Comment décrire le système activité paysage-réservoirs ?

Effets cumulés des retenues sur la qualité physico-chimique des cours d'eau : approches conceptuelles

Compte tenu du manque d'études portant spécifiquement sur l'effet cumulé des retenues sur la qualité physico-chimique des cours d'eau, la littérature portant sur les zones humides et les lacs a été considérée, essentiellement du point de vue des approches conceptuelles et méthodologiques utilisées. L'enjeu dans les travaux portant sur les zones humides est d'évaluer les effets cumulés de la perte ou de la dégradation de zones humides dans un bassin versant. Les zones humides comme les retenues sont des compartiments de stockage des éléments adsorbés sur les particules et des réacteurs de transformation en conditions réductrices des éléments dissous, avec passage possible du particulaire au dissous. Comme pour les retenues, les flux sortants des zones humides sont fonction des flux entrants, et de la capacité de stockage ou de transformation des différents polluants, qui dépend entre autres du temps de résidence. Les similitudes sont ainsi nombreuses entre zones humides et retenues, et nombre des conclusions relatives aux zones humides sont transposables au cas des retenues.

Les études montrent qu'il n'y a pas de relation linéaire entre l'abondance des zones humides et leur effet cumulé. La somme des effets de chaque zone humide ne fournit pas toujours une estimation des effets cumulés, à cause des interactions entre les zones humides. Il est important de **définir les échelles spatiales, mais aussi temporelles,** du système à étudier, qui dépendent de la fonction assignée aux zones humides, c'est-à-dire de leur effet sur telle ou telle variable ou groupe de variables physico-chimiques. Les interactions entre zones humides passent essentiellement par des échanges d'eau (séquence hydrologique) et le bassin versant est l'unité appropriée pour identifier ces interactions et les intégrer pour le cumul, mais plusieurs échelles peuvent être pertinentes (Figure 20, page suivante). L'échelle temporelle doit prendre en compte la variabilité saisonnière et interannuelle, mais aussi événementielle, et parfois le long terme. La pertinence de l'échelle de temps considérée dépend du type d'impact étudié : effet moyen sur une certaine durée, pics lors des événements exceptionnels, etc.

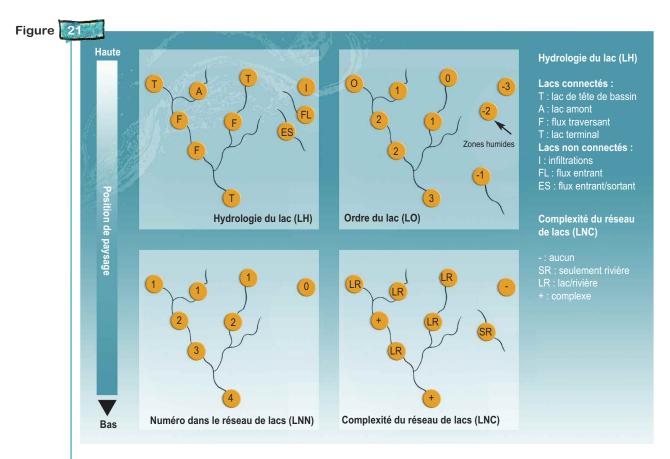
La position des zones humides dans le paysage est, pour plusieurs auteurs, déterminante pour l'évaluation des effets cumulés, à côté bien sûr des caractéristiques propres de chaque zone humide, à la fois parce que leur position dans le bassin versant détermine les flux qu'elles reçoivent et parce que leur position vis-à-vis du cours d'eau détermine leur type de fonctionnement. Les études concluent que le recours à la modélisation semble nécessaire pour évaluer les effets cumulés. Deux approches peuvent être suivies en parallèle : une approche bottom-up qui permet d'intégrer dans la séquence hydrologique chaque zone humide avec ses caractéristiques propres, et une approche top-down, où les modèles, conceptuels, développent une évaluation qualitative tout en identifiant les perspectives de recherche pour construire les hypothèses majeures et définir le besoin de données.

Le développement de méthodes d'évaluation quantitative nécessite toutefois d'améliorer la compréhension des facteurs qui contrôlent les processus dans les zones humides et qui permettent ainsi de prendre en compte les différences de fonctionnement entre les zones humides.

A : Exutoire de bassin versant complet
B : Exutoire d'un sous bassin versant très équipé
C : Exutoire d'un sous bassin versant peu équipé
Zones humides
Sous bassin versant

Bassin versant virtuel montrant les différents sous bassins où il serait possible d'évaluer les effets cumulés des zones humides sur le stockage des crues, et leurs exutoires A, B, C.

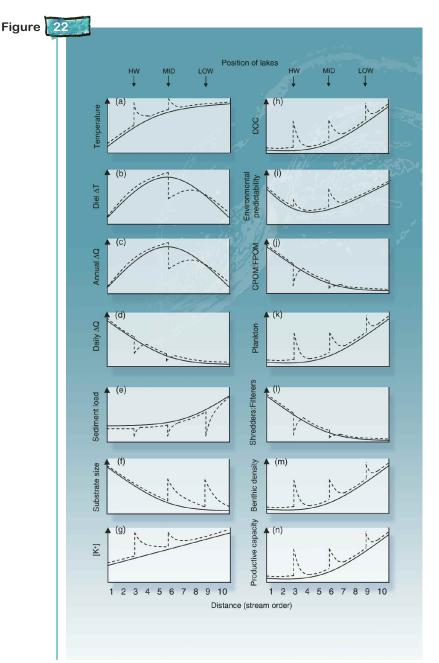
Les travaux sur les lacs mettent également en évidence l'importance de leur position dans le paysage. Celle-ci détermine notamment leur alimentation par la nappe ou par les eaux de surface, qui influe sur certains paramètres de qualité de l'eau. On peut ainsi décrire cette position par différents index, semi-qualitatifs, renseignant sur leur mode d'alimentation/restitution d'eau, leur position dans le bassin versant et par rapport aux autres lacs (Figure 21). Une étude sur le Nord Michigan a montré que ces index sont reliés à certains paramètres de qualité de l'eau, mais aussi à d'autres déterminants paysagers, comme la proportion de zones humides dans le bassin versant ou la morphologie des lacs. Il est donc difficile de distinguer quels déterminants jouent réellement un rôle sur la qualité de l'eau.



Description de métriques de position des lacs : hydrologie du lac (LH), ordre du lac (LO), numéro dans le réseau de lacs (LNN), complexité du réseau de lacs (LNC).

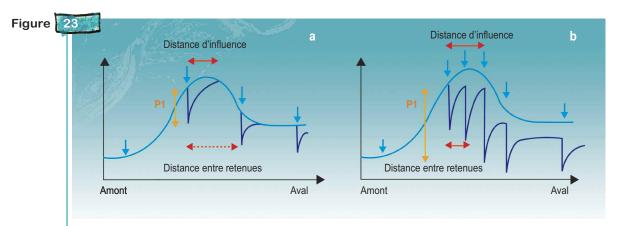
Les lacs considérés sont souvent en série sur une même rivière, chaîne de lacs naturels ou lacs de barrages. L'influence que peut avoir un lac sur le cours d'eau dépend de la taille du cours d'eau, de la taille et de la forme du lac, et de la position du tributaire (cours d'eau alimentant le lac) et de l'émissaire (cours d'eau alimenté par le lac) ou de la gestion du barrage le cas échéant. Une des difficultés signalées pour progresser dans la compréhension de l'effet cumulé des lacs sur un cours d'eau est que les deux types de milieux, lentiques et lotiques, ne sont pas étudiés par les mêmes spécialistes. Le recours à des systèmes d'information géographique et des analyses de réseau permettant d'organiser les connaissances devraient permettre d'avancer vers une science prédictive des réseaux aquatiques.

En partant du *River Continuum Concept* (RCC) qui considère que la dimension longitudinale de la rivière est associée à différents gradients physiques et d'ajustements biotiques, on peut, pour étudier l'effet d'une succession de lacs sur un cours d'eau, s'appuyer sur le SDC *Serial Discontinuity Concept*. Celui-ci introduit les barrages comme des discontinuités modifiant les paramètres et processus abiotiques et biotiques le long de ces gradients depuis l'amont vers l'aval. Cette modification est fonction de la position des lacs ou des barrages dans le bassin versant, partitionnée en trois situations contrastées : l'amont, le milieu ou l'aval de la rivière (Figure 22). L'ordre du cours d'eau intervient différemment selon le contexte climatique.



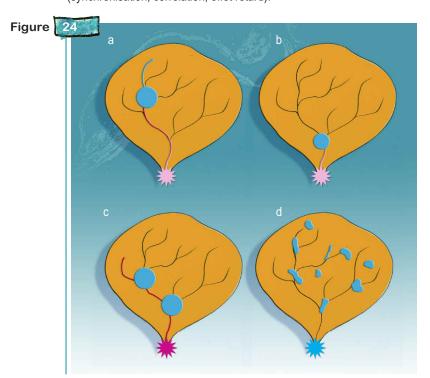
Sur cette figure le trait continu représente l'évolution amont-aval des différentes variables sur une rivière sans lac (température, variabilité journalière de la température, variabilité annuelle du débit, variabilité journalière du débit, charge en matières en suspension, granulométrie du substrat, teneur en potassium, teneur en COD...). Le trait discontinu représente l'effet des barrages en fonction de leur position dans le réseau hydrographique. (source Jones, 2010).

Deux indicateurs peuvent être intéressants à considérer, pour une variable donnée : la distance pour laquelle l'effet du barrage est observé (*DD Discontinuity Distance*), l'intensité de la perturbation liée à sa présence (PI). Dans la Figure 23b, les plans d'eau sont suffisamment proches les uns des autres pour qu'un effet cumulé soit visible, compte tenu de l'amplitude des effets individuels (PI), ne permettant pas un retour à l'état initial comme dans la Figure 23a. Ce schéma théorique ne précise pas à quelle variable de qualité de l'eau (physique, chimique, biologique) il s'applique. Les évolutions simulées devraient en effet être différentes selon les différentes variables.



Impact de plans d'eau sur le comportement aval théorique d'une variable, a) sans impacts cumulés, b) avec des impacts cumulés.

Toutefois, la prise en compte de la position longitudinale des lacs sur le cours d'eau ne suffit pas, et à l'échelle d'un bassin versant, le premier facteur de discontinuités est la ramification du réseau hydrographique, avec des variations souvent brutales et importantes à chaque confluence. Alors que précédemment on s'intéressait à une dimension unique longitudinale de la rivière, dont le gradient à peu près continu était interrompu par la présence d'un lac, les choses se compliquent en présence de lacs multiples à l'échelle d'un bassin versant. La forme du bassin versant et, partant, la forme et la hiérarchie du réseau hydrographique peuvent avoir une influence. Même si un lac a un effet important sur une rivière, l'arrivée en aval d'un affluent à fort débit peut annuler cet effet (Figure 24a), alors qu'un faible effet d'un lac situé près de l'exutoire du bassin étudié prendra une importance démesurée (Figure 24b). Quant aux effets de multiples lacs avec des cas de figures plus complexes, semblant plus réalistes que ces premières configurations, ils semblent bien plus difficiles à évaluer (Figure 24d). Outre l'organisation spatiale des lacs, il faut aussi prendre en compte la cohérence temporelle de leurs réponses (synchronisation, corrélation, effet retard).



Répartition théorique de plusieurs lacs sur le réseau hydrographique: (a) un lac important en tête de bassin peut altérer significativement les caractéristiques du cours d'eau. À l'aval un affluent sans lac pourra diluer cet effet. (b) un petit lac pourra avoir assez peu d'influence sur les caractéristiques du cours d'eau à l'aval du réseau, (c) la combinaison de deux lacs dans le réseau influence les caractéristiques écologiques des mêmes affluents, (d) lacs de positions et tailles plus réalistes : leurs influences individuelles et combinées sont complexes et pas aisément résumées.

L'effet cumulé des lacs doit être étudié en croisant l'échelle locale (chaque lac) et l'échelle du système global (le bassin versant). Certains indicateurs ou descripteurs, résumés dans le Tableau 5, peuvent permettre de caractériser l'influence d'un lac, ou fournir des éléments pour appréhender leur effet cumulé à l'échelle d'un bassin versant. Leur application pour comparer des situations reste toutefois très contexte-dépendante.

Tableau 5



Mesures et descripteurs potentiels des réseaux lacs-cours d'eau, incluant des métriques résumant les conditions du bassin versant entier, ainsi que le potentiel d'un lac à altérer les caractéristiques du cours d'eau aval

Mesure	Mesures spécifiques	Objectifs
Métriques d'influence des lacs à l'échelle du bassin versant	Pourcentage du bassin couvert par des lacs	Un fort pourcentage (de l'ordre de >10 %) du bassin couvert pourrait indiquer une forte influence des lacs sur le système. Néanmoins leur distribution pourrait êtr réduite à un grand lac en tête de bassin versant
	Position des lacs dans le bassin versant	Surface ou volume de lacs en tête, milieu ou bas de bassin versant
	Pourcentage de la longueur de rivière s'écoulant à travers des lacs, ou pourcentage d'écoulant comme rivière	Une mesure de l'effet global des lacs
	Distribution des tailles de lacs dans le réseau	De nombreux petits lacs ont moins de potentiels à altérer les cours d'eau
	Score cumulé des effets des lacs pour le bassin versant	Une mesure de l'influence des lacs sur les cours d'eau dans le réseau
Potentiel d'un lac à altérer les caractéristiques aval	Surface ou volume de lac par rapport à la taille (largeur ou débit) du cours d'eau entrant ou sortant	Les attributs d'un petit cours d'eau peuvent être significativement altérés quand il s'écoule dans un grand lac à faible taux d'écoulement. Au contraire, une grande rivière s'écoulant dans un petit lac avec un fort taux de renouvellement gardera l'essentiel de ses caractéristiques
	Temps de résidence Taille (ou importance) des cours d'eau entrant	Temps moyen que l'eau passera dans un lac donné. La largeur du chenal ou le débit du cours d'eau des rives fournit une indication de l'importance du cours d'eau
	Ordre maximal des cours d'eau entrant dans un lac	Fournit une indication de l'importance du cours d'eau
	Distance d'écoulement entre l'entrée et l'exutoire d'un lac	Un lac avec des entrées et exutoires à des extrémités opposées altèrera les attributs du cours d'eau sortant à un degré plus importants que si entrées et exutoires sont proches et peuvent court-circuiter les effets du lac
	Angle de l'entrée par rapport à l'exutoire	Angle entre le tributaire et le cours d'eau sortant dans le lac
	Nombre de cours d'eau entrant dans un lac	Un grand nombre de cours d'eau entrant dans un lac peut indiquer un faible temps de résidence
	Forme du bassin	Ratio entre la surface du bassin et le carré de sa longueur
	Distance à l'aval d'un lac	La distance à l'aval du lac déterminera l'amplitude de l'effet du lac à un point d'observation aval. Les coefficients et la forme fonctionnelle de l'atténuation des effets des lacs à l'aval sont largement méconnus



Importance du choix de l'échelle spatiale (et temporelle) à considérer pour le cumul

L'effet cumulé des retenues doit être étudié en croisant l'échelle locale de chacune des retenues et l'échelle du système plus large (le bassin versant). Il est lié à la fois au fonctionnement des différentes retenues avec leurs facteurs de contrôle internes, d'où l'importance des connaissances acquises à l'échelle d'une retenue, et à leurs échanges avec l'environnement dont l'importance et la nature impliquent des facteurs de contrôle externes aux retenues. Cette échelle spatiale large du cumul est importante mais délicate à définir, comme d'ailleurs l'échelle temporelle. Elles dépendent d'hypothèses a priori sur le type d'impact à considérer, sur la ou les variables physico-chimiques d'intérêt, sur le lieu où cet impact doit être évalué : pour les gaz à effet de serre (GES) c'est l'échelle planétaire qui est choisie, et l'échelle de temps pertinente est l'année voire la décennie ; pour d'autres variables, les effets ne seront pas les mêmes si on s'intéresse aux petits bassins versants amont ou aux grands bassins aval, et l'échelle de temps à considérer doit prendre en compte les variations hydrologiques (événement ou saison).

Importance des connexions hydrologiques entre les retenues

Comme pour les zones humides, il ne devrait pas y avoir de relation linéaire entre l'abondance des retenues (cumul des surfaces ou des volumes) et leur effet cumulé sur la plupart des variables physico-chimiques. Autrement dit, la somme des effets de chaque retenue ne fournit pas toujours une estimation des effets cumulés. Deux raisons peuvent être invoquées :

- certains effets locaux ne se retrouvent pas à l'aval du paysage, ou s'atténuent en fonction de la distance. C'est le cas des effets sur la température ou l'oxygène dissous ;
- le plus souvent le fonctionnement de chaque retenue vis-à-vis des variables physico-chimiques dépendent des caractéristiques des flux entrants. C'est le cas de la dénitrification qui dépend de la charge en nitrate dans l'eau d'alimentation. Or ces flux entrants peuvent être déjà influencés par le passage dans d'autres retenues.

Les interactions entre les retenues passent essentiellement par des échanges d'eau. Il semble donc essentiel d'identifier comment les retenues s'insèrent dans le système de chemins hydrologiques dans le bassin versant

où le cumul est considéré. Cette insertion est fonction du mode d'alimentation des retenues (cf typologie en introduction), de leur place dans le bassin versant en relation avec le fonctionnement hydrologique de celui-ci, et de leur mode de gestion.

Dès lors que les retenues sont situées sur le même chemin hydrologique (cas le plus courant : les retenues en série sur un cours d'eau), un effet distance peut intervenir (retour éventuel aux caractéristiques initiales avant retenues par passage aux conditions lotiques ou par effet de « dilution » des flux sortants dans le cours d'eau). Dans un certain nombre de cas (alimentation par la nappe, absence de restitution en aval au cours d'eau, distance importante entre retenues sur le réseau hydrographique, etc.) il n'y a pas d'interactions directes entre

distance importante entre retenues sur le réseau hydrographique, etc.) il n'y a pas d'interactions directes entre les retenues. Dans ce cas, soit les effets cumulés pour l'ensemble du bassin versant sont la somme des effets individuels (émission des GES, rétention de C, N, P, etc.), soit les effets individuels restent cantonnés à chaque retenue et n'ont qu'un impact localisé (réchauffement estival, désoxygénation, eutrophisation, etc.).

Importance de la position dans le paysage des différentes retenues

La position des retenues dans le paysage ressort dans la bibliographie des effets cumulés comme un facteur important. Elle était déjà mise en avant comme un facteur de variabilité d'effet à l'échelle d'une retenue, sans pour autant être très précisément étudiée. Il existe également de nombreux autres facteurs de cette variabilité, notamment les facteurs de contrôle « internes » jouant sur la capacité de stockage et de transformation de la retenue, c'est-à-dire ses caractéristiques morphologiques, sa taille, sa forme, sa gestion, la position des prises d'eau en entrée et sortie, etc. Lorsqu'on s'intéresse au cumul, la position des retenues dans le paysage participe aussi à la question des interactions entre retenues évoquées ci-dessus.

À l'exemple des nombreuses publications conceptuelles sur les zones humides et les lacs, il pourrait être intéressant d'établir un certain nombre de métriques paysagères, ou une typologie des retenues en termes de position à l'amont ou à l'aval du bassin versant, en fonction de leur relation au cours d'eau. Cela supposerait toutefois de connaître plus précisément les effets de cette typologie : y a-t-il des grandes tendances, associées à cette position, sur les flux entrants en fonction de l'hydrologie du bassin versant drainé, de l'occupation du sol, de l'alimentation de la retenue, sur sa capacité de stockage et de transformation ? L'idée est de définir des indicateurs plus larges que la seule description des connexions hydrologiques. Des études pourraient être menées reliant statistiquement ces métriques de la position des retenues dans différents type de bassins versants et la qualité de l'eau aux exutoires.

Méthodes d'évaluation de l'effet cumulé

Étant donné les nombreux processus à l'œuvre et la multiplicité de leurs facteurs de variation, les effets cumulés ne peuvent *a priori* être évalués que par **modélisation**. Des modèles spatialisés pourraient être développés en intégrant pour chaque retenue sa place dans la séquence hydrologique, son type, sa taille, sa capacité de stockage ou transformation. La représentation de l'influence des retenues doit être en cohérence avec les données disponibles, mais aussi avec le modèle hydrologique sous-jacent : un modèle hydrologique non distribué ne permettra de représenter que l'effet d'une retenue équivalente unique, un modèle spatialement explicite permettra de représenter une retenue par maille (qui, dans certaines applications analysées, atteignent malgré tout 50 km²), et potentiellement les interactions entre retenues. Le choix du modèle doit donc être pertinent avec l'analyse que l'on a des interactions entre les retenues.

Actuellement l'efficacité de prédiction de tels modèles est *a priori* discutable, à cause de la grande variabilité du fonctionnement des retenues et des limites des connaissances sur le rôle des nombreux déterminants. Une approche qualitative, basée sur quelques cas types contrastés de bassins versants intégrant des retenues, pourrait déjà permettre d'identifier les perspectives de recherche pour construire les hypothèses majeures et connaître le besoin de connaissances et de données. Force est de reconnaître qu'il n'existe pas de projet de recherche dédié spécifiquement à la guestion de l'effet cumulé des retenues sur la qualité physico-chimique de l'eau.

Besoins et lacunes de recherches

Au niveau scientifique, les verrous identifiés concernent d'abord l'échelle d'une retenue, avec la quantification des nombreux processus actifs dans cette retenue. Des observations et des données à l'échelle locale sont encore nécessaires, avec des suivis suffisamment denses aux niveaux spatial et temporel. Leur objectif doit être clairement d'alimenter des modèles bio-géo-chimiques adaptés aux retenues, dont le développement doit se poursuivre. Certains phénomènes spécifiquement développés dans les retenues ont besoin d'être quantifiés et mieux compris : l'effet initial dû à l'inondation de matières organiques et sa durabilité, l'effet du marnage. Par ailleurs les données existantes ou à acquérir à l'échelle d'une retenue pourraient être mobilisées dans une méta-analyse pour bien identifier les nombreux facteurs d'influence et permettre d'envisager une transposition des résultats acquis.

À l'échelle globale du bassin versant, d'autres modèles doivent être développés, permettant de traiter l'effet cumulé. La position des retenues dans le bassin jouant un rôle important (apports différents par l'aire drainée et interactions entre retenues liées à leur position relative sur les chemins hydrologiques), les modèles devront soit être distribués spatialement, soit faire ressortir une typologie [patterns spatiaux – effets physico-chimiques], qui reste à élaborer. Les possibilités de tracer des effets globaux de retenues grâce aux traçages isotopiques de C et N mais peut être aussi de PO4 (développement en cours) mériteraient d'être évaluées.

Encadré 6

6

Effets des retenues sur les grandes échelles de temps et d'espace

Les retenues sont des infrastructures prévues pour durer plusieurs dizaines d'années : leurs effets peuvent donc s'exprimer sur des temps longs, englobant une évolution du climat ou de l'aménagement du bassin versant qui les supportent. Ce point est important : si cette expertise ne traite pas spécifiquement du changement climatique ou des aspects socio-économiques liés au développement des retenues, il n'en reste pas moins que ses résultats doivent être mis en perspective de l'évolution prévisible conjointe du régime climatique et de l'occupation des sols dans certaines régions, impactant la capacité de remplissage des retenues, ainsi que leur impact sur des milieux aquatiques dont l'état « naturel » évoluera également.

Par ailleurs, les effets des petites retenues, abordés dans cette expertise essentiellement à l'échelle du bassin versant qui les supporte, peuvent se cumuler avec ceux d'autres aménagements le long du cours d'eau, et contribuer ainsi à des effets sur les estuaires et les mers. Ainsi, la réduction des apports d'eau et de sédiments peut conduire à une augmentation de la salinité, qui modifie la circulation des courants marins, mais également l'équilibre du réseau trophique, d'autant que ces modifications s'accompagnent en général d'une modification des apports en nutriments. La turbidité de l'eau est également perturbée, avec des bouchons vaseux qui tendent à remonter dans l'estuaire. Dans le cas de grands lacs ou de mers intérieures, la réduction des apports peut conduire à un assèchement partiel, voire total de ces surfaces en eau. À l'échelle globale (planétaire), il est estimé que l'impact sur les débits des petites retenues pour irrigation, qui représente environ 23 % de l'irrigation mondiale, correspond à une diminution de 5 % des débits moyens, 44 % du débit mensuel minimal, et 2 % du débit mensuel maximal.

La réduction des inondations annuelles aval affecte en particulier la productivité naturelle des plaines inondables et les deltas. En Amérique du Nord des études approfondies indiquent que la construction de barrages est l'une des principales causes de l'extinction des espèces d'eau douce. Les réductions spectaculaires des espèces

d'oiseaux sont également connues, en particulier dans les zones de plaines inondables et des deltas en aval. Certains réservoirs fournissent également des habitats pour les oiseaux et d'autres animaux, mais cela souvent ne l'emporte pas sur la perte de l'habitat en aval.

Un autre effet cumulé des retenues est traité dans la littérature pour un enjeu qui semble non négligeable à l'échelle globale, il s'agit du bilan d'émission de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O). Des études avancent le chiffre de 7 % pour quantifier la contribution des réservoirs aux émissions de GES produites par l'ensemble des sources anthropiques. D'autres soulignent que l'émission de CH₄ est inversement proportionnelle à la taille des retenues, l'émission étant bien plus élevée lorsque leur taille est inférieure à 1000 m². À l'inverse, les retenues sont aussi considérées comme des lieux de séquestration du carbone organique. Des estimations du stockage annuel de carbone dans les réservoirs dans le monde aboutissent à des ordres de grandeur de l'ordre de 0,15 à 0,6 Pg/an²0 pour une surface totale en eau estimée entre 400 000 et 1,5 million de km². Ces flux sont à comparer par exemple avec le flux de C stocké dans les milieux terrestres, estimé entre 1 et 4 Pg/an, ou les 0,4 Pg/an transportés par les rivières jusqu'aux océans.

Le rôle des retenues à la surface du globe semble donc significatif dans les émissions de GES responsables du changement climatique. Il convient toutefois de souligner qu'à la fois les estimations des surfaces concernées sont entachées d'une grande incertitude, et que les flux d'émission par unité de surface sont très mal connus, d'autant qu'une valeur moyenne est souvent considérée dans les études, sans tenir compte des nombreux facteurs de variabilité spatiales et temporelles. Comme souligné pour l'impact d'une retenue, on ne peut pas faire abstraction du fonctionnement des milieux remplacés par ces réservoirs (rivière, sol, végétation...) et de leur impact dans le cycle du carbone, ce qui devrait être un autre facteur de variabilité entre retenues.

L'échelle spatiale à laquelle s'intéresse cette expertise sur l'impact cumulé des retenues n'est a priori pas l'échelle planétaire : il peut y avoir contradiction entre un gain local et plutôt individuel associé à un usage de retenue et un coût environnemental planétaire et collectif lié à leur cumul dans certains pays. Il s'agit ici de ne pas oublier ce type d'impact qui devrait, s'il s'avère contribuer à l'effet de serre, quand même infléchir les grandes lignes de la politique publique, et ne pas inciter à multiplier le nombre de retenues pour un bénéfice à court terme sans être conscient de ce niveau global d'impacts.

