



4

© Olivier Leroyer - AFB

## Effets cumulés des retenues sur l'hydrologie

- 52 ■ Introduction
- 53 ■ Influence locale d'une retenue : principaux processus en jeu
- 56 ■ Effets cumulés : des méthodes d'évaluation différentes pour des résultats qui convergent
- 65 ■ Conclusion sur les effets cumulés des retenues sur l'hydrologie

A stylized map of France is shown in the top left corner, colored in shades of orange and yellow. Several small, blue rectangular icons representing dams are placed across the map, connected by thin black lines. The rest of the page has a light blue background with a faint, wavy pattern.

## Introduction

Ce chapitre aborde l'influence des retenues sur l'hydrologie et l'hydrogéologie. Les retenues considérées ici sont d'un volume inférieur à un million de m<sup>3</sup>. Les grands barrages, qui font l'objet d'un grand nombre d'articles scientifiques, diffèrent en effet des retenues concernées par l'expertise : leurs positions et volumes sont bien connus, ils sont souvent multi-usage, et leur mode de fonctionnement est relativement bien caractérisé, ce qui n'est en général pas le cas des nombreuses retenues présentes sur les bassins. Leur intérêt pour ce chapitre est donc limité. Les retenues étudiées dans la littérature scientifique relèvent de contextes climatiques et géologiques, et de modes de fonctionnement et de gestion assez contrastés et assez différents des situations rencontrées en France. On trouve principalement des contextes climatiques de type aride ou semi-aride, voire méditerranéen (Australie, Maghreb, Sud de l'Afrique, Espagne, USA, Brésil), tropical sec (Inde, Brésil) ou océanique (Nouvelle-Zélande). La géologie est contrastée, avec des zones perméables comportant des aquifères étendus en Inde, où les retenues sont destinées à accroître la recharge des nappes, et des zones plus imperméables. Dans les zones imperméables, l'eau des retenues est majoritairement utilisée pour l'irrigation ou l'abreuvement du bétail ; une minorité des retenues est dédiée à la lutte contre les crues et la rétention des sédiments.

La phase exploratoire de l'expertise a montré une connaissance limitée du fonctionnement hydrologique à l'échelle d'une retenue, conduisant à de fortes incertitudes sur l'estimation de l'impact cumulé des retenues : ce chapitre aborde d'abord la compréhension et l'estimation des termes du bilan hydrique des retenues, puis présente les méthodes (observation et modélisation) permettant d'analyser et quantifier l'impact cumulé des retenues, et les principaux résultats qui découlent de leur mise en œuvre.

## Influence locale d'une retenue : principaux processus en jeu

Le fonctionnement hydrologique d'une retenue peut être influencé par de nombreux processus. Ils sont le plus souvent analysés de façon quantitative par une démarche de bilan hydrique de la retenue s'attachant à estimer les flux relatifs à chacun des processus. Ces derniers peuvent être résumés en distinguant les processus à l'origine de flux entrants dans la retenue des processus à flux sortants (Figure 6).

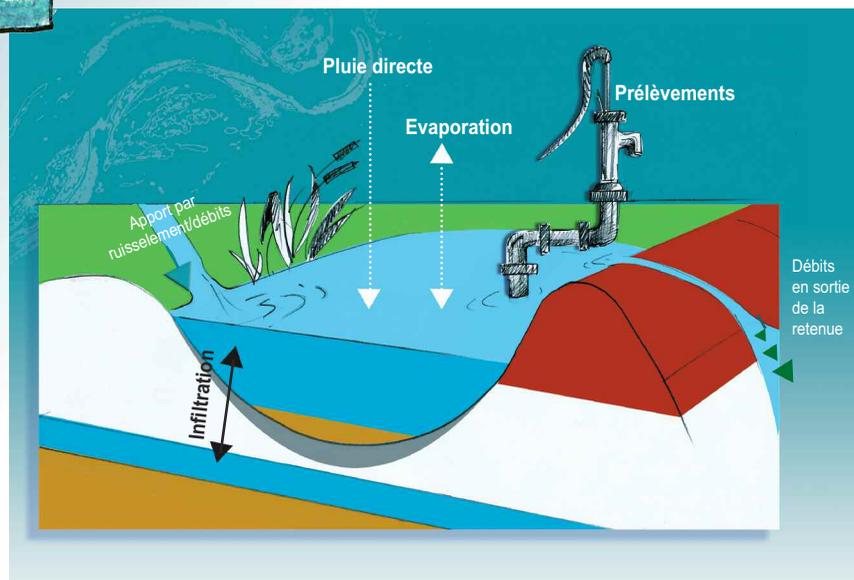
Les flux en entrée sont constitués :

- des écoulements en entrée de la retenue ;
- des apports par les précipitations directes à la surface de la retenue ;
- des éventuels apports par la nappe, si les échanges retenue-nappe sont ascendants ;
- des apports par flux de condensation (c.-à-d. une évaporation négative).

Les flux en sortie sont constitués :

- des pertes par infiltration si les échanges retenue-nappe sont descendants ;
- des pertes par évaporation ;
- des prélèvements en retenue ;
- des débits en sortie de la retenue.

Figure 6



La variation du volume dans la retenue est donc égale à la différence entre flux entrants et flux sortants. La phase exploratoire avait mis en évidence une connaissance limitée de ces différents termes, qui méritait d'être approfondie. Si la retenue est située sur une rivière, les écoulements entrants correspondent majoritairement au débit de la rivière en amont de la retenue. Sinon, il s'agit des écoulements générés sur le bassin versant de la retenue.

*Schématisme du bilan hydrique d'une retenue : les apports sont majoritairement les écoulements en entrée, les pluies directes, de possibles apports par la nappe et par condensation. Les sorties sont liées aux pertes par évaporation et par infiltration, les prélèvements dans la retenue, et les débits en sortie.*

## Infiltration

Les échanges entre le plan d'eau et la zone aquifère sont difficiles à quantifier, car leur calcul strict demanderait une connaissance précise des propriétés hydrauliques et topographiques du terrain supportant la retenue, ainsi que des niveaux d'eau dans la retenue et dans la nappe sous-jacente. Ils peuvent toutefois être approchés selon différentes méthodologies similaires à celles utilisées dans l'étude des échanges entre une nappe et une rivière. L'infiltration est un processus essentiellement étudié et quantifié dans le cas de retenues destinées à la recharge de nappes, les nappes étant exploitées pour l'irrigation notamment : l'infiltration y est donc au maximum favorisée, contrairement aux retenues que l'on trouve en France. Pour ces retenues, l'infiltration peut atteindre 75 à 80 % de l'eau interceptée par la retenue. Pour les retenues servant au stockage d'eau en surface, **la valeur médiane du flux d'infiltration se situe aux alentours de 1-2 mm/jour** ; des retenues engendrant des pertes de 4-5mm/jour doivent être considérées comme posant problème et entrainer la recherche de solution.

## Évaporation

Les pertes par évaporation sont susceptibles de représenter une part importante du bilan hydrique, des valeurs de près de 40 % des flux entrants étant souvent citées et représentant, rapportées à l'ensemble des retenues présentes sur un territoire, un volume significatif. La mesure de ce flux est difficile, et malgré le recours à des techniques complexes (scintillométrie\*, Eddy Covariance\*) reste entachée d'incertitude. L'estimation numérique à partir de variables atmosphériques est également possible mais reste un sujet de recherche. De plus, le flux d'évaporation dépend à la fois des particularités climatiques, des spécificités de la retenue (surface, profondeur, configuration, écoulement ou non) et de celles son environnement. Des relations entre la pan-évaporation\* (c.-à-d. évaporation sur des bacs de classe A) et l'évaporation depuis les retenues, selon les caractéristiques de ces dernières et la période de l'année ont été développées sur certains bassins. Elles sont toutefois spécifiques au bassin versant sur lequel elles ont été développées. Les études convergent sur le fait que l'évaporation d'une petite retenue est généralement plus faible que les mesures de pan-évaporation ou celle d'un environnement non lacustre, du fait que l'air au-dessus de la retenue tend à se saturer en humidité, de façon moins efficace cependant que pour les grands lacs. Les valeurs hautes mesurées ou estimées sont souvent de **3 à 5 ou 6 mm/jour**, voire 9 mm/jour, sur des périodes pouvant dépasser 100 jours, et représenter 1 300 à 1 400 mm/an. Dans certains pays des techniques ont été développées pour réduire ce flux évaporatoire :

- ajout d'un produit créant un film en surface ;
- ajout de colorant pour modifier l'albédo de la retenue ;
- couverture partielle ou totale de la retenue ;
- aménagement des berges pour limiter le vent ;
- optimisation d'un réseau de retenues (en exploitant tout d'abord les retenues dont la température est la plus élevée).

## Pluie directe

Elle correspond à l'apport d'eau par la pluie directement à la surface d'eau libre de la retenue. Le flux associé à la pluie directe est généralement assez faible par rapport aux autres termes du bilan hydrique, excepté dans des zones où les flux de circulation sont très faibles. Lorsqu'il est estimé, l'apport par la pluie directe l'est à partir de la surface de l'eau de la retenue et des précipitations mesurées par des instruments classiques (pluviographe, pluviomètre).

## Débits entrant et sortant

Le débit entrant dans une retenue dépend de sa position dans le bassin versant, de sa connexion au cours d'eau, et des caractéristiques du bassin (pédologie, géologie climat, occupation des sols) ; il est donc difficile de donner des ordres de grandeur sans préciser un contexte. Si la retenue est connectée à une rivière, les débits entrants peuvent être facilement mesurés directement. S'il s'agit d'une retenue collinaire, l'estimation des débits entrants est plus complexe. Les débits entrants peuvent être modélisés. Dans ce cas, plusieurs méthodes et

modèles permettent d'estimer ce flux entrant, le plus simple étant celui développé par le *Soil Conservation Service* aux USA et considérant que le flux ruisselant est proportionnel à la pluie précipitée sur le bassin d'alimentation de la retenue, le coefficient de proportionnalité (*Curve Number*) dépendant notamment de la forme du bassin, de sa pente, du type de sol et de son humidité.

Le débit sortant est généralement facilement accessible en termes de mesure. Cependant, l'information sur les débits sortant de l'ensemble des retenues d'un bassin est rarement disponible. Comme les débits entrants, les débits sortant sont fortement variables en fonction des conditions climatiques et physiographique locales, mais dépendent également du mode de gestion des retenues. Si les débits sortant ne sont pas accessibles par la mesure, ils sont alors simulés. Dans ce cas, le mode de fonctionnement de la retenue pris en compte pour l'estimation du débit sortant est important. Or, il faut souligner que l'essentiel des retenues étudiées sont pilotées selon une gestion de type *fill-and-spill* c'est-à-dire qu'elles ne restituent de l'eau que par débordement, quand elles sont pleines. Le débit sortant est donc une résultante du volume d'eau de la retenue, du débit entrant, des flux d'infiltration et d'évaporation, et des prélèvements éventuels dans la retenue. Selon ce mode de gestion, l'impact instantané de la retenue est binaire : la retenue est partiellement vide et elle réduit alors de 100 % le ruissellement et le débit entrant, ou elle est remplie à sa capacité maximum, l'effet sur le ruissellement et le débit est alors nul, la retenue restituant à l'aval les volumes entrant. Les autres types de retenues, pourvues d'un dispositif assurant un débit minimum, ou soumises à une gestion « active » ne sont que peu abordés.

La pratique de l'irrigation est susceptible d'avoir en retour un effet sur les flux dans l'hydrosystème et les apports aux retenues, en augmentant par exemple les flux de ruissellement depuis les surfaces irriguées vers les retenues. Cet aspect a rarement été abordé, et si l'irrigation augmente effectivement la teneur en eau du sol, une étude menée sur un bassin versant de l'Alberta (Canada) n'a pas montré d'effet significatif sur le ruissellement. En zone de rizières inondées par contre, ces flux méritent effectivement d'être pris en compte.

## Prélèvements dans la retenue

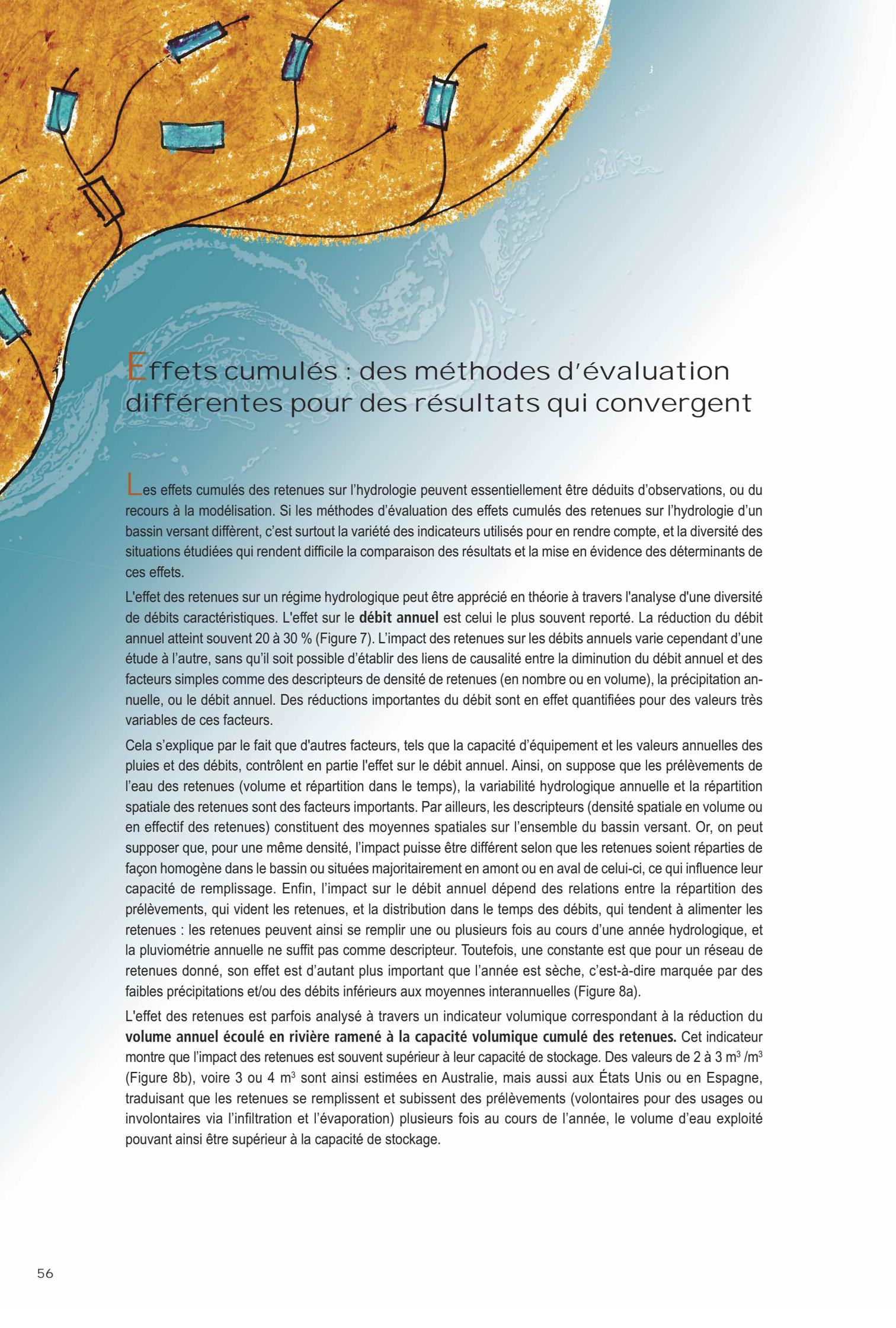
Dans l'essentiel des études, les prélèvements en eau dans les retenues visent à irriguer les cultures ou à abreuver les animaux. Ces flux, qu'il s'agisse de leur cumul ou de leur dynamique temporelle, sont souvent entachés d'une grande incertitude. Deux grands types de méthodes sont mobilisés pour les quantifier.

Une première approche, utilisée surtout en Australie, considère que les prélèvements annuels représentent un certain pourcentage de la capacité totale de la retenue. Ce pourcentage, obtenu par enquête auprès des propriétaires des retenues ou parfois par télédétection s'avère très variable, en fonction des usages (irrigation vs. abreuvement du bétail) et des régions : de 35 % en Australie Occidentale à 83 % en Victoria pour l'irrigation, pour une moyenne de 83 % pour l'ensemble de l'Australie et des variations de 10 à 400 %. Les pourcentages semblent plus stables pour l'abreuvement, de l'ordre de 50 %. Ces prélèvements sont supposés constants au cours de l'année, ou répartis temporellement en fonction des usages connus.

La deuxième approche s'appuie sur la caractérisation de la demande : les besoins liés à l'abreuvement sont considérés comme constants au cours de l'année (par ex. 35 litres par unité de bétail tropical et par jour pour une étude au Burkina Faso). Les besoins liés à l'irrigation sont au mieux assimilés aux besoins des plantes irriguées, sans tenir compte de la différence qu'il peut y avoir entre besoin en eau des cultures, demande en eau des agriculteurs (qui intègre à la fois un objectif de rendement et des contraintes liées au temps et au matériel disponibles) et usage effectif de l'eau (qui intègre l'effet supplémentaire d'éventuelles restrictions administratives ou de pannes du matériel). Compte tenu du peu d'informations en général disponibles, qui concernent au mieux le volume annuel prélevé et/ou la surface irriguée et le type de culture, et de l'absence de données sur les règles de gestion des prélèvements, les prélèvements d'irrigation sont ainsi assimilés aux besoins des cultures, calculés en fonction du coefficient cultural des cultures ( $k_c$ , qui varie dans le temps) et de l'évapotranspiration potentielle\* (ETP). Cette estimation permet de prendre en compte les conditions climatiques de l'année en cours, y compris leurs variations intra-annuelles.

On voit ainsi que ce terme important du bilan hydrique de la retenue, qui peut représenter un pourcentage significatif des flux sortants, notamment dans le cas de retenues *fill-and-spill*, est assez mal connu, tant en cumul qu'en dynamique temporelle.

Pour ce qui concerne les **stratégies de prélèvements** quand plusieurs retenues sont disponibles (retenue collinaire vs retenue collective) ou qu'une retenue est une ressource parmi d'autres (nappe, rivière), elles ne sont que très rarement abordées dans la littérature scientifique.



## Effets cumulés : des méthodes d'évaluation différentes pour des résultats qui convergent

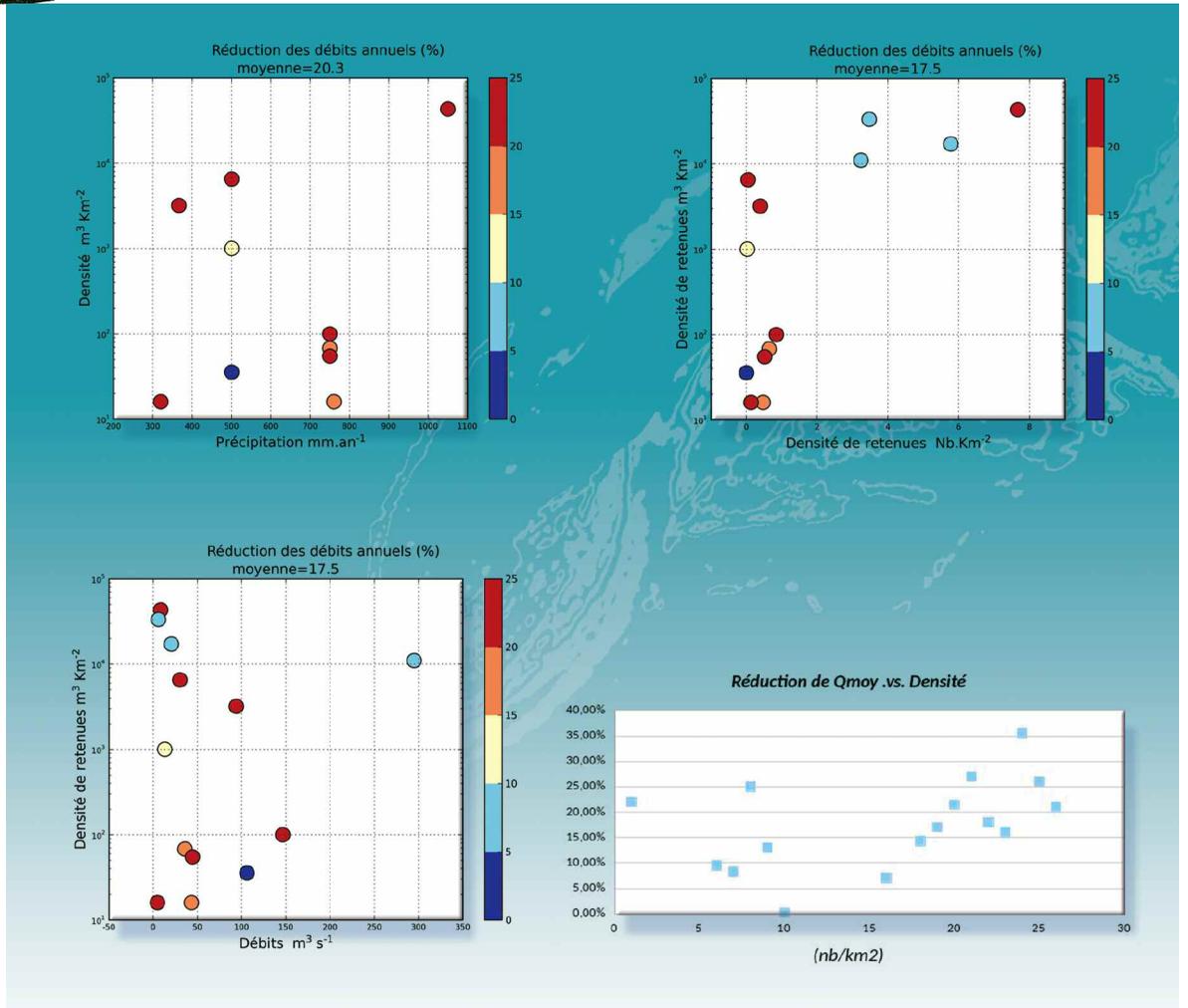
Les effets cumulés des retenues sur l'hydrologie peuvent essentiellement être déduits d'observations, ou du recours à la modélisation. Si les méthodes d'évaluation des effets cumulés des retenues sur l'hydrologie d'un bassin versant différent, c'est surtout la variété des indicateurs utilisés pour en rendre compte, et la diversité des situations étudiées qui rendent difficile la comparaison des résultats et la mise en évidence des déterminants de ces effets.

L'effet des retenues sur un régime hydrologique peut être apprécié en théorie à travers l'analyse d'une diversité de débits caractéristiques. L'effet sur le **débit annuel** est celui le plus souvent reporté. La réduction du débit annuel atteint souvent 20 à 30 % (Figure 7). L'impact des retenues sur les débits annuels varie cependant d'une étude à l'autre, sans qu'il soit possible d'établir des liens de causalité entre la diminution du débit annuel et des facteurs simples comme des descripteurs de densité de retenues (en nombre ou en volume), la précipitation annuelle, ou le débit annuel. Des réductions importantes du débit sont en effet quantifiées pour des valeurs très variables de ces facteurs.

Cela s'explique par le fait que d'autres facteurs, tels que la capacité d'équipement et les valeurs annuelles des pluies et des débits, contrôlent en partie l'effet sur le débit annuel. Ainsi, on suppose que les prélèvements de l'eau des retenues (volume et répartition dans le temps), la variabilité hydrologique annuelle et la répartition spatiale des retenues sont des facteurs importants. Par ailleurs, les descripteurs (densité spatiale en volume ou en effectif des retenues) constituent des moyennes spatiales sur l'ensemble du bassin versant. Or, on peut supposer que, pour une même densité, l'impact puisse être différent selon que les retenues soient réparties de façon homogène dans le bassin ou situées majoritairement en amont ou en aval de celui-ci, ce qui influence leur capacité de remplissage. Enfin, l'impact sur le débit annuel dépend des relations entre la répartition des prélèvements, qui vident les retenues, et la distribution dans le temps des débits, qui tendent à alimenter les retenues : les retenues peuvent ainsi se remplir une ou plusieurs fois au cours d'une année hydrologique, et la pluviométrie annuelle ne suffit pas comme descripteur. Toutefois, une constante est que pour un réseau de retenues donné, son effet est d'autant plus important que l'année est sèche, c'est-à-dire marquée par des faibles précipitations et/ou des débits inférieurs aux moyennes interannuelles (Figure 8a).

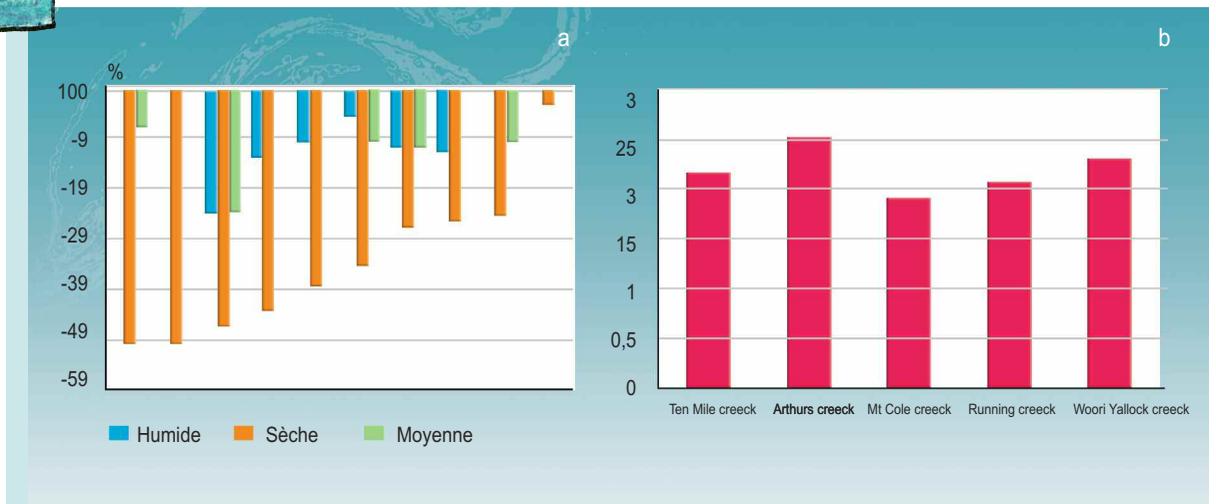
L'effet des retenues est parfois analysé à travers un indicateur volumique correspondant à la réduction du **volume annuel écoulé en rivière ramené à la capacité volumique cumulé des retenues**. Cet indicateur montre que l'impact des retenues est souvent supérieur à leur capacité de stockage. Des valeurs de 2 à 3 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (Figure 8b), voire 3 ou 4 m<sup>3</sup> sont ainsi estimées en Australie, mais aussi aux États Unis ou en Espagne, traduisant que les retenues se remplissent et subissent des prélèvements (volontaires pour des usages ou involontaires via l'infiltration et l'évaporation) plusieurs fois au cours de l'année, le volume d'eau exploité pouvant ainsi être supérieur à la capacité de stockage.

Figure 7



Diminutions des débits annuels (couleur du symbole, exprimé en %) issues de la littérature et associées à a) en haut à gauche aux densités exprimées en abscisse en nombre de retenues par km² et en ordonnée en m³/km² ; b) en haut à droite aux débits en m³/s et à la densité de retenue en m³/s et c) aux précipitations en m³/s et à la densité des retenues en m³/km². Le nombre d'articles disponibles peut varier en fonction des indicateurs et d) en bas à droite, associés au nombre de retenues.

Figure 8



a) Impacts des retenues sur les débits moyens annuels selon que l'année est sèche, humide ou plutôt moyenne. b) Impact d'1 m³ de retenues agricoles sur les débits : les valeurs supérieures à 1 indiquent qu'une capacité d'1 m³ de retenue conduit à une réduction des débits de plus de 1m³.

Les quelques études menées sur les **débits de crue ou les débits d'étiage** montrent un effet significatif sur ces débits, avec des réductions maximum reportées de 45 % pour les débits de crue, et de 60 % pour les débits d'étiage. **La capacité des retenues à se remplir** n'est que peu fréquemment abordée, bien qu'elle puisse être problématique, notamment pour celles situées en tête de bassin. **La variabilité interannuelle des débits** est également affectée par la présence de retenues, et son évolution peut avoir des conséquences sur l'écologie. En général, l'impact des retenues est plus important en phase de remplissage des retenues puisque les retenues à débordement (de type « *fill-and-spill* ») ne laissent pas l'eau s'écouler en aval : cette période de transition entre des basses eaux et hautes eaux reste en général une période de débits modérés, et les flux alimentant les retenues sont alors conséquents par rapport aux volumes qui s'écoulent dans les rivières. À l'image du débit annuel, tirer des éléments de généralité sur la variation des débits caractéristiques d'un régime hydrologique induite par un réseau de retenues, ou sur les relations de causalité entre cette variation et des descripteurs simples du réseau de retenues, du climat et de l'hydrologie est un exercice difficile. D'une part le corpus d'études et les données associées sont souvent trop limités pour en développer une analyse statistique. D'autre part, d'autres facteurs, en lien notamment avec les usages et la gestion de l'eau des retenues, pourraient peser dans la relation de causalité.

Ce résumé des principaux effets cumulés des retenues sur l'hydrologie est basé sur deux principaux types d'études : celles basées sur **l'observation** (une demi-douzaine d'études) et celles basées sur la **modélisation** (une vingtaine). Ces deux méthodes sont présentées ci-dessous. Le déséquilibre dans l'utilisation entre les deux méthodes s'explique en partie par la difficulté de disposer d'observations relatives à un état de référence « sans retenue ». Selon les études, l'état de référence correspond à l'état d'un bassin similaire non influencé, ou est déduit d'une analyse de la trajectoire temporelle des caractéristiques du bassin et de son hydrologie. Une autre méthode consiste à estimer l'impact cumulé comme la somme de l'impact de chaque retenue, impact déduit des débits observés en amont et en aval des retenues, et ce, en plusieurs points du bassin et sur plusieurs années. Cela nécessite un effort important en termes de moyens d'observations sur des durées importantes.

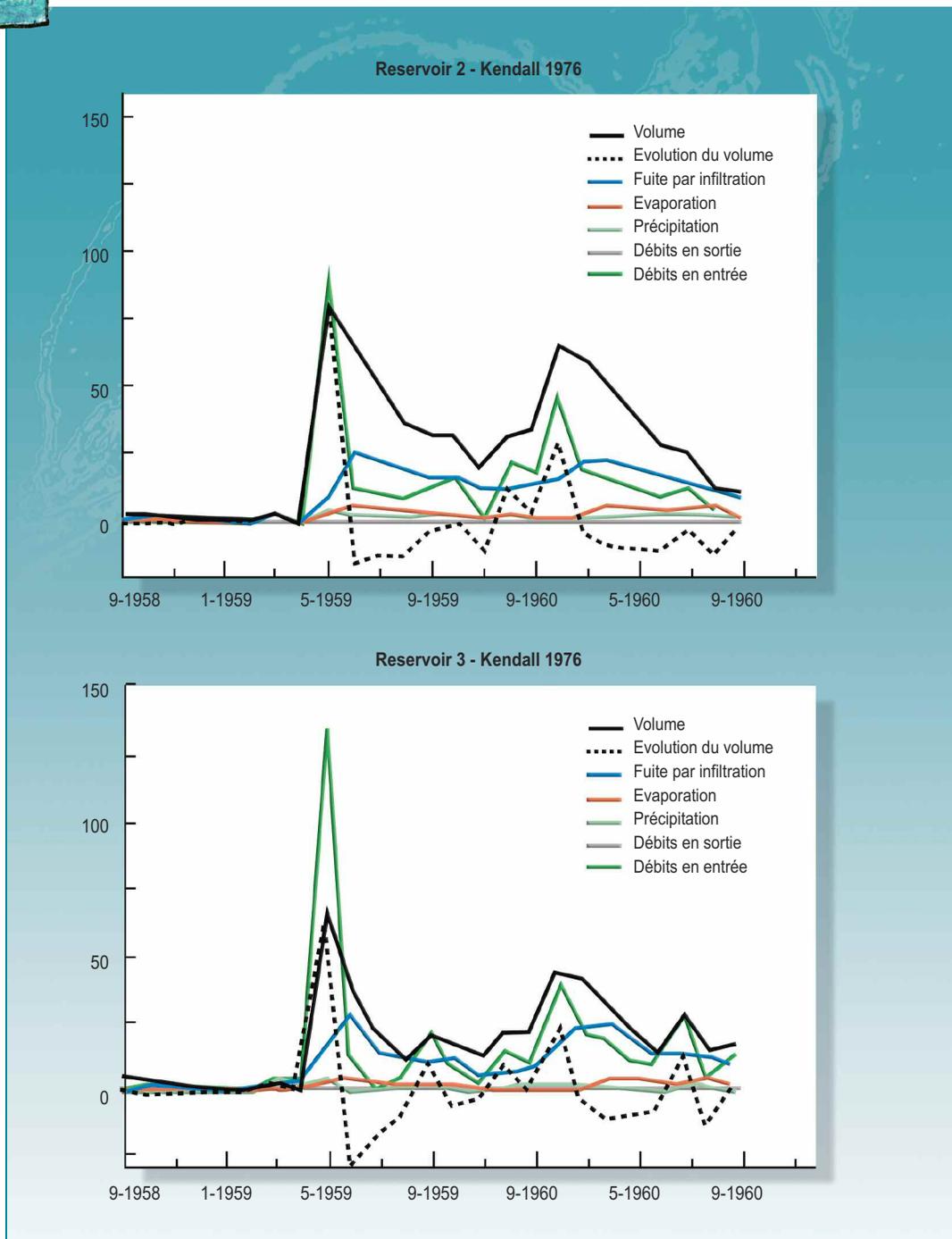
## Méthodes basées sur les observations

Les études basées sur des observations sont peu nombreuses, et souvent antérieures aux années 1980. Les travaux recensés sont majoritairement des thèses ou rapports, et certains ont pu échapper aux recherches bibliographiques. Plusieurs démarches sont utilisées pour quantifier les impacts des retenues à partir d'observations :

- le suivi amont/aval des débits des retenues présentes sur le bassin et de leurs variations de volume, ou d'un ensemble représentatif de retenues présentes dans le bassin ;
- le suivi de bassins versants jumeaux mais équipés différemment en retenues ;
- l'analyse multifactorielle de chroniques longues de débits, de données météorologiques et des informations sur le développement des retenues.

Les études recensées portent sur des bassins situés au nord-ouest des États-Unis, au Nordeste brésilien, en Chine, Nouvelle-Zélande ou Afrique du Sud, donc dans **des contextes climatiques et de densité de retenues variés**. La diversité des situations, mais aussi des débits caractéristiques analysés par ces études, rend de nouveau difficile la comparaison des résultats et la déduction de règles quantitatives. Toutefois, l'ensemble des études concluent à une réduction des débits due aux retenues, parfois induite davantage par les pertes dues à l'évaporation ou l'infiltration (Figure 9), qu'aux usages de l'eau. Ces pertes peuvent par exemple conduire à ce qu'un m<sup>3</sup> de capacité de retenue induise une réduction du volume écoulé de 3 à 4 m<sup>3</sup>. Sur certains bassins, les pertes par infiltration au sein de la retenue peuvent contribuer à pérenniser l'écoulement du cours d'eau aval qui était à l'origine intermittent. La réduction des débits, variable dans le temps à la fois au cours de l'année et entre les années peut être particulièrement marquée pour les débits de crues et d'étiage. Comme noté précédemment, il a été observé que la réduction est d'autant plus marquée que l'année est sèche. Compte tenu de la variété des situations et des descripteurs d'impact utilisés dans les différentes études, il est difficile de formuler des conclusions générales plus précises, et qui seraient transposables au contexte hexagonal.

Figure 9

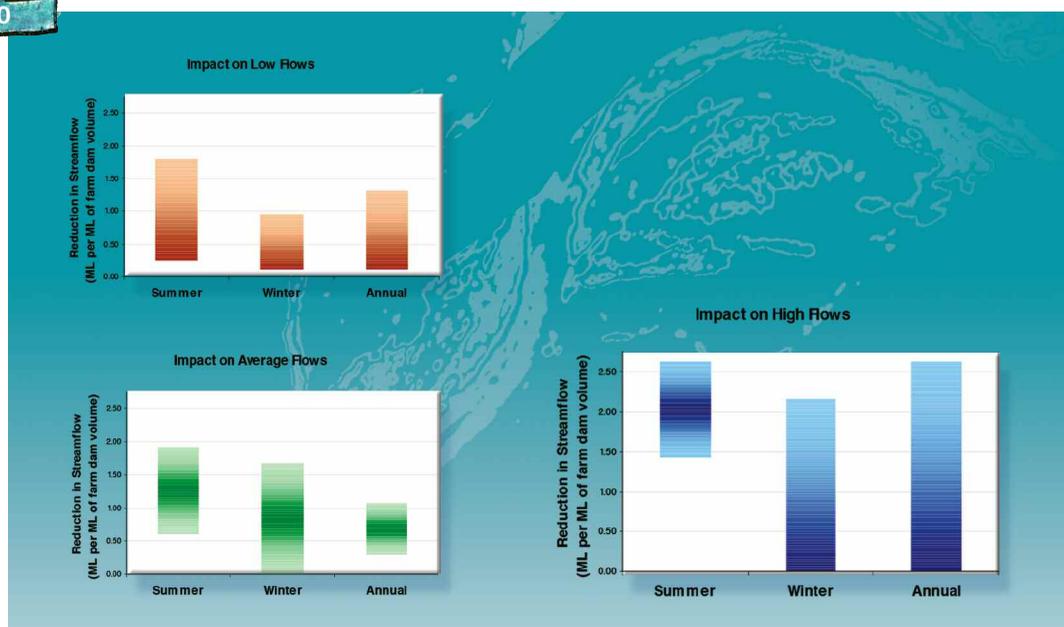


Bilan hydrique mensuel de deux retenues, en Oklahoma, suivies entre septembre 1958 et septembre 1960. Noir : volume de la retenue, noir pointillé : évolution du volume de la retenue, vert foncé: apport sur le bassin d'alimentation, vert clair : précipitation sur la retenue, bleu : perte par infiltration, rouge: perte par évaporation; gris : débits en sortie. Tous les volumes sont exprimés en milliers de m<sup>3</sup>.

## Méthodes basées sur la modélisation

L'essentiel des travaux qui abordent l'effet cumulé des retenues sur l'hydro(géo)logie a recours à la modélisation. Il s'agit de simuler les écoulements en un ou plusieurs points du bassin versant comportant des retenues, ainsi que le plus souvent l'état hydrique de ces dernières. L'effet cumulé du réseau de retenues est alors estimé sur la base d'indicateurs hydrologiques calculés à partir de simulations réalisées avec et sans prise en compte des retenues dans le modèle, comme illustré par exemple sur la Figure 10, page suivante, pour un ensemble de bassins versants en Australie.

Figure 10



Impacts des réseaux de retenues sur les débits des rivières en été, en hiver et en moyenne sur l'année. La différence de débit est rapportée à la capacité cumulée des retenues. À gauche l'impact sur les faibles débits, au milieu sur les débits moyens et à droite sur les forts débits. Les valeurs sont une compilation d'estimations faites par modélisation sur un ensemble de bassins versants dans la province de Victoria – Australie.

Les démarches de modélisation sont diverses, et varient notamment en fonction des objectifs visés, des données disponibles, ainsi que des «habitudes de modélisation» des personnes ou organismes menant l'exercice de simulation. On peut les distinguer notamment selon **la description qu'ils font de la distribution spatiale des retenues et de leurs caractéristiques**, ainsi que de **la façon dont ils conceptualisent et calculent les flux au sein du bassin versant**.

### ■ Des représentations de réseaux de retenues très variées entre les modèles....

Le mode de représentation spatiale du réseau de retenues dans un bassin versant constitue une des principales clés de différenciation dans les modélisations recensées dans la littérature scientifique. Les représentations peuvent être classées selon trois grandes catégories :

- une représentation spatiale explicite, où chaque retenue est prise en compte individuellement ;
- une représentation globale, où le réseau de retenues est représenté sous la forme d'une retenue équivalente ;
- une représentation statistique, qui rend compte des classes de capacités de retenues.

Mode de représentation des retenues et modèles hydrologiques sont liés : certains modèles adoptent une représentation globale par suite de manque d'informations suffisamment détaillées sur les retenues, alors que leur structure leur permettrait de rendre compte de la distribution spatiale de celles-ci, mais d'autres sont « par nature » contraints à une représentation globale ou statistique, comme cela sera explicité plus loin.

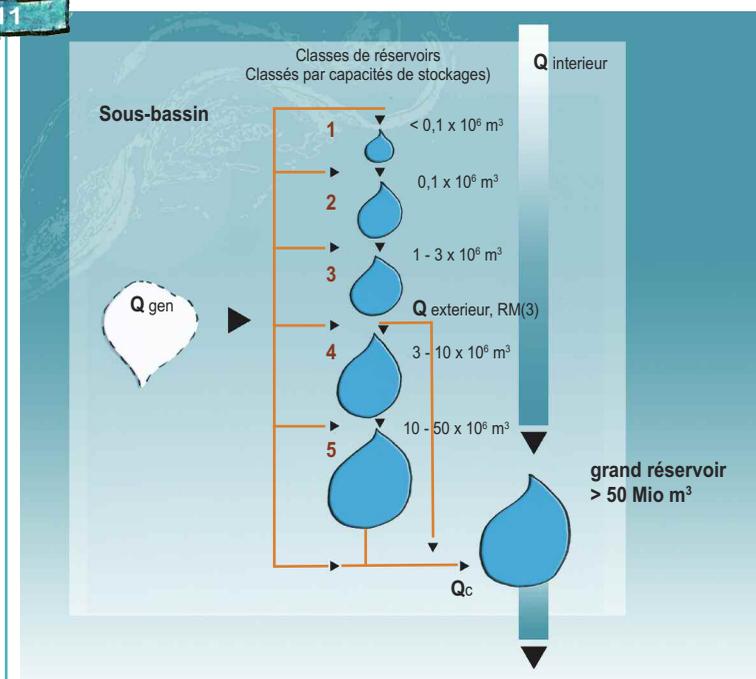
**La représentation spatialement explicite des retenues** présente l'intérêt de simuler l'effet cumulé des retenues à différents niveaux d'organisation, et notamment d'amont en aval du réseau hydrographique. Elle permet de quantifier des impacts locaux qui pourraient être gommés à plus grande échelle quand seul l'impact global à l'exutoire du bassin versant est calculé. Rarement mise en œuvre, en raison du manque de données suffisamment exhaustives sur les caractéristiques du réseau de retenues (nombre, localisation, caractéristiques géométriques, prélèvement, Chapitre 3), ce mode de représentation implique de plus que le modèle hydrologique soit capable de simuler les débits entrants et/ou les flux de ruissellement entrant dans chaque retenue.

La représentation globale par retenue équivalente est la plus utilisée. Le réseau de retenues collinaires présentes sur une portion de l'espace est représenté sous la forme d'un réservoir équivalent, auquel sont affectées des

caractéristiques dérivant de l'ensemble des retenues présentes sur cette portion d'espace. Selon le modèle et les données disponibles, une seule retenue équivalente peut être utilisée pour l'ensemble du bassin versant, ou une pour chacun des sous bassins, voire des mailles. Selon les modèles, l'écoulement alimentant la retenue équivalente correspond à celui simulé sur l'ensemble du (sous) bassin versant, ou à une fraction de ces flux. Dans ce dernier cas, la fraction est alors supposée correspondre à la fraction surfacique du (sous) bassin versant drainé par les retenues (rapport du cumul des aires drainées des retenues sur la surface totale du bassin versant). Sa frugalité en données et la simplicité de mise en œuvre du modèle associé constituent les principaux atouts de cette représentation. Ce faisant, seule l'influence du réseau de retenues à l'exutoire du bassin versant ou du sous bassin versant supportant la retenue équivalente peut être simulée, excluant la possibilité d'une simulation spatialisée des débits le long des biefs du réseau hydrographique. Cette limite (qui peut être levée si le découpage en sous bassins est réalisée à haute résolution) pose problème si l'on cherche par exemple à estimer l'influence des retenues sur la qualité de l'habitat écologique au niveau spatial des biefs. Cette représentation implique par ailleurs deux hypothèses fortes, dont la validité est rarement respectée : l'influence d'une retenue est indépendante de sa position dans le (sous) bassin versant et par rapport au cours d'eau, nonobstant son influence sur les différentes composantes de l'écoulement et du bilan hydrique, et les flux d'eau contrôlant la vidange et le remplissage de la retenue sont homogènes sur le (sous) bassin versant. De plus les connexions existant éventuellement entre des retenues du (sous) bassin versant ne peuvent être prises en compte. Or, les effets locaux en matière de climat, de sol, de lithologie et d'occupation du sol peuvent avoir un poids important dans la genèse des écoulements.

**La représentation statistique** considère un ensemble de réservoirs équivalents, chaque réservoir équivalent moyennant les caractéristiques des retenues d'une classe de capacité. L'état et le fonctionnement hydrologique de chaque réservoir équivalent sont simulés par le modèle en fonction des flux entrant et sortant des retenues. Cette représentation peut être vue comme une variation de la représentation par retenue globale équivalente. Le fonctionnement de chaque classe de retenues dépend du modèle : selon le cas, le débit d'entrée peut par exemple ne dépendre que de l'aire drainée estimée pour cette classe de retenues, ou inclure également tout ou partie des débits sortant d'une autre classe de retenues, considérées, compte tenu de leur capacité moindre, être situées en amont et connectées à la classe aval. Ainsi cette représentation implique de poser des règles de connexion entre les classes de réservoirs, et entre ces classes et l'exutoire, ainsi que la répartition des débits entre les réservoirs et l'exutoire. Dans les applications, ces règles semblent le plus souvent être basées sur **une expertise empirique plutôt que sur une analyse de la topologie des retenues**, du réseau hydrographique et des écoulements sur le bassin d'application. La Figure 11 illustre par exemple la conceptualisation des connexions et de la répartition des flux utilisés dans le modèle brésilien WASA.

Figure 11

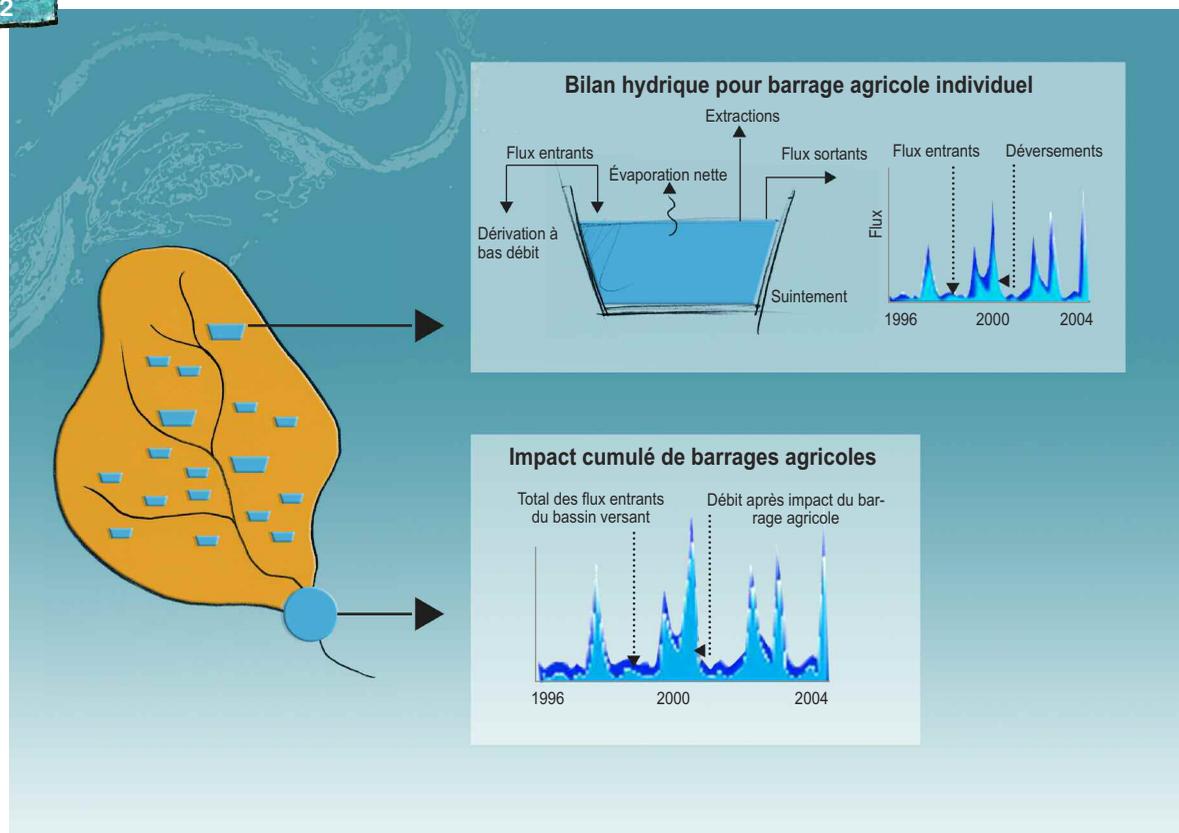


*Schéma des réservoirs en cascade du modèle WASA. Chaque réservoir équivalent représente une classe de capacité de retenue. Dans l'exemple présenté, 5 classes sont représentées, de la classe à plus faible capacité ( $< 100\,000 \text{ m}^3$ ) à la classe à plus forte capacité ( $10\text{-}50 \text{ millions m}^3$ ). Le bassin en question est doté à son exutoire d'un grand barrage (LR) dont le fonctionnement hydrologique est explicitement simulé.*

## ■...liées à des conceptualisations différentes du fonctionnement du bassin versant ...

La modélisation de l'effet cumulé des retenues sur le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant **demande d'une part de simuler le bilan hydrologique des retenues et d'autre part d'estimer les flux d'eau dans le bassin versant**, comme schématisé sur la Figure 12.

Figure 12



Représentation conceptuelle d'un modèle hydrologique pour la simulation de l'effet cumulé des retenues sur le débit à l'exutoire (modèle TEDI, (Nathan & Lowe 2012)).

À une exception près, où le fonctionnement de la retenue (ou de la retenue équivalente, ou des classes de retenues selon la représentation adoptée) est prescrit dans le modèle car les données relatives à la gestion de la retenue (flux de prélèvement et de restitution au cours d'eau) sont connues, la **représentation du fonctionnement de la retenue** est basée sur le calcul de son bilan hydrique, à un pas de temps allant de la journée au mois selon la modélisation (Tableau 4). Dans la grande majorité des cas, les modèles ne représentent que des retenues de type *fill-and-spill* : les retenues restituent de l'eau à l'aval uniquement en cas de débordement, entraînant alors la re-connexion du bassin versant qu'elles drainent avec le reste du bassin. Rares sont les modèles qui prennent en compte l'existence d'un débit réservé, ou d'une gestion « active » du flux restitué au cours d'eau. La ou les retenues sont le plus souvent supposées vides en début de saison. Le Tableau 4 résume le type de représentation spatiale des retenues et les processus hydrologiques simulés par les différents modèles étudiés. Les prélèvements dans la ou les retenue(s) sont évalués de façon souvent simplifiée voire simpliste faute d'informations, comme cela a été évoqué page 55.

Pour ce qui concerne l'estimation des flux d'eau dans le bassin versant ou à son exutoire, deux grandes classes de méthodes existent. La **première consiste à se baser sur les débits mesurés à l'exutoire du bassin versant**. Le modèle sert alors à estimer les débits en des points clés du réseau hydrographique, et notamment en entrée des retenues. La spatialisation du débit le long du réseau hydrographique à partir du débit mesuré se fait sur la base de règles, souvent géométriques et basées sur les aires drainées amont, et ce faisant supposant un débit spécifique constant le long du réseau hydrographique. L'intérêt de cette approche, en comparaison de la simulation

des flux, est de soustraire à l'acquisition de données (par ex. sol, végétation, ...) nécessaires à la modélisation des flux et au travail de calage de modèles. Elle permet de focaliser la modélisation sur l'étude du fonctionnement des retenues et de leur influence sur l'hydrologie du bassin. Cependant, cette approche utilisant des débits observés qui sont déjà « perturbés » ne peut déduire l'impact des retenues qu'en supposant que la réponse hydrologique est linéaire, c.-à-d. que le modèle forcé par les débits observés et intégrant la représentation de retenues sur le bassin simule de fait l'impact du double de retenues, puisque la baisse de débit liée à la présence de retenues est soustraite du débit observé, qui intègre déjà la présence de retenues. L'écart entre les observations de débits et les débits simulés doit donc être divisé par deux et ajouté au débit observé pour estimer le débit non influencé. Malgré cette hypothèse importante, cette méthode bénéficie d'une certaine facilité de mise en œuvre.

**Tableau 4** Mode de représentation spatiale des retenues et processus pris en compte par les modèles analysés

Modèle	Représentation des retenues	Dt, pas de temps	Processus pris en compte						
			Débit entrant	Débit à l'aval	Evaporation	Evaporation	Evaporation	Evaporation	Evaporation
TEDI	Statistique	Mois/jour	Débit observé	Débordement	x	x	x		x
CHEAT	Spatialement explicite	Mois	Débit observé	Débordement + débit réservé					
WaterCAST	Statistique	Jour	Modèle hydrologique	Débordement	x	x			x
WASA	Statistique	Jour	Modèle hydrologique semi distribué	Débordement	x		x		x
Deitch <i>et al.</i>	Spatialement explicite	Jour	Débits observés	Débordement					
PITMAN	Équivalente par bassin versant	Mois	Modèle hydrologique global	Débordement	x				x
SWAT	Équivalente par sous bassin versant	Jour	Modèle hydrologique semi-distribué	Débordement	x	x		x	x
ISBA-Rapid	Équivalente par maille (de 64 km <sup>2</sup> )	Horaire	Modèle hydrologique distribué	Débordement	x				x
ACRU	Équivalente par bassin versant	Jour	Modèle hydrologique	Débit réservé/ débordement	x	x	x		x
POTYLDR	Équivalente par bassin versant	Jour	Modèle hydrologique	Contrôle des débits restitués /débordement	x	?	x	?	x
GR4J*	Équivalente par bassin versant	Jour	Modèle hydrologique global	Débit restitué : débit entrant – variation de volume dans le retenue (prescrite)					
HYDROMED	Équivalente par bassin versant	jour	Modèle hydrologique global	Débordement	x	x			x

\* Le modèle GR4J n'établit pas de bilan hydrologique des retenues. Les variations de volumes observées dans les barrages sont des variables d'entrée du modèle.

**La deuxième méthode**, plus classique, consiste à simuler les flux d'eau en intégrant la présence de retenues. Le recours à la modélisation hydrologique permet de simuler les flux d'eau dans le bassin versant (ruissellement, débit, écoulement de nappe, évaporation, transpiration, ...), et notamment les flux d'eau qui conditionnent le fonctionnement hydrologique des retenues, ou qui sont sous la dépendance des retenues. C'est en particulier l'intérêt de la modélisation hydrologique que de simuler le ruissellement et le débit de rivière qui vont alimenter les retenues ou qui vont être modifiés par la présence de retenues. Du point de vue de la résolution spatiale des modèles, on retrouve ici la même variété que pour la modélisation de bassin versant « classique » (Tableau 4) :

- **les modèles globaux** considèrent le bassin versant comme une entité unique et ont pour la plupart été développés pour calculer un flux à l'exutoire du bassin versant. À une exception près (GR4J), la démarche suivie avec un modèle hydrologique global est de simuler d'abord le débit et le ruissellement dans le bassin versant, qui constituent ensuite les variables d'entrée dans le modèle de bilan hydrologique de la retenue équivalente. Le modèle GR4J procède différemment. Les variations de volumes observées dans les réservoirs, connues dans l'application citée, sont des variables d'entrée du modèle. Ces modèles ne permettent de représenter les retenues que sous forme de retenue équivalente. Soulignons qu'un bassin versant peut être découpé en sous-bassins versants, et le modèle global appliqué sur chaque sous bassin, avec une représentation associée des transferts le long du réseau hydrographique : dans ce cas, le modèle global peut quasiment être considéré comme un modèle semi-distribué, voire distribué, la maille élémentaire minimale étant dans ce cas le sous bassin versant élémentaire (puisque par essence un modèle global ne représente les flux qu'à l'exutoire d'un bassin versant) ;
- **les modèles semi-distribués** découpent le bassin versant selon des grandes unités hydrologiques supposées homogènes du point de vue de leur fonctionnement hydrologique et de leurs propriétés. Selon le modèle, la redistribution de l'eau entre ces unités est représentée ou pas. Selon les travaux, une représentation par réservoir équivalent ou selon une représentation statistique a été utilisée ;
- **les modèles distribués** représentent les propriétés du bassin versant, et les connexions entre les différents éléments, de façon spatialement explicite. Ils simulent les flux hydrologiques en tous points du bassin, ou du moins les flux moyens pour chaque élément de discrétisation du bassin versant. L'espace est le plus souvent discrétisé (c.-à-d. découpé) selon un maillage à mailles carrées. Par exemple, le modèle ISBA-Rapid est un modèle distribué, où la discrétisation de l'espace est basée sur des mailles carrées de 8 km de côté et où l'ensemble des retenues au sein d'une maille est représenté par un réservoir équivalent. Seuls ces modèles permettent une représentation spatialement explicite des retenues.

### ■... difficiles à évaluer

De façon générale, le recours à un modèle hydrologique pour simuler l'hydrologie d'un bassin versant requiert une phase d'évaluation du modèle, également appelée validation. Cette phase consiste à analyser la pertinence du modèle pour simuler le fonctionnement du bassin versant étudié et passe par la comparaison d'une ou de plusieurs variables observées avec leurs valeurs simulées par le modèle, le plus couramment le débit à l'exutoire. Cette phase peut permettre de mieux caractériser la validité des hypothèses qui fondent le modèle, de sa structure et des jeux de paramètres employés. Dans le cas de la modélisation de bassin versant avec retenues, selon la structure du modèle et les données disponibles, cette phase de validation peut porter sur la seule comparaison des débits observés et simulés à l'exutoire du bassin ou de ses sous bassins versants, sur le volume d'eau dans les retenues, ou sur des variables internes, comme par exemple le niveau de la nappe en certains points du bassin. Dans le cas particulier de l'application de modèles utilisant comme entrée le débit observé à l'exutoire, la démarche de validation est très peu explicitée. Dans tous les cas, l'évaluation est relativement difficile. Ainsi, si on compare débits simulés et observés, on évalue le modèle hydrologique et la façon dont sont représentées les retenues. Un biais sur l'estimation du bilan hydrique peut alors être exacerbé ou au contraire gommé par la façon dont sont représentées les retenues. Pour être pertinente, une évaluation du modèle sur les débits devrait pouvoir couvrir une période assez longue, idéalement débiter avant le développement des retenues. Cependant, le manque de données limite ce type d'évaluation. Une évaluation multicritère, par exemple, sur les débits en différents points ainsi que sur les volumes des retenues, serait *a priori* plus fiable, mais, nécessite de nouveau des données souvent difficiles d'accès.

La démarche de validation peut être complétée d'une analyse de sensibilité du modèle, permettant d'identifier les paramètres ou variables d'entrée ayant la plus forte influence sur les résultats de simulation. **Les incertitudes liées aux hypothèses faites sur la position des retenues et de leur fonctionnement**, qui découlent du choix d'une représentation par retenue équivalente ou par distribution statistique des retenues, **ne sont que rarement évaluées**. Cela s'explique par la difficulté de l'exercice qui nécessiterait de pouvoir comparer des simulations d'un modèle selon différentes répartitions spatiales de retenues, sous condition de disposer de données réalistes sur ces répartitions. Cette démarche est donc peu suivie et les rares cas recensés montrent que la sensibilité des simulations aux paramètres diffère selon le débit caractéristique simulé (débit moyen, débit de pointe, débit d'étiage) et selon le fonctionnement hydrologique du bassin versant.



## Conclusion sur les effets cumulés des retenues sur l'hydrologie

L'impact de réseaux de retenues sur l'hydrologie est démontré et quantifié dans toutes les études, qu'elles s'appuient sur l'observation ou la modélisation. Ces impacts se traduisent par une réduction du débit moyen, mais aussi des débits d'étiage, de crue, ainsi que de la variabilité annuelle des débits. Des impacts sur les nappes et les zones humides sont également relevés, et ces impacts se prolongent jusqu'aux estuaires et à la mer.

Cependant, l'intensité des impacts est assez variable, d'une part sur un même bassin, en fonction de la variation des conditions climatiques d'une année à l'autre, les diminutions des débits étant systématiquement plus importantes les années sèches que les années humides, et d'autre part, d'un bassin à l'autre. La variabilité entre deux bassins, même situés dans des contextes climatiques et géologiques similaires peut s'expliquer par la différence d'équipement en retenues des bassins, leur situation dans le bassin, et/ou par leur utilisation.

À notre connaissance, aucune étude ne s'attache à répondre à la question de la pertinence d'indicateurs simples, notamment en lien avec la densité de retenues, pour évaluer l'impact des retenues, la plupart des études se focalise sur un bassin particulier, sans objectif **de corréler les impacts à des indicateurs**. Ainsi, il n'y a pas de trace d'indicateur élaboré, comme par exemple la comparaison des précipitations efficaces par rapport au volume des retenues. Une première analyse globale à partir de l'ensemble des études de cas suggère que la densité de retenues seule n'est pas un critère suffisant pour quantifier l'impact hydrologique. Pour autant, la question reste ouverte compte tenu du faible effectif de cas d'études disponibles.

Les méthodes utilisées pour identifier et quantifier l'impact cumulé des retenues sur l'hydrologie reposent rarement sur des observations (une demi-douzaine d'études) et plus généralement sur de la modélisation (une vingtaine). Méthode *a priori* plus abordable, le recours à la modélisation doit relever cependant un double défi : représenter l'ensemble des retenues présentes dans le bassin, avec leurs caractéristiques physiques individuelles (localisation, surface, volume), leur usage, voire, avec leur mode de gestion, et simuler le fonctionnement de chaque retenue (et de leurs interactions le cas échéant) en relation avec le fonctionnement de leur bassin versant.

Face à la difficulté de disposer de données complètes sur les retenues (localisation, propriétés, usages associés) (Chapitre 3) la stratégie la plus commune est d'adapter la modélisation aux données disponibles. Ainsi, la plupart des modèles représentent l'ensemble des retenues par des classes volumiques de retenues dont la distribution spatiale n'est pas individuellement spécifiée. Les incertitudes associées à cette simplification spatiale semblent réduites par rapport à d'autres sources d'incertitudes, mais dépendent très certainement de contextes locaux. Une des principales sources d'incertitudes de la modélisation est associée à l'estimation du bilan hydrique de la retenue, en raison d'une connaissance peu précise de l'usage de l'eau de la retenue (c.-à-d. le volume et la temporalité des prélèvements), des capacités de remplissage de la retenue (qui dépendent du fonctionnement hydrologique du sous bassin associé) et des pertes de la retenue par évaporation, qui peuvent être conséquentes selon les régions.

L'analyse de la bibliographie sur les estimations via observation et modélisation des différents termes du bilan hydrique montre que ces flux restent difficiles à estimer, mais, peut conduire néanmoins à des recommandations sur les méthodes à privilégier.

Dans ces différentes études, nous avons pu constater que le mode de gestion des retenues impliquant l'existence de débits réservés, ou des périodes de remplissage particulières n'était qu'exceptionnellement pris en compte, alors que ces éléments ressortaient comme des points importants lors de la phase exploratoire de l'expertise. De même, les relations entre les systèmes de cultures, leurs modalités d'irrigation et le fonctionnement des retenues, ne faisant pas l'objet d'analyses qui permettraient une modélisation fine et robuste (non dépendante d'un contexte particulier), sont peu prises en compte. Pourtant, l'irrigation, en maintenant les sols plus humides, peut favoriser des écoulements qui contribuent aux débits des sous bassins irrigués et la position relative dans l'espace des différents systèmes de cultures (plus ou moins irrigués et irrigués à des périodes variables) peut jouer sur l'intensité des écoulements. De plus les effets indirects des retenues, en particulier sur l'évolution de l'occupation des sols et des pratiques agricoles, ne sont généralement pas pris en compte dans les études. Cependant, il est certain que les modifications d'occupation des sols influencent l'hydrologie des bassins versants. Ainsi, l'irrigation se traduit généralement par une intensification et/ou une diversification des cultures. La modification de l'occupation des sols a donc certainement un impact sur la dynamique de vidange et remplissage des retenues du bassin, qui verra son hydrologie varier après la création des retenues.

Au niveau scientifique, **les verrous identifiés** pour progresser sur l'étude de l'impact cumulé des retenues sur l'hydrologie se situent notamment au niveau de l'accès aux données décrivant les retenues et leurs usages. Il semble qu'une certaine régionalisation soit possible, tant pour les caractéristiques des retenues, leur distribution sur le bassin, les usages associés ou leur influence sur le régime hydrologique, mais ces paramètres sont contexte dépendants, et leur acquisition suppose donc une démarche d'observation et/ou de modélisation sur une gamme de bassins versants aménagés. Une telle démarche, aboutissant à l'élaboration d'une typologie permettrait de déterminer pour chaque cas quel type de modélisation est le plus approprié, notamment pour ce qui concerne la spatialisation des retenues. **Les études basées sur la modélisation** se heurtent aux limitations classiques liées à la modélisation hydrologique, aggravées par la méconnaissance des flux d'eau perdus par évaporation ou infiltration. **Les études basées sur les observations** se heurtent quant à elles à la nécessité d'aborder des périodes longues, et de distinguer les effets de la variabilité naturelle de ceux de l'anthropisation. Enfin, l'intégration des effets indirects, notamment sur l'évolution de l'occupation du sol, nécessite un recul sur des temps relativement longs, se heurtant là encore à la difficulté d'accès à des données appropriées.

Les petites retenues constituent par leur multiplicité des capacités de stockage conséquentes, et leur volume à l'échelle planétaire est du même ordre de grandeur que celles des grands barrages. De plus, la durée de vie de ces retenues est en général de plusieurs décennies. Il est donc important d'intégrer les impacts de ces retenues sur l'hydrologie également sur les temps longs. Dans les régions où les projections climatiques conduisent à une augmentation des sécheresses, il faut s'attendre à ce que l'impact des retenues existantes sur l'hydrologie augmente (même à un taux d'équipement constant).

