

Document à accès immédiat

# Impact de l'effacement des seuils en rivière sur les eaux souterraines

Rapport final

**BRGM/RP-71235-FR**

13 novembre 2021

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

**Serviere Marie**

## Vérificateur :

Nom : Gutierrez Alexis  
Fonction : Hydrogéologue référent pour  
DAT/CL  
Date : 25/10/2021

Signature :



## Approbateur :

Nom : Saada Alain  
Fonction : Directeur Régional Centre  
Val-de-Loire  
Date : 13/12/2021

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM  
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

## Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

## Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire mis à votre disposition.

**Mots clés :** Eau souterraine, eau de surface, impact, retenue d'eau.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Serviere Marie** (2021) – Impact de l'effacement des seuils en rivière sur les eaux souterraines. Rapport final V1. BRGM/RP-71235-FR, 56 p.

© BRGM, 2021, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.  
IM003-MT008-P2-21/09/2021

## Synthèse

Au titre de l'Appui aux Services de la Police de l'Eau, la Direction Départementale des territoires de l'Indre a sollicité le BRGM pour qu'il réalise une évaluation de cas d'études concernant la problématique de l'impact des seuils en rivière et de leur effacement sur les eaux souterraines.

L'impact de l'effacement des seuils sur les nappes a très peu été étudié. Les références bibliographiques sur le sujet sont peu nombreuses, alors qu'elles sont très abondantes sur les autres critères d'ordre géomorphologique ou biologique (mobilisation de la charge sédimentaire, érosion du profil en long, qualité de l'eau, biodiversité, etc.).

Selon la position relative du niveau d'eau dans la rivière et de la surface libre dans l'aquifère, un débit peut être échangé : depuis un tronçon de rivière vers l'aquifère, ou réciproquement depuis l'aquifère vers la rivière. Aucun échange n'a lieu entre la rivière et l'aquifère dans le cas d'une étanchéification, volontaire ou non, du tronçon. Ces trois types de relation peuvent se rencontrer le long d'un même cours d'eau.

L'abaissement de la ligne d'eau consécutif à l'effacement d'un seuil aura donc des impacts variables en fonction de la situation d'équilibre mise en place par le seuil existant. Mais les altitudes respectives de la nappe et du cours d'eau ne sont pas les seuls critères à entrer en jeu : la perméabilité de l'aquifère et celle des dépôts vaseux sur les berges ou dans le lit du cours d'eau jouent également un rôle dans l'étendue de l'impact (de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres perpendiculairement au cours d'eau). La remobilisation des sédiments du cours d'eau et l'érosion régressive qui parfois en découle modifie la relation nappe rivière en augmentant la perméabilité du lit et des berges.

Quelques cas présentés dans cette étude bibliographique font état d'assèchements de puits de la nappe d'accompagnement suite à la suppression de barrages. D'autres prennent en compte ce risque en resserrant les berges pour limiter l'abaissement de la ligne d'eau. Toutefois, dans la grande majorité des cas, il n'y a ni anticipation ni contrôle de la nappe pendant et après la suppression du seuil.

Si les références bibliographiques sur les suppressions de seuils sont nombreuses, peu d'études spécifiques de leurs impacts sur les eaux souterraines ont été publiées. Le BRGM préconise d'approfondir les connaissances scientifiques dans ce domaine. Il importe de disposer de sites pilotes, de configurations variées, afin d'acquérir de la donnée et élaborer des modèles conceptuels. Sur des sites pilotes, le BRGM préconise de réaliser des mesures avant et après suppression de seuil afin de disposer de données permettant de tester différents outils d'évaluation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes associés.



## Sommaire

1. Objectifs et contexte de l'étude.....	7
1.1. Objectifs de l'étude.....	7
1.2. Les échanges nappe-rivière .....	7
2. Les seuils .....	10
2.1. Définition d'un seuil .....	10
2.2. Impact des seuils en rivière .....	10
2.2.1. Effets sur la dynamique du cours d'eau.....	11
2.2.2. Effets retenue.....	13
2.2.3. Influence sur les profils en long .....	13
2.2.4. Elévation de la nappe d'accompagnement en amont .....	14
2.2.5. Effets sur la qualité de l'eau .....	17
2.2.6. Effets sur la biodiversité .....	18
2.3. Impact de la suppression des seuils.....	18
2.3.1. Effets sur le transit sédimentaire .....	19
2.3.2. Effets sur la recharge/décharge des nappes .....	20
2.4. Exemples de suppression de seuils .....	21
2.4.1. Le seuil sur la Briançe .....	21
2.4.2. Le seuil sur la Ramberge .....	21
2.4.3. Le seuil sur la Bave.....	22
2.4.4. Modélisation d'une suppression de seuil en Alaska.....	22
2.4.5. Conséquences de suppressions de seuils aux Etats-Unis.....	23
2.4.6. Modèles conceptuel de relations nappes-rivière dans un contexte naturel, avec un seuil ou après suppression du seuil.....	24
2.5. Etudes préalables à l'effacement d'un ouvrage .....	25
3. Conclusion .....	29
3.1. Impact de l'effacement des seuils sur les nappes.....	29
3.2. Recommandations du BRGM.....	29
4. Bibliographie.....	31

## Liste des figures

Figure 1 : Schéma de nappe alluviale (Vernoux et al., 2010).....	7
Figure 2 : Zone hyporhéique, riparienne et alluviale (Environment Agency, 2005).....	8
Figure 3 : Hétérogénéité des flux hydrauliques dans la zone hyporhéique (Vernoux et al., 2010) .....	8
Figure 4 : Différentes configurations d'échanges nappe-rivière (Thiéry, 2020) .....	9
Figure 5 : Principales recherches sur les impacts des seuils (Berthelote, 2013).....	11
Figure 6 : Mécanismes de transport des particules (Manière, 2013).....	12
Figure 7 : Impact théorique d'un ouvrage sur le transit sédimentaire et sur l'altération du substrat et de la morphologie à son aval (Manière, 2013) .....	12
Figure 8 : Schéma de l'évolution des fonds après la construction d'un seuil (Manière, 2013) .....	12

Figure 9 : Evolution de la nappe de la basse vallée du Var durant les années 1960-1970 après une phase d'extraction (Collin, 2004) .....	15
Figure 10 : Evolution de la nappe de la basse vallée du Var durant les années 1960-1970 après la construction de seuils (Collin, 2004) .....	15
Figure 11 : Evolution de la nappe de la basse vallée du Var durant les années 1960-1970 après colmatage des fosses d'extraction (Collin, 2004) .....	16
Figure 12 : Principales recherches sur les impacts de la suppression de seuils (Berthelote, 2013) .....	19
Figure 13 : Suppression du seuil de la cristallerie de Saint Paul sur la Briançe (source : site de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne) .....	21
Figure 14 : Suppression d'un seuil sur la Remberge à Saint-Ouen-les-Vignes (37) .....	22
Figure 15 : Suppression du barrage du Martinet (source : ONEMA) .....	22
Figure 16 : Exemple de modélisation des effets d'une suppression de seuil sur le niveau de la nappe d'accompagnement (Show environmental, 2006, dans l'étude de Malavoi, 2011) .....	23
Figure 17 : Modèles conceptuels pour les aquifères de sable et de gravier non consolidés dans une vallée étroite, une vallée large et une plaine dans les conditions naturelles, avec un seuil et immédiatement après la suppression d'un seuil pour une nappe haute (Berthelote, 2013) .....	25
Figure 18 : Modèles conceptuels pour les aquifères de sable et de gravier non consolidés dans une vallée étroite, une vallée large et une plaine dans les conditions naturelles, avec un seuil et immédiatement après la suppression d'un seuil pour une nappe basse (Berthelote, 2013) .....	25

## Liste des annexes

Annexe 1 .....	38
Annexe 2 .....	40
Annexe 3 .....	42

# 1. Objectifs et contexte de l'étude

## 1.1. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Depuis toujours, les cours d'eau ont contribué de manière décisive à la localisation des implantations humaines, la plupart des villes, s'étant développées en forte interaction avec les rivières. Au moyen-âge, l'utilisation de la force hydraulique fut le moteur de la première révolution industrielle. L'aspect d'un grand nombre de rivières en France, s'est modelé à cette époque, comme en témoigne la multitude de moulins qui structurent grands et petits cours d'eau et ont pour la plupart une origine très ancienne. De même, la lutte contre les inondations a façonné les cours d'eau. La protection par des endiguements des lieux habités a modelé le paysage fluvial, notamment à la traversée des villes (Grier, 2003).

Dans l'ensemble des projets proposés dans le cadre des contrats territoriaux de l'agence de l'eau Loire-Bretagne, il est prévu un examen du cas de chaque seuil et une appréciation précise du contexte tant en termes de caractéristiques du milieu physique que d'usages associés au seuil (ONEMA, 2012).

Les contrats territoriaux préconisent la restauration de la continuité écologique des cours d'eau, pour garantir la libre circulation des sédiments et des poissons.

Au titre de l'Appui aux Services de la Police de l'Eau, la Direction Départementale des territoires de l'Indre a sollicité le BRGM pour qu'il réalise une évaluation des cas d'études concernant la problématique de l'impact des seuils en rivière et de leur effacement sur les eaux souterraines à partir d'une recherche bibliographique.

## 1.2. LES ECHANGES NAPPE-RIVIERE

Les échanges entre les cours d'eau et les aquifères se font soit directement lorsque les alluvions sont peu ou pas développées et que le cours d'eau est en contact direct avec l'aquifère ; soit par l'intermédiaire des nappes alluviales (Figure 1).

Cependant, en France métropolitaine, les nappes alluviales sont présentes le long de la quasi-totalité des cours d'eau (Auterives et al., 2012).

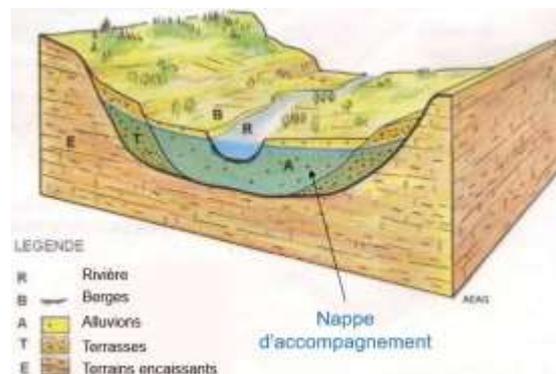


Figure 1 : Schéma de nappe alluviale (Vernoux et al., 2010)

Généralement ces nappes alimentent les rivières en étiage ; plus rarement et surtout dans des zones karstiques, ces nappes sont alimentées par des pertes diffuses ou localisées des rivières (Vernoux et al. 2010). Si la composante principale d'apport au cours d'eau provient des nappes souterraines contenues dans le bassin versant, le débit des cours d'eau peut être modifié le long de son parcours par des échanges avec la nappe alluviale à laquelle il est étroitement associé. Les échanges peuvent être de deux sens, de la nappe vers la rivière ou de la rivière vers la nappe, selon les états instantanés de hautes ou basses eaux de l'un ou de l'autre en un lieu donné. Le débit de drainage des aquifères peut être mesuré en étiage, lorsque le ruissellement superficiel est faible, par des campagnes de jaugeages différentiels réalisées le long des cours d'eau concernés. Dans des conditions naturelles, les rivières ne

sont alimentées en période sans pluie, que par le drainage des aquifères. Ce régime naturel peut être modifié par des influences anthropiques, notamment le stockage temporaire d'une partie des débits induit par la présence des seuils.

Les flux échangés entre la nappe et le cours d'eau sont conditionnés par les propriétés du lit et des berges de la rivière. Cette interface entre les eaux de surface et les eaux souterraines est la zone hyporhéique (Figure 2). Le dépôt des sédiments charriés par le cours d'eau, en particulier lors des phases de décroissance des crues, inclut des particules minérales fines. Le processus de colmatage de la zone hyporhéique correspond à l'infiltration et au piégeage dans les pores du substrat de ces particules fines (Descoux, 2011). Il induit une perte de porosité et de perméabilité de cette zone à l'interface entre la rivière et la nappe, par rapport à l'aquifère alluvial (Brunke, 1999).

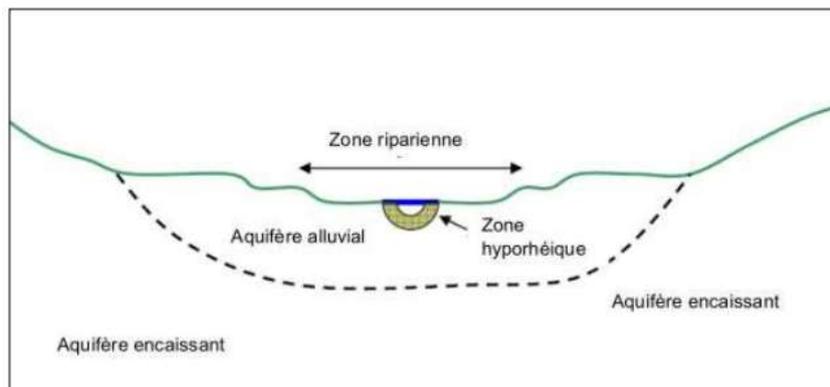


Figure 2 : Zone hyporhéique, riparienne et alluviale (Environment Agency, 2005)

L'extension de la zone hyporhéique est contrôlée par de multiples facteurs dont le gradient hydraulique, les hétérogénéités de la perméabilité, le type de cours d'eau. La nature des matériaux qui colmatent le fond et les berges des cours d'eau, ainsi que l'épaisseur, vont largement conditionner la quantité et la vitesse des échanges entre eaux souterraines et eaux de surface. Des sédiments perméables et peu épais favoriseront les échanges tandis que de fortes épaisseurs et des matériaux peu perméables favoriseront de plus longs temps de résidence dans la zone hyporhéique. Il est aussi nécessaire de souligner que les eaux des rivières peuvent se ré-infiltrer de nombreuses fois dans la zone hyporhéique, notamment au niveau des seuils ou des méandres (Figure 3). Par conséquent, les eaux de surface peuvent également être filtrées le long de leur parcours, indépendamment des eaux souterraines.

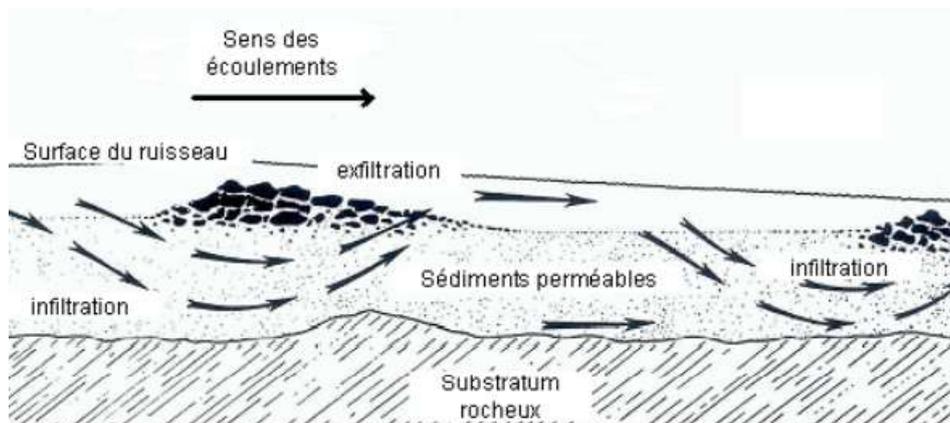


Figure 3 : Hétérogénéité des flux hydrauliques dans la zone hyporhéique (Vernoux et al., 2010)

Selon la position relative du niveau d'eau dans la rivière et de la surface libre dans l'aquifère, un débit peut être échangé : depuis un tronçon de rivière vers l'aquifère, ou réciproquement depuis l'aquifère vers la rivière. Le débit d'échange est contrôlé, d'une manière non linéaire, par le lit et les berges du cours d'eau en fonction de leur surface, épaisseur et perméabilité (Thiéry, 2020).

On considère trois cas de relation hydrodynamique entre la nappe et la rivière (Figure 4). Ces trois types de relation peuvent se rencontrer le long d'un même cours d'eau (Vernoux et al., 2010) :

- Pas d'échange entre la rivière et l'aquifère (bief étanchéifié, domaine non aquifère ou aquifère avec des berges colmatées). Lorsque le niveau dans l'aquifère est inférieur à la base du lit de la rivière, le débit d'échange vers l'aquifère est un terme de percolation indépendant de ce niveau. En effet la nappe est « décrochée ».
- La nappe est en relation avec la rivière et est alimentée par la rivière. Le niveau piézométrique est inférieur à l'altitude du plan d'eau.
- La nappe est en relation avec la rivière et l'alimente. Le niveau piézométrique est supérieur à l'altitude du plan d'eau.

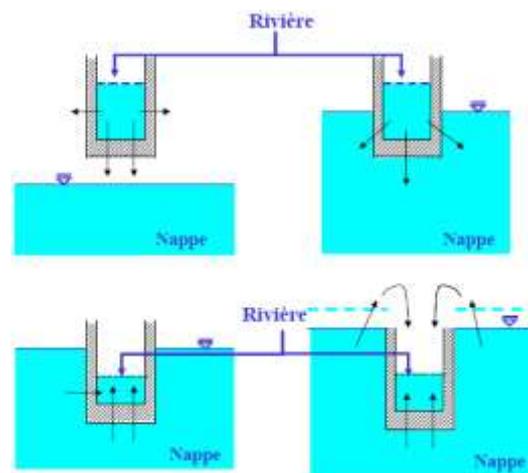


Figure 4 : Différentes configurations d'échanges nappe-rivière (Thiéry, 2020)

## 2. Les seuils

### 2.1. DEFINITION D'UN SEUIL

Selon le site du Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau (Sandre), un seuil en rivière est défini comme étant un ouvrage, fixe ou mobile, qui barre tout ou partie du lit mineur contrairement au barrage qui, lui, barre plus que le lit mineur. La présence d'un seuil crée une surélévation de la ligne d'eau en amont du seuil, une section de contrôle hydraulique au niveau du seuil, pouvant conduire à la création d'un petit plan d'eau à l'amont de l'ouvrage, suivi d'une zone de rapides sur le parement aval. Un seuil peut être un ouvrage artificiel en béton, en maçonnerie, en gabions, en enrochements, en bois, en métal, etc. Il permet dans certains cas d'alimenter un canal de dérivation, d'exploiter la force motrice de l'eau, de prélever de l'eau dans de meilleures conditions, grâce à la surélévation de la ligne d'eau en amont du seuil.

Il est précisé que les ouvrages communément dénommés « barrages au fil de l'eau » et « barrages à aiguilles » sont à considérer comme des seuils et non pas comme des barrages. Les seuils en rivière recensés dans le Référentiel des Obstacles à l'écoulement sont uniquement ceux d'origine anthropique. Un seuil peut être composé d'un dispositif d'auscultation permettant de mesurer le débit d'un cours d'eau.

### 2.2. IMPACT DES SEUILS EN RIVIERE

Si les références bibliographiques sur les impacts de la présence de seuils sont particulièrement nombreuses (Figure 5, la version originale est en annexe 2), elles sont focalisées sur les phénomènes en surface impliquant la géomorphologie, l'hydraulique, le transport de sédiments, la pêche, l'écologie benthique et riparienne, l'aspect esthétique (Graf, 2005, dans l'étude de Berthelote, 2013).

Les changements des conditions dans la rivière au droit des seuils entraînent le développement d'un réservoir d'eau, l'augmentation de la profondeur d'eau, les changements de température dans la rivière, la perte d'infiltration de lumière due à l'augmentation de la profondeur d'eau et à la turbidité, la rétention de nitrates et phosphates, la présence de plancton et d'algues, et le changement des écosystèmes aquatiques d'espèces lenticques en espèces lotiques (Baxter, 1977 ; Petts, 1984 ; Poff et Hart, 2002, dans l'étude de Berthelote, 2013). De plus, le fait que l'accumulation de sédiments dans le réservoir diminue sa capacité de stockage, a été documenté depuis longtemps (Dendy, 1968 ; Radoane et Radoane, 2005, dans l'étude de Berthelote, 2013).

En aval d'un seuil, la rivière rétablit sa charge sédimentaire en érodant le lit et les berges, provoquant l'incision et l'élargissement du chenal et le transport préférentiel des sédiments fins (Evans et al., 2000c ; Faulkner et McIntyre, 1996 ; Graf, 2005 ; Grams et Schmidt, 2005 ; Petts et Gurnell, 2005 ; Poff et al., 1997 ; Radoane et Radoane, 2005 ; Renwick et al., 2005, dans l'étude de Berthelote, 2013). Le résultat est l'enfoncement du chenal, qui peut avoir un effet négatif sur les écosystèmes benthiques (Petts, 1984 ; Petts et Gurnell, 2005, dans l'étude de Berthelote, 2013). Un autre effet sur le long terme est l'aggradation en aval du seuil, c'est-à-dire un nouveau dépôt sédimentaire, résultant de la régulation de l'écoulement (Grams et Schmidt, 2005 ; Marston et al., 2005, dans l'étude de Berthelote, 2013).

La présence d'un seuil permet d'atténuer les pics d'inondations. La diminution de sédiments en aval modifie la morphologie du chenal et les phénomènes de crue (Chin et al., 2002 ; Collier et al., 1996, dans l'étude de Berthelote, 2013). Les autres impacts en aval peuvent être

l'altération de la structure thermique de la rivière (Muth et al., 2000, dans l'étude de Berthelote, 2013), les plantes ripariennes (Bayley, 1995 ; Doyle et al., 2005 ; Magilligan et Nislow, 2005 ; Muth et al., 2000 ; Petts et Gurnell, 2005 ; Shafroth et al., 2002, dans l'étude de Berthelote, 2013) et la diminution de la migration de poissons anadromes (Baxter, 1977 ; Bayley, 1995 ; Nislow et al., 2002 ; Wootton et al., 1996, dans l'étude de Berthelote, 2013).

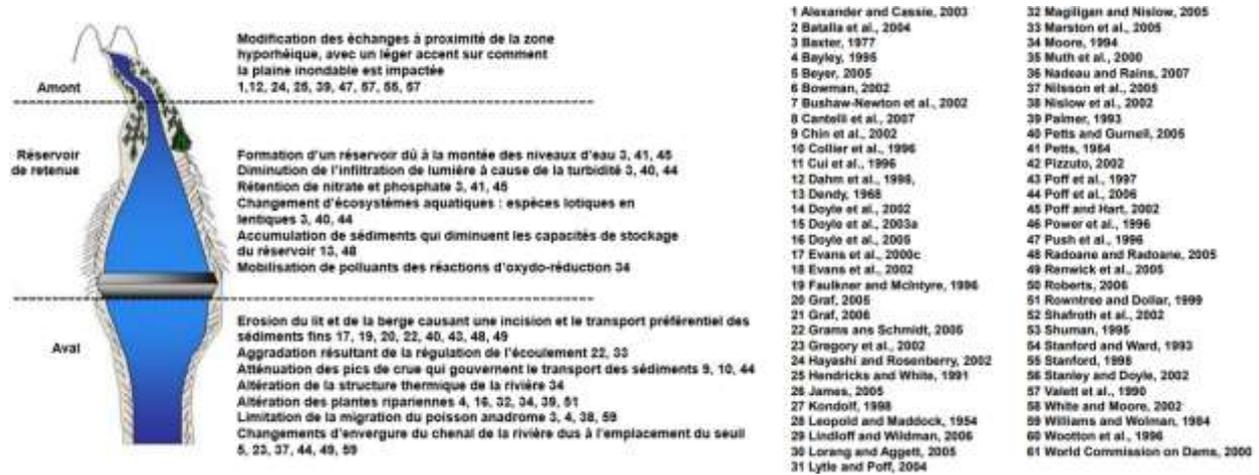


Figure 5 : Principales recherches sur les impacts des seuils (Berthelote, 2013)

Illustration de Hart et al. (2002). Texte traduit en français.

Comme l'a suggéré Constantz (2003), les impacts sur les eaux souterraines ne sont pas ou peu analysés dans ces études.

### 2.2.1. Effets sur la dynamique du cours d'eau

Le seuil ou le barrage ralentit voire bloque aussi les matériaux solides naturellement et nécessairement transportés par tout cours d'eau (galets, graviers, sédiments...). La tendance naturelle de la rivière étant de retrouver un équilibre sédimentaire, elle se recharge en matériaux dès le passage de l'ouvrage, en érodant son lit : cela contribue à faire disparaître des fonds de rivière favorables à la reproduction de certaines espèces, produit un enfoncement du lit et/ou des érosions de berges, aboutit parfois au déchaussement de ponts ou autres ouvrages d'art et sépare les bras latéraux du cours d'eau principal une grande partie de l'année (ONEMA, 2012).

Les apports en sédiments vont principalement dépendre des conditions hydroclimatiques, géologiques et topographiques, et s'effectuent par différents processus érosifs. Les apports externes distinguent les apports primaires, qui s'effectuent sur les versants par gravité et ruissellement, et les apports secondaires, qui concernent les matériaux amenés par les affluents. Les apports internes, ou le stock alluvial, sont les sédiments pouvant être mobilisés par le cours d'eau dans son lit mineur, sa plaine alluviale ou ses anciennes terrasses (Malavoi et al., 2011). Le transport des sédiments depuis l'amont vers l'aval peut alors s'effectuer de trois façons différentes selon la puissance fluviale et la taille des particules. La charge de fond est mobilisée par charriage tandis que les alluvions plus fines vont se déplacer par saltation ou même par suspension (fig. 3).



Figure 6 : Mécanismes de transport des particules (Manière, 2013)

Un ouvrage transversal a pour conséquence une réduction brutale de la pente de la ligne d'eau sur le linéaire du cours d'eau correspondant à la hauteur de l'aménagement. Le secteur influencé par la modification de la pente est appelé « zone de remous liquide » (Figure 7).

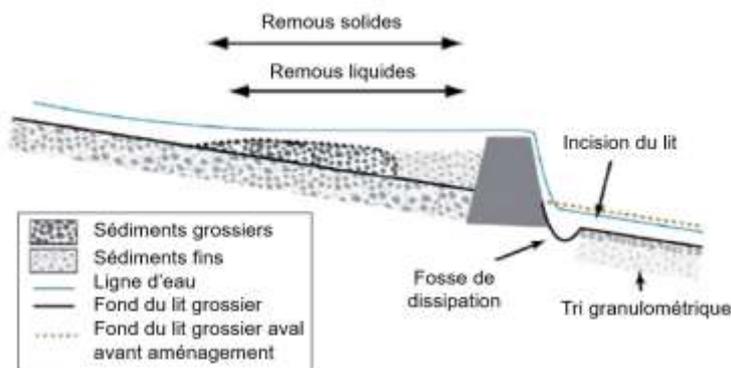


Figure 7 : Impact théorique d'un ouvrage sur le transit sédimentaire et sur l'altération du substrat et de la morphologie à son aval (Manière, 2013)

La rupture de pente induit une diminution de la capacité de transport et de la compétence du cours d'eau. Il en résulte un stockage de la charge solide parvenant de l'amont dans la zone de remous liquide, formant ainsi un « remous solide » qui se traduit par une rupture de la pente du fond du lit (Figure 8). La charge grossière est la fraction granulométrique principalement impactée du fait de son déplacement par charriage sur le fond du lit. Les sédiments fins peuvent, quant à eux, être stockés lorsque les conditions d'écoulement sont quasi stagnantes du fait d'une hauteur de l'ouvrage particulièrement élevée pour une pente d'origine faible.

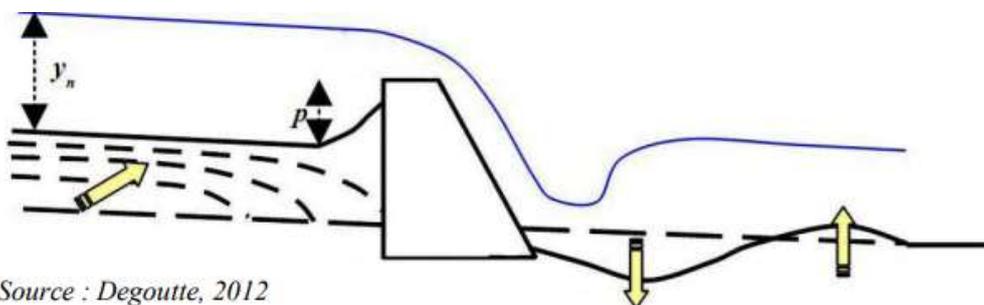


Figure 8 : Schéma de l'évolution des fonds après la construction d'un seuil (Manière, 2013)

La plupart des seuils fixes, quel que soit le type de cours d'eau, bloquent la plus grande partie de la charge alluviale grossière de fond (celle transportée par charriage). Certains vannages peuvent parfois être suffisamment levés en période de crue pour permettre le transit de tout ou partie de la charge alluviale de fond. Cet effet de piégeage perdure en général jusqu'à ce que le seuil soit plein et devienne « transparent » au transport solide. A l'amont, le

remblaiement du seuil se traduit par une réduction de la capacité du lit, donc une augmentation de la fréquence des débordements. A l'aval, le « manque » d'alluvions grossières génère souvent une érosion progressive (se propageant depuis le seuil vers l'aval) conduisant à l'incision du lit mineur.

Les sédiments fins en transit se piègent dans la plupart des retenues, plus particulièrement sur les rivières à faible pente et à faibles vitesses d'écoulement, dans les plans d'eau (même en crue), ainsi que si les vannes ne peuvent être ouvertes au bon moment (pendant la crue et la décrue).

### **2.2.2. Effets retenue**

Les effets « retenue » sont ceux induits par la présence quasi permanente d'un plan d'eau en amont de l'ouvrage. Les seuils et vannages maintiennent un plan d'eau calme en amont, souvent de manière permanente. En outre, le maintien permanent d'un équilibre hydrostatique entre le plan d'eau et la nappe phréatique inhibe l'un des principaux processus générateurs d'érosion latérale : la décharge brusque de la nappe vers le cours d'eau à la décrue. Ce processus est particulièrement intense sur les cours d'eau à berges non cohésives (des sables aux galets). Enfin, la stabilité du plan d'eau et la faiblesse des processus géodynamiques favorisent le développement d'une végétation rivulaire (aulnes, saules, frênes etc.) qui va elle-même renforcer la stabilité de la berge.

D'une manière générale, les seuils induisent à leur amont une augmentation des profondeurs d'eau et une réduction des vitesses. Cet « effet plan d'eau » ou « effet retenue » est lié au calage hydraulique de la ligne d'eau par la section de contrôle majeur que constitue un seuil en régime fluvial. La longueur concernée par cet effet hydraulique est fonction de la hauteur du seuil, de la pente du cours d'eau, du débit considéré. Cet effet est particulièrement sensible en étiage et en régime moyen mais a beaucoup moins d'influence sur les caractéristiques hydrodynamiques en crue (beaucoup d'ouvrages peuvent fonctionner en « régime noyé » avec un moindre effet sur les vitesses et les hauteurs d'eau à l'amont).

Un bief de 2 000 m de long, 15 m de large provoqué par un seuil de 2 m de haut accumule 60 000 m<sup>3</sup>. Si on vide totalement ce bief, on peut espérer apporter à la rivière 1 m<sup>3</sup>/s pendant 60 000 secondes, soit 16 heures, ou encore 138 l/s pendant 5 jours (ONEMA, 2012).

### **2.2.3. Influence sur les profils en long**

Les ouvrages transversaux ont un effet stabilisateur sur le profil en long du cours d'eau. Les seuils découpent la rivière en biefs dont ils contrôlent les conditions hydrauliques, la fonction la plus courante d'un seuil est la gestion des lignes d'eau. La présence d'un seuil dans un cours d'eau crée une section de contrôle hydraulique, c'est-à-dire, une transition de régime d'écoulement rapidement varié qui va du fluvial au torrentiel puis, qui revient au fluvial. L'effet du seuil est donc d'introduire un contraste plus important dans l'écoulement en fixant le régime amont en conditions fluviales. En amont du seuil, le courant est ralenti à la faveur d'une profondeur accrue (Grier, 2003).

La présence d'un seuil limite la vitesse du courant dans le bief et évite ainsi l'érosion des berges. De plus, elle limite la vitesse d'abaissement du bief et diminue ainsi les surpressions hydrauliques et les gradients hydrauliques dans les sols (Grier, 2003).

Les seuils fixes et les vannages fermés facilitent généralement les débordements dans le lit majeur à leur amont. La distance affectée est fonction de la hauteur du seuil, de la pente du cours d'eau, de la largeur du lit majeur. Certains auteurs indiquent que le débordement en amont pourrait avoir un effet d'écrêtement de la crue dans le lit majeur et réduire la fréquence et la hauteur de submersion en aval (Meriaux et al., 1997).

#### **2.2.4. Elévation de la nappe d'accompagnement en amont**

Peu de données bibliographiques semblent avoir été publiées sur ce sujet (Malavoi, 2011).

Le débit des cours d'eau peut être modifié le long de leur parcours par des échanges avec la nappe alluviale à laquelle il est étroitement associé. Un seuil en rivière, par sa fonction de retenue peut avoir pour effet de relever et stabiliser le niveau de la nappe à son amont, dans la zone alluviale à proximité de celui-ci. Ce phénomène dépend du contexte hydrogéologique et de l'état de colmatage de la retenue. Les aménagements anthropiques, notamment le pompage que l'on retrouve fréquemment au niveau des seuils, peuvent également modifier les flux entre la nappe et la rivière (Malavoi, 2011). Les tronçons fortement colmatés limitent les échanges avec la « zone hyporhéique ». La perméabilité de cette zone et le gradient hydraulique des écoulements déterminent le sens et l'intensité des échanges entre l'eau de surface et la nappe souterraine. Le dépôt de fines à l'amont d'un seuil peut entraîner un colmatage du lit qui réduira l'alimentation de la nappe par la rivière.

Selon Malavoi (2003), les seuils ont parfois, certains sont même construits dans ce but, un effet sur le niveau des nappes phréatiques situées en amont. Cet effet peut cependant ne pas exister ou être très modeste dans les biefs étanchéifiés, volontairement ou non.

Selon Roland-Meynard et al. (2019), les travaux d'aménagements anciens des cours d'eau (seuil mais aussi mise en bief de cours d'eau, rectification, recalibrage, curage voire busage) ont modifié les liens entre les cours d'eau et leurs nappes d'accompagnement. Dans les cas de mise en bief par exemple, les cours d'eau sont généralement perchés et une partie de l'eau du cours d'eau est drainée par la nappe. À l'inverse, dans les cas de curage anciens et répétés par exemple, les cours d'eau s'incisent, et l'eau de la nappe est drainée par le cours d'eau.

Collin (2004) cite l'exemple du Var dans les années 1960-1970 qui a connu une importante phase d'extraction de ses granulats. Il rappelle que si l'eau contenue dans les nappes alluviales est renouvelable, si les alluvions ne sont fréquemment que de vastes dispositifs de filtration naturelle constamment parcourus par des écoulements souterrains venus d'ailleurs, au contraire, les granulats naturels sont extraits une fois pour toutes, comme des minerais. Ces caractéristiques particulières ont donc des conséquences importantes sur la gestion des nappes alluviales. Tout prélèvement, notamment dans une fosse de dragage, provoque une rectification du profil par érosion régressive et le fond du lit de la rivière s'abaisse, parfois sur plusieurs kilomètres. Selon Collin (2004), l'abaissement de la ligne d'eau exerce un impact sur les eaux souterraines. Le réajustement de la surface piézométrique, dont le potentiel aval se raccorde à la nouvelle cote des eaux de surface, peut abaisser le niveau statique de plusieurs mètres dans les ouvrages qui exploitent la nappe. Les puits ou les forages doivent alors être approfondis pour que les pompes puissent encore extraire l'eau (Figure 9).

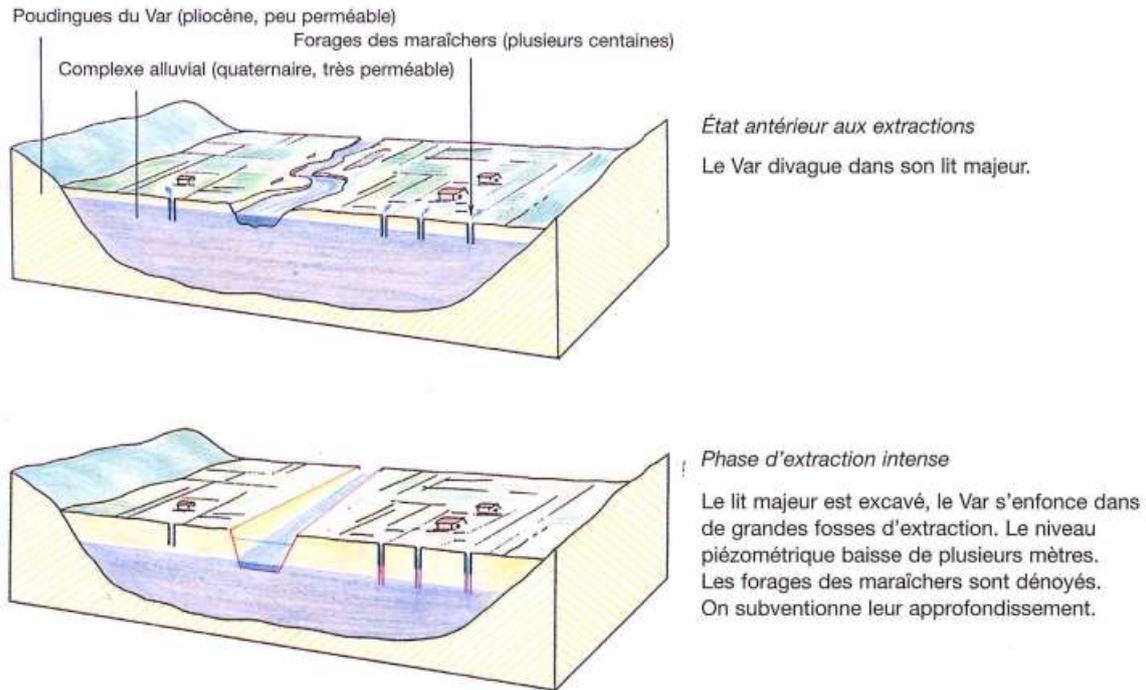


Figure 9 : Evolution de la nappe de la basse vallée du Var durant les années 1960-1970 après une phase d'extraction (Collin, 2004)

Collin (2004) précise qu'il faut également tenir compte de l'effet de certains barrages qui retiennent les sédiments. En effet, le Var a connu d'autres travaux correctifs, notamment le rehaussement de la ligne d'eau par des seuils ou des barrages sommaires (Figure 11).

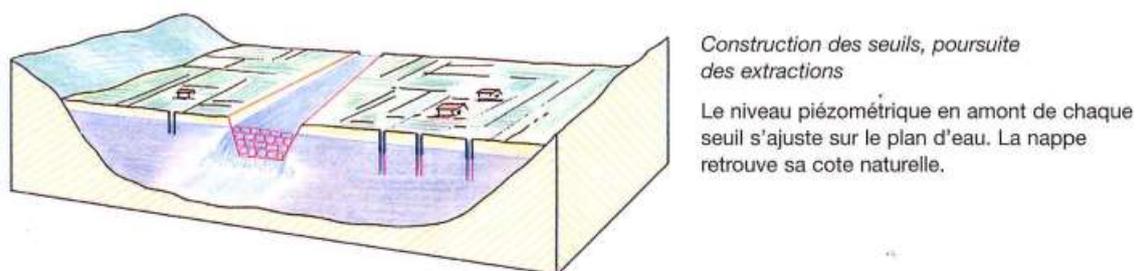
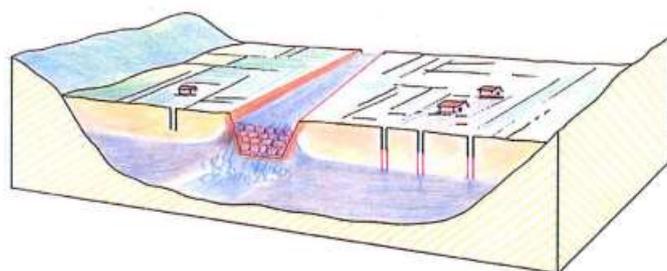


Figure 10 : Evolution de la nappe de la basse vallée du Var durant les années 1960-1970 après la construction de seuils (Collin, 2004)

Selon Collin (2004), le colmatage des biefs d'eau calme par des sédiments fins, à l'amont des seuils, a créé une coupure hydraulique entre eau libre et eau souterraine. La nappe, mal réalimentée, a poursuivi son abaissement (Figure 11).



#### Colmatage des fosses d'extraction

Après les premières crues qui suivent la mise en place des seuils, moins d'un an après leur construction, les fosses d'extraction se sont colmatées. Il n'y a plus de réalimentation de la nappe, qui décroche et s'abaisse de nouveau. Le Var est devenu une succession de plans d'eau rectangulaires.

Figure 11 : Evolution de la nappe de la basse vallée du Var durant les années 1960-1970 après colmatage des fosses d'extraction (Collin, 2004)

Quant aux constructeurs de moulins, Malavoi (2011) explique que, pour garantir un volume d'eau suffisant, ils étanchaient volontairement les biefs d'amenée mais aussi les rives des cours d'eau en amont afin que l'eau ne reparte pas vers la nappe phréatique à travers des berges parfois très perméables. Cette étanchéification se faisait aussi naturellement sous l'effet d'un colmatage progressif des berges par les fines en suspension dans l'eau. Comme pour les effets hydrologiques, la distance affectée par cette rehausse du niveau de la nappe est fonction de la hauteur du seuil, de la pente du cours d'eau, des caractéristiques des alluvions du lit majeur en amont de l'ouvrage (perméabilité, transmissivité).

Les seuils existants peuvent aggraver les débordements et donc les inondations à leur amont immédiat. C'est pour éviter de telles inondations dommageables que la réglementation générale des ouvrages hydrauliques et des cotes légales de retenues fixe des cotes maximales à ne pas dépasser pour ne pas pénaliser les usagers situés en amont. Cette obligation limite le volume disponible pour un stockage de l'eau à celui compris entre les berges. L'étendue du débordement vers l'amont est fonction de la pente dynamique de l'eau en période de crue : un cours d'eau avec une pente de 5 cm par km, répercutera une surélévation de 20 cm de la ligne d'eau due à un seuil sur une distance de 4 km vers l'amont mais avec des hauteurs de débordements (et non d'inondation) inférieures à 20 cm. Dans les zones urbanisées, les seuils peuvent aggraver les crues. La présence de seuils implantés dans des zones urbanisées sensibles au risque d'inondation, ou à leur aval, peut justifier des travaux d'effacement pour éviter toute aggravation locale des niveaux de crues (ONEMA, 2012).

L'augmentation du niveau d'eau à l'amont est propice à la création ou la restauration de zones humides. En crue, l'élévation de la ligne d'eau favorise l'inondation de zones de plaines. S'il s'agit de zones agricoles peu vulnérables (prairies, absence d'habitations), les seuils jouent un rôle intéressant d'écrêtement de crues. S'il s'agit de zones urbaines, ils peuvent accentuer les phénomènes d'inondations (Grier, 2003).

Cependant, l'augmentation du niveau de la nappe en amont de l'ouvrage n'est pas systématique, soit du fait de l'étanchéification volontaire du bief par le constructeur initial (qui ne voulait pas perdre d'eau), soit par colmatage naturel au fil du temps (Malavoi, 2011).

Quelques chercheurs ont essayé de décrire et quantifier les impacts des retenues sur les eaux souterraines. Les étangs construits par des castors sont hydrauliquement similaires aux lacs et aux réservoirs. Ainsi, les études sur les barrages de castors sont un analogue naturel (barrage de petite à grande échelle) pour comprendre comment les eaux souterraines réagissent. Là où les barrages de castors s'étendent sur toute la vallée, l'étang en amont élève le niveau des eaux souterraines (Butler et Malanson, 2005; Chen et Chen, 2003; Mertes, 1997; Naiman et al., 1988; Westbrook et al., 2006, Woo et Waddington, 1990, dans l'étude de Berthelote, 2013).

Guo (1997) a décrit plusieurs solutions analytiques sur les échanges d'eau entre un réservoir et un aquifère libre semi-infini. Sawyer et al. (2009) ont appliqué des techniques similaires pour examiner les effets, sur la zone hyporhéique, des fluctuations du niveau de la rivière dues à la présence d'une retenue. Toutes ces solutions sont limitées à des conditions particulières rarement trouvées dans les milieux naturels. La modélisation des eaux souterraines où une rivière pénètre dans un réservoir a montré des liens entre la rivière, la terrasse de la plaine inondable, le niveau du réservoir et les niveaux des eaux souterraines (Rains et al., 2004, dans l'étude de Berthelote, 2013). La modélisation d'Aseltyne et al. (2006) a montré une augmentation de la profondeur à laquelle l'eau de surface pénètre dans les sédiments du lit de la rivière à la suite d'une élévation du niveau du réservoir. Enfin, Heilweil et al. (2005) ont surveillé la montée des niveaux d'eau souterraine sous et à côté d'un réservoir nouvellement construit. Des changements du niveau des eaux souterraines en réponse à la construction de barrages et de réservoirs dans ces contextes sont attendus, mais, comme mentionné ci-dessus, rarement documentés. Principalement, le degré de changement du niveau des eaux souterraines sera un résultat direct (Berthelote, 2013) :

- de l'ampleur de l'élévation du niveau du réservoir,
- du taux d'échange entre le réservoir, les sections de rivière et les eaux souterraines,
- des conditions régionales des eaux souterraines,
- des conditions aux limites.

### **2.2.5. Effets sur la qualité de l'eau**

En amont d'un seuil, ou dans la retenue d'eau formée par un barrage, la vitesse d'écoulement ralentit et la hauteur d'eau dans le cours d'eau s'élève. Dès lors, les eaux stagnent plus longtemps, les sédiments se déposent, l'eau se réchauffe, bactéries et algues se développent, l'oxygénation de l'eau est réduite, la lumière doit traverser une plus grande hauteur d'eau. Le cours d'eau perd de sa capacité d'autoépuration. Dans le plan d'eau, l'évaporation est aussi plus forte, diminuant la quantité d'eau qui circule à l'étiage (ONEMA, 2012).

Selon une idée très répandue, les seuils en rivière transformeraient les eaux courantes en eaux stagnantes, mais les recherches sur les parties de cours d'eau à l'amont de ce type d'ouvrage hydraulique sont rares. Partant de l'hypothèse qu'elles sont des retenues, l'objectif d'une étude réalisée par l'Université d'Orléans (Donati et al. 2020) a été de vérifier, à travers l'observation de leurs caractéristiques hydrodynamiques, sédimentaires et thermiques, si elles présentent effectivement des traits lenticques ou si elles conservent des traits lotiques. L'écoulement a été étudié, ainsi que son degré de compétence sédimentaire. Ce dernier aspect a été approfondi par une analyse des sédiments déposés au fond du lit. Les propriétés thermiques des eaux ont été examinées pour apprécier si la colonne d'eau se fractionne en masses distinctes selon un gradient vertical de température-densité. Les résultats obtenus montrent que la présence d'un seuil en rivière n'est pas synonyme de transformation des eaux courantes en eaux stagnantes. En effet, bien que l'énergie des eaux soit affaiblie, le courant se déplace constamment dans le sens de la pente et il peut transporter une charge sédimentaire. En outre, même dans les cas les plus prononcés il n'a pas été observé de gradient thermique vertical significatif laissant penser à un fonctionnement hydrologique d'eaux dormantes. Dans les retenues de seuil étudiées, les conditions abiotiques au centre de cette étude diffèrent sensiblement de celles des milieux lenticques : les eaux ont un écoulement unidirectionnel vers l'aval, leur énergie assure le transport des particules jusqu'à 1 mm de diamètre et les stratifications thermiques sont très faibles et de courte durée. Il est cependant incontestable que d'autres de leurs caractères sont similaires à ce qui peut être observé dans un étang, comme la faible énergie de l'écoulement et la présence d'une couche de sédiments parfois riche en matière organique. Les retenues de seuil pourraient donc être définies comme des milieux hybrides associant des aspects lotiques et lenticques. Les sites susceptibles de

s'approcher au plus près des milieux lenticques sont a priori ceux qui combinent une vitesse d'écoulement très faible, une absence de ripisylve et un volume d'eau important (Donati et al. 2020).

### **2.2.6. Effets sur la biodiversité**

Créant des retenues d'eau calme, modifiant la forme de la rivière et la qualité de son eau, ces seuils et barrages transforment les habitats des espèces animales et végétales qui y vivent. Les variations saisonnières des niveaux d'eau sont atténuées, les petites crues amorties (ONEMA, 2012).

## **2.3. IMPACT DE LA SUPPRESSION DES SEUILS**

L'Institut d'études géologiques des Etats-Unis (USGS) met en ligne sur son site une base de données de 543 études sur les suppressions de seuil, réalisées dans plus d'une dizaine de pays différents (Australie, Autriche, Corée, Etats-Unis, Chine, Danemark, Japon, Norvège, Espagne, Suède, Taiwan, Pays de Galles), dont les dénivelés sont compris entre 60 cm et 64 m. Sur l'ensemble de ces études, seules deux d'entre elles, deux thèses, traitent des impacts de la suppression d'un seuil sur les eaux souterraines. L'une modélise la suppression d'un seuil haut de 8,2 m à Milltown, (Farinacci, 2009) et l'autre développe des modèles conceptuels (Berthelote, 2013).

Le tableau (annexe 1) recense les études réalisées sur des seuils de dénivelé compris entre 1 et 2 mètres. Aucune de ces études ne traite de l'impact des suppressions de seuils sur les eaux souterraines.

L'observation et la prévision des impacts de la suppression de retenues ont été réalisées (Doyle et al., 2003b ; Evans et al., 2000b ; Graf, 2003 ; Hart et al., 2002, dans l'étude de Berthelote, 2013). Les suppressions de barrages impliquent des effets transitoires qui introduisent de nouvelles préoccupations pour la gestion des bassins versants et la restauration des rivières, comme le résume la Figure 12. (Collins et al., 2007 ; Hewitt et al., 2001 ; Pennsylvania Organization for Watersheds and Rivers et al., 2004, dans l'étude de Berthelote, 2013). Les principales préoccupations comprennent généralement les modifications de la morphologie des canaux (Cantelli et al., 2007 ; Williams et Wolman, 1984, dans l'étude de Berthelote, 2013), les processus d'échange des cours d'eau et des plaines inondables (Graf, 2006 ; Kondolf, 1998, dans l'étude de Berthelote, 2013), le sort des sédiments des réservoirs (Cui et al., 2006 ; Doyle et al., 2002, 2003a ; Evans et al., 2002 ; Evans et al., 2000c ; Lorang et Aggett, 2005 ; Pizzuto, 2002 ; Stanley et Doyle, 2002, dans l'étude de Berthelote, 2013), et la génération potentielle de risques d'inondation en aval (Roberts, 2006). D'autres préoccupations concernent les conséquences écologiques et les risques pour la santé humaine des sédiments de réservoir contaminés libérés ou exposés (DesGranges et al., 1998 ; James, 2005 ; Shuman, 1995 ; Commission mondiale des barrages, 2000, dans l'étude de Berthelote, 2013). Les impacts reconnus sur les systèmes fluviaux en amont d'un réservoir comprennent des changements de régime des crues (Batalla et al., 2004 ; Leopold et Maddock, 1954 ; Poff et al., 1997 ; Power et al., 1996 ; Rowntree et Dollar, 1999, dans l'étude de Berthelote, 2013), les écosystèmes riverains (Doyle et al., 2005 ; Petts, 1984 ; Shafroth et al., 2002, dans l'étude de Berthelote, 2013), les bilans sédimentaires (Faulkner et McIntyre, 1996, dans l'étude de Berthelote, 2013) ou une combinaison de ces trois facteurs (Beyer, 2005 ; Bushaw-Newton et al., 2002 ; Graf, 2006 ; Lytle et Poff, 2004 ; Magilligan et Nislow, 2005 ; Poff et al., 2006, dans l'étude de Berthelote, 2013).

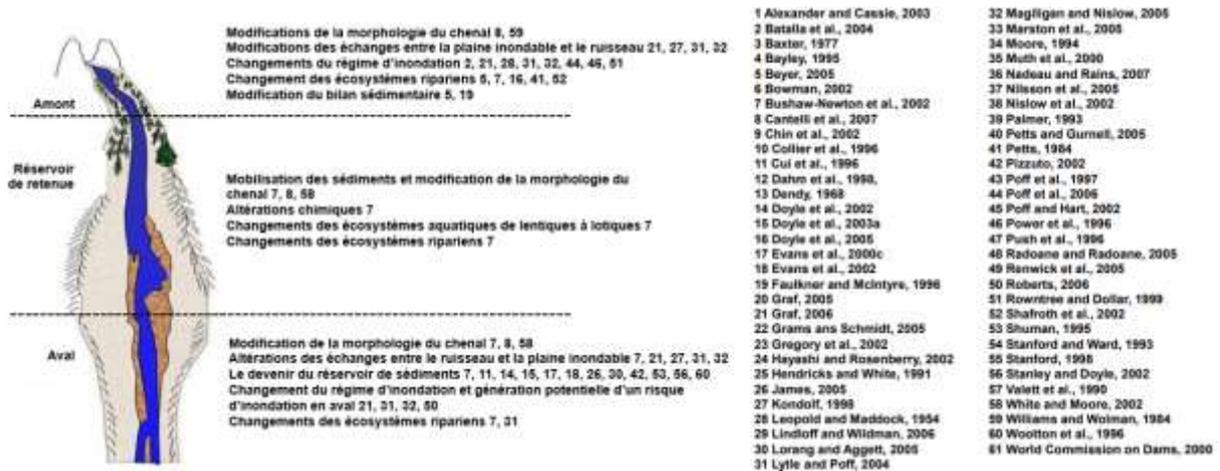


Figure 12 : Principales recherches sur les impacts de la suppression de seuils (Berthelote, 2013)

Illustration de Hart et al. (2002). Texte traduit en français.

Comme indiqué précédemment, les études d'effacement des barrages ont également été historiquement limitées à des études géomorphologiques qui se concentrent sur les processus de surface sans lien avec les niveaux d'eau souterraine ou les impacts sur les aquifères de la plaine inondable (par exemple, Collier et al., 1996; Doyle et al.; Evans et al., 2007 ; Evans et al., 2000c ; Graf, 2003 ; Hart et al., 2002, dans l'étude de Berthelote, 2013).

### 2.3.1. Effets sur le transit sédimentaire

L'apport sédimentaire à l'aval dépend du stockage sédimentaire dans la retenue, qui lui-même dépend du contexte géographique (abondance des productions sédimentaires par les versants), de l'ancienneté de l'ouvrage (effet d'accumulation dans le temps), d'éventuelles opérations de curage dans la retenue ou d'ouverture de vannes à intervalle régulier. D'une manière générale, la tendance est au déficit sédimentaire, ou à un apport sédimentaire limité, dans les parties aval des rivières ou des fleuves du bassin de la Loire. Selon l'ONEMA (2012), l'Allier, la Loire moyenne et aval et la Vienne ont connu au cours du XX<sup>ème</sup> siècle un enfoncement de leur lit de un à trois mètres, du fait des extractions de granulats alluvionnaires en lit mineur ou à proximité de celui-ci. Il manque donc au contraire des sédiments pour contrecarrer le processus d'enfoncement. Ce phénomène est connu : il a été abondamment décrit et quantifié, selon l'ONEMA (2012). Il a notamment engendré des problèmes graves de stabilité de certains ponts (exemple connu du pont Wilson à Tours) et obligé à reprendre les fondations de la quasi-totalité des ponts sur la Loire et ses principaux affluents, mais aussi sur des côtières bretons et vendéens. Sur de plus petits cours d'eau, on n'a pas connaissance, pour les rivières de plaine, de cas où des retenues de seuils se trouveraient remplies de sédiments conduisant à un risque de sur-alluvionnement néfaste pour le cours d'eau en cas de suppression ou d'ouverture de vannages. Globalement, l'apport sédimentaire massif n'est pas à redouter. Mais l'examen préalable à la suppression d'un seuil doit comprendre un diagnostic sédimentaire de la retenue artificielle concernée (ONEMA, 2012)

Le dérasement total d'un seuil va se traduire par une érosion régressive dans le remous solide du seuil mais pas au-delà, sauf si un processus d'érosion régressive (lié à une autre cause) existe en aval du seuil à araser. Ce remous solide s'étend souvent, selon l'ancienneté de l'ouvrage et l'intensité du transport solide du cours d'eau, très au-delà du remous liquide (Malavoi, 2010).

### 2.3.2. Effets sur la recharge/décharge des nappes

Les mêmes principes hydrogéologiques de base qui se rapportent à l'augmentation des niveaux d'eau souterraine après la construction de la retenue (Heilweil et al., 2005, dans l'étude de Berthelote, 2013) suggéreraient que les niveaux du réservoir diminueraient jusqu'aux niveaux antérieurs à l'endiguement suite à l'enlèvement d'un barrage. À l'exception de quelques études sur les barrages de castors qui ont documenté des réductions des niveaux d'eau souterraine après leur suppression (Butler et Malanson, 2005 ; Chen et Chen, 2003 ; Mertes, 1997 ; Naiman et al., 1988; Westbrook et al., 2006; Woo et Waddington, 1990), seul un petit nombre d'études a examiné comment les barrages modifient les échanges hyporhéiques, en mettant peu l'accent sur tout lien avec la position de la nappe d'eau souterraine (Alexander et Caissie, 2003 ; Dahm et al., 1998 ; Hayashi et Rosenberry, 2002 ; Hendricks et White, 1991 ; Palmer, 1993 ; Pusch et al., 1998 ; Stanford, 1998 ; Stanford et Ward, 1993 ; Valett et al., 1990, dans l'étude de Berthelote, 2013).

La présence d'un seuil relève la ligne d'eau et donc le niveau d'eau dans la nappe d'accompagnement, sur une portion du cours. Schématiquement on peut distinguer deux cas de figure :

- si le sous-sol aux alentours du cours d'eau est perméable, le niveau dans la nappe et dans le cours d'eau s'équilibre facilement et la ligne de piézométrie est horizontale (réservoir transmissif) : le cours d'eau peut influencer sur le niveau piézométrique assez loin dans les terres, en fonction de la hauteur du seuil ;
- si le sous-sol aux alentours du cours d'eau est peu perméable, le cours d'eau influence difficilement sur le niveau piézométrique sinon à proximité des berges.

La suppression du seuil aura un impact très localisé dans le second cas alors que, dans le premier cas, l'impact pourra être plus significatif en particulier sur les débits des ouvrages dans les champs captants alluviaux, puisque le débit d'appel au cours d'eau sera réduit après la diminution de la hauteur mouillée.

Cependant, cette situation peut être inversée par le dépôt des fines au fond de la retenue et sur les berges et par le colmatage qu'il engendre. Le colmatage est parfois tel que le niveau de l'eau dans la nappe d'accompagnement sera déterminé non pas par le niveau d'eau à l'amont du seuil, mais par celui au pied de l'ouvrage.

Si le seuil jouait un rôle d'augmentation du niveau de la nappe et de sa stabilité, il est très probable que son dérasement se traduise par un retour à un niveau de nappe naturel (c'est à dire plus bas). Ce retour peut être pénalisant si certains usages, comme des puits de captage AEP par exemple, se sont greffés sur un niveau de nappe haute. Malavoi (2010) préconise une étude préalable qui vérifiera, par des mesures adaptées, qu'il existe bien une relation directe entre le seuil, sa retenue et le niveau de la nappe. Malavoi (2010) précise que ces approches peuvent être réalisées par des mesures in situ (installation de piézomètres et suivi sur une ou deux années avec et sans ouverture des vannes permettant de vidanger la retenue) ou au moyen de modèles nappe/riivière intégrant notamment la conductivité hydraulique.

En cas d'effet avéré, Malavoi (2010) préconise une étude qui vérifiera si le dérasement se traduit réellement par une perte d'usage (il est parfois possible de descendre les puits de quelques mètres) et proposer dans ce cas des mesures compensatoires, réductrices ou une solution alternative au dérasement.

## 2.4. EXEMPLES DE SUPPRESSION DE SEUILS

### 2.4.1. Le seuil sur la Briance

Selon le site de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, le seuil de la cristallerie de Saint Paul - Emaux de Soyer, entreprise de 10 salariés, constituait un obstacle 55 mètres de long et 1,4 mètre de haut (Figure 13).

L'entreprise « Cristallerie de Saint Paul - Emaux de Soyer » a décidé avec l'appui du syndicat du bassin de la Vienne de supprimer le seuil de l'ancien moulin de Saint-Paul-des-Ribes à Condat-sur-Vienne (87).



Figure 13 : Suppression du seuil de la cristallerie de Saint Paul sur la Briance (source : site de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne)

Selon le site de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, ce seuil n'avait plus d'utilité et il constituait un obstacle à la circulation des poissons et des sédiments de la rivière : la Briance. De plus, l'entreprise qui produit des émaux bijoutiers pour cuivre, argent et or, avait un projet d'agrandissement.

Selon le site de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, ce type de projet montre qu'il est possible de concilier vie économique locale et bon fonctionnement des milieux aquatiques. Il permet à la fois de résoudre plusieurs problèmes environnementaux et de sécurité publique, de valoriser la rivière et son aspect paysager et récréatif, tout en étant bénéfique pour l'avenir d'une entreprise. Grâce à ces travaux, l'entreprise a gagné de la place et a pu s'agrandir.

### 2.4.2. Le seuil sur la Ramberge

Selon le site de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, à Saint Ouen-les-Vignes, en Indre-et-Loire, le syndicat intercommunal pour l'entretien et l'aménagement de la Remberge a supprimé un seuil (Figure 14), à l'origine construit pour alimenter en eau une cimenterie désormais fermée. D'une hauteur d'environ un mètre, il représentait un obstacle à la libre circulation des poissons et des sédiments et provoquait un colmatage du fond du cours d'eau en amont de l'ouvrage. Cela induisait une uniformisation et une perte des habitats de reproduction, notamment pour la truite. Et cela créait une érosion menaçant la stabilité de la berge. L'ouvrage a été arasé, le lit du cours d'eau resserré en amont afin de limiter l'abaissement de la ligne d'eau, et les berges ont été retalutées en pentes douces. Selon le site de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, ces travaux ont amélioré la qualité piscicole de la Remberge. Des pêches régulières ont permis de mesurer une amélioration progressive et l'atteinte d'une bonne qualité piscicole, selon le site de l'Agence Loire-Bretagne, notamment marquée par le retour de la truite.



Figure 14 : Suppression d'un seuil sur la Remberge à Saint-Ouen-les-Vignes (37)

(source : site de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne)

### 2.4.3. Le seuil sur la Bave

Selon le site des zones humides, le seuil de Martinet est un ancien seuil de moulin, haut de 3 m et qui n'a plus d'usages. Le seuil du Martinet a été effacé totalement. Les sédiments accumulés en amont de la retenue ont servi à obstruer le canal d'amenée vers les bâtiments attenants. L'effacement a permis de décroiser un tronçon de 15 km de linéaire sur la Bave, désormais accessible à la fraie des espèces piscicoles. La destruction du barrage n'a pas entraîné d'érosion régressive et n'a engendré aucun dysfonctionnement, ni du régime hydrologique ni des conditions morphologiques du cours d'eau, si ce n'est la chute de quelques arbres à l'amont provoquée par l'abaissement de la ligne d'eau. L'absence de suivi scientifique empêche toutefois la quantification du gain écologique. On observe cependant l'apparition de radiers et de zones courantes ainsi que le retour d'une diversité de faciès (alternance radier-mouille) au niveau de l'ancienne retenue et plus en amont.



Figure 15 : Suppression du barrage du Martinet (source : ONEMA)

### 2.4.4. Modélisation d'une suppression de seuil en Alaska

Un bureau d'études américain (Show Environmental, 2006) a réalisé une étude sur l'effet de la suppression de seuil sur le niveau de la nappe alluviale en Alaska, mettant en œuvre une modélisation. De fortes incertitudes sur les paramètres de calage du modèle et notamment la perméabilité de l'aquifère, les ont conduits à tester plusieurs cas de figure. Il ressort qu'en présence du seuil, plus la perméabilité augmente, moins l'effet de la retenue joue sur le niveau de la nappe. Finalement, pour toutes les valeurs de perméabilité le niveau de la nappe diminue au droit de l'ouvrage après effacement. Cependant, ces changements n'apparaissent qu'à proximité de l'ouvrage. A 150 mètres de l'ouvrage, à l'amont comme à l'aval, le niveau de la nappe est le même dans une configuration avec ou sans seuil. Pour un seuil de 1,5 m sur un

cours d'eau de 15 mètres de large à l'amont de la retenue, avec un débit moyen de  $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$ , l'affaissement maximal de la nappe est de  $0,54 \text{ m}$  après arasement, avec une perméabilité de  $30 \text{ m/j}$  (Malavoi, 2011). Les courbes piézométriques sont en pieds. (a) niveau de la nappe avec seuils existants (traits gris au niveau du point MP-4) et (b) après suppression des seuils. L'affaissement est localisé mais observé en aval également (Figure 16).

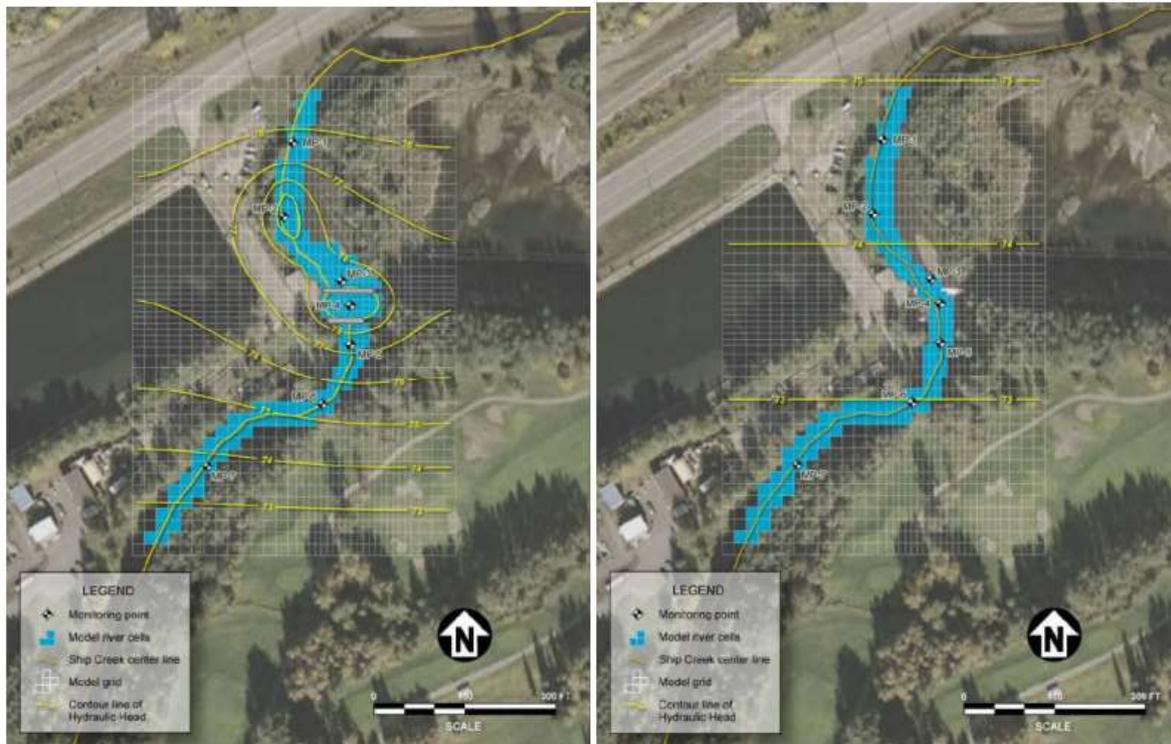


Figure 16 : Exemple de modélisation des effets d'une suppression de seuil sur le niveau de la nappe d'accompagnement (Show environmental, 2006, dans l'étude de Malavoi, 2011)

#### 2.4.5. Conséquences de suppressions de seuils aux Etats-Unis

United States Army Corps of Engineers' Dam Removal Research Office, qui est responsable de toute la surveillance du retrait des barrages aux États-Unis ; American Rivers, une organisation à but non lucratif dédiée à la protection et à la restauration des rivières d'Amérique du Nord ; Le centre d'échange d'informations sur les suppressions des barrages de l'Université de Californie ; et Oregon States' Dam Removal Listserv font état du peu d'information sur les échanges entre l'eau superficielle et les eaux souterraines lors des suppressions de seuil.

Un village du centre du Vermont, aux Etats-Unis, a connu une pénurie d'eau à la suite de la suppression d'un barrage (Pyle, 1995, selon l'étude de Berthelote, 2013), ce qui a amené la Federal Energy Regulatory Commission (FERC) à autoriser le village alimenté en eaux souterraines à acheter le contrôle d'un deuxième barrage dont le déclassement était prévu pour empêcher son retrait (Graf, 2002, selon l'étude de Berthelote, 2013).

Plus récemment, des puits se sont asséchés suite au retrait du barrage de Condit de 39 m, sur la rivière White Salmon à Washington, en octobre 2011 (Learn, 2011, selon l'étude de Berthelote, 2013). Les propriétaires ont demandé à la PacifiCorp Power Company qui détenait le barrage, une contrepartie financière suite à leur perte d'approvisionnement en eau souterraine locale. L'Étude d'impact environnementale (EIE) du projet de la suppression du barrage de Condit indiquait que « des impacts négatifs importants et inévitables n'ont pas été

identifiés en ce qui concerne les eaux souterraines » (Sandison, 2010, selon l'étude de Berthelote, 2013).

Suite à cela, l'EIE du projet de suppression du barrage Finesville de 2,75 m sur la rivière Lower Musconetcong dans le New Jersey indique qu'une « baisse potentielle de la nappe phréatique peut entraîner une baisse des niveaux d'eau dans certains puits » (USDA, 2010, selon l'étude de Berthelote, 2013).

L'EIE du projet de suppression du barrage Gold Ray (11 m) sur la rivière Rogue en Oregon indiquait que « les puits en amont du barrage pourraient être affectés par des niveaux d'eau plus bas » (NMFS, 2010, selon l'étude de Berthelote, 2013).

Au cours de l'arasement des barrages Wadsworth de 6 m et du lac Sterling de 4,4 m dans le bassin hydrographique du Mantua au New Jersey, plusieurs résidents ont noté que le niveau de la nappe phréatique avait diminué à la suite de la baisse des niveaux des réservoirs, et ils se sont dits préoccupés par la nécessité d'approfondir les puits après la suppression complète des barrages (Wyrick et al., 2009, selon l'étude de Berthelote, 2013).

Le retrait proposé du barrage Rodman (11 m) sur la rivière Ocklawaha en Floride était accompagné d'une étude pour déterminer les impacts du retrait du barrage sur les niveaux des eaux souterraines, y compris les effets sur les niveaux d'eau dans puits résidentiels, rejets de sources et niveaux d'eau dans les lacs et les zones humides avoisinants (Shuman, 1995, selon l'étude de Berthelote, 2013). Un modèle numérique des eaux souterraines a été développé pour déterminer les rendements des pompages des eaux souterraines après le retrait du barrage, mais n'a pas spécifiquement abordé les impacts sur le niveau des eaux souterraines ou les impacts sur l'échange hyporhéique (Hall, 2005, selon l'étude de Berthelote, 2013).

Aux États-Unis, certains auteurs estiment que des études d'impacts sur les eaux souterraines avant une suppression de retenue permettraient d'éviter un certain nombre de litiges coûteux (Bowman et al., 2002; Bowman, 2002, selon l'étude de Berthelote, 2013). Les questions juridiques de responsabilité sont complexes et impliquent souvent des réglementations contradictoires de plusieurs agences (locales, tribales, étatiques et fédérales).

#### **2.4.6. Modèles conceptuel de relations nappes-rivière dans un contexte naturel, avec un seuil ou après suppression du seuil**

Berthelote (2013) a développé un modèle conceptuel qui a permis de représenter des tronçons de rivière naturels, endigués et restaurés situés dans des zones de vallées étroites, larges ou de plaines, pour les cas de nappe élevée, dont le niveau est supérieur au niveau de la rivière (Figure 17, version originale en annexe 2) et de nappe basse, dont le niveau est inférieur au niveau de la rivière (Figure 18, version originale en annexe 2). Selon Berthelote (2013), un système de vallée étroite aura une plaine inondable étroite qui contiendra des sédiments à grains grossiers, avec une topographie de hautes terres escarpée et un fort gradient longitudinal du lit de la rivière. Les barrages placés dans de tels contextes remplissent souvent la vallée de la rivière. La plaine a généralement un relief beaucoup plus faible. Les sédiments de la plaine inondable contiennent de plus grandes quantités de matériaux plus fins et le gradient longitudinal du lit de la rivière est plus progressif. Les ouvrages construits dans ces contextes sont souvent plus larges que hauts et remplissent partiellement la plaine inondable. Une augmentation de la surface mouillée et une augmentation du niveau rivière/réservoir agiront généralement sur une augmentation locale des niveaux d'eau souterraine. La réduction potentielle de sédiments en aval de l'ouvrage provoquera une érosion des berges de la rivière, dans certains contextes ; et potentiellement une augmentation des fuites dans le lit entraînant une augmentation des niveaux d'eau souterraine (Berthelote, 2013).

Selon le modèle de Berthelote (2013), immédiatement après la suppression d'un barrage, une partie des sédiments accumulés dans le réservoir migrera vers l'aval et se déposera dans le chenal, provoquant une diminution des échanges d'eau de surface avec les eaux souterraines

et un changement des propriétés du chenal, augmentant potentiellement le risque d'inondation en aval.

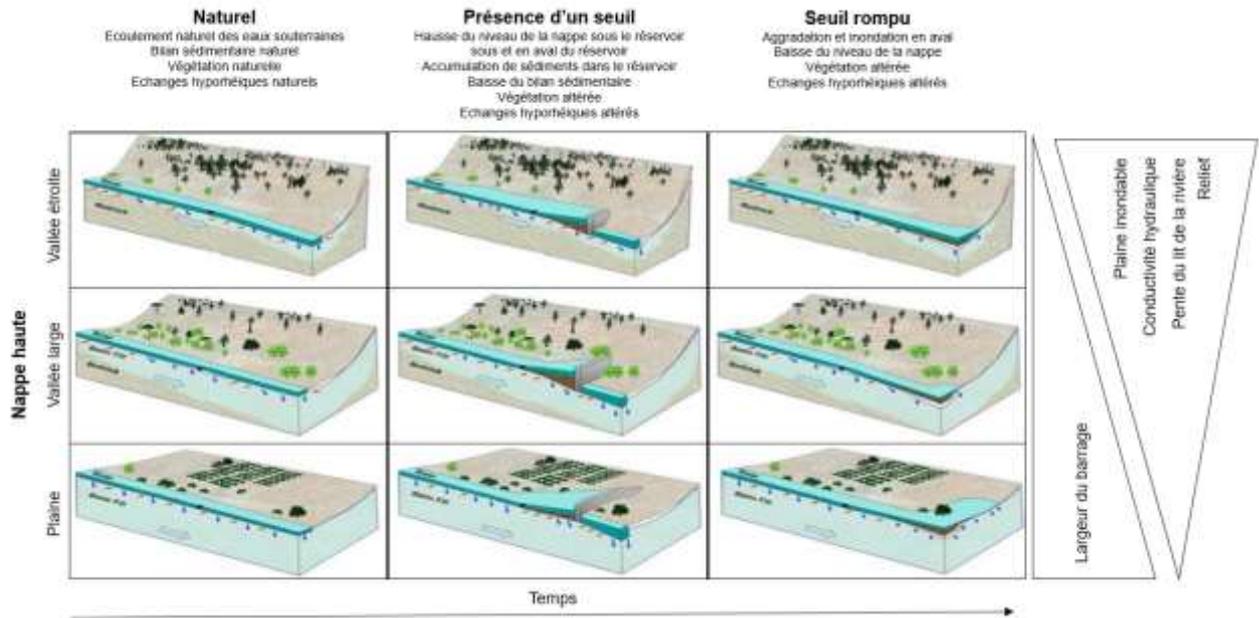


Figure 17 : Modèles conceptuels pour les aquifères de sable et de gravier non consolidés dans une vallée étroite, une vallée large et une plaine dans les conditions naturelles, avec un seuil et immédiatement après la suppression d'un seuil pour une nappe haute (Berthelote, 2013)

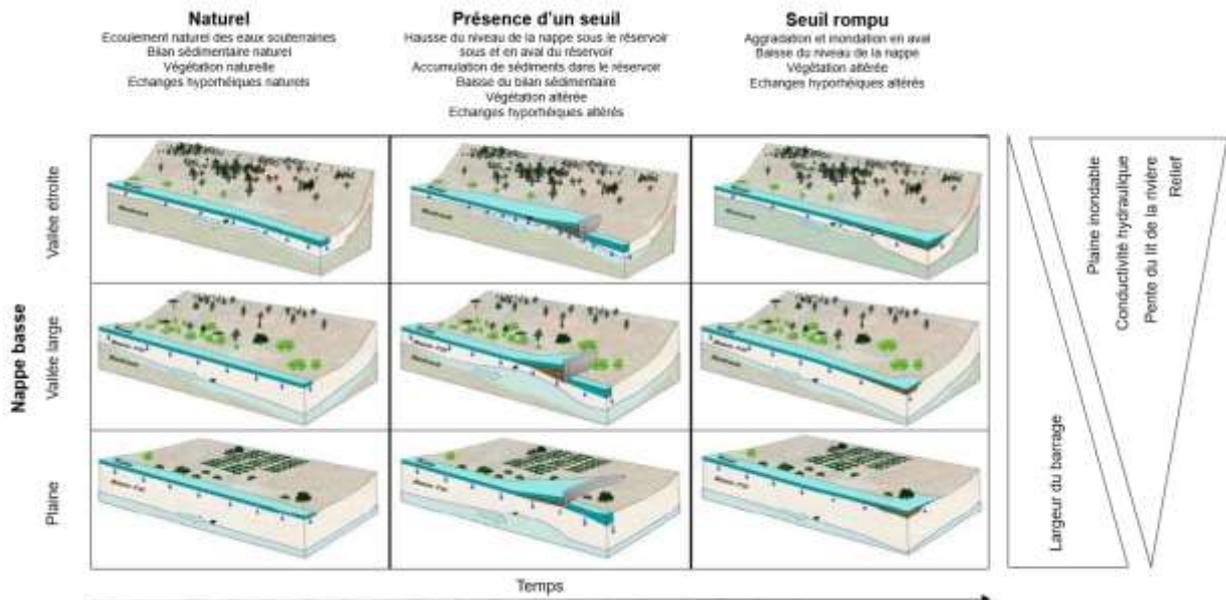


Figure 18 : Modèles conceptuels pour les aquifères de sable et de gravier non consolidés dans une vallée étroite, une vallée large et une plaine dans les conditions naturelles, avec un seuil et immédiatement après la suppression d'un seuil pour une nappe basse (Berthelote, 2013)

## 2.5. ETUDES PREALABLES A L'EFFACEMENT D'UN OUVRAGE

L'étape essentielle dans la réflexion préalable à la suppression d'un ouvrage est de correctement inventorier les usages actuels et leur évolution respective, et de les analyser pour apprécier leur compatibilité avec les objectifs du projet. Le projet de suppression de

barrage influera sur chacun de ceux-ci, de sorte qu'une concertation préalable avec tout ou partie de ces usagers est indispensable pour en définir la pertinence.

L'effacement d'un seuil est un cas particulier d'aménagement de la rivière. Un tel projet résulte généralement d'une modification des usages de la rivière, lorsque de nouveaux usages supplantent des usages plus traditionnels (Grier, 2003). La suppression de la chute d'eau peut avoir plusieurs motivations : suppression d'un obstacle à la circulation des poissons, déclassement d'un ouvrage devenu obsolète, remplacement de deux ou plusieurs seuils par un seul de plus haute chute.

Selon Grier (2003), d'un point de vue technique, la suppression d'un seuil peut être aussi complexe que la construction d'un nouvel ouvrage. Le démantèlement est une opération délicate qui demande une étude hydraulique préalable. En effet le retrait d'un ouvrage, même de petite dimension peut avoir des conséquences sur les parties amont et aval avec, par exemple, l'apparition de phénomène d'érosion régressive et progressive.

Les conséquences de cette suppression sur la gestion des lignes d'eau sont d'ordre (Grier, 2003) :

- hydraulique : analyse des lignes d'eau pour les différents débits après suppression du seuil ;
- morphodynamique : influence des nouvelles lignes d'eau sur l'évolution morphodynamiques de la rivière (augmentation des vitesses dans le bief amont, mobilisation des sédiments accumulés dans la retenue, instabilité temporaire du profil en long de la rivière) ;
- hydrogéologique : abaissement de la nappe ;
- esthétique : toute modification de la ligne d'eau pose bien évidemment la question du traitement adéquat du nouvel aspect de berges, du nouveau paysage. Le devenir des plantations existantes, la nature, le choix des végétaux de remplacement ;
- environnemental : suppression du plan d'eau amont et modification des écosystèmes, remise en mouvement des sédiments ;
- modification des habitudes.

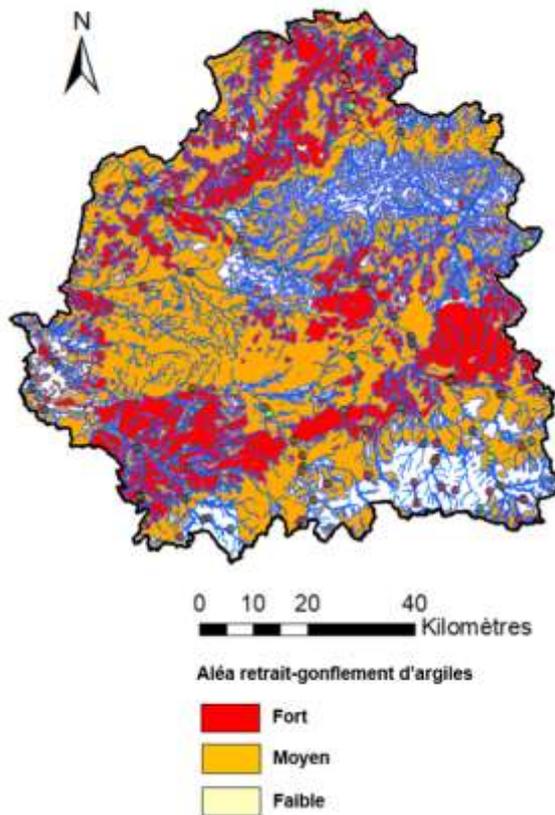


Figure 19 : Carte d'aléas retrait-gonflement d'argiles (BRGM)

Malavoi préconise d'une part d'étudier les relations entre le niveau de la nappe et celui de la retenue en suivant par exemple les niveaux piézométriques avant et après vidange totale ou partielle de la retenue, dans le cas où une vidange temporaire est possible ; d'autre part, de réaliser une modélisation hydrogéologique de la zone en configuration avec et sans seuil, en période de hautes et basses eaux.

Un risque de déformation géotechnique des bâtiments le long de la retenue est à mettre en relation avec deux paramètres : la présence d'argile dans le sous-sol et le type d'échange entre la nappe et la rivière (Malavoi, 2011). Le BRGM propose une carte d'aléa retrait-gonflement d'argiles sur toute la France, afin de tenter de diminuer à l'avenir le nombre de sinistres causés par ce phénomène de retrait-gonflement.

En cas de risque avéré, dû à une forte probabilité de présence d'argiles dans le sol et un effet du seuil sur le niveau de la nappe d'accompagnement, Malavoi préconise la réalisation d'une étude géotechnique complémentaire.

Selon Roland-Meynard et al. (2019), il n'existe pas à ce jour de méthode standardisée voire même définie dans la bibliographie pour l'évaluation des effets des opérations de restauration de cours d'eau sur les échanges nappes/rivières. Dans le cas d'un effacement d'ouvrage par exemple, il s'agira avant tout de suivre l'évolution du niveau de la nappe et de s'assurer que les usages de celle-ci peuvent être maintenus.

Roland-Meynard et al. (2019) préconisent en premier lieu, de vérifier sur une emprise fonctionnelle, sur les deux rives, la présence ou non d'une nappe alluviale sur la base d'une analyse sommaire reposant sur une visite de terrain et l'analyse de documents existants (carte géologique montrant que le cours d'eau coule sur une roche aquifère - Fz - exploitations de la nappe par pompages et puits...). Cette approche doit permettre de déterminer s'il existe une nappe potentiellement connectée au cours d'eau.

Si la présence d'un aquifère, susceptible d'être en connexion avec le cours d'eau, est avérée, Roland-Meynard et al. (2019) préconisent de rechercher la présence d'ouvrages (puits, forages, piézomètres) dans la zone d'emprise fonctionnelle pouvant permettre de mesurer des niveaux de nappe et/ou de prélever des eaux souterraines. Les principaux ouvrages sont bancarisés dans la base de données du sous-sol du BRGM et des coupes géologiques associées peuvent être disponibles. Les points d'eau disposent d'informations supplémentaires stockées dans la banque de données ADES (données de hauteur d'eau et/ou de qualité d'eau suivant les points).

Roland-Meynard et al. (2019) rappellent l'existence des systèmes d'information pour la gestion des eaux souterraines régionaux (SIGES), mettant à disposition des données à l'échelle plus locale.

Cette recherche permettra de connaître la nature du sous-sol et l'altitude du toit de la nappe dans certains cas, voire l'évolution du niveau piézométrique en fonction des conditions hydrologiques afin de caractériser en première approche le fonctionnement hydrogéologique du secteur.

Selon Roland-Meynard et al. (2019), cette analyse préalable doit ainsi permettre de produire une première approche de l'existence des échanges nappes/rivières sur le secteur d'étude dans le but de dimensionner un suivi plus fin avant/après travaux, en particulier par le biais de mesures piézométriques réalisées sur des ouvrages existants et/ou à mettre en place pour les besoins du suivi.

Pour comprendre l'évolution des échanges nappe-rivière, Roland-Meynard et al. (2019) proposent de suivre le niveau de la nappe à proximité du site et le niveau du cours d'eau à différents moments de l'année. Selon Roland-Meynard et al. (2019), la fréquence et la période de suivi dépend des objectifs donnés à ce suivi : en cas de risque lié à l'abaissement, le comportement de la nappe sera principalement suivi à l'étiage ; en cas de suivi de l'augmentation du niveau de la nappe, le suivi pourra être réalisé lorsque les zones humides riveraines sont en eau. En cas d'enjeux forts, il est possible de suivre les piézomètres toute l'année. A minima, Roland-Meynard et al. (2019) préconisent quatre campagnes de mesures : deux en saison hivernale, et deux en saison estivale ; et précisent que dans les deux cas, une mesure peu après un épisode pluvieux ; la seconde à distance d'événements pluvieux.

## 3. Conclusion

### 3.1. IMPACT DE L'EFFACEMENT DES SEUILS SUR LES NAPPES

L'impact de l'effacement des seuils sur les nappes a très peu été étudié. Les références bibliographiques sur le sujet sont peu nombreuses, alors qu'elles sont très abondantes sur les autres critères d'ordre géomorphologique ou biologique (mobilisation de la charge sédimentaire, érosion du profil en long, qualité de l'eau, biodiversité, etc).

Selon la position relative du niveau d'eau dans la rivière et de la surface libre dans l'aquifère, un débit peut être échangé : depuis un tronçon de rivière vers l'aquifère, ou réciproquement depuis l'aquifère vers la rivière. Aucun échange n'a lieu entre la rivière et l'aquifère dans le cas d'une étanchéification volontaire du tronçon. Ces trois types de relation peuvent se rencontrer le long d'un même cours d'eau.

L'abaissement de la ligne d'eau consécutif à l'effacement d'un seuil aura donc des impacts variables en fonction de la situation d'équilibre mise en place par le seuil existant. Mais les altitudes respectives de la nappe et du cours d'eau ne sont pas les seuls critères à entrer en jeu : la perméabilité de l'aquifère et celle des dépôts vaseux sur les berges ou dans le lit du cours d'eau joue également un rôle dans l'étendue de l'impact (de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres perpendiculairement au cours d'eau). La remobilisation des sédiments du cours d'eau et l'érosion régressive qui parfois en découle modifie la relation nappe rivière en augmentant la perméabilité du lit et des berges.

Quelques cas présentés dans cette étude bibliographique font état d'assèchements de puits de la nappe d'accompagnement suite à la suppression de barrages aux Etats-Unis (mais il s'agit de barrages dont la hauteur hydraulique atteint la dizaine de mètres). D'autres prennent en compte ce risque en resserrant les berges pour limiter l'abaissement de la ligne d'eau. Toutefois, dans la grande majorité des cas, il n'y a ni anticipation ni contrôle de la nappe pendant et après la suppression du seuil.

### 3.2. RECOMMANDATIONS DU BRGM

Un projet de construction, de remplacement ou de suppression d'un seuil ou d'une série de seuils devrait toujours être précédé d'une étude d'impact préalable. Les actions doivent être envisagées au cas par cas, rivière par rivière, ouvrage par ouvrage, de façon à choisir les solutions les plus pertinentes pour la rivière, ses usages et ses usagers. Les impacts locaux doivent être analysés projet par projet, et les projets adaptés de manière à minimiser leurs effets secondaires.

Si les références bibliographiques sur les suppressions de seuils sont nombreuses, peu d'études spécifiques de leurs impacts sur les eaux souterraines ont été publiées. Il apparaît indispensable d'approfondir les connaissances scientifiques dans ce domaine. Il importe de disposer de sites pilotes, de configurations variées, afin d'acquérir de la donnée et élaborer des modèles conceptuels.

Le BRGM préconise une étude hydrogéologique préalable à chaque projet de suppression de seuil afin d'élaborer un modèle conceptuel :

- définition et lithologie des aquifères, types d'écoulement (poreux/fissuré/karstique) au droit du seuil
- mesures des niveaux d'eau

- inventaire des chroniques piézométriques et des cartes piézométriques existantes ;
  - en période d'étiage et en période de crue, mesures piézométriques, en plusieurs points plus ou moins éloignés du seuil.
  - mesures du fil d'eau. Les mesures du déphasage et de la différence d'amplitude entre les variations limnimétriques et piézométriques permettent le calage de la diffusivité hydraulique.
- campagnes de jaugeages en amont et en aval du seuil, réalisées simultanément aux mesures du fil d'eau et piézométriques ;
  - collecte des paramètres hydrodynamiques ;
  - inventaire des prélèvements anthropiques : irrigation agricole, AEP, industrie ;
  - mesures du débit des sources à proximité ;

Sur des sites pilotes, le BRGM préconise de réaliser ces mesures avant et après suppression de seuil afin de disposer de données permettant de tester différents outils d'évaluation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes associés.

## 4. Bibliographie

Alexander M.D., Caissie D. (2003). Variability and comparison of hyporheic water temperatures and seepage fluxes in a small atlantic salmon stream1: *Ground Water*, v. 41, p. 72-82.

Aseltyne T., Rowe H., Fryar A. (2006), Stable isotopic fingerprint of a hyporheic–hypolentic boundary in a reservoir: *Hydrogeology Journal*, v. 14, p. 1688-1695.

Auterives C. Allier D., Pinson S. (2012). Proposition d'une méthodologie d'identification du Lien entre eau souterraine et écosystèmes terrestres. Rapport final BRGM/RP-61677-FR, 85 p.

Barraux, R. et al. (2009). Restauration écologique et paysagère des rivières à seuils : contexte social et culturel. Retour d'expérience (bassins de la Sèvre Nantaise et du Thouet, ouest de la France). *Ingénieries – EAT – N° spécial – p 17 à 30*

Batalla R.J., Gómez C.M., Kondolf G.M. (2004). Reservoir-induced hydrological changes in the ebro river basin (NE Spain): *Journal of Hydrology*, v. 290, p. 117-136.

Baxter R.M. (1977), *Environmental effects of dams and impoundments: annual review of ecology and systematics*, v. 8, p. 255-283.

Bayley P.B. (1995). Understanding large river-floodplain ecosystems: *Bioscience*, v. 45, p. 153-158.

Bednarek A.T. (2001). Undamming rivers: A review of the ecological impacts of dam removal. *Environmental Management*. 27(6): 803–814.

Berthelote, A.R. (2013). Forecasting groundwater reponses to dam removal. Graduate Student Theses, Dissertations, & Professional Papers. 1402.

Beyer P.J. (2005). Introduction to the special issue: dams and geomorphology: *Geomorphology*, v. 71, p. 1-2.

Bowman M., Higgs S., Maclin E., McClain S., Sicchio M., Souers A., Johnson S., Graber B. (2002). Exploring dam removal: a decision-making guide, American Rivers Trout Unlimited, p. 80.

Bowman M.B. (2002). Legal Perspectives on Dam Removal: *BioScience*, v. 52, p. 739-747.

Bushaw-Newton K.L., Hart D.D., Pizzuto J.E., Thomson J.R., Egan J., Ashley J.T., Johnson, T.E., Horwitz R.J., Keeley M., Lawrence J., Charles D., Gatenby C., Kreeger D.A., Nightengale T., Thomas R.L., Velinsky D.J. (2002). An integrative approach towards understanding ecological responses to dam removal: The Manatawny Creek study: *Journal of the American Water Resources Association*, v. 38, p. 1581-1599.

Butler D.R., Malanson G.P. (2005). The geomorphic influences of beaver dams and failures of beaver dams: *Geomorphology*, v. 71, p. 48-60.

Brunke M., Gonser T. (1997). The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater, *Freshwater Biology*, n° 37, p. 1-33.

- Brunke M. (1999). Colmation and depth filtration within streambeds: retention of particles in hyporheic interstices. *International Review of Hydrobiology*, 84 (2), pp. 99-117.
- Cantelli A., Wong M., Parker G., Paola C. (2007). Numerical model linking bed and bank evolution of incisional channel created by dam removal: *Water Resources Research*, v. 43, p. 1-16.
- Castany, G. (1965). Unicité des eaux de surface et des eaux souterraines, principe fondamental de la mise en valeur des ressources hydrologiques, *Hydrological Sciences Journal*, 10 : 3, pp. 22-30.
- Chen X., Chen X. (2003). Stream water infiltration, bank storage, and storage zone changes due to stream-stage fluctuations: *Journal of Hydrology*, v. 280, p. 246-264.
- Chin A., Harris D.L., Trice T.H., Given J.L. (2002). Adjustment of stream channel capacity following dam closure, Yegua Creek, Texas: *Journal of the American Water Resources Association*, v. 38, p. 1521-1531.
- Collier M., Webb R.H., Schmidt J.C. (1996). *Dams and Rivers: Primer on the Downstream Effects of Dams*, U.S. Geological Survey Circular 1126.
- Collin J.J. (2004). *Les eaux souterraines. Connaissance et gestion*. 170 p.
- Collins M., Lucey K., Lambert B., Kachmar J., Turek J., Hutchins E., Purinton T., Neils D. (2007). *Stream barrier removal monitoring guide*, Gulf of Main Council on the Marine Environment, Volume 2008, [www.gulfofmaine.org/streambarrierremoval](http://www.gulfofmaine.org/streambarrierremoval).
- Cui Y., Parker G., Braudrick C., Deietrich W.E., Cluer B. (2006). Dam Removal Express Assessment Models (DREAM). Part 1: Model development and validation: *Journal of Hydraulic Research*, v. 44, p. 291-307.
- Dahm C.N., Grimm N.B., Marmonier P., Valett H.M., Vervier P. (1998). Nutrient dynamics at the interface between surface waters and groundwaters: *Freshwater Biology*, v. 40, p. 427-451.
- Datry T., Dole-Olivier M.J., Marmonier P., Claret C., Perrin J.F., et al. (2008). La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau. *Ingénieries eau-agriculture-territoires, Lavoisier ; IRSTEA ; CEMAGREF*.
- Dendy F.E. (1968). Sedimentation In The nation's reservoirs: *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 23, p. 135-137.
- Descloux S. (2011). *Le colmatage minéral du lit des cours d'eau : méthode d'estimation et effets sur la composition et la structure des communautés d'invertébrés benthiques et hyporhéiques*. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard – Lyon I.
- DesGranges J.L., Rodrigue J., Tardif B., Laperle M. (1998), Mercury accumulation and biomagnification in ospreys (*Pandion haliaetus*) in the James Bay and Hudson Bay regions of Quebec: *Archives of Environmental Contamination & Toxicology*, v. 35, p. 330.
- Donati F., Touchart L., Bartout P. (2020). Les seuils en rivière transforment-ils les milieux lotiques en milieux lentiques ? *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, AERES.

- Doyle M.W., Stanley E.H., Harbor J.M. (2002). Geomorphic analogies for assessing probable channel response to dam removal: *Journal of the American Water Resources Association*, v. 38, p. 1567-1579.
- Doyle M.W., Stanley E.H., Harbor J.M. (2003a). Channel adjustments following two dam removals in Wisconsin: *Water Resources Research*, v. 39, p. 1011.
- Doyle M.W., Stanley E.H., Harbor J.M., Grant G.S. (2003b). Dam removal in the United States: Emerging needs for science and policy: *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, v. 84, p. 29-36.
- Doyle M.W., Stanley E.H., Orr C.H., Selle A.R., Sethi S.A., Harbor J.M. (2005). Stream ecosystem response to small dam removal: Lessons from the Heartland: *Geomorphology*, v. 71, p. 227-244.
- Duchame A, Fustec E. (2003). Les zones humides. Leurs capacités de dénitrification et de rétention des pesticides, Séminaire de Fontainebleau (AESN/SAGEP) - 24-25 juin 2003. Actions préventives sur les eaux souterraines : bilan et perspectives.
- Environment Agency (2005). Groundwater-surface water interactions in the hyporheic zone, Science Report SC030155/SR1, 65 p.
- Evans J.E., Levine N.S., Roberts S.J., Gottgens J.F., Newman D.M. (2002). Assessment using GIS And sediment routing of the proposed removal of Ballville dam, Sandusky River, Ohio: *Journal of the American Water Resources Association*, v. 38, p. 1549-1565.
- Evans J.E., Mackey S.D., Gottgens J.F., Gill W.M. (2000b). Lessons from a dam failure: The Ohio Journal of Science, v. 100, p. 121-131.
- Evans J.K., Gottgens J.F., Gill W.M., Mackey S.D. (2000c). Sediment yields controlled by intrabasinal storage and sediment conveyance over the interval 1842-1994: Chagrin River, Northeast Ohio, U.S.A: *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 55, p. 264.
- Farinacci A.J. (2009). Surface Water and Groundwater Exchanges in Fine and Coarse Grained River Bed Systems and Responses to Initial Stages of Dam Removal, Milltown, Montana. Graduate Student Theses, Dissertations, & Professional Papers. 10828.
- Faulkner D., McIntyre S. (1996). Persisting Sediment yields and sediment delivery changes: *Water Resources Bulletin*, v. 32, p. 817-829.
- Graf W.L. (2002). Dam removal: science and decision making, The H. John Heinz III Center for Science, Economics and the Environment, p. 236.
- Graf W.L. (2003). Dam removal research: status and prospects, in Graf, W.L., ed., The Heinz Center's Dam Removal Research Workshop: Warrenton, Virginia, The H. John Heinz III Center for Science, Economics and the Environment, p. 1-151.
- Graf W.L. (2005). Geomorphology and American dams: The scientific, social, and economic context: *Geomorphology*, v. 71, p. 3-26.
- Graf W.L. (2006). Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers: *Geomorphology*, v. 79, p. 336-360.

- Grams P.E., Schmidt J.C. (2005). Equilibrium or indeterminate? Where sediment budgets fail: Sediment mass balance and adjustment of channel form, Green River downstream from Flaming Gorge Dam, Utah and Colorado: *Geomorphology*, v. 71, p. 156-181.
- Grier M. (2003). Impact environnemental des seuils en rivière. Etude bibliographique.
- Grossi R. (2021). Amélioration de la connaissance de l'impact des prélèvements sur l'hydrodynamique des nappes d'accompagnement des cours d'eau. Rapport de stage.
- Hall G. (2005). Ocklawaha river water allocation study, in Greeneville Hall, P.D., ed.: Palatka, Florida, St. Johns River Water Management District.
- Hart D.D., Poff N.L. (2002). A special section on dam removal and river restoration: *BioScience*, v. 52, p. 653-655.
- Hayashi M., Rosenberry D.O. (2002). Effects of ground water exchange on the hydrology and ecology of surface water: *Ground Water*, v. 40, p. 309-316.
- Heilweil V.M. Susong, D.D., Gardner P.M., Watt D.E. (2005). Pre- and post-reservoir groundwater conditions and assessment of artificial recharge at Sand Hollow, Washington County, Utah, 1995-2005: Salt Lake City, Utah, U.S. Geological Survey.
- Hendricks S.P., White D.S. (1991). Physicochemical patterns within a hyporheic zone of a Northern Michigan River, with comments on surface water patterns: *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 48, p. 1645-1654.
- Hewitt L., Graber B., Lindloff S. (2001). Restoring the flow: improving selective small dam removal understanding and practice in Great Lakes States, small dam removal workshop & working meeting: Kohler, Wisconsin, p. 1-25.
- James L.A. (2005). Sediment from hydraulic mining detained by Englebright and small dams in the Yuba basin: *Geomorphology*, v. 71, p. 202-226.
- Kondolf G.M. (1998). Lessons learned from river restoration projects in California: *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 8, p. 39-52.
- Learn S. (2011). Well owners want Pacifi Corp to pay more for damage done by removal of Condit Dam, *The Oregonian*.
- Leopold L.B., Maddock T.M. (1954). The flood control controversy, Big dams, little dams, and land management.
- Lorang M.S., Aggett G. (2005). Potential sedimentation impacts related to dam removal: Icicle Creek, Washington, U.S.A: *Geomorphology*, v. 71, p. 182-201.
- Lytle D.A., Poff N.L. (2004). Adaptation to natural flow regimes: *Trends in Ecology & Evolution*, v. 19, p. 94-100.
- Magilligan F.J., Nislow K.H. (2005). Changes in hydrologic regime by dams: *Geomorphology*, v. 71, p. 61-78.
- Malard F., Ward J.V., Robinson C.T. (2000). An expanded perspective of the hyporheic zone, *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, n° 27, p. 431-437.

Malavoi J.R., Paris P. (2003). Stratégie d'intervention de l'Agence de l'Eau sur les seuils en rivière. Agence de l'Eau Loire-Bretagne.

Malavoi, J.-R. (2010). Petits ouvrages transversaux. Quelques éléments techniques sur les avantages et inconvénients de l'effacement. Les connaître pour mieux les gérer. Colloque des 25-26 novembre 2010.

Malavoi J.R., Salgues D. (2011). Arasement et dérasement de seuils. Aide à la définition de Cahier des Charges pour les études de faisabilité Compartiments hydromorphologie et hydroécologie.

Manière L. (2013). Rapport de stage. Mise au point d'un protocole d'évaluation de l'impact des ouvrages transversaux sur la continuité sédimentaire dans le cadre d'une approche multiscalaire.

Marston R.A., Mills J.D., Wrazien D.R., Bassett B., Splinter D.K. (2005). Effects of Jackson Lake Dam on the Snake River and its floodplain, Grand Teton National Park, Wyoming, USA: *Geomorphology*, v. 71, p. 79-98.

Mertes L.A.K. (1997). Documentation and Significance of the Perirheic Zone on Inundated Floodplains: *Water Resources Research*, v. 33, p. 1749-1762.

Muth R.T., Crist L.W., LaGory K.E., Hayse J.W., Bestgen K.R., Ryan T.P., Lyons J.K., Valdez R.A. (2000). Flow and temperature recommendations for endangered fishes in the Green River Downstream of Flaming Gorge Dam. In: *Upper Colorado River Endangered Fish Recovery Program Final Report, Volume 48: Lakewood, Colorado*, p. 1-344.

Naiman R.J., Johnston C.A., Kelley J.C. (1988). Alteration of North American Streams by Beaver: *BioScience*, v. 38, p. 753-762.

Nislow K.H., Magilligan F.J., Fassnacht H., Bechtel D., Ruesink A. (2002). Effects of dam impoundment on the flood regime of natural floodplain communities in the Upper Connecticut River: *Journal of the American Water Resources Association*, v. 38, p. 1533-1548.

NMFS, N.M.F.S. (2010). Environmental Assessment For The Arra Rogue River Restoration - Gold Ray Dam Project: Jackson County, National Marine Fisheries Service, p. 110.

ONEMA (2012). Améliorer l'état écologique des cours d'eau. 18 questions, 18 réponses.

Palmer M.A. (1993). Experimentation in the Hyporheic Zone: Challenges and Prospectus: *Journal of the North American Benthological Society*, v. 12, p. 84-93.

Pennsylvania Organization for Watersheds and Rivers, American Rivers, Alliance for Aquatic Resources Monitoring, and Alliance for the Chesapeake Bay. (2004). *Citizen's Guide to Dam Removal Monitoring and Restoration: Harrisburg, PA* p. 1-36.

Petts G.E. (1984). *Impounded Rivers. Perspectives for Ecological Management: Chichester, John Wiley and Sons*, 326 p.

Petts G.E., Gurnell A.M. (2005). Dams and geomorphology: Research progress and future directions: *Geomorphology*, v. 71, p. 27-47.

Pinson S., Tillier L., Bourguine B., Sedan-Miegemolle O., Laurencelle M. (2019). Développement de méthodes permettant l'identification de la sensibilité des cours d'eau et la

variation des emprises des zones humides liées aux prélèvements dans les eaux souterraines sur le bassin Loire-Bretagne. Rapport final BRGM/RP-69287-FR, 219 p., 7 ann.

Pizzuto J. (2002). Effects of dam removal on river form and process: *BioScience*, v. 52, p. 683-691.

Poff N.L., Allan J.D., Bain M.B., Karr J.R., Prestegard K.L., Richter B.D., Sparks R.E., Stromberg J.C. (1997). The Natural Flow Regime: *BioScience*, v. 47, p. 769-784.

Poff N.L., Bledsoe B.P., Cuhaciyan C.O. (2006). Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: Geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems: *Geomorphology*, v. 79, p. 264-285.

Power M.E., Dietrich W.E., Finlay J.C. (1996). Dams and downstream aquatic biodiversity: potential food web consequences of hydrologic and geomorphic change: *Environmental Management*, v. 20, p. 887-895.

Pusch M., Fiebig D., Brettar I., Eisenmann H., Ellis B.K., Kaplan L.A., Lock M.A., Naegeli M.W., Traunspurger W. (1998). The role of micro-organisms in the ecological connectivity of running waters: *Freshwater Biology*, v. 40, p. 453-495.

Pyle M.T. (1995). Beyond fish ladders: dam removal as a strategy for restoring America's Rivers: *Stanford Environmental Law Journal*, v. 14, p. 97.

Rădoane M., Rădoane, N. (2005). Dams, sediment sources and reservoir silting in Romania: *Geomorphology*, v. 71, p. 112-125.

Rains M.C., Mount J.F., Larsen E.W. (2004). Simulated changes in shallow groundwater and vegetation distributions under different reservoir operations scenarios: *Ecological Applications*, v. 14, p. 192-207.

Renwick W.H., Smith S.V., Bartley J.D., Buddemeier R.W. (2005). The role of impoundments in the sediment budget of the conterminous United States: *Geomorphology*, v. 71, p. 99-111.

Roberts S.J., Gottgens J.F., Spongberg A.L., Evans J.E., Levine N.S. (2006). Integrated approach to assessing potential dam removals: An example from the Ottawa River: *Journal of Environmental Management*, Northwestern Ohio.

Rolan-Meynard M., Vivier A., Reyjol Y., Boutet-Berry L., Bouchard J., Mangeot P., Navarro L., Melun G., Moreira-Pellet B., Bramard M., Le Bihan M., Magand C., Leurent T., Vigneron T., Cagnant M., Bourrain X., Morel A., Kreutzenberger K. (2019). Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau.

Rowntree K.M., Dollar E.S.J. (1999). Vegetation controls on channel stability in the Bell River, Eastern Cape, South Africa: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 24, p. 127-134.

Sandison D. (2010). Condit Dam Removal Final Second Supplemental Environmental Impact Statement: Yakima. WA, Department of Ecology, p. 85.

Shaw Environmental, inc. (2006). The effect of dam removal on infiltration to the shallow water table beneath Ship creek. 19 p.

Shafroth P.B., Friedman J.M., Auble G.T., Scott M.L., Braatne J.H. (2002). Potential responses of Riparian vegetation to dam removal: *BioScience*, v. 52, p. 703-712.

- Schomburgk S., Lalot E., Maget P., Mardhel V., Martin J.C., Robelin C., Surdyk N. (2013). Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Bassin Loire-Bretagne. Délimitation des entités hydrogéologiques de niveau 3 en région Centre. Rapport final Mise à jour BDLISA Version 0. BRGM/RP-62231-FR, 88 p., 4 ann.
- Shuman J.R. (1995). Environmental considerations for assessing dam removal alternatives for river restoration: regulated rivers: Research & Management, v. 11, p. 249-261.
- Stanford J.A. (1998). Rivers in the landscape: introduction to the special issue on riparian and groundwater ecology: Freshwater Biology, v. 40, p. 402-406.
- Stanford J.A., Ward J.V. (1993). An ecosystem perspective of alluvial rivers: connectivity and the hyporheic corridor: Journal of the North American Benthological Society, v. 12, p. 48-60.
- Stanley E.H., Doyle M.W. (2002). A geomorphic perspective on nutrient retention following dam removal: BioScience, v. 52, p. 693-701.
- Thiéry D. (2020). Code de calcul MARTHE version 7.8 – Modélisation 3D des écoulements et des transferts dans les hydrosystèmes – Notice d'utilisation. Rapport BRGM/RP-69541-FR.
- USDA (2010). Environmental Assessment lower musconetcong river restoration project finesville dam vicinity: Somerset, New Jersey, USDA Natural Resources Conservation Service.
- Valett H.M., Fisher S.G., Stanley E.H. (1990). Physical and Chemical Characteristics of the Hyporheic Zone of a Sonoran Desert Stream: Journal of the North American Benthological Society, v. 9, p. 201-215.
- Vernoux J.F., Lions J., Petelet-Giraud E., Seguin J.J., Stollsteiner P., Lalot E. (2010). Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE, rapport BRGM/RP-57044-FR, 207 pages, 91 illustrations, 1 annexe.
- Westbrook C.J., Cooper D.J., Baker B.W. (2006). Beaver dams and overbank floods influence groundwater–surface water interactions of a Rocky Mountain riparian area: Water Resources Research, v. 42, p. 12.
- Williams G.P., Wolman M.G. (1984). The downstream effects of dams on alluvial rivers, United States Geological Survey.
- Woo M.-K., Waddington J.M. (1990). Effects of Beaver Dams on Subarctic Wetland Hydrology: Arctic, v. 43, p. 223-230.
- Wootton J.T., Parker M.S., Power M.E. (1996). Effects of Disturbance on River Food Webs: Science, v. 273, p. 1558-1561.
- World Commission on Dams (2000). Dams and Development: A New Framework For Decision-Making: London and Sterling, VA, Earthscan Publications Ltd, 404 p.
- Wyrick J.R., Rischman B.A., Burke C.A., McGee C., Williams C. (2009). Using hydraulic modeling to address social impacts of small dam removals in southern New Jersey: Journal of Environmental Management, v. 90, Supplement 3, p. S270-S278.

## Annexe 1

Le tableau ci-dessous recense les études réalisées entre 1977 et 2018, sur des seuils de dénivélé compris entre 1 et 2 mètres. Il provient du site <https://www.sciencebase.gov/catalog>.

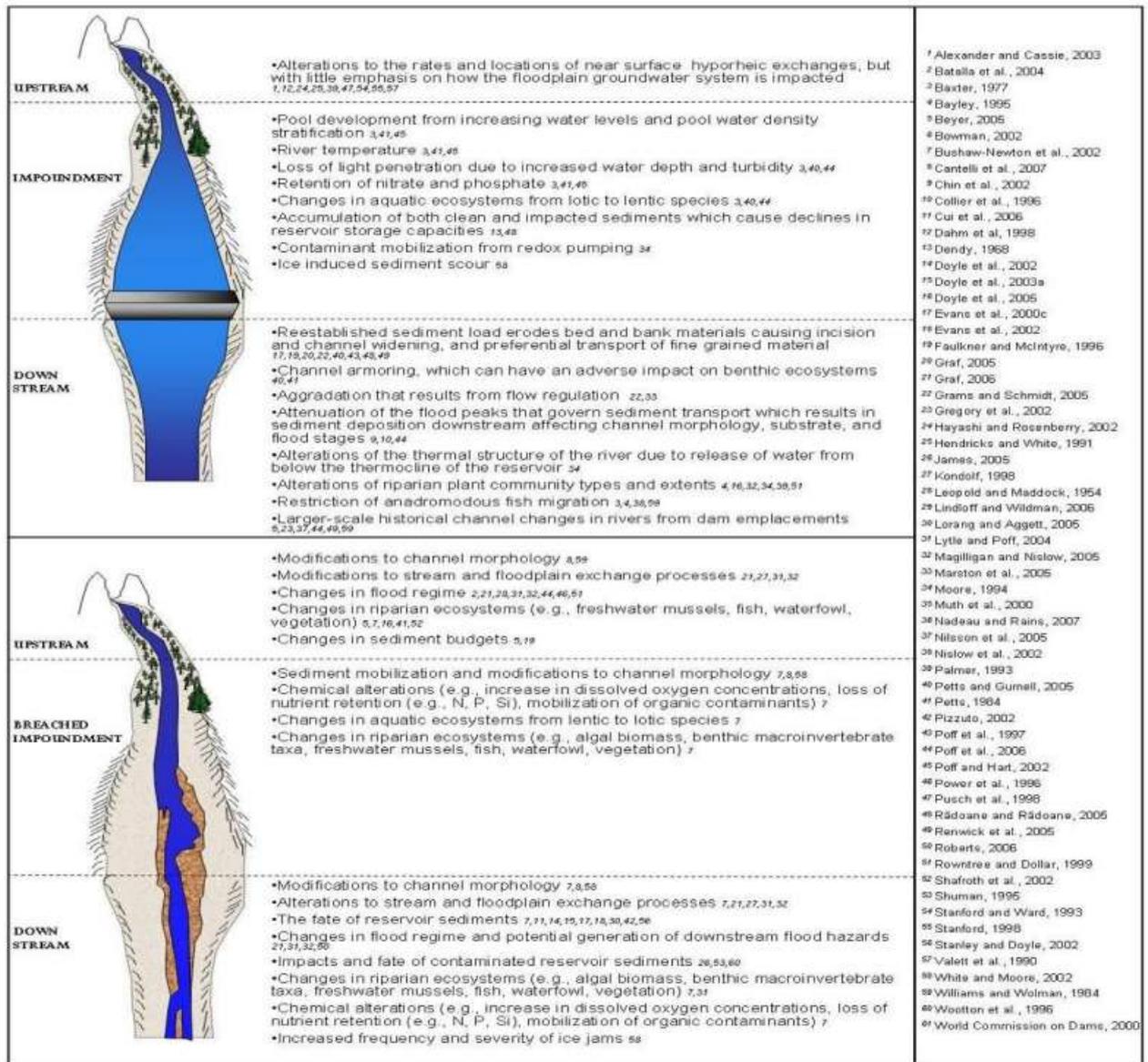
Nom du cours d'eau	Pays	Hauteur du seuil (m)	Etude	Auteur	Année de suppression du seuil
Looking Glass River	USA	1.4	Rehabilitation Potential of Dam Removal: Temporal Perspective from Michigan's Past Dam Removals	Burroughs, B. A.	1966
Looking Glass River	USA	1.4	Long-term implications of dam removal for macroinvertebrate communities in Michigan and Wisconsin Rivers, United States	Hansen, J. F. & Hayes, D. B.	1966
Pawtuxet River	USA	1.5	Assessing organic contaminant fluxes from contaminated sediments following dam removal in an urbanized river	Cantwell, M. G., Perron, M. M., Sullivan, J. C., Katz, D. R., Burgess, R. M. & King, J.	2011
Conodoguinet Creek	USA	1.8	Effects of Removing Good Hope Mill Dam on Selected Physical, Chemical, and Biological Characteristics of Conodoguinet Creek, Cumberland County, Pennsylvania.	Chaplin, J. J., Brighthill, R. A. & Bilger, M. D.	2001
Huron River	USA	1.5	Upstream channel changes following dam construction and removal using a GIS/remote sensing approach	Evans, J. E., Huxley, J. M. & Vincent, R. K.	2002
Gongneung River	Korea	1.5	Changes of river morphology and physical fish habitat following weir removal	Im, D., Kang, H., Kim, K.-H. & Choi, S.-U.	2006
Gongneung River	Korea	1.5	Effects of low-head dam removal on benthic macroinvertebrate communities in a Korean stream	Kil, H. K. & Bae, Y. J.	2006
Fox River	USA	1.7	Changes in macroinvertebrate and fish assemblages in a medium-sized river following a breach of a low-head dam	Maloney, K. O., Dodd, H. R., Butler, S. E. & Wahl, D. H.	2003
Big Beaver Creek	USA	1	Sediment and nutrient loads from stream corridor erosion along breached millponds	Merritts, D., Walter, R. & Rahnis, M.	1972
Boulder Creek	USA	1	Downstream benthic responses to small dam removal in a coldwater stream	Orr, C. H., Kroiss, S. J., Rogers, K. L. & Stanley, E. H.	2003
Boulder Creek	USA	1	Channel morphology and P uptake following removal of a small dam	Orr, C. H., Rogers, K. L. & Stanley, E. H.	2003

Boulder Creek	USA	1	Temporary Downstream Benthic Responses to Small-dam Removal	Rogers, K. L.	2003
Boulder Creek	USA	1	Effects of dam removal on brook trout in a Wisconsin stream	Stanley, E. H., Catalano, M. J., Mercado-Silva, N. & Orr, C. H.	2003
Eightmile River	USA	1.5	Fish Assemblage Response to a Small Dam Removal in the Eightmile River System, Connecticut, USA	Poulos, H. M., Miller, K. E., Kraczkowski, M. L., Welchel, A. W., Heinemann, R. & Chernoff, B.	2007
Gongneung River	Korea	1.5	Effects of a low-head dam removal on river morphology and riparian vegetation: A case study of Gongreung River	Kim, S. N., Toda, Y. & Tsujimoto, T.	2006
Town Brook	USA	1	Changes in water temperature patterns following the removal of a low-head dam in Plymouth, Massachusetts	Conlon, M. D.	2013
Cahaba River	USA	1.8	New upstream records for fishes following dam removal in the Cahaba River, Alabama	Bennett, M. G., Howell, J. H., Kuhajda, B. R. & Freeman, P. L.	2004
Gongneung River	Korea	1.5	Stream corridor ecological restoration by small dam removal: Removals of Gongreung2 & Gotan small dams in Korea	Ahn, H. K., Kim, S. N. & Woo, H. S.	2006
Lower Olentangy	USA	2	Short-term consequences of lowhead dam removal for fish assemblages in an urban river system	Dorobek, A., Sullivan, S. M. P. & Kautza, A.	2012
Thompson Creek	USA	1.8	Aerial insect responses to non-native Chinook salmon spawning in a Great Lakes tributary	Collins, S. F., Marshall, B. & Moerke, A.	2010
North Toe River	USA	2	Fish and benthic macroinvertebrate assemblage response to removal of a partially breached lowhead dam	Gillette, D. P., Daniel, K. & Redd, C.	2009
Red Brook	USA	1.7	Movement patterns of brook trout in a restored coastal stream system in southern Massachusetts	Snook, E. L., Letcher, B. H., Dubreuil, T. L., Zydlewski, J., O'Donnell, M. J., Whiteley, A. R., Hurley, S. T. & Danylchuk, A. J.	2006
Conodoguinot Creek	USA	1.8	The Effect of Urbanization and Dam Removal on Stream Metabolism	Qasem, K.	2001

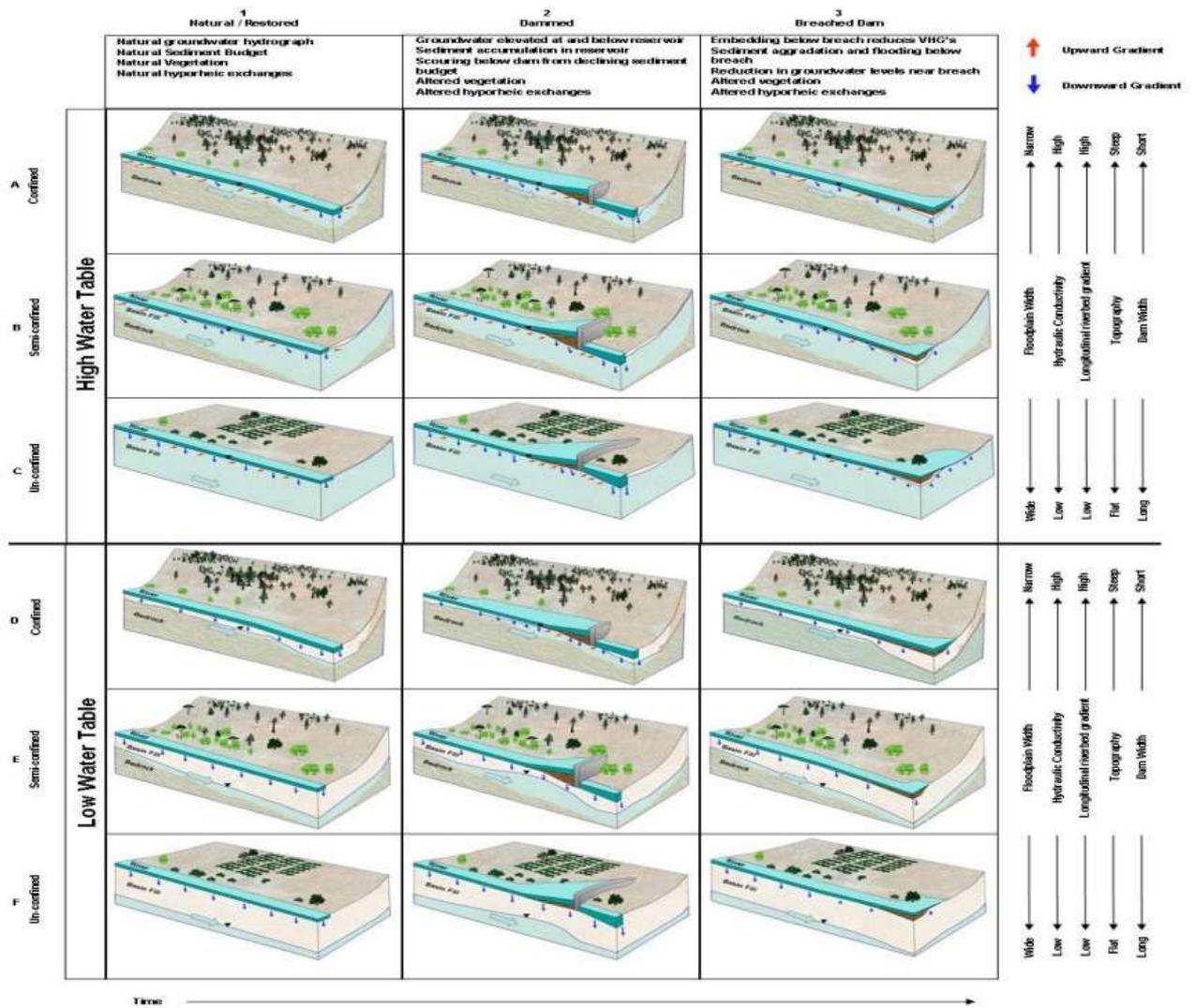
Eightmile River	USA	1.5	Effects of Dam Removal on Fish Community Interactions and Stability in the Eightmile River System, Connecticut, USA	Poulos, H. M. & Chernoff, B.	2007
Heber River	Canada	1.83	Natural Processes for the Restoration of Dam Removal Disturbances	Polster, D. F.	2013
Pawtuxet River	USA	1.5	Particle-bound metal transport after removal of a small dam in the pawtuxet river, Rhode Island, USA	Katz, D. R., Cantwell, M. G., Sullivan, J. C., Perron, M. M., Burgess, R. M. & Hoy, K. T.	2011
Lower Olentangy	USA	2	Do the ecological impacts of dam removal extend across the aquatic-terrestrial boundary?	Sullivan, S. M. P., Manning, D. W. P. & Davis, R. P.	2012
Lower Olentangy	USA	2	Do the ecological impacts of dam removal extend across the aquatic-terrestrial boundary?	Sullivan, S. M. P., Manning, D. W. P. & Davis, R. P.	2012
Lower Olentangy	USA	2	Reductions in fish-community contamination following lowhead dam removal linked more to shifts in food-web structure than sediment pollution	Davis, R. P., Sullivan, S. M. P. & Stefanik, K. C.	2012
Lower Olentangy	USA	2	Water Quality Changes Shortly After Low-Head Dam Removal Examined With Cultural and Microbial Source Tracking Methods	Bohrerova, Z., Park, E., Halloran, K. & Lee, J.	2012
Lower Olentangy	USA	2	Associations between riffle development and aquatic biota following lowhead dam removal	Cook, D. R. & Sullivan, S. M. P.	2012
River Villestrup	Denmark	1.8	River connectivity reestablished: Effects and implications of six weir removals on brown trout smolt migration	Birnie-Gauvin, K., Candee, M. M., Baktoft, H., Larsen, M. H., Koed, A. & Aarestrup, K.	2012
River Villestrup	Denmark	1.9	River connectivity reestablished: Effects and implications of six weir removals on brown trout smolt migration	Birnie-Gauvin, K., Candee, M. M., Baktoft, H., Larsen, M. H., Koed, A. & Aarestrup, K.	2005
Eightmile River	USA	1.5	Dam Removal Effects on Benthic Macroinvertebrate Dynamics: A New England Stream Case Study	Poulos, H. M., Miller, K. E., Heinemann, R., Kraczkowski, M. L., Welchel, A. W. & Chernoff, B.	2007
West River	USA	1.83	Macrobenthos Responses to Dam Removal and Habitat Restoration in the West River, Connecticut	Sheridan, R. W.	2015

## Annexe 2

Extraits de la thèse en anglais de Berthelote, 2013.



**Figure 1** Generalized illustration of the typical dam and dam removal impact research, separated by river reach. Illustrations modified from Hart et al. (2002).



**Figure 2** An illustration of a basic grid of conceptual models for unconsolidated sand and gravel aquifers in; A) a confined floodplain, B) a semi-confined floodplain, and C) an un-confined floodplain during the following conditions; 1) natural or restored, 2) dammed, and 3) immediately following a dam removal for both high and low water table systems.

## Annexe 3

Catégorie d'outils pouvant être utilisés pour caractériser les relations entre cours d'eau et eau souterraine (modifié de Vernoux et al. 2010) :

Catégorie d'outils	Echelle	Références (exemples)
<b>Mesures d'infiltration</b> Mesure de l'écoulement entre l'aquifère et le cours d'eau en des points spécifiques	Site spécifique	Taniguchi & Fukuo 1993 Rosenberry et al. 2016
<b>Température</b> Mesures des variations de températures dans les eaux et sédiments pour suivre les pertes et recharges	Site spécifique	Hatch et al. 2006 Schmidt et al. 2006 Anibas et al. 2011 Rosenberry et al. 2016
<b>Traceurs artificiels</b> Suivi de traceurs expressément injectés tels que la rhodamine ou l'eau lourde	Du site au tronçon de rivière	Becker & Coplen 2001 Somers et al. 2016
<b>Traceurs hydrochimiques et environnementaux</b> Utilisation des éléments dissous (majeurs, isotopes stables, radon, CFC) pour suivre les écoulements	Du tronçon de rivière au bassin versant	Cook et al. 2006 Massmann et al. 2008 Baskaran et al. 2009 Bertrand et al. 2014
<b>Analyses hydrométriques</b> Mesure des gradients hydrauliques entre l'aquifère et le cours d'eau et de la conductivité hydraulique de l'aquifère et de la zone hyporhéique	Du site au bassin versant	Baxter et al. 2003 Menció et al. 2014
<b>Surveillance géophysique (télé-détection)</b> Utilisation de la télé-détection (capteurs, images) pour localiser les connectivités	Du tronçon de rivière au bassin versant	Becker 2006 Loheide & Gorelick 2006
<b>Bilan hydrique</b> Utilisation des bilans d'eau pour définir la composante de recharge ou de perte	Du tronçon de rivière au bassin versant	Jolly et al. 2008 Menció et al. 2014
<b>Modélisation numérique</b> Simulation des écoulements basée sur des équations mathématiques	De la rivière au bassin versant voire à la région	Scibek et al. 2007 Brunner et al. 2010 Barthel & Banzhaf 2016
<b>Analyse hydrographique</b> Suivi du débit et détermination du débit de base	Intermédiaire à régionale	Price 2011 Rumsey et al. 2015
<b>Etude hydrogéologique</b> Description des écoulements, surface piézométrique, qualité des eaux souterraines, structure de l'aquifère et géomorphologie	Intermédiaire à régionale	Marani et al. 2001 Braaten & Gates 2003 Ala-aho et al. 2013 Oyarzún et al. 2014

Plusieurs catégories d'outils peuvent être utilisés pour évaluer les échanges nappe-rivière (Vernoux et al. 2010). Le tableau en annexe 3 résume des catégories d'outils, à l'échelle à laquelle ils peuvent être appliqués et quelques références liées à des applications de ces outils ou aux concepts sous-jacents. Les outils sont présentés en ordre croissant d'application.

Des mesures directes de l'infiltration en des points spécifiques peuvent révéler des échanges d'eau significatifs entre l'aquifère et les cours d'eau, permettant la détermination de la direction d'échange (Pinson et al., 2019)

Des mesures de température acquises dans les eaux et les sédiments d'un cours d'eau ainsi que dans l'aquifère sous-jacent peuvent permettre de détecter voire quantifier les échanges hyporhéiques en des sites d'observation spécifiques.

Des méthodes géochimiques avec l'utilisation de traceurs artificiels (injectés) ou naturellement présents dans l'environnement permettent de suivre les écoulements, d'identifier les flux d'eau souterraine, de localiser les zones de recharge ou de décharge de l'aquifère et ainsi d'étudier les interactions eau de surface - eau souterraine à une échelle locale.

Les analyses hydrométriques, telles la mesure des gradients hydrauliques entre un aquifère et un cours d'eau permettent aussi de quantifier les flux échangés, ou de déterminer l'occurrence et le sens des écoulements.

Le bilan hydrique d'un hydrosystème vise à définir les flux entrants (recharge) et sortant (perte) de ses différents compartiments, à identifier les composantes de flux déterminantes dans son fonctionnement et à apprécier la variabilité temporelle et spatiale des flux, le tout avec une attention particulière portée sur les échanges entre eaux souterraines et de surface.

La modélisation hydrogéologique tente de simuler au mieux les écoulements dans le milieu souterrain et de surface en se basant sur des équations mathématiques et un modèle conceptuel expliquant le fonctionnement de l'hydrosystème.

L'analyse hydrographique de séries temporelles de débit d'un cours d'eau permet d'estimer la contribution des eaux souterraines environnantes au débit d'un cours d'eau donné.

Les études hydrogéologiques s'intéressent à la surface piézométrique aux écoulements souterrains, aux interactions entre les différents réservoirs, à la qualité des eaux souterraines, à la structure et à la géomorphologie d'un hydrosystème afin de décrire et ainsi mieux comprendre son fonctionnement global à l'échelle d'observation souhaitée.



**Direction régionale DAT/Centre Val de Loire**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34  
[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)





**Direction régionale DAT/Centre Val de Loire**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34  
[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)