

Kevin VICAL Master Sciences de l'eau - Agence de l'eau Rhône-Méditerranée & Corse

Les techniques de restauration Low-Tech et basées sur la régénération des processus, quelle application sur les cours d'eau du Bassin Rhône - Méditerranée et Corse ?



Crédit photo : Cédric Cadet

Par Kevin Vical

Maitre de Stage : Benoit Terrier, Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse

Tuteur Académique : Hervé PIEGAY, Laboratoire Environnement, Ville, Société, Ecole Normale Supérieure de Lyon

Examineur : Norbert Landon, Laboratoire Environnement, Ville, Société, Université Lyon 2

Le 28.08.2025

Sommaire

Sommaire	2
Table des abréviations	3
1. Introduction	4
2. Étude Bibliographique	9
2.1. Le bois en rivière	10
2.2. Les barrages naturels de castors	19
2.3. Restauration Low-Tech basées sur les processus	33
2.4. Discussion sur l'étude bibliographique.....	40
3. Etude d'enquêtes	43
3.1. Contexte et objectifs.....	43
3.2. Méthode	44
3.3. Résultats	45
3.4. Discussion sur les entretiens d'enquêtes.....	54
4. Champ d'application et étude d'opportunité sur le bassin RM&C.....	56
4.1. Critères de viabilité d'un projet Low-Tech basé sur les processus	56
4.2. Cartographie des tronçons les plus favorables à la restauration.....	65
5. Discussion	75
6. Conclusion	80
7. Glossaire.....	81
Bibliographie	82
Sitographie.....	97
Table des matières	98
8. Annexes.....	100

Table des abréviations

- RM&C** : Rhône, Méditerranée et Corse
- AERMC** : Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse
- LTBP** : Low-Tech et Basée sur les processus
- BE** : Bureau d'étude
- GEMA** : Gestion des milieux Aquatiques
- GEMAPI** : Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention de inondations¹
- TGH** : Tronçon Géomorphologiquement Homogène
- USRA** : Unité Spatiale de Recueil et d'Analyse
- DCE** : Directive Cadre européenne sur l'Eau
- SDAGE** : Schémas Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux²
- PDM** : Programme de Mesures
- EBF** : Espace de Bon Fonctionnement (cf. Terrier et al., 2016)
- OTC** : Ouvrages Types Castor
- SFN** : Solutions fondées sur la nature
- GIEC** : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
- ARRA²** : Association Rivière Rhone-Alpes Auvergne³

¹ Compétence juridique exclusive et obligatoire en France, confiée depuis le 1er janvier 2018 aux établissements publics de coopération intercommunale à fiscalité propre (EPCI) comme les métropoles, communautés urbaines, communautés d'agglomération, et communautés de communes. Elle vise à gérer de manière cohérente et transversale la prévention des inondations et la gestion des milieux aquatiques

² Document de planification en France qui fixe, pour une période de six ans, les grandes orientations pour une gestion équilibrée de la ressource en eau à l'échelle des grands bassins hydrographiques.

³ Site internet : <https://www.arraa.org/>

1. Introduction

Au cours du siècle dernier, les rivières du globe ont subi d'importantes transformations en raison des pratiques de gestion des cours d'eau et de mise en valeur des terres, perturbant les flux naturels d'eau, de sédiments et de nutriments (Bravard & Petts, 1996; Dynesius & Nilsson, 1994; Ward et al., 1999). Si l'influence humaine sur l'environnement remonte au moins au Néolithique, une intensification notable des modifications physiques causées par l'homme se produit depuis le XXe siècle (Bravard & Petts, 1996). Les altérations actuelles des hydrosystèmes prennent la forme d'interventions directes, telles que la rectification des cours d'eau, la construction d'ouvrages ponctuels (barrages, seuils, ponts...) qui entravent l'écoulement, ou d'aménagements linéaires affectant la connectivité latérale (digues, stabilisation des berges, rectification des chenaux, etc.). Par ailleurs, de nombreux impacts sont indirects. Les changements d'occupation des sols dans les bassins versants, comme la suppression de la végétation riveraine, l'urbanisation et l'étalement urbain, l'intensification agricole, la suppression du bois mort en rivière et l'éradication d'espèces ingénieures modifient profondément le fonctionnement des hydrosystèmes.

Face à la prise de conscience croissante des effets néfastes des activités humaines sur les milieux aquatiques et des rétroactions affectant in fine l'habitabilité des fonds de vallée et la satisfaction des usages, des programmes de restauration des cours d'eau ont été initiés dès la fin des années 1960 en France. Leur objectif est de rétablir les processus écologiques, hydrologiques et morphologiques indispensables au bon fonctionnement des rivières, tout en conciliant les usages anthropiques et la préservation des habitats aquatiques. La réhabilitation des rivières et le recours au génie écologique sont ainsi devenus des enjeux majeurs, notamment lorsque la connectivité et les habitats naturels ont été dégradés par les pressions humaines (Piégay et al., 2023). Le domaine de la restauration des milieux aquatiques est un domaine en pleine évolution qui mobilise des approches intégrées, combinant connaissances scientifiques, techniques innovantes et participation des acteurs locaux voire des citoyens, afin de redonner aux cours d'eau leur dynamique et leur résilience naturelles. Au cours des deux dernières décennies, la restauration des rivières est devenue un domaine de recherche de plus en plus important, soulevant une série de questions complexes qui relèvent non seulement de la science, mais aussi de la société (Dufour & Piégay, 2009). La gestion et la restauration des rivières ont récemment évolué pour privilégier des mesures plus intégrées et économiquement efficaces (Piégay et al., 2020).

Créées par la loi sur l'eau du 16 décembre 1964, les agences de l'eau sont des établissements publics chargés d'organiser la gestion et la préservation des ressources en eau et des milieux aquatiques en France. Leur mise en place répond à la nécessité d'adopter une gestion intégrée et territorialisée, basée sur les grands bassins versants des principaux fleuves. Elles ont pour mission de collecter des redevances auprès des différents usagers (collectivités, industriels, agriculteurs) afin de financer des actions de préservation, de restauration et d'amélioration de la qualité de l'eau. Occupant une place centrale dans la restauration des cours d'eau, les agences de l'eau interviennent principalement en tant que financeurs et conseillers techniques auprès des porteurs de projets, qu'il s'agisse de collectivités, d'associations ou d'acteurs privés. Leur action s'inscrit dans le cadre des politiques publiques de l'eau, élaborées à l'échelle des bassins hydrographiques, et vise à atteindre le bon état écologique des milieux aquatiques.

Les travaux tels que le recalibrage, la rectification, l'endiguement, le bétonnage et l'enrochement des berges, ainsi que le déboisement des rives et des cours d'eau, ont profondément modifié les cours

d'eau du bassin Rhône-Méditerranée et Corse. Ces interventions ont transformé, voire détruit, les habitats indispensables aux communautés aquatiques, qui sont des indicateurs du bon état écologique des eaux. Ces altérations sont particulièrement marquées dans le bassin Rhône-Méditerranée, où 58 % des cours d'eau sont impactés, contre 15 % en Corse (Agence de l'eau Rhône Méditerranée & Corse, 2024). Les dégradations physiques telles que la réduction ou la disparition de la sinuosité des cours d'eau, le colmatage des substrats alluviaux, l'incision du cours d'eau ainsi que la perturbation de la dynamique latérale et de la connectivité avec les annexes hydrauliques et les zones humides affectent le fonctionnement physico-chimique et biologique des milieux aquatiques. Ces transformations entraînent une perte de diversité et de qualité des habitats indispensables à la reproduction, à l'alimentation et au repos des populations de poissons et d'invertébrés aquatiques. Les espèces les plus sensibles, véritables indicateurs de milieux peu perturbés, sont les premières à disparaître. De plus, ces altérations entraînent des répercussions sur les fonctions écologiques des milieux, notamment en réduisant leurs capacités d'autoépuration, de soutien d'étiage et d'expansion naturelle des crues, compliquant ainsi la gestion des inondations. Aujourd'hui, l'enjeu majeur est de restaurer un fonctionnement naturel des rivières, de ralentir les écoulements et de préserver les espaces de bon fonctionnement, autant de leviers essentiels pour limiter les risques liés aux crues (Agence de l'eau Rhône Méditerranée & Corse, 2024). L'objectif majeur de la DCE (Directive Cadre européenne sur l'Eau), dont le SDAGE est l'un des piliers, est d'atteindre le bon état des eaux de surface d'ici 2027, notamment du bon l'état écologique qui est lui-même fortement corrélé à un bon fonctionnement hydromorphologique (Malavoi et al., 2024).

Entre 2013 et 2021, près de 700 km de cours d'eau ont bénéficié de travaux de restauration morphologique (cf. figure 2). Ces interventions portent sur des projets de plus en plus ambitieux, dépassant le simple lit mineur et concernant des linéaires restaurés plus étendus (Agence de l'eau Rhône Méditerranée & Corse, 2024).

Malgré ces travaux, environ la moitié des cours d'eau du bassin sont toujours considérés comme en bon état écologique (cf. figure 1) et environ 40% du linéaire est toujours considéré comme soumis à une pression hydro-morphologique significative, à l'origine d'un risque de non-atteinte du bon état écologique (cf. Annexe 7 : Cartographie des cours d'eau soumis à une pression morphologique). De plus, il n'est pas toujours évident d'observer l'évolution de l'état des cours d'eau après des travaux de restauration. Le succès de certains projets reste parfois incertain ou contesté et les tentatives de réhabilitation des rivières reposant sur des solutions d'ingénierie « lourde » et cloisonnées par discipline ne permettent pas toujours d'atteindre les objectifs escomptés (Brierley et al., 2009). En outre ils peuvent être particulièrement traumatisants pour les milieux naturels. En effet, certaines

opérations axées sur la structure physique du cours d'eau visent à recréer la morphologie du lit, des

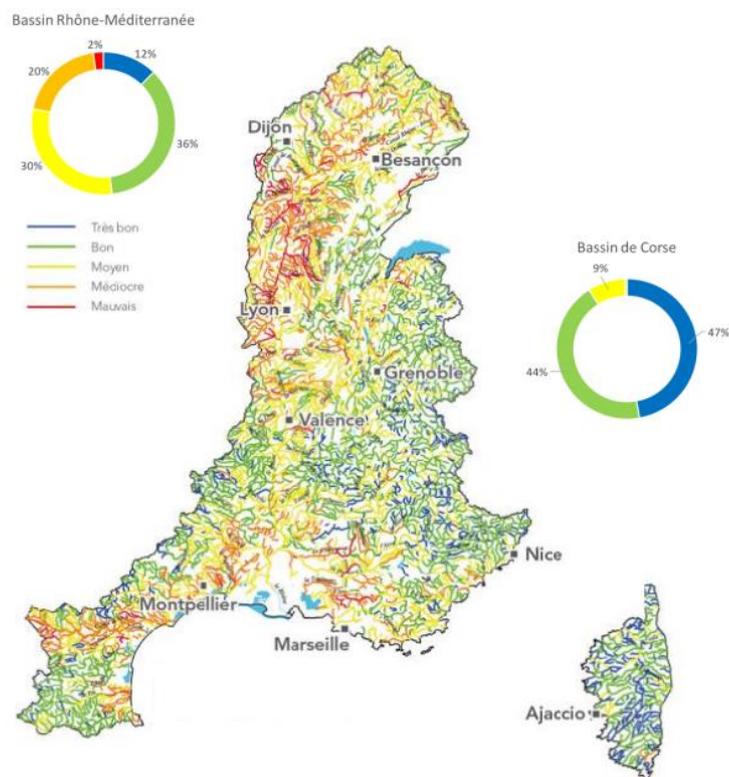


Fig 1. Carte de la qualité des cours d'eau des bassins Rhône-Méditerranée en 2023 (Agence de l'eau Rhône Méditerranée & Corse, 2024)

berges et des habitats en s’inspirant d’états naturels ou de formes de référence, comme le reméandrage. Toutefois, ces approches peuvent imposer une configuration au cours d’eau sans toujours s’attaquer aux causes profondes des dysfonctionnements. À l’inverse, la restauration basée sur les processus cherche à rendre au cours d’eau sa capacité à fonctionner de manière autonome, en favorisant les dynamiques naturelles telles que l’érosion latérale et verticale, le dépôt, le transport des sédiments ou la dynamique des crues (Adam et al., 2007). Cette approche vise à restaurer la dynamique fluviale à une échelle plus large et sur le long terme, en misant sur la faculté du système à s’auto-régénérer grâce au jeu des processus naturels, ce qui favorise la résilience et la durabilité des bénéfices écologiques.

Les techniques de restauration Low-Tech basées sur la régénération des processus (LTBP), constituent donc une sous-catégorie des approches axées sur les processus naturels des cours d’eau. Elles se caractérisent par des interventions à faible technicité et niveau d’ingénierie, privilégiant l’utilisation de matériaux locaux tels que le

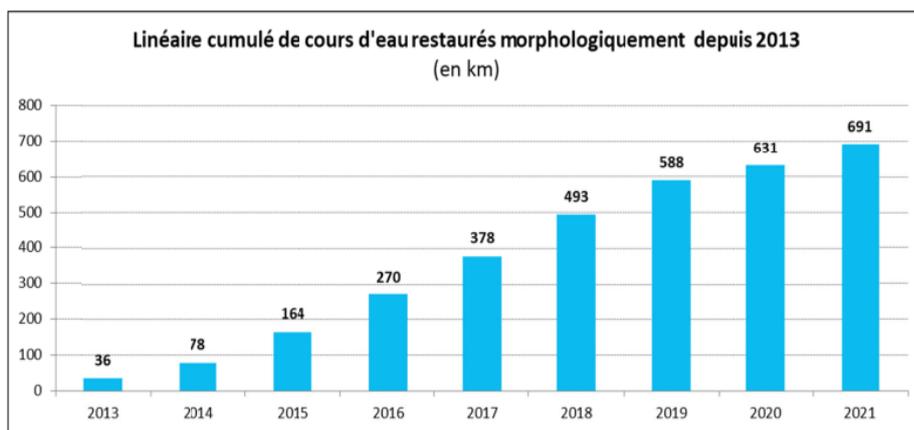


Fig 2. Linéaire cumulé de cours d'eau restaurés sur le bassin RM&C (2013 - 2021)

bois, ce qui permet de limiter leur empreinte carbone. L’usage du bois en rivière, historiquement associé à la restauration d’habitats, à la protection des berges ou à l’ajout de complexité au milieu, impliquait parfois le recours à des engins mécaniques et à des solutions d’ingénierie. À l’inverse, les techniques « Low-Tech » se distinguent par leur simplicité de mise en œuvre et sont particulièrement adaptées aux petits et moyens cours d’eau qui représentent l’essentiel du réseau hydrographique et sont facilement praticables et traversables par l’homme (J. M. Wheaton et al., 2019). C’est pourquoi cette étude se concentre volontairement sur ce type de milieux.

Même si des aménagements rustiques en bois, tels que les épis érosifs, ont été utilisés en France par le passé et le sont encore aujourd’hui, aucun projet de restauration à grande échelle, reposant exclusivement sur des structures conçues manuellement sans recours à la machinerie, visant à restaurer des processus hydromorphologiques spécifiques sur des tronçons entiers de cours d’eau, n’est recensé en France jusqu’à récemment. L’un des premiers projets hydromorphologiques significatifs est mis en œuvre sur la Lierne et la Véore (Drôme) (cf. Annexe 11 : Fiche de présentation du Projet Lierne Véore) par la communauté de communes Valence-Romans Agglomération, sous la coordination de son chef de projet GEMAPI Cédric Cadet. Ces méthodes sont ensuite découvertes et expérimentées par divers acteurs du secteur de l’eau lors de sessions de formation organisées par l’Association Rivières Rhône-Alpes (ARRA²) en avril 2024 et avril 2025. Leur popularisation auprès du grand public est aussi facilitée par Baptiste Morizot, philosophe et maître de conférences à l’université d’Aix-Marseille et Suzanne Husky, artiste (Morizot, 2024). Aux États-Unis, ces techniques sont utilisées depuis une quinzaine d’années et ont permis la restauration de centaines de cours d’eau dont 370 sont répertoriées⁴. Les restaurations Low-Tech basées sur les processus⁵, développées notamment par Joseph Wheaton (J. M. Wheaton et al., 2019), connaissent aujourd’hui un essor médiatisé en France.

⁴ <https://pbr.riverscapes.net/projects>

⁵ Depuis l’anglais *Low-Tech Process-Based Restorations (LTPBR)*

Les techniques de restauration Low-Tech et axées sur les processus consistent à installer dans les cours d'eau des structures simples qui perturbent l'écoulement. Cela favorise l'apparition de processus hydromorphologiques spécifiques (J. M. Wheaton et al., 2019), contribuant ainsi à la restauration de certaines fonctions du milieu aquatique. Les méthodes employées, qui utilisent des matériaux locaux et évitent le recours à une ingénierie lourde, visent à réactiver des processus naturels afin de « laisser le système agir ». Cela signifie qu'elles s'appuient sur l'énergie du cours d'eau pour permettre aux paysages fluviaux de se régénérer d'eux-mêmes, notamment grâce aux ingénieurs écosystémiques naturels (Adam et al., 2007; J. M. Wheaton et al., 2019). Le développement de ces techniques est donc lié à certains constats, tels que :

- Les structures telles que les amas de bois ou les ouvrages naturels construits par les castors sont naturellement abondants dans les cours d'eau d'Europe et d'Amérique du Nord. Elles jouent un rôle essentiel dans le maintien des processus hydromorphologiques vitaux (M. M. Pollock et al., 2003; Wohl, 2016).
- Dans le cas général, un cours d'eau avant toute intervention humaine est très connecté horizontalement à sa plaine alluviale, souvent en chenaux multiples (anastomosé) dans des secteurs plutôt à faible pente et au transport solide modéré, tel que défini par le concept du 'stade 0' (Cluer & Thorne, 2014, cf. figure 3). Le style en anastomose et la forte connectivité horizontale sont bien souvent favorisés par l'abondance de structures dans le cours d'eau (Wohl, 2005, 2013).
- La diminution drastique des populations de castor en Europe et en Amérique du Nord et de l'apport de bois en rivière (Wohl, Kramer, et al., 2019) a été un facteur de dégradation des cours d'eau à l'origine parfois d'une légère incision. La restauration d'un régime de bois plus naturel et des populations de castors pourrait inverser cette dégradation en favorisant l'aggradation dans les retenues et en restaurant la connectivité latérale (W. W. Macfarlane et al., 2017; M. M. Pollock et al., 2007a, 2014).

Ces techniques s'inspirent des accumulations naturelles de bois en rivière ainsi que du comportement du castor, une espèce considérée comme « ingénieure des écosystèmes » en raison de ses capacités de construction (Jones et al., 1994). En particulier, la construction de barrages par les castors suscite un fort intérêt scientifique, car elle représente le principal mécanisme par lequel ces animaux exercent une influence majeure sur la biodiversité, au-delà de leur simple présence. À titre d'exemple, les Zones humides⁶ pourraient bénéficier

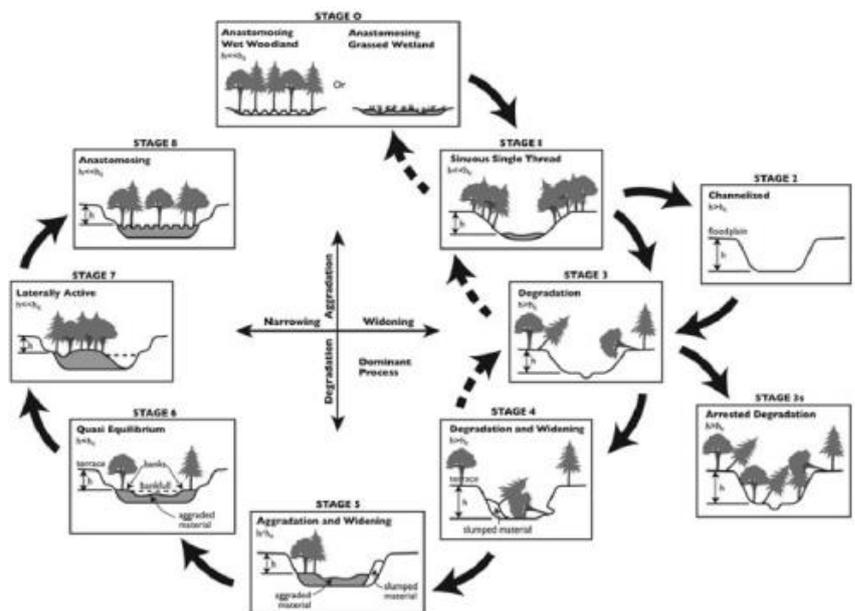


Fig 3. Modèle d'évolution de la morphologie des cours d'eau et concept du 'Stade zéro' par (Cluer and Thorne, 2014)

⁶ Les Zones humides sont considérées comme des habitats prioritaires dans le cadre des réglementations européennes et françaises récentes sur la restauration de la nature. Se référer au plan national milieux humides (Ministère de la transition écologique, 2021).

de la présence des castors, qui offrent une solution naturelle et économique pour atteindre les objectifs de conservation. En Amérique du Nord, le castor d'Amérique (*Castor canadensis*) est reconnu comme un agent clé dans la promotion de conditions hydro-écologiques favorables. Il est même envisagé comme un acteur de la restauration des paysages, avec des approches spécifiques de conservation et de suivi (W. W. Macfarlane et al., 2017; M. Pollock et al., 2012; Weber et al., 2017; Wohl, Scott, et al., 2019).

Les petits bassins versants ruraux, du fait de leur dégradation sont de plus en plus vulnérables aux aléas hydrométéorologiques et aux déséquilibres du cycle de l'eau, ce qui se traduit par une érosion accrue des sols, une réduction de la disponibilité en eau pour les écosystèmes aquatiques et terrestres, ainsi qu'un stress hydrique affectant les forêts. Le changement climatique aggrave ces phénomènes, en intensifiant leur fréquence et leur sévérité (Reverdy et al., 2025). On observe notamment, au cours des trois dernières décennies, une diminution critique des débits des cours d'eau sur la moitié sud de la France⁷, une baisse de la résilience des milieux, une hausse des phénomènes extrêmes, ainsi qu'une élévation des températures des eaux. Cette dynamique hydrologique dégradée marquée par des périodes d'assèchement peut parfois masquer les effets bénéfiques des actions de restauration, qui n'entraînent d'ailleurs pas systématiquement une amélioration de la qualité de l'eau. Face à ces constats, de nombreuses initiatives émergent pour restaurer la capacité des sols et des paysages à retenir et réguler l'eau. Ces approches, désignées sous différents termes tels que Solutions fondées sur la Nature (SFN), Mesures Naturelles de Rétention d'Eau (MNRE) ou encore « hydrologie régénérative », visent à accroître la résilience des agrosystèmes et des écosystèmes face aux dérèglements climatiques (Reverdy et al., 2025). L'« hydrologie régénérative », en particulier, est une notion récente portée par la société civile et des hydrologues⁸ et reposant sur un principe simple : ralentir, répartir, infiltrer et stocker les eaux de pluie et de ruissellement à l'échelle des bassins versants. La restauration de la capacité des sols à retenir l'eau et la diminution de la vitesse des écoulements, encouragées par les techniques de restauration LTBP, constituent des leviers majeurs pour endiguer l'accélération des flux hydriques. Ces interventions renforcent durablement la résilience des sols, des hydrosystèmes et des territoires face aux événements climatiques extrêmes, en favorisant une infiltration accrue et en limitant l'érosion et la dégradation des milieux (Reverdy et al., 2025).

Si elles peuvent être appréhendées d'un point de vue purement fonctionnel, les techniques de restauration Low-Tech et basées sur les processus peuvent aussi s'inscrire dans une démarche philosophique et militante visant à accroître la sobriété et à interroger les besoins réels en matière de technologie (Bihouix, 2014). Ces méthodes, fondées sur des processus naturels, invitent à repenser notre relation à la nature et notre approche de la renaturation et de la restauration des cours d'eau et milieux aquatiques. Plutôt que de recourir à des machines issues de la société extractiviste, elle-même souvent responsable des dégradations environnementales, elle invite à privilégier l'utilisation de matériaux locaux et naturels. Plutôt que d'imposer une vision souhaitée de la nature au milieu lors d'une renaturation, elles cherchent à imiter les processus vivants, comme ceux du castor et du bois en rivière (Morizot, 2024). Cette approche prône un rapport moins dualiste avec notre environnement, lui-même responsable de sa dégradation accélérée (Descola, 2005).

Un objectif fondamental de la restauration et de la conservation des paysages fluviaux est d'améliorer l'état de santé du plus grand nombre de kilomètres possible, tout en veillant à ce que ces systèmes atteignent et maintiennent leur potentiel de manière autonome et durable (J. M. Wheaton et al., 2019).

⁷ Se référer au projet cartographique MAKACHO de l'évolution des débits des cours d'eau en France développé par l'INRAE : <https://makaho.sk8.inrae.fr/>

⁸ Cette notion reprend un concept plus ancien de « ralentissement dynamique »

Des approches à faible coût et à faible technicité ont été proposées comme la meilleure manière d'aborder l'ampleur de la restauration nécessaire (Shahverdian et al., 2019). Ces techniques, potentiellement moins coûteuses que les projets traditionnels de restauration, présentent un potentiel considérable pour restaurer les cours d'eau à grande échelle. Elles pourraient ainsi augmenter la capacité de linéaire restauré chaque année et accélérer la restauration des rivières en France et dans le bassin Rhône-Méditerranée et Corse (RM&C), contribuant à atteindre le bon état écologique des masses d'eau conformément aux objectifs du SDAGE Rhône-Méditerranée. Cependant, leur domaine d'application, leurs limites et leurs effets indésirables restent mal compris, ce qui suscite des controverses. Par ailleurs, le succès remarquable de ces techniques aux États-Unis doit être replacé dans un contexte différent, marqué par une faible densité de population et une plus grande disponibilité des fonds de vallée. Il est donc crucial d'évaluer leur adaptation au contexte spécifique de la France et du bassin RM&C.

À la suite d'un premier rapport d'étude consacré aux techniques de restauration Low-Tech (Goudard, 2024), l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse souhaite aller plus loin sur certains aspects afin d'offrir aux acteurs de l'eau et de la restauration des milieux aquatiques une compréhension approfondie du sujet. Ce rapport de stage s'articulera donc autour de trois axes principaux :

- Une étude bibliographique poussée sur les effets du bois en rivière et des ouvrages naturels de castors, ainsi que sur les techniques de restaurations LTBP avec la présentation de types d'ouvrages, d'objectifs et d'un retour d'expérience.
- Une étude sociologique pour analyser plus en profondeur les points de vue de trois types d'acteurs de l'eau (bureau d'études, structures GEMAPI et fédérations de pêche) vis-à-vis du déploiement de ces techniques.
- Une analyse du champ d'application de ces techniques sur le Bassin Rhône-Méditerranée s'appuyant sur les deux points précédents afin d'identifier des points d'attention quant à l'implémentation de ces techniques de restauration, incluant une réflexion cartographique de premier niveau.

2. Étude Bibliographique

Les techniques de restauration Low-Tech basées sur les processus utilisent des structures imitant des structures naturelles telles que des amas de bois et des ouvrages naturels de castors, et pour cette raison suscitent des controverses quant aux effets désirables et indésirables que ces structures peuvent causer. L'étude bibliographique est divisée en trois parties : une bibliographie sur les effets du bois en rivière sur les cours d'eau, une partie sur les effets des barrages naturels de castors ainsi qu'une étude bibliographique sur les techniques employées dans le cadre de restaurations de type Low-Tech.

La recherche bibliographique s'est concentrée sur les cours d'eau de faible rang et de tête de bassin et concerne principalement les effets du bois de grande taille⁹. Le rôle du bois dans les processus morphologiques des grands cours d'eau n'est pas inclus dans cette étude, même si de nombreux projets de restauration utilisent du bois de grande taille sur des grands cours d'eaux¹⁰, ils nécessitent

⁹ Qui a été défini dans de nombreuses études comme étant supérieur à 10 cm de diamètre et 1 m de longueur (Thevenet et al., 1998).

¹⁰ Souvent dénommée « Large Wood Restoration » en anglais (Anlanger et al., 2022a)

généralement un niveau d'ingénierie et de technicité souvent plus important et ne sont donc pas considérés comme Low-Tech dans cette étude.

2.1. Le bois en rivière

L'hydromorphologie est souvent enseignée comme un équilibre entre les apports sédimentaires (quantité et granulométrie), l'hydrologie, la pente (concept de la balance de Lane) (Lane, 1954). Le bois influence la géomorphologie des cours d'eau au premier plan et reste absent de cette présentation synthétique (Quiniou & Piton, 2022). Avant 1975 il y avait très peu de références dans la littérature sur le rôle du bois dans les systèmes fluviaux (Piégay & Gurnell, 1997). Le rôle structurant des ligneux dans la dynamique fluviale représente un domaine d'étude crucial pour comprendre et améliorer la gestion des cours d'eau. L'impact des bois flottants sur la morphologie et la dynamique des cours d'eau et in fine sur la composition des habitats aquatiques a été depuis un point de focus largement étudié (T. B. Abbe et al., 2003; A. M. Gurnell et al., 2002).

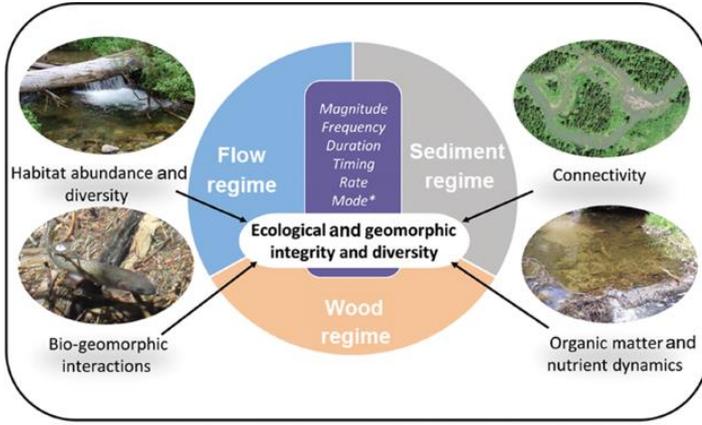


Fig 4. Modèle conceptuel basé sur les interactions entre eau, sédiments et bois (Wohl et al, 2019)

Avant les interventions humaines, les rivières et ruisseaux contenaient des quantités très importantes de bois flottés - des feuilles et brindilles jusqu'à des arbres entiers déracinés. Les perturbations anthropiques, telles que la réduction drastique des forêts ripariennes et l'extraction du bois, ont entraîné une méconnaissance des densités historiques de bois dans les rivières (Piégay & Gurnell, 1997). Le nombre de bois et leur volume est 10 à 100 fois inférieur dans nos rivières par rapport à un état naturel (Wohl et al., 2017). Cette perte a des conséquences directes sur la dynamique

fluviale, notamment une augmentation de la capacité de transport sédimentaire et une simplification de la morphologie des cours d'eau (S. V. Gregory et al., 2007). Dans un milieu forestier, l'apport de bois et la taille des pièces présentes définit un régime de bois, analogue au régime sédimentaire (A. M. Gurnell, 2007) et formant le troisième pilier des processus physiques du cours d'eau avec les flux liquides et sédimentaires (Wohl, Kramer, et al., 2019), le régime du bois est essentiel à la bonne santé d'un paysage fluvial (Glassic et al., 2025).

2.1.1. Hydromorphologie

Le bois de grande taille joue un rôle déterminant en tant qu'agent géomorphologique, initiant et maintenant une diversité de formes fluviales (Bureau of Reclamation & U.S Army Corps of Engineers, 2015; K. J. Gregory & Davis, 1992). En augmentant la rugosité hydraulique et en obstruant localement les écoulements, les barrages de bois élèvent le niveau d'eau, favorisent l'avulsion et la formation de chenaux secondaires (T. Abbe & Brooks, 2011) contribuant ainsi à renforcer la connectivité entre le chenal principal et la plaine alluviale. Dans les petits cours d'eau, ce processus peut

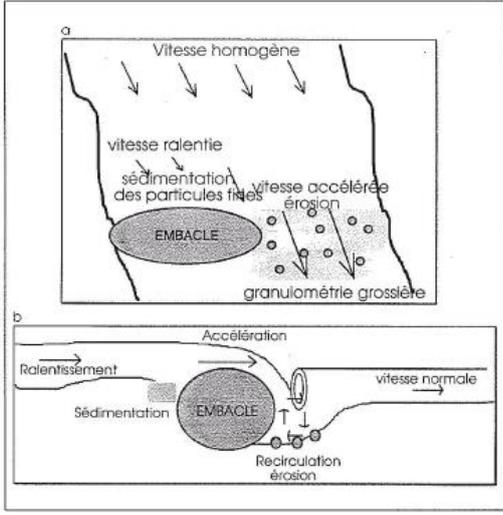


Fig 5. Modifications d'écoulements induites par une accumulation de bois (Maridet et al, 1996)

aboutir à l'établissement d'une hiérarchie de chenaux secondaires relativement stables, capable d'acheminer des débits variables selon les saisons (A. M. Gurnell et al., 1995). La présence de bois dans le chenal modifie la morphologie et le fonctionnement de la plaine d'inondation en agissant sur la résistance à l'écoulement, la capacité de transport et la connectivité chenal-plaine, tout en influençant l'accrétion latérale et verticale des dépôts alluviaux (Wohl, 2013). Les débris ligneux peuvent créer des berges végétalisées et des îles en augmentant la rugosité du lit, ce qui ralentit l'écoulement et favorise la déposition des sédiments (Beechie et al., 2010). Dans les bassins versants des Rocheuses du Sud, les tronçons riches en bois présentent une plus grande hétérogénéité spatiale et une connectivité latérale et verticale accrue, grâce à la formation de zones de remous et de chenaux multiples induites par les embâcles (Wohl, 2013). Dans de nombreuses rivières tempérées, le retrait direct ou indirect du bois a probablement entraîné des modifications fondamentales des processus et de la morphologie du chenal et de la plaine d'inondation. Négliger les interactions entre bois et plaine d'inondation conduit à une représentation erronée de la dynamique fluviale dans les bassins forestiers (Wohl, 2013).

En amont de l'obstacle se produit une élévation du niveau d'eau, une réduction des vitesses de courant et une sédimentation des particules minérales liée à la diminution des forces érosives (Maridet et al., 1996). Lorsque l'embâcle n'occupe pas tout le lit mineur du cours d'eau, la perte de charge localisée se traduit au contraire par une concentration de l'écoulement avec une augmentation des vitesses et des forces tractrices dans une partie seulement de la section en travers (Maridet et al., 1996).

Faciès

Plusieurs études ont démontré que la fréquence des mouilles augmente proportionnellement à celle des accumulations de bois (embâcles ou débris ligneux) (Beechie & Sibley, 2011; Elosegi et al., 2017; A. M. Gurnell & Sweet, 1998; Montgomery et al., 2003; Richmond, 1994) (cf. figure 6) et peut modifier la morphologie générale du chenal, passant d'un lit plat à des chenaux à mouilles et radiers. Buffington & Montgomery, (1999) ont aussi montré que l'espacement moyen entre les mouilles dans les ruisseaux de type radiers/mouilles dépendait de la quantité de bois mort de grande taille présente, et diminuait à mesure que la quantité de bois augmente. Dans une étude sur un ruisseau côtier en Oregon, 70% des mouilles avec un volume de plus de 1m³ étaient associées avec des débris ligneux dans le chenal (Andrus et al., 1988). Beechie & Sibley, (2011) ont montré que le pourcentage de mouilles était plus fortement corrélé au volume de bois mort dans les chenaux à pente modérée (0,02 < pente < 0,05) que dans ceux à faible pente (0,001 < pente ≤ 0,02). Toutefois Montgomery et al., (1995) ont montré que dans les ruisseaux de types step/pool¹¹, généralement plus pentus, l'espacement des mouilles est indépendant de la quantité d'amas de bois de grande taille. Les amas de bois modifient le profil longitudinal et favorisent une topographie alluviale

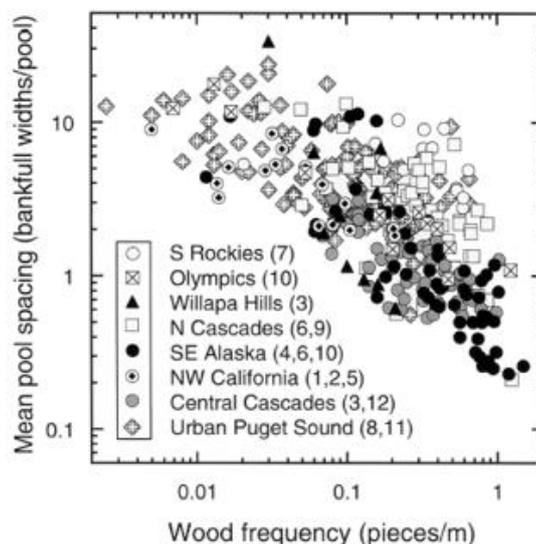


Fig 6. Relation entre distance entre mouilles et abondance de bois dans le cours d'eau (Montgomery et al, 2003)

¹¹ Cours d'eau caractérisé par une alternance régulière de chutes (steps) et de fosses (pools) creusées derrière ces chutes. Cette morphologie forme comme un "escalier", très typique dans les rivières à forte pente et au lit garni d'éléments grossiers.

complexe avec des bancs centraux propices à l'établissement végétal (T. B. Abbe & Montgomery, 1996).

Dynamique sédimentaire

En augmentant la résistance hydraulique, en obstruant l'écoulement et en provoquant un affouillement local dans le lit du cours d'eau, le bois de grande taille influence fortement les caractéristiques sédimentaires, notamment la distribution granulométrique (Hassan et al., 2005; Jeffries et al., 2003; Montgomery et al., 2003), l'hétérogénéité granulométrique (Le Lay & Piégay, 2007) ainsi que le volume



Fig 7. A gauche : Accumulation naturelle de bois sur l'Allondon créant une diversité de faciès. A droite : Exemple de diversification morphologique et granulométrique à la suite de l'ajout de bois dans la Brévenne (69), cours d'eau auparavant très simplifié et homogène.

et le temps de séjour des sédiments stockés dans le chenal (Elosegi et al., 2017; Jeffries et al., 2003) (cf. figure 7). Localement, juste en amont de l'obstacle, la réduction des vitesses favorise la sédimentation des particules fines, tandis que dans la partie ouverte de la section, l'augmentation des vitesses entraîne l'enlèvement des fines, laissant en place une granulométrie plus grossière (Maridet et al., 1996). A une échelle plus large, les accumulations de bois favorisent la rétention des sédiments fins (Parker & Rønning, 2007; Ryan et al., 2014). Ces effets se traduisent par une diminution de la taille moyenne des sédiments du lit, une augmentation de l'hétérogénéité spatiale des sédiments, ainsi qu'une augmentation du volume de sédiments retenus dans le chenal (Ryan et al., 2014) (cf. figure 8). Des études comparatives montrent que le bois de grande taille retient davantage de sédiments et sur des durées plus longues que d'autres irrégularités du chenal, telles que les blocs (Fisher et al., 2010; Wohl & Scott, 2017). En outre, le bois stationnaire peut initier la formation de bancs de sédiments ou favoriser leur croissance dans les rivières (T. Abbe & Brooks, 2011). Lorsque la quantité de bois de grande taille présente dans le chenal est suffisante pour faciliter les écoulements hors berges, le stockage des sédiments dans la plaine inondable peut aussi être accru (Jeffries et al., 2003). À l'inverse, la diminution de l'apport de bois liée aux activités de gestion diminue la rétention des sédiments et augmente la taille des graviers (Beechie & Sibley, 2011; Bilby, 1981; R. D. Smith et al., 1993). Dans une étude, le retrait de tous les barrages de débris organiques sur un tronçon de 175m a entraîné une augmentation de 500% de l'export de particules fines et grossières (Bilby, 1981).

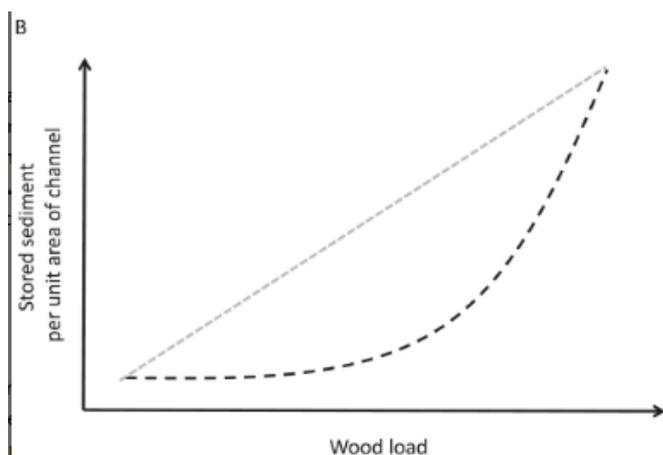


Fig 8. Courbe conceptuelle de stockage sédimentaire en fonction de la charge de bois dans le cours d'eau (Wohl & Scott, 2017)

Effets sur le temps long

Sur des échelles temporelles importantes, ces modifications du transport sédimentaire entraînent une baisse du taux de transport global dans les rivières riches en bois par rapport à celles appauvries en bois (Elosegi et al., 2017; Montgomery et al., 2003). En amont des embâcles, le bois piège et stocke non seulement la charge de fond, mais aussi les particules fines telles que les limons et les sables, ce qui conduit à une granulométrie généralement plus fine. Au droit de l'embâcle, les forces tractrices augmentent, entraînant le transport des particules fines et une granulométrie plus grossière. De même, les particules grossières sont plus apparentes immédiatement en aval de l'obstacle (Le Lay & Piégay, 2007). Le bois influence ainsi plusieurs fonctions des cours d'eau, notamment le stockage des sédiments et la création de tronçons alluviaux dans des chenaux autrement rocheux (T. B. Abbe & Montgomery, 1996; Quiniou & Piton, 2022).

Dans les petits cours d'eau forestiers, il peut réduire le transport des sédiments du lit, transformant des chenaux rocheux en chenaux alluviaux ou diminuant la taille des alluvions du lit (T. B. Abbe & Montgomery, 1996; Buffington & Montgomery, 1999). Dans une étude, La suppression expérimentale de bois mort dans un petit cours d'eau à lit de graviers situé dans un bassin forestier a entraîné une redistribution spectaculaire des sédiments du lit et des modifications de la topographie du fond. Le retrait du bois a même modifié la trajectoire principale de l'écoulement, ce qui a changé la taille et la localisation des bancs et des mouilles, provoqué une érosion locale des berges et élargi le chenal. Des ajustements marqués du lit sont survenus presque immédiatement après l'intervention expérimentale (R. D. Smith et al., 1993).

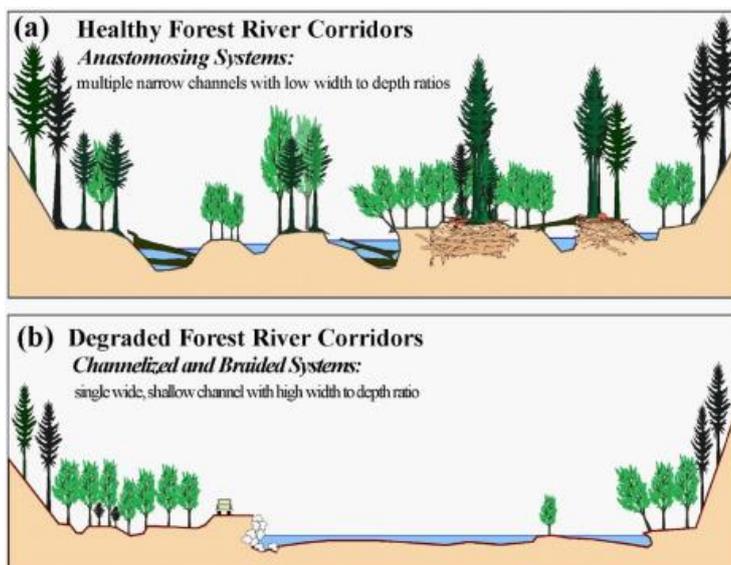


Fig 7. Le bois favorise la complexité des chenaux et l'anastomose des cours d'eau. Le retrait du bois peut faire passer un système en anastomose vers un système à chenal unique (Bureau of Reclamation & U.S Army Corps of Engineers, 2015)

Dans les petits cours d'eau de montagne, le bois mort participe à l'équilibre morphologique de la rivière en limitant le transfert des sédiments et en réduisant l'énergie hydraulique (Marston, 1982). Ainsi, à la suite de l'enlèvement d'embâcles sur ce type de cours d'eau, plusieurs auteurs ont observé une déstabilisation du lit suivie de changements morphologiques importants (Heede, 1985; Shields & Smith, 1992; R. D. Smith et al., 1993).

Francis et al., (2008) ont indiqué que le bois a été un facteur important dans les dynamiques d'évolution des paysages des vallées fluviales. Par la suite, la déforestation engendrée par l'homme depuis plusieurs milliers d'années a elle aussi engendré des impacts considérables sur les paysages fluviaux (A. G. Brown & Barber, 1985; Collins et al., 2012) (cf. figure 7). La chronostratigraphie des plaines inondables montre que, durant l'Holocène ancien, la plupart des petits et moyens cours d'eau étaient majoritairement des systèmes à chenaux multiples (anastomosés), souvent encombrés de végétation, et que les systèmes à chenal unique ou en tresse active étaient relativement rares. Le principal facteur à l'origine de la transformation des plaines inondables vierges a été l'accélération de l'érosion des sols due à la déforestation et à l'agriculture céréalière, bien que l'apport effectif de sédiments reflète également les fluctuations climatiques (A. G. Brown et al., 2018a).

2.1.2. Risques liés au bois en rivière

Le bois mort et les embâcles augmentent les risques de débordement dans la plaine tout en jouant un rôle d'atténuation des crues en aval. Cependant, ils peuvent présenter un danger pour les ouvrages tels que les ponts ou les barrages situés en aval (Dany, 2016), car ils risquent d'endommager ces structures ou de provoquer des inondations locales en obstruant le passage de l'eau, notamment aux points de serrage hydraulique comme les ponts. Il est toutefois erroné de penser que les embâcles proviennent principalement du bois mort. Une étude récente menée en Suisse a montré que 87 à 98% du bois flottant est en réalité du bois vivant ou frais (Steeb et al., 2023), apporté au cours d'eau par l'érosion lors de crues importantes. Par conséquent, l'élimination du bois mort dans les cours d'eau a un effet limité sur la formation d'embâcles (Quiniou & Piton, 2022). Dans certains cas, elle peut même faciliter la mobilité du bois en réduisant la rugosité qui freine le transport hydraulique dans le cours d'eau (Quiniou & Piton, 2022). Par ailleurs, il convient de noter que sur les petits cours d'eau de tête de bassin, dont la largeur est inférieure à la hauteur d'un arbre, la mobilité de débris ligneux est faible (A. M. Gurnell et al., 2002) réduisant ainsi le danger associé. Néanmoins, les risques liés à la présence de bois en rivière ne sont pas négligeables. De ce fait, il n'est pas toujours réaliste de chercher à rétablir un régime naturel de bois sur certains cours d'eau particulièrement sensibles. Il est alors préférable d'opter pour un régime ciblé, qui apporte un bénéfice minimal tout en limitant les risques (Wohl, Scott, et al., 2019). La présence de bois flottant est systématique lors de crues morphogènes, il faut apprendre à vivre avec (Quiniou & Piton, 2022). Les solutions pour gérer les risques existent :



Fig 10. Peigne à embâcle sur la Bourbre (Piégay et al, 2004)

- Redimensionner les ouvrages d'art souvent sous-dimensionnés ou favoriser les ponts submersibles.
- Installer des Peignes à embâcles et autres pièges à corps flottant¹². (cf. Figure 10)

De nombreux travaux sont en cours pour mieux comprendre les dynamiques de mobilité du bois flottant et modéliser la probabilité d'embâcles, par exemple le programme woodflow en suisse (Steeb et al., 2021). La meilleure connaissance de ces dynamiques permettra d'effectuer des Analyse coûts/bénéfices de différentes approches sur le bois (Lassetre & Kondolf, 2012).

2.1.3. Perception et législation

Des pays comme la Suède et l'Allemagne semblent réceptifs à une politique qui profite des services rendus par l'ajout de bois mort. En France, cette pratique est peu utilisée car le bois mort est souvent mal perçu car lié à la formation d'embâcles qui constituent un facteur de risque inondation (Le Lay & Piégay, 2007; Morandi & Piégay, 2017). Toutefois, la gestion de la ripisylve en France oriente de plus en plus vers une élimination raisonnée du bois mort en fonction des enjeux (Dany, 2016). Le bois en rivière est un sujet compliqué, tant par la complexité des processus qui le contrôlent et qu'il engendre

¹² Ce type de dispositifs a été mis en œuvre sur des cours d'eau du bassin RM&C tels que La Bourbre, Le Vidourle et La Deûme

que par la sensibilité du grand public et des élus à son égard (Le Lay & Piégay, 2007). Bien que le bois constitue un bienfait écologique, les services de l'État continuent à promouvoir l'entretien des cours d'eau et maintiennent un cadre juridique aujourd'hui désuet (Le Lay & Piégay, 2007)¹³. Cependant, la loi Barnier (1995) a redéfini les objectifs de l'entretien, et par là-même de la restauration, l'un comme l'autre étant dès lors entrepris « afin de maintenir l'écoulement naturel des eaux, d'assurer la bonne tenue des berges et de préserver la faune et la flore dans le respect du bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques » (Morandi & Piégay, 2017).

Des enquêtes d'évaluation environnementale montrent que les cours d'eau disposant de bois sont perçus comme moins esthétiques, plus naturels, plus dangereux, et nécessitent une intervention (Le Lay & Piégay, 2007). Le dispositif législatif gagnerait à être amendé pour atténuer la responsabilité qui pèse sur les gestionnaires des cours d'eau et laisser une place au bois en rivière (Le Lay & Piégay, 2007). Le bois en rivière reste négativement valorisé dans l'imaginaire collectif et il importe d'en prendre conscience lorsque des décisions dites rationnelles doivent être prises en matière de gestion des rivières aménagées (Le Lay & Piégay, 2007).

2.1.4. Effets sur la faune piscicole

Thompson et al., (2017) ont démontré que l'ajout de bois dans un cours d'eau augmentait la biodiversité et la biomasse du milieu sur toute la chaîne trophique, et notamment les invertébrés et les truite farios. L'ajout de bois de grande taille et d'autres structures dans les cours d'eau est l'une des techniques les plus courantes et répandues pour améliorer l'habitat des poissons en rivière (Nagayama & Nakamura, 2010; Roni et al., 2015). En partie en raison de la popularité et de la diversité des techniques de mise en place du bois, des ouvrages complets et des manuels techniques ont été élaborés au fil des années pour guider les praticiens de la restauration et les pêcheurs locaux sur la manière de concevoir et de mettre en œuvre des projets d'introduction de bois dans les cours d'eau (Murphy et al., 1986;

Nagayama & Nakamura, 2010; Oregon department of forestry & Oregon department of fish and wildlife, 1995; Urabe & Nakano, 1998). Les modifications hydrauliques liées à la présence d'embâcles, caractérisées par des variations locales des vitesses, du sens d'écoulement, des hauteurs d'eau et de la composition granulométrique, créent une grande variabilité physique du milieu (cf. figure 11). On obtient ainsi une mosaïque de combinaisons différentes de ces trois variables physiques (vitesse, hauteur, granulométrie) au niveau de ces structures. L'habitat des organismes aquatiques, dont la sélection dépend pour beaucoup de ces trois variables, se trouve alors largement enrichi, chaque

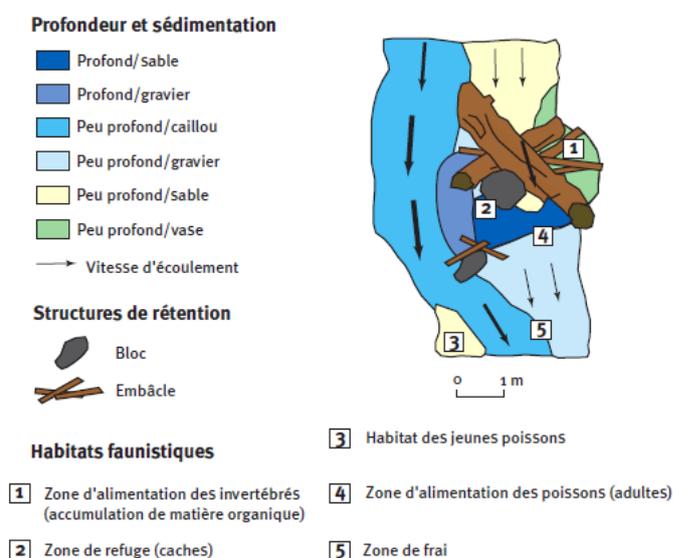


Fig 11. Le bois facteur de diversification physique de la rivière (Le Lay & Piégay, 2007)

¹³ En effet le code de l'environnement (R215-14) prévoit que 'le propriétaire riverain est tenu à un entretien régulier du cours d'eau. L'entretien régulier a pour objet de maintenir le cours d'eau dans son profil d'équilibre, de permettre l'écoulement naturel des eaux et de contribuer à son bon état écologique ou, le cas échéant, à son bon potentiel écologique, notamment par enlèvement des embâcles, débris et atterrissements, flottants ou non, par élagage ou recépage de la végétation des rives. Un décret en Conseil d'Etat détermine les conditions d'application du présent article.'

espèce et stade pouvant rencontrer les conditions favorables à leur survie et leur développement (Maridet et al., 1996). Dans des petits cours d'eau de montagne, les troncs tombés, en créant des escaliers où se succèdent mouilles et seuils, augmentent la diversité des habitats (Bisson et al., 1987). En termes d'écologie, il est généralement reconnu que l'enlèvement d'amas de bois réduit la qualité de l'habitat des poissons (Murphy et al., 1986; Sedell et al., 1988; Swanson et al., 1976). Pour les poissons, les accumulations de bois jouent le rôle d'abri, élément indispensable lors des périodes quotidiennes de repos. Elles sont utilisées d'une part comme abris hydrauliques, où les poissons se maintiennent facilement sans dépenses d'énergie excessives, et d'autre part comme protection contre les prédateurs terrestres et aquatiques (Maridet et al., 1996). Les modifications hydrauliques, hydrologiques et géomorphologiques induites par la présence de bois créent des refuges physiques (et d'écoulement) durant les périodes d'étiage saisonnier ou de sécheresse pluriannuelle (A. Gurnell, 2013) et durant les crues.

De nombreuses études ont mis en évidence une augmentation significative de l'abondance des poissons à la suite de l'ajout de bois dans les cours d'eau (Kratzer, 2018; Roni et al., 2008). Ces structures influencent la répartition, la croissance, la reproduction et la survie de la truite commune (*Salmo trutta*), notamment en favorisant la formation de mouilles, habitats préférentiels des salmonidés, dont la biomasse est corrélée au volume de bois flottant présent (Le Lay & Piégay, 2007; Urabe & Nakano, 1998). Des travaux réalisés en Suisse ont montré qu'en introduisant des arbres entiers dans un cours d'eau chenalisé, la biomasse et l'abondance de truites fario et arc-en-ciel augmentaient grâce à la création de nouveaux habitats, avec une croissance estivale accrue dans les secteurs boisés (Zika & Peter, 2002). À l'inverse, les opérations de nettoyage du lit et des berges, ou la suppression de la ripisylve, réduisent la disponibilité des caches et modifient les apports de bois, impactant négativement la biomasse et la diversité piscicole (Le Lay & Piégay, 2007).

Dans un suivi de sites sur lesquels du bois a été réinjecté dans le cours d'eau dans l'état du Vermont, la biomasse moyenne d'Omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) sur les sites traités avait approximativement triplé dès la deuxième année de suivi après traitement (Kratzer, 2018). Une revue de 50 études de restauration utilisant du bois dans des ruisseaux en Allemagne et en Autriche a montré des effets positifs sur certaines espèces comme la truite fario, le vairon, le chabot, le chevesne et le barbeau (Kail et al., 2007). Dans une revue d'expériences sur la restauration utilisant l'ajout de bois, Des données ont montré une augmentation significative du nombre de truites fario dans les tronçons restaurés par rapport aux tronçons témoins, deux ans après l'ajout de bois (Becker et al., 2003) depuis (Kail et al., 2007). Un autre répondant a rapporté une multiplication par 15 du nombre de truites fario 3,5 ans après l'ajout de bois ; cependant, aucune donnée n'était disponible pour les tronçons témoins (Siemens, 2005) depuis (Kail et al., 2007). De plus, les répondants de cette synthèse ont signalé des effets positifs sur les populations de vairon (*Phoxinus phoxinus*), de chabot (*Cottus gobio*), de chevesne (*Leuciscus cephalus*) et de barbeau fluviatile (*Barbus barbus*). L'effet du bois sur l'ombre commun (*Thymallus thymallus*) variait selon les projets (Kail et al., 2007). Une autre étude française se concentrant sur les grandes rivières a montré que certaines espèces généralistes, comme le vairon, le chevesne, le spirin ou la perche commune, présentent une forte affinité pour les

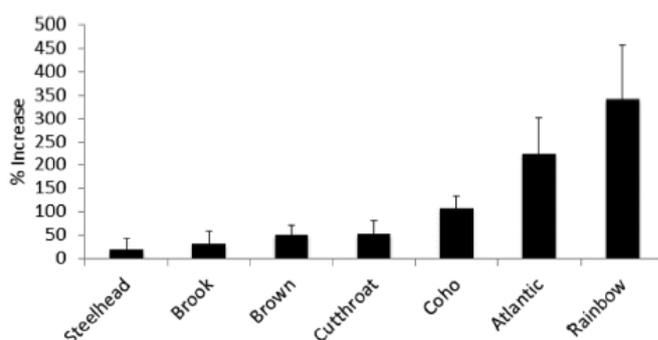


Fig 12. Augmentation de l'abondance de différentes espèces de salmonidés à la suite de programmes de réintroduction de bois estimés sur 211 projets (Roni et al., 2015)

secteurs boisés, où elles trouvent abris, ressources alimentaires et diversité d'habitats (Thevenet et al., 1998).

Des expérimentations menées sur de petits cours d'eau confirment que les tronçons enrichis en bois présentent une plus grande abondance de poissons et que les individus les plus âgés évitent les secteurs dépourvus de débris ligneux, ce qui souligne le rôle structurant du bois pour l'intégrité biologique des milieux aquatiques (Angermeier & Karr, 1984). Les travaux de nettoyage du lit et des abords du cours d'eau ont un effet négatif sur les peuplements en réduisant le nombre d'abris indispensables au maintien des poissons (depuis Le Lay & Piégay, 2007). Ainsi, la suppression de la ripisylve, combinée avec le nettoyage complet du cours d'eau et des coupes fréquentes a pour conséquence de modifier les sources, les mécanismes d'alimentation et la redistribution du bois dans l'hydrosystème; ce qui conduit à altérer la biomasse et la biodiversité spécifique des poissons (Bisson et al., 1987). Sur les secteurs étudiés par ces auteurs, la chute d'arbres, en reconstituant des caches, a permis de revenir à la densité piscicole initiale avant nettoyage. Une étude sur un petit ruisseau en Illinois, avec un tronçon sur lequel le bois a été enlevé et un tronçon sur lequel du bois a été rajouté a montré que les poissons étaient plus abondant sur le site avec la présence de bois, que la plupart des poissons les plus gros, d'âge > 2 ans évitaient les tronçons sans bois et a conclu que le retrait du bois dans les petits cours d'eaux pouvaient perturber l'intégrité biologique du milieu (Angermeier & Karr, 1984). Une étude a quantifié les effets hydromorphologiques, biologiques et fonctionnels du bois mort de grande taille huit mois après son installation dans une grande rivière à lit de graviers et a mesuré localement une multiplication par 10 de l'abondance de poissons (Anlanger et al., 2022b). Dans une revue, la plupart des études sur les salmonidés ont montré une augmentation du nombre de poissons après l'ajout de bois, bien que les études fassent défaut pour certaines espèces de salmonidés et que les résultats concernant les espèces non salmonidés soient très variables et relativement rares (Roni et al., 2015) (cf figure 12). Une étude suisse a observé qu'en ajoutant des arbres entiers sur un cours d'eau chenalisé, la biomasse et l'abondance de truites farios et arc-en-ciel avaient augmenté grâce à la création de nouveaux habitats, et que ces espèces avaient tendance à grandir davantage dans les secteurs avec du bois (Zika & Peter, 2002).

L'ensemble de ces résultats souligne le rôle central du bois dans la structuration des habitats aquatiques et le maintien de la diversité et de l'abondance piscicole.

2.1.5. Impacts sur la faune aquatique non piscicole

Dans quatre cours d'eau de montagne, l'ajout de bois a favorisé la richesse, la diversité et la biomasse des invertébrés en été, mais l'effet inverse a été observé en hiver ; la composition des communautés a aussi changé, avec une forte augmentation des Elmidae, Limnephilidae et Limoniidae, et une diminution des Baetidae (Flores et al., 2017). En Allemagne, le bois mort a significativement augmenté la densité et la richesse des macroinvertébrés (Zigann et al., 2023). La réintroduction de bois dans trois rivières de plaine aux Pays-Bas a favorisé la diversité des habitats et entraîné des changements dans les communautés de macro-invertébrés, avec une augmentation de l'abondance pour de nombreux taxons dans chaque cours d'eau étudié (De Brouwer et al., 2020) (cf. figure 13).

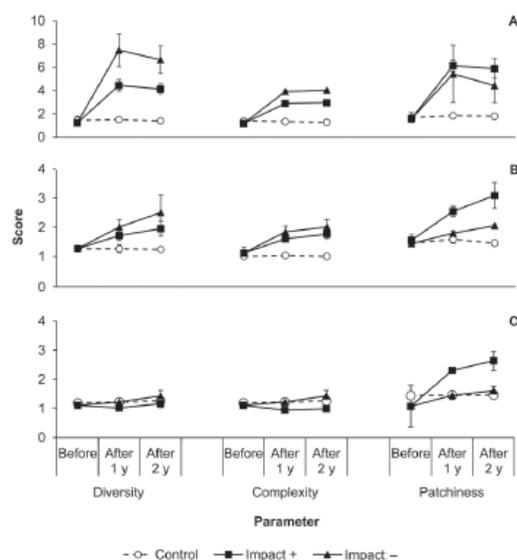


Fig 13. Réponse des invertébrés un an et deux après ajout de bois sur trois cours d'eau (A,B et C) (De Brouwer et al, 2020)

Aucune étude n'a été trouvée sur l'écrevisse à pieds blancs, mais en Nouvelle-Zélande, la présence de bois a augmenté l'abondance et la biomasse de l'écrevisse locale *Paranephrops planifrons* (Parkyn et al., 2009).

2.1.6. Impact sur le régime hydrologique

La présence de bois en rivière influence le régime hydrologique en modifiant les dynamiques d'écoulement et la connectivité du cours d'eau avec son environnement. Les structures ligneuses ralentissent généralement les vitesses d'écoulement en amont, tout en pouvant les accélérer localement en aval (Stringer & Gaywood, 2016). Elles augmentent la rugosité hydraulique du lit et de la plaine alluviale (S. Dixon, 2015), favorisant ainsi les échanges entre le chenal principal et les annexes hydrauliques, telles que les zones d'expansion des crues (Quiniou & Piton, 2022). Le bois favorise également la connectivité latérale entre le cours d'eau et sa plaine d'inondation (A. M. Gurnell et al., 2002), ce qui facilite le stockage de l'eau dans les nappes souterraines (Wohl, Kramer, et al., 2019).

Cette infiltration accrue contribue à modifier les régimes hydrologiques à l'échelle du tronçon ou du bassin versant, avec des effets bénéfiques lors des épisodes de crue. En ralentissant les écoulements dans la plaine d'inondation, le bois contribue à l'atténuation et à la diminution des pics de crues, tout en augmentant le temps de transfert de l'eau vers l'exutoire (S. Dixon, 2015; S. J. Dixon et al., 2016). Des études de terrain illustrent ces effets, par exemple, Mason et al., (1990) ont montré que le recalibrage et le retrait du bois flottant dans la rivière *Chicod Creek* ont entraîné une réduction significative de la durée des pics de crue, mais aussi une augmentation des débits de pointe, conséquence directe de l'augmentation de la capacité hydraulique du chenal (Quiniou & Piton, 2022). À l'inverse, l'ajout de structures en bois (« leaky dams ») est désormais utilisé sur de nombreux bassins versants comme SFN pour limiter les inondations (Grabowski et al., 2019). Ces ouvrages laissent passer l'eau à faible débit, mais sont submergés lors des crues, contribuant ainsi à atténuer les effets des événements extrêmes (Ashbrook, 2020; Hankin et al., 2020; Muhawenimana et al., 2021).

Cependant, l'accumulation de bois à des endroits critiques, comme les ponts, peut réduire la section transversale du chenal et diminuer la capacité d'écoulement, augmentant ainsi le risque d'inondations localisées (Gippel et al., 1996). Ce phénomène peut s'accompagner de processus morphodynamiques tels que l'aggradation du lit, l'avulsion du chenal ou le creusement local (Ruiz-Villanueva et al., 2016). Une étude anglaise a par ailleurs montré que les barrages de débris végétaux modifient notablement l'amplitude et le délai des pics de crue à mesure que l'onde de crue progresse dans le réseau hydrographique (K. J. Gregory et al., 1985).

Le bois mort, a tendance à rehausser le niveau des nappes phréatiques (S. J. Dixon et al., 2016; Wohl, Kramer, et al., 2019) ce qui augmente le volume d'eau stocké dans les sols (ralentissement dynamique) (L. G. Larsen & Harvey, 2011) et peut même soutenir le débit d'étiage. Toutefois, les modifications de l'évaporation et de l'évapotranspiration liées à ces changements peuvent également influencer les débits d'étiage (Bobst et al., 2022).

2.1.7. Effets sur la qualité physico chimique de l'eau

Les rivières sont le siège de processus de recyclage, de transformation, de stockage, d'élimination des éléments chimiques qui les traversent. Ces processus sont d'ordre physique (sédimentation, dilution, adsorption), chimique (oxydation, réduction) et biologique (assimilation, oxydation et réduction

microbienne). Cette capacité de transformation des éléments chimiques est liée également à des éléments morphologiques favorisant ces processus (Dany, 2016).

Les résultats d'une étude américaine ont montré que la rétention du phosphate (PO_4^{3-}) était étroitement liée à l'âge de la forêt et donc au volume de bois dans le cours d'eau, qu'ils ont attribué à une adsorption abiotique accrue du phosphate par les sédiments inorganiques retenus par le bois (Warren et al., 2007).

Des expériences en chambres de recirculation ont montré que les structures de bois et les galets présentaient des taux d'absorption de nitrate et de phosphate plus élevés par unité de surface que le sable/gravier ou la matière organique particulaire fine (Aumen et al., 1990). Les taux d'absorption élevés des pièces de bois et des galets pourraient s'expliquer par leur aptitude à être colonisés par des microorganismes hétérotrophes et des algues. Les ligneux pourraient un rôle crucial à petite échelle spatiale grâce à leur forte activité d'absorption. Dans une étude, tous les barrages de débris organiques ont été retirés sur un tronçon de 175m, ce qui a augmenté de 500% l'export en sédiments fins et grossier et donc le phosphate stocké dans les particules fines (Bilby, 1981).

Une étude en milieu urbain a mesuré la production et la consommation d'azote de différentes structures géomorphologiques et a montré que le potentiel de dénitrification était le plus élevé en présence de d'amas de bois et de bancs de graviers riches en matières organiques (Groffman et al., 2005). Les résultats d'une autre étude ont montré que le retrait du bois et l'exclusion des feuilles mortes réduisait la rétention des nutriments dans un ruisseau forestier (Webster et al., 2000).

2.2. Les barrages naturels de castors

Historiquement, les barrages de castors étaient fréquents dans les petits cours d'eau de la majeure partie de l'hémisphère nord. Alors qu'il a été quasiment exterminé, la perte cumulative de millions de barrages de castors a considérablement affecté l'hydrologie et la dynamique sédimentaire des systèmes fluviaux. La construction de barrages par les castors fournit des éléments structuraux importants qui modifient les écoulements, entraînant des effets en cascade sur les paysages fluviaux (M. M. Pollock et al., 2003). Bien que les castors soient présents dans les grandes rivières et les lacs où ils peuvent construire des huttes ou des terriers, l'accent est mis ici sur leurs effets sur les petits et moyens cours d'eau où ils recrutent du bois dans le chenal et construisent des barrages. L'effet des canaux et terriers n'est pas étudié. L'activité des castors et son effet sur la morphologie fluviale a été extensivement traitée, mais pour l'essentiel dans un corpus de littérature scientifique distinct de celui du bois mort (Wohl, Scott, et al., 2019). Les barrages de castors peuvent être vus comme une sous-catégorie distincte du bois en rivière, partageant de nombreuses caractéristiques mais présentant certaines spécificités, comme la collecte de bois mort et l'entretien actif des structures. Cela engendre des différences dans le recrutement et la rétention du bois mort de grande taille au niveau des tronçons de cours d'eau influencés par les castors (Wohl, Scott, et al., 2019). Parmi les nombreux organismes qui modifient leur environnement, les castors influencent la morphologie des chenaux et la biogéochimie de manière si spectaculaire qu'ils ont inspiré le paradigme de « l'ingénieur de l'écosystème » (Jones et al., 1994). Les barrages de castor entraînent la création de nouveaux milieux lentiques entraînent une diminution de la connectivité hydrologique longitudinale et une augmentation de la connectivité latérale (Burchsted et al., 2010; Polvi & Wohl, 2012).

2.2.1. Hydromorphologie

La présence de barrages de castors transforme profondément la morphologie des cours d'eau. En modifiant le profil longitudinal, ces ouvrages créent des chenaux en escalier plutôt qu'un gradient continu (Giriat et al., 2016). À l'instar du bois mort, mais de façon encore plus marquée, les barrages de castors renforcent la connectivité latérale en forçant l'eau à s'étendre dans les terres riveraines, inondant ainsi les plaines alluviales et générant une mosaïque de zones humides (Polvi & Wohl, 2012). La construction de barrages par les castors peut transformer des cours d'eau incisés et statiques en réseaux dynamiques à chenaux multiples, favorisant la création de marais et de prairies humides (A. Larsen et al., 2021) (cf. figure 14). La complexité morphologique du chenal s'accroît immédiatement en aval des barrages, tandis qu'elle tend à diminuer lorsque la population de castors décline (Polvi & Wohl, 2012). Les barrages de castors limitent l'incision du lit du cours d'eau, tout en pouvant favoriser localement l'érosion latérale (Gorczyca et al., 2017). Le ralentissement du courant réduit l'énergie érosive en aval (Wohl et al., 2017). Certaines études montrent cependant que les barrages de castors peuvent également contribuer à la stabilisation des berges (Brookes et al., 1988; M. E. Smith et al., 1991; R. D. Smith et al., 1993).

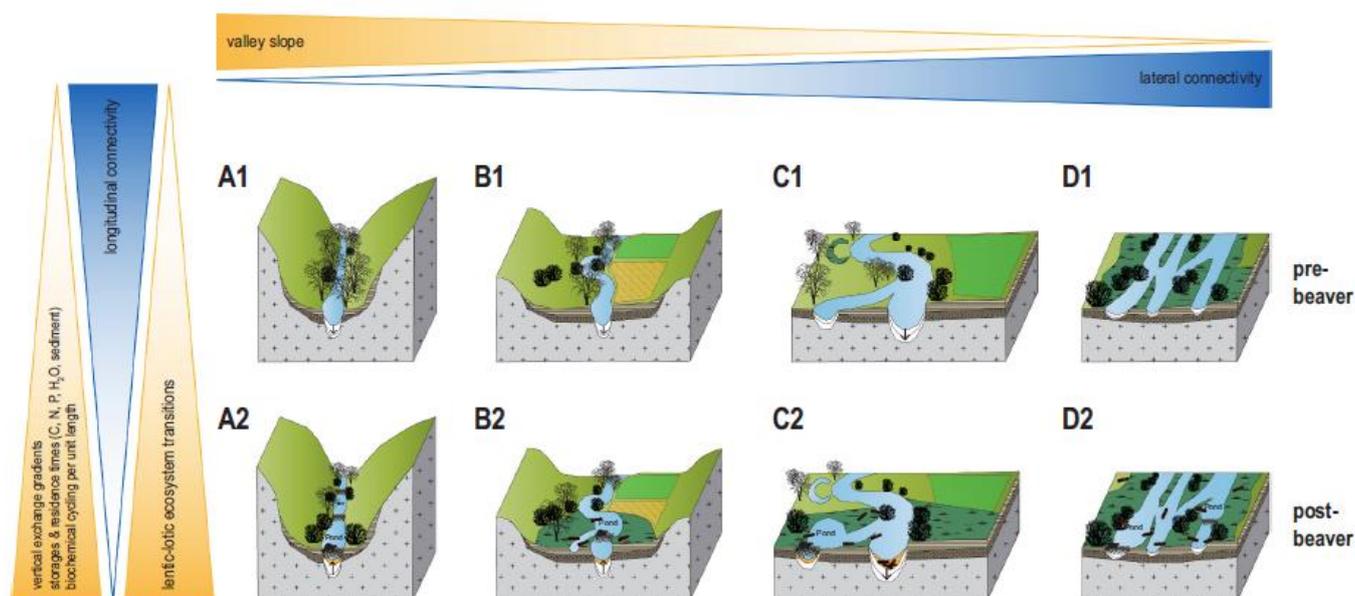


Fig 14. Modèle conceptuel sur la capacité des barrages de castor à favoriser la connectivité latérale. Les transitions verticales (1-2) représentent le changement dans chaque contexte paysager entre la période avant (1) et après (2) la construction de barrages par les castors. Une conséquence importante de cette transition dans tous les contextes paysagers est la diminution de la connectivité longitudinale (Larsen et al, 2021)

Les barrages de castors réduisent la connectivité longitudinale du transport sédimentaire, car la diminution de la vitesse du courant en amont favorise le dépôt de sédiments. Les taux d'accumulation varient fortement selon les contextes, de 0,2 à 45 cm/an (A. Larsen et al., 2021). Des taux d'aggradation ont été mesurés à l'amont des barrages de castors sur la rivière Bridge Creek, qui transporte une charge sédimentaire importante (fine et grossière) et ont observé une rapide accumulation de sédiments derrière les barrages. En fonction des apports locaux en sédiments, avec une élévation du lit de 40 cm à l'intérieur du lit mineur lors de la première année (M. Pollock et al., 2012; M. M. Pollock et al., 2007a) pendant que le chenal encaissé se remplit, puis tendent à se stabiliser autour de 0,075m par an à partir de la sixième année, alors que les sédiments commencent à s'accumuler sur les terrasses adjacentes

(M. M. Pollock et al., 2007b) (*cf. Courbe figure 15*). Une étude Belge a montré une épaisseur moyenne de 25,1cm déposée en amont de 31 barrages de castors sur une période de 7 ans pour un volume de sédiment total de 1710 m³ (De Visscher et al., 2014).

En cas de rupture d'un barrage, un volume important d'eau et de sédiments peut être libéré, générant une crue morphogène (Burchsted et al., 2010; A. Larsen et al., 2021).

Les retenues de castors agissent aussi comme des pièges à sédiments fins (Naiman et al., 1986; Risch & Pomati, 2025; Wohl, 2013) et à matière organique (M. M. Pollock et al., 1995). Ces zones stockent et libèrent eau et sédiments selon les conditions hydrologiques, la saison et le type d'habitat, créant ainsi un profil en paliers du transport sédimentaire (Burchsted et al., 2010). Cependant, ces discontinuités ne sont pas comparables à celles générées par les seuils en béton (Wohl & Inamdar, 2025). Les barrages de castors augmentent également la rétention des embâcles naturels, avec une hausse estimée à 78 % (Polvi & Wohl, 2013).

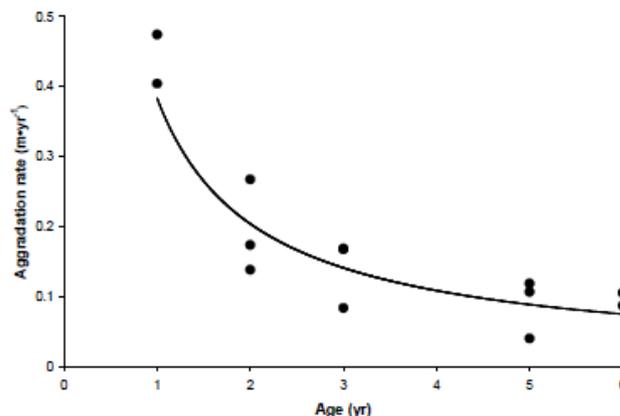


Fig 15. Taux d'aggradation mesurés en amont des barrages de castors sur Bridge creek (Pollock et al, 2007)

Effets sur le temps long

La sédimentation dans les retenues de castors est suffisante pour façonner durablement des reliefs ripariens, parfois persistants sur des siècles ou des millénaires, avec un impact à l'échelle du bassin versant (Butler & Malanson, 2005; Naiman et al., 1988). Sur le long terme, les barrages de castors peuvent modifier la pente du profil longitudinal des vallées (M. M. Pollock et al., 2003). Des analyses sédimentaires menées au Colorado confirment que les castors jouent un rôle majeur dans l'aggradation des plaines alluviales post-glaciaires, soulignant l'importance de prendre en compte la variabilité historique des processus de fond de vallée pour la restauration écologique (Polvi & Wohl, 2012). Sur le long terme, les taux de dépôt sédimentaire sont plus faibles, autour de 0,05 cm/an pendant l'Holocène, mais répartis sur de vastes surfaces (Polvi & Wohl, 2012). L'éradication des castors en Europe occidentale à l'époque médiévale a été avancée comme une explication à la disparition des rivières anastomosées au profit de chenaux plus rectilignes et de zones humides réduites dans les vallées post-glaciaires alpines (Rutten, 1967). Plusieurs études paléontologiques suggèrent que les surfaces planes au fond des vallées récemment déglacées résultent de l'accumulation de sédiments derrière les barrages de castors (Polvi & Wohl, 2012; Ruedemann & Schoonmaker, 1938; Rutten, 1967).

2.2.2. Effets sur la faune piscicole

Une méta-analyse effectuée sur les effets des barrages naturels de castors sur les populations piscicoles montre généralement plus d'effets positifs que négatifs cités dans la littérature scientifique avec les bénéfiques cités 184 fois et les effets négatifs 119 fois (Kemp et al., 2012). Après les barrières à la migration/déplacement, la perte d'habitats de frai due à l'envasement des graviers de frai est l'impact négatif le plus souvent cité des activités des castors (Kemp et al., 2010). Les résultats d'une enquête d'opinion d'experts impliquant 45 experts nord-américains et européens ont révélé que la majorité des scientifiques et gestionnaires des pêches avaient tendance à suggérer que l'impact global des castors sur les populations de poissons était positif (58 % des réponses) (Kemp et al., 2010).

Continuité piscicole

La continuité piscicole constitue un enjeu central pour la préservation des écosystèmes aquatiques car les barrières perturbent les populations de poissons de multiples façons : blocage des migrations reproductives, limitation de la colonisation d'habitats, isolement génétique des populations, et restriction de l'accès à des refuges vitaux lors d'épisodes extrêmes (sécheresses, crues) (Dany, 2016). Dans ce contexte, les barrages de castors (naturels ou mimétiques) suscitent des débats importants, en France comme à l'étranger (Auster et al., 2021; Kemp et al., 2012).

La méta-analyse de (Kemp et al., 2012) synthétisant 108 études, révèle une surreprésentation des recherches nord-américaines (88%) sur les relations entre poissons et barrages de castors, centrées sur *Castor canadensis* et des espèces de poissons locales. Aucune étude française et quelques études européennes sont comprises dans cette méta-analyse. Les travaux analysés se concentrent principalement sur les salmonidés : ainsi dans une autre méta-analyse comprenant 82 publications scientifiques sur les effets des castors sur les poissons, 78% concernaient les salmonidés (Grudzinski et al., 2022). Elles étudiaient notamment différentes espèces de truites et saumons natives américaines, dont les besoins migratoires diffèrent de ceux des espèces du bassin RM&C. Pour adapter ces résultats au contexte du bassin RM&C, les études européennes et les études concernant les espèces présentes sur le bassin RM&C sont priorisées. Ainsi, les études portant sur la truite fario (*Salmo Trutta*) et les espèces dont l'écologie est proche¹⁴ sont pertinentes. Dans une précédente méta analyse, seules 11 études sur 98 mentionnent la truite fario (*Salmo trutta*)¹⁵ (Kemp et al., 2010). D'une manière générale, la transposition des conclusions nord-américaines reste délicate, en raison des différences comportementales entre castors européens et américains, des assemblages piscicoles distincts, et des spécificités hydrologiques, géologiques et climatiques locales.

Aux Etats-Unis certaines études ont trouvé que les barrages de castors entravaient les reproducteurs automnaux (omble de fontaine et/ou truite fario) pendant les périodes de faible débit dans l'État de New York, même si cette étude n'est pas empirique (Cook, 1940) et dans le Maine (Rupp, 1955). Toutefois (Rupp, 1955) a conclu que, comme l'habitat de la truite était bien réparti sur l'ensemble de son site d'étude, une migration saisonnière extensive n'était probablement pas importante mais que dans d'autres contextes ces obstacles pourraient être un problème. Une autre étude menée aux Etats-Unis sur la capacité de plusieurs salmonidés à franchir des ouvrages de castors a conclu que la mobilité de la truite fario pouvait être entravée par les barrages de castors, la majorité des truites farios taguées pendant cette étude n'ayant pas été détectés comme ayant passés ouvrages castors (Lokteff et al., 2013).

À l'inverse, une autre étude menée en Californie a démontré qu'une partie des truites peut franchir les barrages dans les deux sens, montrant que ces obstacles ne sont pas infranchissables (Gard, 1961) Ces déplacements ont lieu tout au long de l'année, bien qu'ils soient conditionnés par le débit de la rivière (Gard, 1961). Les truites fario étaient plus susceptibles de passer par-dessus les barrages construits par les castors que les saumons de fontaine ou les truites arc-en-ciel. De plus, les poissons utilisent divers moyens pour contourner ces obstacles, notamment en empruntant des chenaux latéraux, en sautant par-dessus, ou en se faufilant à travers les interstices des barrages (Gard, 1961). Plus récemment une étude sur la rivière *Bridge creek* concernant la truite arc-en-ciel migratrice¹⁶ a montré qu'aucune entrave

¹⁴ Études mentionnant le saumon de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) dont l'écologie présente des similitudes comportementales avec la truite fario, ainsi que les études concernant la truite arc en ciel (*Oncorhynchus mykiss*), même si les périodes de migration de cette dernière sont différentes et que les capacités à franchir des ouvrages peuvent donc différer de la truite fario

¹⁵ Incluant sa forme migratrice (truite de mer)

¹⁶ Steelhead : forme anadrome de la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*)

à la mobilité n'a été causée par l'ajout de nombreux ouvrages de castors naturels et artificiels (Bouwes et al., 2016). Ces différences peuvent en partie s'expliquer par les régimes hydrologiques différents selon les régions, et correspondant ou non aux périodes de montaison des espèces.

En Europe, quelques études intéressantes sont à mentionner, avec des conclusions encore très hétérogènes. En Norvège, une étude conclue qu'en raison de leur faible fréquence, de leur petite taille et de leur courte durée de vie, les barrages de castors européens auront un effet négligeable sur les migrations en amont et en aval du saumon atlantique et de la truite de mer¹⁷ (Parker & Rønning, 2007). Encore en Norvège, une autre étude conclut que les ouvrages castors n'ont pas bloqué le mouvement de salmonidés (truites et saumons) juvéniles qui ont été détecté franchir des barrages castors et en conclut que « *Bien que les barrages de castors puissent ressembler à des obstacles infranchissables, de nombreuses opportunités de déplacement existent pour les poissons. Il a été documenté que les poissons se déplaçaient même lorsqu'il n'y avait pas de voie d'écoulement visible, utilisant probablement les espaces à l'intérieur des barrages* » (Malison & Halley, 2020).

En Ecosse, une étude extensive a été menée sur la réponse des truites farios à la modification des habitats par les barrages de castors. Cette étude conclut que le passage au-dessus des barrages de castors pendant les périodes de débit moyen et élevé ne doit pas être une préoccupation de gestion (Needham, 2024). Cependant, le passage peut être entravé en périodes de faible débit, et durant ces moments, une intervention de gestion peut être nécessaire. Une autre étude écossaise empirique (utilisant des PIT tags¹⁸) a évalué l'impact d'une série de quatre barrages de castors sur le déplacement en amont de la truite fario pendant la période de frai (octobre-décembre) Le succès de passage a notablement varié entre les années, les débits élevés et la taille des poissons étant des facteurs positifs importants pour le passage en amont (Needham et al., 2025). Les résultats indiquent qu'avec des conditions environnementales et biotiques adéquates, la truite fario est capable de franchir les barrages de castors, bien que dans certaines conditions, ces barrages puissent freiner leur progression, l'ampleur de cet impact étant modulée par ces facteurs. En particulier, les effets barrières des barrages de castors sont exacerbés lors des faibles débits (Needham et al., 2025).

En Pologne, une étude sur un ruisseau de montagne a aussi observé que les barrages de castors n'étaient pas des barrières permanentes au passage des poissons, qui pouvaient passer les ouvrages sans difficulté au printemps et conclut que les impacts sur la migration des poissons étaient mineurs en regards des impacts positives sur l'ichtyofaune du ruisseau (Kukula & Bylak, 2010). Une étude menée dans les Carpates polonaises indique que la distribution des poissons observée dans les rivières étudiées suggère que même les petites espèces, telles que le vairon commun et la loche franche, sont vraisemblablement capables de franchir les barrages de castors à certaines périodes (Bylak et al., 2014).

Aucun consensus ne semble donc réellement émerger de la littérature scientifique sur ce sujet, avec des résultats très hétérogènes (Kemp et al., 2012). La méta-analyse met en lumière le fait que la majorité (78,4 %) des études soulignant le potentiel des barrages de castors à entraver les déplacements des poissons et à avoir un impact significatif sur les populations sont spéculatives et non fondées sur des données (Kemp et al., 2012). Une autre méta-analyse sur les effets des barrages castors relativement aux barrages artificiels, a conclu qu'il n'y avait pas d'effets négatifs globaux causés par les barrages ou les retenues de castors sur les salmonidés ou d'effets significatifs sur les poissons migrateurs, puisque les barrages étaient régulièrement inondés et l'excès d'eau contourne les barrages en s'écoulant à travers la zone riveraine pendant les périodes de fortes précipitations (Ecke et al., 2017). Les barrages de castors sont temporaires et peuvent être endommagés (s'effondrant partiellement ou même

¹⁷ Sous-espèce migratrice de la truite fario

¹⁸ Dispositifs utilisant la radio-identification via l'insertion de puces électroniques codées dans les poissons

entièrement) lors de grandes crues (Butler & Malanson, 2005). Par leur nature transitoire et dynamique, ils présentent des effets localisés et à court terme sur les écosystèmes aquatiques. Ces ouvrages semi-perméables permettent généralement le passage d'une proportion significative de poissons en montaison comme en dévalaison, bien que leur impact sur la mobilité piscicole soit plus marqué dans les très petits cours d'eau et durant les périodes de basses eaux (Kemp et al., 2012). La franchissabilité de ces structures varie selon plusieurs facteurs : le débit du cours d'eau (Needham et al., 2025; Snodgrass & Meffe, 1998), la durée de vie du barrage, et les espèces de poissons concernées (Kemp et al., 2012; Snodgrass & Meffe, 1998).

Aucune étude n'a cependant démontré que ces barrages naturels pouvaient constituer des obstacles infranchissables en permanence et dans toutes les conditions hydrologiques (M. M. Pollock et al., 2003). Les recherches actuelles soulignent plutôt leur caractère de barrières saisonnières, dont l'impact sur la connectivité piscicole reste limité dans le temps et dans l'espace. Contrairement aux seuils bétonnés qui peuvent isoler durablement les populations, les barrages de castors agissent comme des barrières semi-perméables temporaires pour certaines espèces (Wohl & Inamdar, 2025). Les impacts localisés des barrages de castors sur le passage des poissons, bien que potentiellement négligeables du point de vue de la dynamique à long terme des populations résistantes, peuvent imposer localement des pressions supplémentaires sur les stocks qui sont déjà stressés en raison de facteurs anthropiques (Kemp et al., 2012).

Impacts sur les populations piscicoles

Les ouvrages de castors offrent un potentiel important d'être bénéfique aux populations de truite fario en augmentant la diversité d'habitats (Collen & Gibson, 2001; Kemp et al., 2012; Needham, 2024; Stringer & Gaywood, 2016). L'augmentation de la diversité d'habitats a pour effet d'augmenter la diversité d'espèces. En Amérique du Nord, l'activité des castors est associée à une grande richesse et diversité des espèces de poissons (Snodgrass & Meffe, 1998).

Une étude récente menée en Suisse montre que la présence du castor a un effet très positif sur les populations de poissons. Dans les retenues de castors, la diversité des espèces est en moyenne multipliée par 2,6 et l'abondance totale par 5,9 par rapport aux sites témoins. Ces effets sont encore plus marqués lorsque les barrages sont restés intacts tout au long de l'étude, avec une diversité spécifique multipliée par 3,1 et une abondance par 13,7. Dans les territoires forestiers où les castors reconnectent le cours d'eau à la plaine alluviale, la diversité des espèces est multipliée par 6,5 et l'abondance par 62. De plus, les truites capturées dans les retenues de castors sont généralement plus grandes et plus lourdes que celles des sites témoins (Risch & Pomati, 2025).

L'étude menée en Ecosse montre les bénéfices des zones colonisées par le castor sur les populations de truites fario (Needham, 2024). La création de zones lenticules plus profondes sur les cours d'eau à dominante lotique ont pour effet de favoriser la densité de truites et les barrages semblent aussi servir de zones où les truites farios peuvent grossir davantage (Arismendi et al., 2020; Bylak et al., 2014; Hägglund & Sjöberg, 1999; Needham, 2024; Risch & Pomati, 2025). Ces habitats semblent aussi être particulièrement propices pour le vairon (Bylak et al., 2014; Hägglund & Sjöberg, 1999) et la loche (Bylak et al., 2014). L'ajout de zones lenticules peut augmenter la diversité d'espèces et favoriser les populations de cyprinidés et augmentent la densité de poissons de petite taille (friture) (Rupp, 1955).

En Pologne, une étude (Kukula & Bylak, 2010) a noté la diminution d'espèces rhéophiles et l'apparition de nouvelles espèces adaptées aux eaux stagnantes. La présence du chabot (*cottus gobio*) a été négativement impactée par les barrages de castor dans une étude suédoise, ceci est dû au fait que les

chabots affectionnent les zones lotiques rapides et très peu les zones lenticques et profondes (Hägglund & Sjöberg, 1999), ce qui est corroboré par une étude dans les montagnes Carpates polonaises où le chabot de Sibérie a été négativement impacté par les ouvrages castors (Bylak et al., 2014).

L'effet des barrages castors sur les populations de poissons varie aussi avec l'âge des retenues castors (Snodgrass & Meffe, 1998). Dans les Ardennes belges, une étude comparative menée sur le recrutement de juvéniles de truite fario entre zone avec barrages castors et zones sans barrages castors conclut que les barrages de castors ne semblent pas avoir pas d'impacts négatifs sur le recrutement en juvéniles à condition qu'il existe une zone de ruisseau directement connectée aux zones lenticques formées par les plans d'eau. Il semble que lorsqu'une portion de rivière n'est plus qu'une suite de plans d'eau, les barrages de castors ont des impacts négatifs sur la production de juvéniles de truite fario (Gilles, 2019).

La sédimentation dans les retenues castors peut altérer des zones de reproduction (Swanston, 1991), mais elle peut aussi filtrer les sédiments fins et ainsi protéger des zones de reproduction en aval (Beedle, 1991).

2.2.3. Autres effets sur la faune

Une méta-analyse des études publiées sur les interactions des castors avec la biodiversité a été réalisée, et l'équilibre entre les interactions positives et négatives avec les plantes, les invertébrés, les amphibiens, les reptiles, les oiseaux et les mammifères a montré que, globalement, les castors exercent une influence très largement positive sur la biodiversité (Stringer & Gaywood, 2016) (cf. figure 16). Leur capacité à modifier l'environnement permet d'augmenter fondamentalement l'hétérogénéité des habitats. De plus, les retenues de castors et les stades de succession uniques qui leur sont associés accroissent l'hétérogénéité des habitats tant dans l'espace que dans le temps. Les castors influencent également les écosystèmes par la création de diverses structures telles que des barrages et des huttes, des éléments importants comme le bois mort sur pied (après inondation), l'augmentation des débris ligneux, et la création d'une zone de transition progressive entre les milieux terrestres et aquatiques, riche en complexité structurelle (Stringer & Gaywood, 2016). L'étude a conclu que pour le contexte écossais, l'activité des castors devrait bénéficier la biodiversité et offrir un habitat important pour la loutre (*Lutra lutra*), le triton crêté (*Triturus cristatus*) et le campagnol amphibie (*Arvicola amphibius*), toutes des espèces d'importance pour la conservation. La comparaison de cours d'eau avec et sans barrages de castor montre qu'à l'échelle du paysage, les retenues de castor ont un effet majoritairement positif sur l'abondance et la diversité des communautés d'invertébrés aquatiques (Hering et al., 2001). En revanche, des études à des échelles plus réduites indiquent que la diversité peut-être plus faible dans les retenues (McDowell & Naiman, 1986, Nummi, 1989), avec une structure

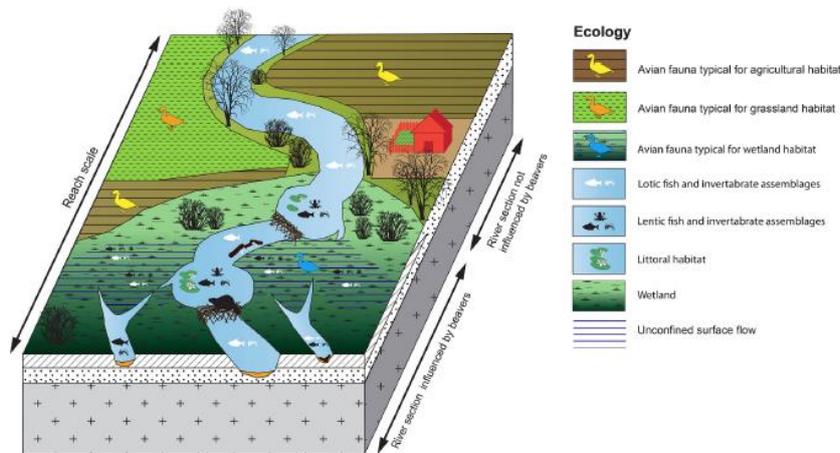


Fig 16. Les barrages et étangs de castors créent des habitats plus diversifiés et connectent les écotones aquatiques et riverains (Larsen et al, 2021).

barrages et des huttes, des éléments importants comme le bois mort sur pied (après inondation), l'augmentation des débris ligneux, et la création d'une zone de transition progressive entre les milieux terrestres et aquatiques, riche en complexité structurelle (Stringer & Gaywood, 2016). L'étude a conclu que pour le contexte écossais, l'activité des castors devrait bénéficier la biodiversité et offrir un habitat important pour la loutre (*Lutra lutra*), le triton crêté (*Triturus cristatus*) et le campagnol amphibie (*Arvicola amphibius*), toutes des espèces d'importance pour la conservation. La comparaison de cours d'eau avec et sans barrages de castor montre qu'à l'échelle du paysage, les retenues de castor ont un effet majoritairement positif sur l'abondance et la diversité des communautés d'invertébrés aquatiques (Hering et al., 2001). En revanche, des études à des échelles plus réduites indiquent que la diversité peut-être plus faible dans les retenues (McDowell & Naiman, 1986, Nummi, 1989), avec une structure

des communautés et des abondances spécifiques qui peut varier (McDowell & Naiman, 1986, Redin & Sjöberg, 2013). Dans une étude suisse en cours de parution, l'abondance d'écrevisses a réagi positivement à la présence des castors sans que soit précisé les espèces d'écrevisses étudiées (Risch & Pomati, 2025).

Les barrages de castors ont un impact principalement favorable sur les différentes espèces d'amphibiens. En effet, la création de zones humides variées, de tailles diverses et souvent interconnectées, offre des habitats idéaux pour leur développement et leur reproduction. Les prairies humides entretenues par l'activité des castors jouent un rôle crucial dans le maintien des populations d'amphibiens reproducteurs. Ces habitats nouvellement formés favorisent une richesse spécifique accrue à l'échelle locale et contribuent à renforcer la diversité biologique à l'échelle du paysage (Cunningham et al., 2007; Russell et al., 1999).

L'expansion des zones humides provoquée par la construction de barrages de castors joue un rôle clé dans l'augmentation de la diversité de l'avifaune (D. J. Brown et al., 1996; Grover & Baldassarre, 1995; Peterson & Low, 1977). Plus particulièrement, les habitats aquatiques comprenant de vastes étendues d'eaux peu profondes constituent des environnements essentiels pour de nombreuses espèces d'oiseaux d'eau (D. J. Brown et al., 1996).

2.2.4. Effets sur la flore

Une étude a montré qu'après douze ans de présence des castors, la richesse moyenne en espèces végétales a augmenté de 46% par parcelle, tandis que le nombre total d'espèces recensées a progressé de 148% en moyenne (Law et al., 2017). De plus, l'hétérogénéité, mesurée par la variation dans la composition des parcelles, a également connu une augmentation significative. Ces résultats soulignent que le castor, véritable « ingénieur de l'écosystème », peut, avec le temps, transformer des terres agricoles en zones humides caractérisées par une richesse en espèces et une diversité structurelle accrues, contribuant ainsi efficacement aux objectifs contemporains de restauration écologique (Law et al., 2017).

2.2.5. Effets sur la qualité physico chimique de l'eau

Température

Certaines espèces sont très sensibles à la température de l'eau et une augmentation de la température pourrait être critique à leurs populations, surtout si les températures estivales d'un cours d'eau sont déjà proches des maximaux tolérés par l'espèce. Cet impact potentiellement néfaste des retenues créées par les barrages de castors, et des techniques de restauration Low-Techs imitant ces constructions, est une source d'inquiétude majeure et commune, notamment au sein de la communauté des pêcheurs, mais pas seulement (Kemp et al., 2012). Sur les têtes de bassins du bassin RM&C, la truite fario (*Salmo trutta*) et le chabot commun (*Cottus gobio*) sont particulièrement thermosensibles et pour ces espèces et le réchauffement climatique vient apporter une pression supplémentaire (par la hausse de température et la baisse des débits). Dans une moindre mesure, d'autres espèces sont sensibles à la température mais un peu moins exigeantes comme la lamproie de planer, le vairon ou la loche franche.

La recherche bibliographique effectuée sur l'impact des barrages de castors sur la température médiane ou moyenne n'a pas montré de consensus. Certaines études montrent des augmentations de la température par les retenues castors (Majerova et al., 2015; Margolis, Raesly, et al., 2001; Shetter & Whalls, 1955) alors que d'autres n'ont pas trouvé d'impact significatif du castor sur la température

(Bouwes et al., 2016; McRae & Edwards, 1994; Talabere, 2002) ou ont trouvé un effet de baisse des températures maximales (Weber et al., 2017). Une étude a montré que la suppression d'ouvrages castors pouvait augmenter le réchauffement de l'eau (McRae & Edwards, 1994), une autre a trouvé un réchauffement en aval de certains barrages, mais pas tous (Andersen et al., 2011). Salyer, (1935) a observé un réchauffement de barrages à partir d'une certaine taille, mais ce réchauffement était très localisé et le ruisseau retrouvait généralement sa température initiale après quelques centaines de mètres en aval. Bouwes et al., (2016) ont observé que les températures de l'eau restaient stables ou diminuaient dans les sections contenant des retenues de castors, et que les fluctuations journalières étaient atténuées.

Une récente méta-analyse portant sur 27 études a révélé que les étangs de castors sont plutôt associés à une augmentation de la température en aval (Ecke et al., 2017). Une récente revue de littérature concernant les impacts des barrages de castors sur les poissons résume davantage ces résultats contradictoires. Kemp et al., (2012) ont cité 13 articles affirmant que les barrages de castors fournissaient des refuges thermiques et 11 articles arguant des impacts négatifs dus à l'altération du régime thermique (c'est-à-dire des augmentations préjudiciables des températures estivales)¹⁹. Bien que de nombreuses études existent concernant l'influence des barrages de castors sur les régimes hydrologiques et thermiques locaux, la majorité de ces études manquent de mesures de terrain suffisantes à des échelles spatiales (souvent un seul barrage ou complexe de barrage) et temporelles (souvent sur une seule saison voire quelques jours plutôt que des mesures continues sur une période de plusieurs années) appropriées pour tirer des conclusions significatives (Gibson & Olden, 2014; Kemp et al., 2012). De plus, de nombreuses études ont été menées sans comparaisons appropriées avec des tronçons de cours d'eau sans barrages, qui pourraient efficacement élucider les effets des retenues de castors sur la température des cours d'eau (Weber et al., 2017) et les résultats sont souvent généralisés de manière inappropriée au-delà des échelles des observations (Majerova et al., 2015). Les barrages de castors peuvent entraîner un réchauffement par différents mécanismes : baisse de l'ombrage par la végétation rivulaire liée à la présence de grandes retenues d'eau (Alexander, 1998), augmentation de la surface en eau et baisse des vitesses d'eau susceptibles d'augmenter les échanges avec l'air ambiant.

Toutefois, la présence d'ouvrages de castors entraîne une augmentation du niveau de la nappe alluviale favorisant les échanges entre eau de surface et eau souterraine (Westbrook et al., 2006). Une distribution spatiale plus large et un taux accru d'infiltration d'eau souterraine fraîche ont le potentiel d'augmenter l'hétérogénéité de la température des eaux de surface, et de modérer les températures extrêmes pendant les périodes d'étiage. Différentes études ont démontré une plus grande diversité de températures au sein des complexes castors que dans des zones sans barrages. Ainsi, une étude menée sur l'influence des ouvrages castors sur les régimes thermiques montre des différences de températures allant jusqu'à 10.5°C au sein des complexes castors alors que cette différence est de 2°C dans les zones sans ouvrage castors (Majerova et al., 2020) (*cf. figure 17*). Cette étude a aussi observé une stratification thermique au sein des retenues castors (fond de la retenue avec une eau plus fraîche qu'à la surface en été), confirmant des études précédentes (Elliott, 2000; Tate et al., 2007; Weber et al., 2017). Des résultats similaires ont été trouvés dans un travail de Master menée sur 17 ruisseaux de l'état de Washington qui montre que la température médiane été augmentée de 0.3°C en moyenne mais que le fond des retenues crée des zones d'eaux froides pendant les moments les plus chauds de la

¹⁹ Il est intéressant de noter que cette revue a également souligné que sur les 13 articles revendiquant des bénéfices thermiques des barrages de castors, seuls sept étaient basés sur des données, les six autres étant spéculatifs. Sur les 11 articles montrant des dégradations thermiques, un seul était basé sur des données empiriques, tandis que les autres étaient spéculatifs.

journée (Means, 2018). Cette stratification est attribuée à la baisse de la vitesse de l'eau, ainsi qu'à l'influence des échanges avec les eaux souterraines (Majerova et al., 2020). Une autre étude menée aux états unis sur 8 ans entre 2007 et 2014 et sur 34km linéaires de cours d'eau impliquant des ouvrages castors naturels et mimétiques, a révélé deux principaux effets positifs (Weber et al., 2017) :

- Un effet tampon longitudinal sur les extrêmes de température diurne estivale à l'échelle du tronçon (augmentation du minimum et baisse du maximum des températures journalières), dû à l'augmentation du stockage des eaux de surface. Ce phénomène a aussi été observé par (Bouwes et al., 2016).
- Une augmentation de la diversité thermique entraînant la création de refuges thermiques d'eau fraîche à l'échelle du chenal, grâce à une connectivité accrue entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Des zones d'exfiltrations d'eau souterraine ont été mesurées avec des températures de plus de 10°C inférieures aux zones sans ouvrages castors.

Une étude menée dans l'état du Utah sur une période de trois ans a démontré un réchauffement moyen de 0.38°C entre les zones après colonisation du castor comparé à avant, en partie expliquée par un temps de résidence de l'eau augmenté de 230% en moyenne. Elle a aussi identifié une augmentation de la diversité thermique avec une température s'étalant entre 11 et 18°C au sein de la zone colonisée par les barrages de castors (Majerova et al., 2015). Une telle hétérogénéité thermique est généralement négligée lorsque des mesures à plus grande échelle (par exemple, à l'échelle du tronçon) sont collectées. Majerova et al., (2015) concluent que « dans le contexte des impacts sur

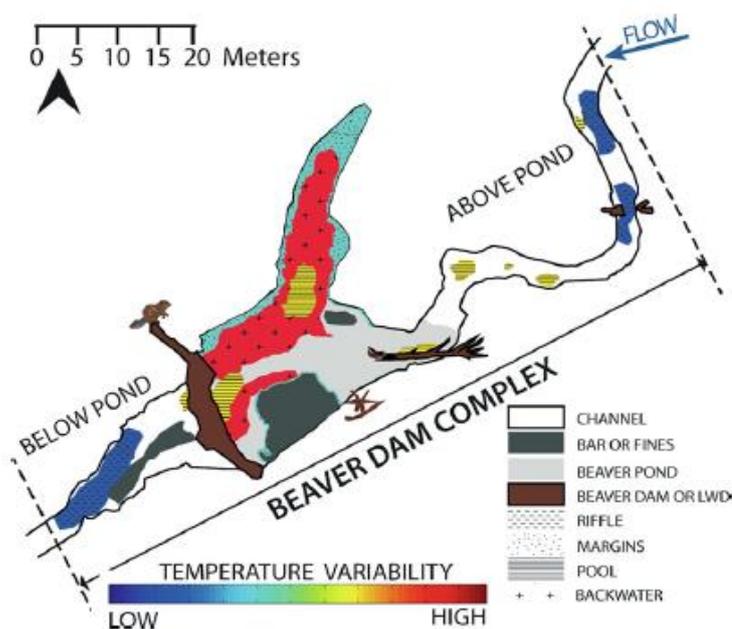


Fig 17. Variabilité thermique au sein d'un complexe castor (Majerova et Al, 2020)

l'écosystème et de l'utilisation potentielle du castor comme outil de restauration, où l'hétérogénéité de l'habitat et une résilience accrue du système sont obtenues grâce à des taux plus élevés de biodiversité, nous soutenons que quantifier l'étendue et l'augmentation de la variabilité peut être bien plus important que de mesurer un changement mineur et souvent incohérent des conditions moyennes. » Par exemple, en conditions de sécheresse, la capacité des castors à stocker l'eau de surface et à élever le niveau local de la nappe phréatique, pour laquelle il existe de nombreuses preuves, pourrait l'emporter sur tout effet négatif potentiel sur la température du cours d'eau (Majerova et al., 2015).

La hauteur des retenues, et donc celle des barrages, semble avoir un effet sur la variation de température selon certaines études. Fuller & Peckarsky, (2011) ont observé des augmentations de températures en aval des barrages de castors à faible hauteur, mais un effet de refroidissement en aval des barrages de castors à grande hauteur. Ces résultats ont été confirmés dans un rapport de master mesurée dans l'état de Washington, où les sites avec des hauteurs hydrauliques maximales plus importantes et des surfaces plus petites présentaient des températures plus fraîches en aval (Means,

2018). Ceci peut être expliqué par le fait que la pression hydraulique favorise les échanges avec les eaux souterraines.

Ces résultats suggèrent que la création de barrages de castors naturels et/ou artificiels pourrait permettre d'atténuer les impacts de la dégradation thermique causée par l'homme, au bénéfice des espèces thermosensibles comme les salmonidés (Weber et al., 2017). De plus, cette étude est certainement l'une des premières/seules à étudier les effets thermiques des ouvrages mimétiques utilisés pour la restauration.

Oxygène

La baisse d'oxygène dissout est fréquemment citée comme un problème lié aux retenues de castors (Kemp et al., 2010). Au sein des retenues, ou en aval de celles-ci, plusieurs études constatent une baisse de l'oxygène dissout (Naiman et al., 1988; Salyer, 1935). Le taux d'oxygène dissout a tendance à rapidement augmenter en aval de la retenue, et une réoxygénation complète était achevée à 250m en aval de la retenue dans une étude (M. E. Smith et al., 1991). Une privation prolongée d'oxygène critique due aux activités des castors ne devrait pas être attendue dans des cours d'eau non pollués et de faible ordre (M. E. Smith et al., 1991), qui sont généralement ciblés dans les restaurations de type Low-Tech.

Acidité

Plusieurs études constatent que dans un cours d'eau plutôt acide ($\text{pH} < 7$), le Ph peut être augmenté ainsi que la capacité de neutralisation de l'acide²⁰ grâce à la présence de retenue de castors, notamment en stockant les rentrées d'acides dans les couches de sédiments et en favorisant des processus anoxiques neutralisant l'acidité (Błędzki et al., 2011; Cirno & Driscoll, 1993; Margolis, Castro, et al., 2001; M. E. Smith et al., 1991). Une étude a observé que l'acidité pouvait augmenter avec l'âge du barrage lié à l'accumulation d'acides humiques liée au bois submergé (Salyer, 1935).

Nutriments

Dans le cycle de l'azote, les systèmes impactés par le castor peuvent stocker l'azote de manière considérable. M. M. Francis et al., (1985) a estimé que l'accumulation totale d'azote dans les sédiments, par unité de surface, est multipliée par 9 à 44 grâce à la construction de barrages par les castors sur une section de cours d'eau.

Dans une méta-analyse de 42 publications scientifiques portant sur des changements de qualité d'eau mesurés en aval d'un barrage de castor, Grudzinski et al., (2022) ont trouvé que :

- Le taux de NO_3^- a baissé dans 59% des études, a eu un effet neutre dans 35% des études et a vu une augmentation significative dans une étude
- Le taux de NH_4^+ a augmenté dans 50% des études, a eu des effets neutres dans 42% et a baissé dans une étude.
- Une absence de réponse claire sur certains paramètres comme l'Azote Total, le Phosphore total, le Phosphore Réactif soluble

Les barrages de castors retiennent des débris organiques qui peuvent se décomposer et libérer du NH_4^+ (ammonium), tout en créant des zones anoxiques pouvant constituer des points chauds pour l'élimination du NO_3^- (nitrate) par le biais de la nitrification et de la dénitrification couplées. Lazar et al., (2015) ont mesuré les taux de traitement des nutriments dans les retenues de castors et ont constaté

²⁰ ANC : Acide Neutralisation Capacity

que la dénitrification dans ces retenues pouvait éliminer 5 à 45 % des charges en NO_3^- du bassin versant. Le caractère puit ou source de nutriments d'une retenue de castor dépend de son âge, de son stade dans la succession écologique et de la morphologie du cours d'eau (Naiman et al., 1994). Le NH_4^+ exporté depuis les retenues castors a un caractère saisonnal (Devito & Dillon, 1993) et ne sera pas transporté sur des distances très longues car il sera potentiellement transformé en NO_3^- par nitrification (Błędzki et al., 2011; A. Larsen et al., 2021).

L'impact sur le cycle du phosphore a montré des résultats inconsistants (Grudzinski et al., 2022; A. Larsen et al., 2021). Le contraste entre un potentiel accru de stockage et la capacité à libérer du phosphore dans des conditions anaérobies pourrait expliquer l'absence de consistance dans le comportement des concentrations de PO_4^{3-} en aval des systèmes impactés par les castors, observée dans l'ensemble des études publiées (A. Larsen et al., 2021). Une méta-analyse récente suggère que la rétention du phosphore ne se produit généralement que dans les retenues plus anciennes (Ecke et al., 2017).

Dans une étude, Burchsted et al., (2010) ont émis les hypothèses suivantes :

- Dans des conditions de référence dominées par les castors, les concentrations d'azote à l'échelle du réseau étaient plus élevées qu'actuellement dans des conditions d'écoulement libre avec un impact humain moderne limité. Cependant, la colonisation par les castors de bassins versants actuellement enrichis en nutriments devrait entraîner une diminution globale des concentrations en nutriments.
- Les bassins versants colonisés par les castors sont plus résistants aux fluctuations des apports en nutriments que les bassins à écoulement libre.

Autres effets sur la qualité physico-chimique de l'eau

Les études scientifiques portant sur l'effets des ouvrages castors sur les paramètres physico-chimiques et la qualité de l'eau ont des résultats différents, qu'elles portent sur les conditions au sein d'une retenue castor ou en aval de celle-ci et il semble que le contexte de base influence énormément les évolutions que peuvent apporter la présence d'ouvrages de type barrages castors et les retenus associée, ainsi que la présence du castor lui-même. Dans une méta-analyse portant sur 42 publications scientifiques étudiant les changements de qualité d'eau mesurés en aval d'un barrage de castor, Grudzinski et al., (2022) ont trouvé que :

- 6 études sur 6 ont trouvé une augmentation de méthyl-Mercure (MeHg).
- Le taux de Carbone Organique Dissout (COD) a augmenté dans 59% des études revues, a eu des effets neutres dans 29% a baissé dans 12%.
- Le taux de Matières en Suspension (MES) a baissé dans 89% des études revues et a eu un effet neutre dans une étude.
- La saisonnalité des débits et des températures influence l'impact sur la qualité de l'eau (Law et al., 2016; Margolis, Castro, et al., 2001)

Ces résultats indiquent que les processus microbiens qui produisent du MeHg sont favorisés dans les retenues d'eau (Herrero Ortega et al., 2018), et que les barrages de castors retiennent des débris organiques qui peuvent se décomposer et libérer du carbone organique dissous.

Compte tenu des multiples modifications hydrologiques et biogéochimiques que les castors peuvent induire dans les systèmes fluviaux, ils sont susceptibles de jouer un rôle dans le cycle et la dégradation de contaminants émergents ou prioritaires, tels que les pesticides, les médicaments et les microplastiques, mais ces effets sont encore à étudier (A. Larsen et al., 2021).

2.2.6. Impact sur le régime hydrologique

Les barrages de castors modifient l'écoulement de l'eau au sein du cours d'eau, en ralentissant généralement les vitesses d'écoulement en amont et en les accélérant de manière localisée en aval des structures (Green & Westbrook, 2009; Stringer & Gaywood, 2016). Ils favorisent la connectivité du cours d'eau avec sa plaine d'inondation et peuvent favoriser le stockage dans les nappes souterraines, ce qui se traduit par des modifications des régimes hydrologiques à l'échelle d'un tronçon ou d'un bassin versant. Ils peuvent de plus modifier les caractéristiques d'évaporation et d'évapotranspiration (Grygoruk & Nowak, 2014).

Les effets sur le module (débit moyen) du cours d'eau peut varier selon les études. Grudzinski et al., (2022) a fait une revue de 52 études évaluant les effets des barrages de castors sur la réponse hydrologique des cours d'eau. Sur ces études 9 ont mesurés le changement de module lié à la présence d'ouvrages castors :

- Trois études ont montré une augmentation du module en aval des barrages
- Deux études ont rapporté des impacts neutres ou contrastés
- Trois études ont constaté une diminution du débit moyen.

Une étude sur trois ans dans l'état du UTAH a observé que la présence des castors avait modifié le module du cours d'eau. Alors que son débit diminuait vers l'aval, la colonisation par les castors a eu pour effet d'augmenter le débit entre amont et aval à l'échelle d'un tronçon de 750m de long (Majerova et al., 2015).

La présence de bois flottant sous forme d'accumulation en lit mineur ou en lit majeur peut avoir des effets bénéfiques en cas de crue. Ils provoquent une augmentation de la résistance (ou rugosité) hydraulique (rugosité du lit ou de la plaine alluviale), favorisant les échanges du lit mineur vers les annexes hydrauliques (zones d'expansion des crues) (Quiniou & Piton, 2022). En ralentissant les écoulements dans la plaine d'inondation, ils contribuent à la diminution des pics de crues (ralentissement dynamique). Plusieurs études scientifiques ont démontré l'effet d'ouvrages de castors comme atténuation des pics de crues. tout en augmentant (en magnitude) et en prolongeant temporellement les débits de base post-crue pendant des jours, semaines ou même mois dans certains systèmes (Majerova et al., 2015; Nyssen et al., 2011; Puttock et al., 2017).

Puttock et al., (2017) ont montré une atténuation médiane de 30% des débits de pointe et une augmentation médiane de 29% des délais entre précipitations maximales et débits de pointe. Dans une étude multi-sites Puttock et al., (2021) ont analysé plus de 1000 épisodes orageux et ont constaté un même ralentissement du pic de crue, une baisse du débit de crue et une atténuation entre débit de crue maximal et débit de base (ratio Q5:Q95).

Cette même étude a montré que même en période humide, les pics de crues pouvaient être diminués jusqu'à 60%. L'atténuation est plus marquée pour les petits événements mais peut aussi s'observer sur des événements plus importants. En effet, Westbrook et al., (2020) ont invalidé une idée reçue selon laquelle, en raison de leur faible capacité de stockage et de leur risque de rupture, les

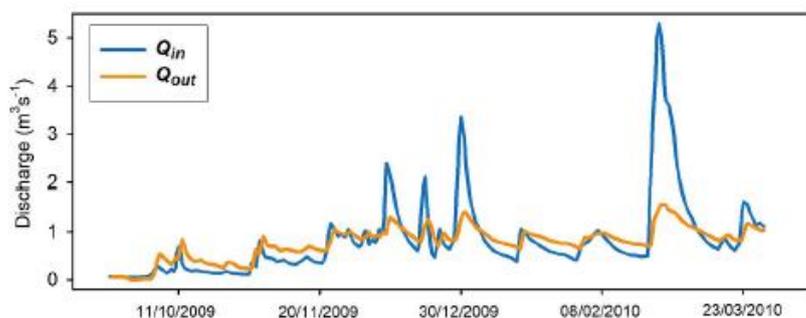


Fig 18. Atténuation des pics de crue après barrages de castors (Larsen et al, 2021 depuis Nyssen et al, 2011)

barrages de castors n'atténuent que marginalement les crues lors de fortes pluies. Pour vérifier cette hypothèse, Westbrook et al., (2020) ont surveillé une crue majeure (200-350 mm sur 4 jours), concluant que des séquences de barrages de castors peuvent atténuer les effets même lors de tempêtes importantes. Dans une autre étude, il a été démontré que des séquences de 5 retenues de castors réduisaient les débits de pointe des crues de période de retour de 2 ans de 14% tandis que les pics de crues de période de retour de 50 ans ont été réduits de seulement 4%, suggérant que le nombre de barrages de castors en série était déterminant dans l'atténuation des crues (Bedelle, 1991). La rupture d'un barrage sur un petit cours d'eau peut aussi entraîner une crue conséquente (Hillman, 1998). Une étude réalisée en dans les Ardennes belges a montré qu'une série de six barrages de castors avait des effets notables sur le régime hydrologique, changeant la période de retour d'une crue de 60m³/s de 3.4 ans à 5.6 ans après installation des barrages (Nyssen et al., 2011).

La présence de bois mort et d'ouvrages de castors naturels ou mimétiques ont tendance à rehausser le niveau des nappes (Bouwes et al., 2016; Grudzinski et al., 2022; Karran et al., 2018; Majerova et al., 2015; Westbrook et al., 2006) ce qui a pour effet d'augmenter le volume d'eau stocké dans les sols (Grudzinski et al., 2022; A. Larsen et al., 2021) et donc potentiellement le débit d'étiage, même si le changement d'évaporation et d'évapotranspiration peuvent aussi affecter les débits d'étiages (Bobst et al., 2022). Malheureusement, peu d'études quantitatives ou empiriques existent pour quantifier des changements de débit d'étiage.



Fig 19. Exemple de résilience d'un milieu fluvial aux incendies grâce à l'activité du castor (Wheaton et al, 2019).

Une étude réalisée dans les Ardennes belges a observé que le débit d'étiage Q₃₅₅ (débit dépassé 355 jours dans l'année) était passé de 0.6m³/s à 0.88m³/s après construction d'ouvrages de castors (Nyssen et al., 2011). Majerova et al., (2015) a aussi observé une augmentation des débits d'étiages, mais Clark, (2020) a observé que cet effet est seulement visible pour les barrages les plus jeunes. L'importance du contexte hydrogéologique et de la transmissivité ou porosité de l'aquifère (Bobst et al., 2022; M. M. Pollock et al., 2003).

Bien que des mesures quantitatives systématiques fassent encore défaut, certains cas de cours d'eaux intermittents ayant été transformés en cours d'eaux permanents par la réintroduction ou réapparition du castor ont été reportés ((Dalke, 1947), cité depuis (M. M. Pollock et al., 2003), (Rutherford, 1955; Yeager & Hill, 1954) cités depuis (Rosell et al., 2005), (Albert & Trimble, 2000; Collier, 1959; Gibson & Olden, 2014) depuis (Wohl, Scott, et al., 2019). Des cas de cours d'eaux permanents transformés en cours d'eaux intermittents ont aussi été reporté suivant la disparition du castor (Finley, 1937; Wilen et al., 1975) cités depuis (M. M. Pollock et al., 2003).

Aussi, le castor augmente la résilience aux sécheresses (Fairfax & Whittle, 2021; Karran et al., 2018) et aux incendies (Fairfax et al., 2024) (*cf figure 19*). Cette espèce est ainsi considérée comme un allié écologique face au changement climatique par le GIEC²¹ et certains scientifiques (Jordan & Fairfax, 2022; Pörtner et al., 2022).

²¹ GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

2.3. Restauration Low-Tech basées sur les processus

Cette section a pour but de décrire différents types d'ouvrages et de techniques de restaurations LTBP. Les ouvrages sont généralement des structures artisanales en bois destinées à imiter et favoriser les processus naturels d'accumulation de bois. On les érige en accumulant des matériaux ligneux de tailles diverses au sein d'un maillage de pieux en bois non traité plantés dans le lit du cours d'eau. Ils peuvent être traversants, rattachés aux berges ou en îlots.

Ouvrages en bois transversaux types castor²²

Les ouvrages transversaux type castor (sont des structures construites à la main qui imitent et favorisent les processus d'activité des barrages de castor (cf. figure 20). Ce sont des structures perméables qui s'étendent d'une rive à l'autre du cours d'eau, avec une élévation de crête constante, construites à partir d'un mélange de branchages et de matériaux de remblai (par exemple sable et graviers), afin de favoriser la formation temporaire de retenues. Elles peuvent être construites au naturel (sans pieux) ou renforcées par des pieux (J. M. Wheaton et al., 2019).

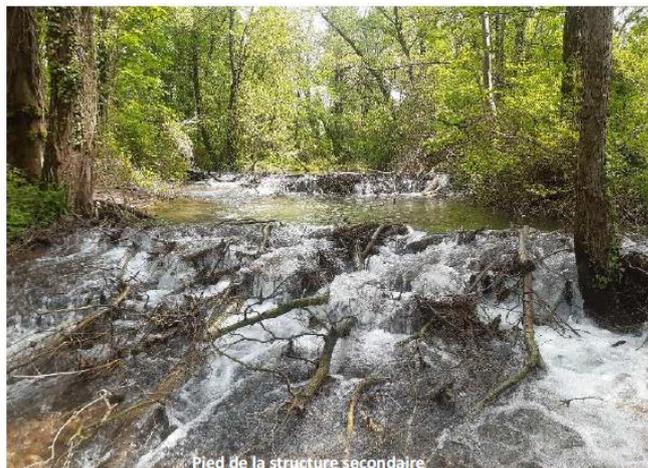


Fig 20. Ouvrage Type Castor sur la Véore (26) @Cedric Cadet

Ouvrages non transversaux de type épis renforcés par des pieux²³

Les épis sont des structures construites à la main qui imitent et favorisent les processus d'accumulation du bois afin de favoriser leurs processus hydrauliques, hydrologiques et géomorphologiques, notamment l'érosion et le recrutement en sédiments. Bien que les épis renforcés par des pieux agissent sur l'hydraulique à tous les débits, elles sont plus susceptibles d'entraîner des changements géomorphologiques lors des débits élevés, ce qui nécessite que les pieux apportent une stabilité temporaire. Du bois de différentes tailles est fixé ensemble à l'aide de pieux en bois non traités enfoncés dans le substrat (J. Wheaton et al., 2019; J. M. Wheaton et al., 2019). Différents types d'ouvrages peuvent être réalisés :



Fig 21. Structure en îlot 'fendeur de flots' (Wheaton et al., 2019)

- Rattachée aux berges : Mange-berge ou sculpteur de lit
- Installé en îlot au centre du cours d'eau > 'Fendeur de flot' : divise le flux autour de la structure, peut favoriser le développement de banc de sédiments en Aval (cf. figure 21).
- Nourrisseur de fond (Channel-Spanning PALS)

²² Depuis l'anglais *Beaver Dam Analogues (BDA)*

²³ Depuis l'anglais *Post-Assisted Log Structure (PALS)*

Ouvrages d'amas de bois 'désorganisé'

L'ajout de structures en bois dans les cours d'eau est destiné à imiter et favoriser les processus naturels d'accumulation de bois. Leur aspect 'désorganisé' n'est donc pas un problème, il est important de se concentrer davantage sur les processus favorisés par la structure que par sa forme (J. M. Wheaton et al., 2019). Des cas de gestionnaires remettant des structures de bois dans le cours d'eau afin de relancer des processus fluviaux sont documentés sur le bassin RM&C, comme sur le Brévenne²⁴(69), ou le Suran (01). Ces techniques peuvent être qualifiées de « Low-Tech » lorsqu'elles se limitent, par exemple, à l'utilisation d'une simple tronçonneuse pour abattre des arbres dans le cours d'eau, mais elles peuvent également impliquer le recours à des engins plus lourds pour dessoucher ou déplacer les arbres.

Structures minérales

Certaines structures Low-Tech et basées sur les processus utilisent des minéraux plutôt que du bois pour favoriser certains processus. C'est le cas des :

- Structures de Zeedyk (Zeedyk & Clothier, 2009) utilisées principalement pour restaurer les prairies humides et les cours d'eau en ralentissant le débit d'eau, en piégeant les sédiments et en améliorant l'humidité du sol. On peut noter par exemple les Zuni Bowls, formation en forme de cuvette constituée de pierres, conçue pour capter et retenir les sédiments et l'eau, favorisant l'installation des plantes des zones humides et prévenant la dégradation supplémentaire du chenal (cf. figure 22).
- Barrages transversaux en pierre : Lorsque le bois n'est pas suffisamment disponible, les barrages de castor peuvent également être construits avec des pierres (Jung & Staniforth, 2010). Cette méthode est utilisée dans certains projets de restauration aux états unis (Pilliod et al., 2018).



Fig 22. Fabrication d'un Zuni Bowl (@milkwood.net)

Structures d'obstruction à l'écoulement en cas de crues

Des structures transversales d'obstruction à l'écoulement ont été spécialement conçues pour favoriser les mêmes processus que les barrages de castors, comme le débordement vers la plaine inondable en cas de crues (Devries et al., 2012) (cf. figure 23). Elles sont similaires aux « leaky dams », solutions fondées sur la Nature (SFN) utilisées dans la prévention contre les inondations (Van Leeuwen et al., 2024).



Fig 23. Structure d'obstruction à l'écoulement 'flow choke' (DeVries et al, 2012)

Restauration passive

Une opération de restauration hydromorphologique peut être menée « passivement » (en réduisant les « forces de dégradation ») ou « activement » (par des interventions plus lourdes). Plus un cours d'eau sera puissant, avec des berges facilement érodables et des apports solides encore importants, plus sa restauration sera facile, peu coûteuse et avec des effets

²⁴https://www.le-pays.fr/arbresle-69210/actualites/a-l-arbresle-le-syndicat-de-rivieres-teste-l-approche-low-tech-pour-redonner-vie-a-la-brevenne_14656841/

rapides. La simple suppression des forces de dégradation (enrochements de protection de berges, barrages) suffira généralement pour que le cours d'eau se réajuste rapidement, tant du point de vue physique qu'écologique (à condition toutefois pour ce dernier point, que la qualité physico-chimique de l'eau soit correcte) (Adam et al., 2007). Toutefois, la qualité de la ripisylve et le régime naturel du bois du cours d'eau devront être restaurés et/ou conservés pour que leurs bénéfices sur le cours d'eau soient maximisés et les processus naturels favorisés (Polvi & Wohl, 2013).

Restauration par la protection du castor

Le castor est considéré comme une espèce ingénieure (Brazier et al., 2021) et l'utilisation du castor comme agent de restauration des milieux aquatiques est une pratique de plus en plus commune (Pilliod et al., 2018). La réintroduction et la recolonisation du castor à travers l'Europe offrent des opportunités pour la conservation et la fourniture de services écosystémiques. Notre capacité à imiter son activité et à entretenir les ouvrages est limitée, il est donc pertinent de considérer sa présence, son activité ou sa potentielle recolonisation lors de projets de restauration. Restaurer les populations de castors – ou les réintroduire lorsque c'est possible – et assurer leur protection sur le territoire constitue sans doute la stratégie de restauration "low-tech" la plus efficace pour réhabiliter des paysages fluviaux autonomes et fonctionnels, à condition qu'un espace suffisant soit disponible et que leur présence soit acceptée (J. M. Wheaton et al., 2019).

Cela peut être réalisé grâce à une combinaison de protection des populations existantes par l'application de restrictions temporaires ou permanentes de capture, ainsi que par la translocation de castors vers des paysages fluviaux capables de supporter la construction de barrages mais actuellement dépourvus de castors. De plus en retenant les sédiments, les ouvrages types castor permettent au lit du cours d'eau de se reconstruire et force l'eau à déborder sur la plaine inondable, rechargeant ainsi la nappe phréatique et ralentissent les courants ce qui permet aux castors de recoloniser plus facilement (Goldfarb, 2018; Weber et al., 2017).

Le castor d'Eurasie (*Castor fiber*) a considérablement étendu son aire de répartition depuis le début des efforts de réintroduction dans les années 1950, et l'espèce est désormais présente dans plus de 30 pays à travers l'Europe, avec plus de 1,5 million d'individus (Halley et al., 2020). En France, Les projets de réintroduction sont couramment en pose, aucun projet de grande ampleur de réintroduction n'est annoncé même si un projet est à l'étude en Ariège²⁵, la politique semble plutôt d'accompagner et de documenter son expansion naturelle.

2.3.1. Objectifs et processus ciblés

Les restaurations Low-Tech basés sur les processus visent à restaurer des processus physiques, chimiques, biologiques qui soutiennent les rivières et les plaines inondables (Beechie et al., 2010). Pour définir correctement les objectifs de restaurations, quatre principes ont été définis par Beechie et al., (2010a) :

1. Les actions de restauration doivent s'attaquer aux causes profondes de la dégradation
2. Les actions doivent être cohérentes avec le potentiel physique et biologique du site
3. Les actions doivent être réalisées à une échelle compatible avec les problèmes environnementaux

²⁵ Projet mené par l'association 'A l'eau Castor' : <https://www.helloasso.com/associations/a-l-eau-castor>

4. Les actions doivent présenter des résultats attendus clairement définis pour la dynamique de l'écosystème.

Un diagnostic solide du milieu et une définition des objectifs en amont est donc primordial avant tout projet de restauration.

Remise en eau du fond de vallée et de la plaine inondable, connectivité latérale

La restauration fluviale basée sur les processus vise à rétablir des processus tels que la connexion entre le chenal et la plaine inondable, qui créent et maintiennent les fonctions du corridor fluvial (Wohl et al., 2024). La reconnexion à la plaine alluviale constitue un objectif classique de la restauration des cours d'eau (Beechie et al., 2010; Wohl et al., 2015), souvent favorisée par les techniques LTBP. Certains projets visent à rétablir l'hydrologie de l'ensemble du fond de vallée, démarche parfois désignée sous les termes de « restauration de l'état zéro », « stage 0 restoration » ou « valley bottom rewet ²⁶ ». Elles visent donc à favoriser les processus d'avulsion et d'anastomose du cours d'eau. Ces approches reposent sur l'idée d'un état naturel du cours d'eau, dans lequel le fond de vallée est entièrement réhydraté et le réseau hydrographique présente un système d'anastomose couvrant toute la plaine alluviale. Lorsque le fond de vallée est partiellement occupé ou altéré, on fait référence au « Stage 8 » dans le cycle évolutif des cours d'eau (Cluer & Thorne, 2014) (cf. figure 3).

L'amélioration de la connexion entre le cours d'eau et sa plaine d'inondation permet aussi l'atténuation des pics de crues, ce qui peut faire partie des objectifs visés même si le potentiel d'atténuation d'épisodes important est difficile à estimer et ne devra pas être surestimé.

L'un des principes d'action de projets de restauration est de reconnecter les lits mineur et majeur afin de restaurer les fonctionnalités des zones humides alluviales autres que la ripisylve des berges (Dany, 2016). Dans le cadre de restaurations LTBP, cela se fait notamment par la restauration d'annexes hydrauliques.

Augmentation du niveau des nappes souterraines et du stockage d'eau

L'ajout de structures dans le cours d'eau permettant de rehausser la lame d'eau, et la mise en eau de paléo-chenaux ou autres chenaux secondaires permet la réhumidification de nouvelles zones du lit majeur. Cette augmentation du volume d'eau stocké dans les sols peut avoir pour objectif l'aide aux débits d'étiage, et la résilience des milieux face aux sécheresses. La remise en

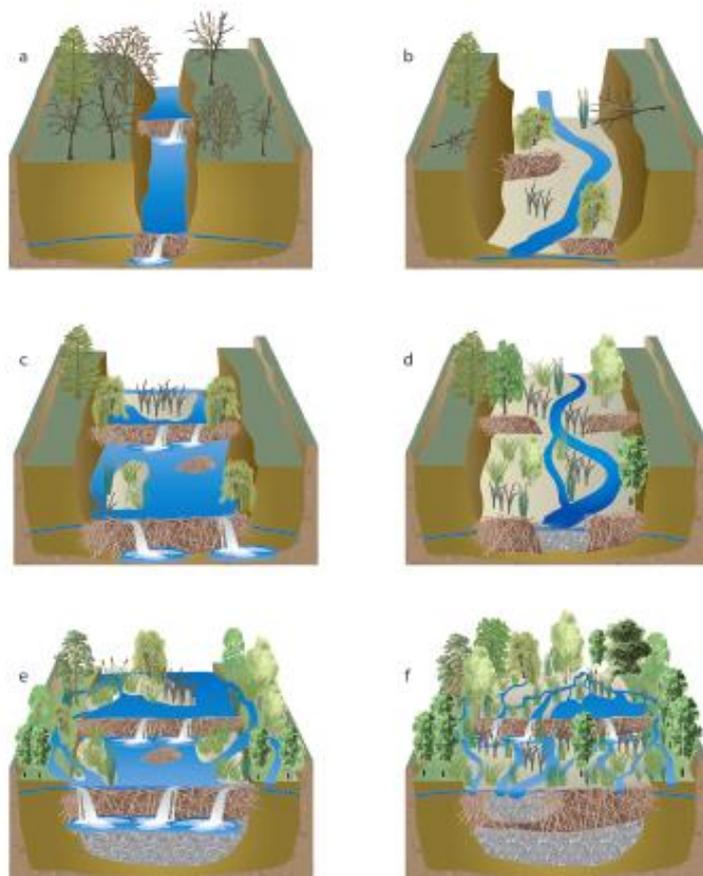


Fig 24. Comment les barrages de castor affectent le développement des cours d'eau incisés (Pollock et al, 2014)

²⁶ Remise en eau du fond de vallée

eau des nappes alluviales fait partie des objectifs importants de projet de restaurations et sont particulièrement importants dans un contexte d'augmentation des tensions autour de la ressource en eau.

Erosion des berges, érosion localisée du lit et recrutement sédimentaire

Plusieurs ouvrages visent à réintroduire des structures dans le cours d'eau, certaines cherchant à stimuler des processus d'érosion latérale ou horizontale afin de renforcer l'apport sédimentaire dans le lit mineur ou majeur, et ainsi soutenir la dynamique sédimentaire du tronçon et restaurer les potentialités de rééquilibrage hydromorphologique du cours d'eau. Lorsque ces processus sont favorisés, il est important de distinguer quelles classes granulométriques sont recherchées par la régénération de processus érosifs (fines/grossiers).

Dépôt sédimentaire et aggradation, lutte contre l'incision

M. M. Pollock et al., (2007b, 2014) ont suggéré que le castor peut être utilisé pour restaurer les cours d'eau dégradés et incisés, car leurs barrages retiennent les sédiments et élèvent le niveau du lit des cours d'eau (cf. figure 24). Cette sédimentation induite par le castor peut accélérer le processus naturel de restauration des cours d'eau incisés, qui autrement pourrait prendre des centaines voire des milliers d'années, en réduisant ce délai à quelques années voire décennies. Cependant, la capacité des barrages de castor à accélérer la restauration des cours d'eau incisés dépend de nombreux autres facteurs. (Levine & Meyer, 2014) ont documenté que la plupart des sédiments stockés dans le chenal étaient rapidement évacués lorsque les barrages de castor cassaient, sans qu'une accumulation durable ne soit observée. Persico & Meyer, (2009) ont constaté que l'aggradation induite par le castor sur des échelles temporelles de 100 à 1000 ans était limitée à 2 mètres dans les parcs nationaux de Yellowstone et Grand Teton, sur des tronçons adaptés à la construction de barrages par les castors.

Favoriser la diversité d'habitats, la biodiversité, la présence du castor

L'augmentation de la biodiversité, particulièrement d'espèces autochtones fait partie des objectifs classiques de restauration (Wohl et al., 2015). L'un des objectifs affichés de la restauration est d'augmenter l'abondance de poissons (abondance, croissance et/ou survie) et la productivité (nombre de juvéniles par femelle reproductrice) (J. M. Wheaton et al., 2019).

L'augmentation de la complexité du milieu est un objectif classique des projets de restaurations (Wohl et al., 2015). Les techniques de restauration LTBP visent à diversifier les conditions d'écoulement dans la plaine d'inondation du cours.

Les cours d'eau dégradés et/ou incisés peuvent offrir des conditions peu favorables au castor. Leur puissance plus élevée et plus concentrée entraîne par exemple la rupture des barrages plus fréquemment (M. Pollock et al., 2012). L'ajout de structures de type castor peut significativement améliorer les conditions d'habitabilité pour le castor et favoriser son retour (Bouwes et al., 2016).

Amélioration des processus et de la qualité physico-chimique du milieu

Les rivières sont le siège de processus de recyclage, de transformation, de stockage, d'élimination des éléments chimiques qui les traversent. Ces processus sont d'ordre physique (sédimentation, dilution, adsorption), chimique (oxydation, réduction) et biologique (assimilation, oxydation et réduction microbienne). Cette capacité de transformation de la zone hyporhéique joue un rôle majeur dans ces processus. C'est au cours du transfert de l'eau chargée en éléments nutritifs à travers les pores des sédiments que des processus de type adsorption et bio-assimilation bactérienne se produisent. L'élévation des éléments chimiques est liée également à des éléments morphologiques favorisant ces processus

(Dany, 2016). Les techniques de restauration LTBP visent à restaurer les échanges hyporhéiques et par extension :

- Favoriser la réalisation contiguë de phénomènes de nitrification et dénitrification, grâce notamment à la restauration d'une alternance de zones oxygénées et de zones anoxiques, de faciès lents et rapides, de la sinuosité
- Les apports souterrains peuvent permettre de créer des poches d'eau froide en période estivale et ainsi favoriser la diversité thermique. La restauration de la ripisylve joue aussi un rôle sur la température des ruisseaux en procurant un ombrage (Dany, 2016).

De plus, la restauration de la ripisylve et de la zone humide alluviale joue un rôle de zone tampon entre les flux de polluants, de pesticides, de nitrates, de phosphores et sédiments fins venant des versants ou des apports souterrains (Dany, 2016).

Restaurer un régime de bois plus naturel dans le cours d'eau

La régénération de la ripisylve et le développement d'une forêt alluviale peuvent être des objectifs complémentaires aux techniques de restauration LTBP. Elles doivent impérativement être corrélées avec un entretien raisonné du bois en rivière pour rétablir un régime de bois sain pour le maintien de la qualité du milieu (Wohl, Kramer, et al., 2019).

La remise en eau des sols dans la plaine inondable du cours d'eau peut avoir comme objectif l'augmentation de la production végétale, particulièrement dans les contextes semi-arides.

Restauration de zones humides alluviales

Les zones humides latérales aux rivières constituent des habitats intermédiaires entre le milieu terrestre et aquatique. La plupart des espèces qui s'y trouvent n'effectuent qu'une partie de leur cycle de vie. C'est autant le cas pour les espèces aquatiques (poissons par exemple) que terrestres (oiseaux par exemple) (Dany, 2016). Ces milieux peuvent leur servir pour se reproduire, s'alimenter, se reposer, grandir (Bressan et al., 2006). La connectivité entre les différents milieux est donc essentielle pour les espèces qui en dépendent. La préservation des zones humides alluviales joue un rôle dans la préservation de la diversité animale et végétale. Cette diversité biologique se traduit également en termes de diversité génétique qui offre un potentiel adaptatif très important (Bressan et al., 2006)

Cadre participatif et social, sensibilisation et réappropriation

Les restaurations LTBP se prêtent particulièrement à un cadre participatif, car leur mise en œuvre requiert un investissement humain important. Elles favorisent ainsi la création de liens sociaux et contribuent à sensibiliser les gestionnaires, les riverains, les pêcheurs et les agriculteurs locaux à la complexité et à la vulnérabilité des milieux aquatiques.

2.3.2. Retour d'expérience sur la rivière Bridge Creek

La rivière Bridge creek est un affluent de la rivière John Day dans l'est de l'Oregon ayant fait partie d'un programme de suivi intensif dans le cadre de restaurations LTBP. Il était initialement incisé (*cf. figure 25*), avait une faible complexité d'habitat, une forte puissance, une déconnexion entre la plaine inondable et la nappe alluviale et des températures élevées en période estivale. Le plan de restauration a inclus la construction d'ouvrages type castor sur des tronçons du bassin versant (Haskell et al., 2020). Environ 121 ouvrages types castor ont été construits sur un tronçon total de 4km (Bouwes et al., 2016). Dans une étude de suivi incluant des stations de contrôle et de référence, la répartition des barrages

de castors et la température de l'eau a été suivie sur une longueur de 34 km de cours d'eau pendant une période de huit ans entre 2007 et 2014 (Weber et al., 2017). L'objectif principal de la restauration étant d'augmenter de manière mesurable le nombre de steelhead²⁷ sauvages qui utilisent ce système (M. Pollock et al., 2012), une autre étude a documenté les effets sur des populations de steelheads sur ce cours d'eau (Bouwes et al., 2016; Weber & Bouwes, 2017). Les changements géomorphologiques suivants ont aussi été documentés :



Fig 25. Exemple de structure LTBP installée sur un secteur incisé de la rivière Bridg Creek (Weber & Bouwes, 2017)

- Le nombre de barrages naturels de castors a fortement augmenté pendant l'étude, ce qui illustre le potentiel d'attraction de l'espèce par les structures LTBP. Le cours d'eau était initialement incisé et les barrages avaient tendance à disparaître rapidement (M. Pollock et al., 2012), les structures LTPB ont donc favorisé les conditions d'habitat de l'espèce.
- Un amortissement longitudinal des extrêmes de température diurne estivale à l'échelle du tronçon a été constaté (Weber et al., 2017).
- La création de refuges thermiques frais à l'échelle des chenaux grâce à une connectivité améliorée entre les eaux souterraines et superficielles (Weber et al., 2017)
- Après les interventions, la quantité et la qualité de l'habitat ont augmenté dans les tronçons traités ainsi que dans la plupart des tronçons témoins où la présence de castors s'est étendue, par rapport aux tronçons de référence non occupés par les castors.
- Suite à l'installation de structures analogues aux barrages de castor (BDAs²⁸), des augmentations significatives de la densité (168%), de la survie (52%) et de la production (175%) des jeunes truites arc-en-ciel (steelhead) ont été observées sans impact sur les migrations en amont et en aval (Haskell et al., 2020).
- La production végétale et la surface de Zone humide ont augmenté (cf. figure 26).

Les résultats de ces suivis indiquent que la restauration facilitée par les castors pourrait constituer une stratégie viable et efficace pour rétablir la fonctionnalité écosystémique des cours d'eau incisés, tout en favorisant l'augmentation des populations piscicoles menacées (Bouwes et al., 2016).



Fig 26. Comparaison de photos aérienne avant et après restauration (Weber & Bouwes, 2017)

²⁷ Truites arc-en-ciel migratrice (*Oncorhynchus mykiss*)

²⁸ Beaver Dam Analogs : Ouvrages type Castors

2.4. Discussion sur l'étude bibliographique

La revue bibliographique met en évidence un consensus sur les nombreux bénéfices que le bois apporte aux rivières (cf. figure 27). Il influence positivement la dynamique hydromorphologique et sédimentaire, favorise les connexions avec la plaine d'inondation, et crée une rugosité qui stimule la diversité des écoulements, des sédiments, des faciès ainsi que les échanges avec la plaine inondable. Par ailleurs, le bois constitue un élément essentiel des écosystèmes aquatiques, participant activement à la chaîne trophique tout en offrant des habitats précieux et des refuges pour les poissons et les macro-

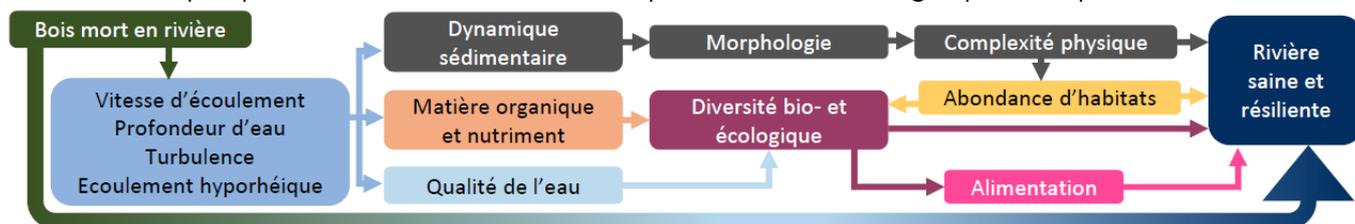


Fig 27. Influences bio-physiques du bois mort sur les cours d'eau (Quiniou et Piton, 2022) depuis (Ruiz-Villanueva, 2020)

invertébrés, ce qui profite aux populations. Le manque de bois comparé aux conditions naturelles est un facteur de dégradation général des cours d'eau, et le maintien d'un régime de bois minimum est indispensable au bon état des cours d'eau. D'une manière générale, l'ajout de bois dans un cours d'eau par l'intermédiaire de techniques LTBP devrait participer à améliorer sa santé écologique en créant des habitats et en favorisant la biodiversité, particulièrement sur des cours d'eau rectifiés/recalibrés montrant peu de diversité de faciès. Sur le long terme, la restauration des processus permettant le recrutement naturel de bois de grande taille est considérée comme plus appropriée et moins coûteuse, tout simplement parce que la restauration est alors assurée par la ripisylve elle-même.

La variabilité des impacts des barrages de castors sur les espèces piscicoles et leurs habitats rend difficile un consensus scientifique, comme l'a montré la méta-analyse de Kemp et al., (2012). Bien que les castors coexistent avec les poissons depuis des millénaires, les pressions anthropiques actuelles (pollution, changement climatique) modifient le contexte de ces interactions. Les barrages de castors peuvent offrir des opportunités pour certaines espèces, notamment les truites fario et les vairons, lorsque des zones lotiques sont bien conservées, par exemple dans des contextes de tête de bassin avec un minimum de pente dans lesquels les techniques de restauration Low-Tech inspirées des castors pourraient être bénéfiques. Dans les zones aval plus lentes, les modifications morphologiques et physico-chimiques dues aux retenues castors peuvent défavoriser des espèces comme la truite fario et le chabot, tout en favorisant la diversité spécifique, notamment les cyprinidés et carnassiers.

La revue bibliographique a constaté un manque de consensus sur l'entrave à la mobilité des poissons par les barrages de castors. En l'absence de migrateurs anadromes atteignant les têtes de bassin, et compte tenu des épisodes pluvieux automnaux coïncidant avec la montaison de la truite fario, la franchissabilité des ouvrages est généralement favorisée. Les différences de résultats sur la mobilité de la truite fario peuvent s'expliquer par des différences de régime hydrologique entre les études, en effet il est probable que la mobilité observée soit meilleure si les périodes de hautes eaux correspondent avec les périodes de migration de l'espèce pour la fraie.

Les barrages de castors, artificiels ou naturels ne sont pas voués à être pérennes puisqu'ils peuvent subir des brèches ou être détruits lors de crues, et ne sont pas totalement imperméables. Certains barrages peuvent localement et temporairement entraver les déplacements des poissons durant les étiages et les empêcher d'accéder à des zones refuges, toutefois cet effet est susceptible d'être compensé par les bénéfices sur la diversité d'habitats et le maintien de débits plus favorables grâce à

ces mêmes ouvrages. De plus, les aménagements type castors ont pour vocation la création de chenaux secondaires latéraux facilitant le passage des poissons, ce qui n'est pas toujours le cas des ouvrages naturels de castors étudiés dans cette étude bibliographique, et des mesures correctives peuvent être mises en œuvre si nécessaire (création de brèches, effacement des ouvrages). Bien que l'adaptation évolutive des espèces de poissons européennes aux barrages castorins soit probable, les relations historiques entre castors et poissons restent mal documentées, notamment pour les espèces non-salmonidés. Aucune étude n'a démontré d'impact durable des barrages de castors sur les mouvements de populations piscicoles, et l'isolement génétique des populations ne constitue pas une préoccupation dans le cadre des restaurations Low-Tech. La franchissabilité d'espèces de poissons non-salmonidés est en général très peu étudiée dans la littérature scientifique.

La littérature montre un consensus dans la capacité du bois et des barrages de castors à atténuer les pics de petites crues. Toutefois il est impossible de savoir jusqu'à quelle importance de crues ces effets pourront être perceptibles, puisque cela dépend complètement du contexte hydrologique, topographique ainsi qu'à la quantité de bois présente.

Aucune généralisation n'est faisable facilement à partir de l'étude bibliographique sur l'impact des ouvrages de castors sur la température moyenne ou médiane à l'échelle d'un cours d'eau ou d'un tronçon. La diversité des résultats peut s'expliquer par le nombre et la diversité des facteurs d'influence dépendant du contexte : la taille et la morphologie des retenues, la capacité d'ombrage du milieu, l'influence de la géologie, des paramètres climatiques, ont certainement des effets encore peu étudiés. L'un des résultats intéressants de cette recherche bibliographique provient du consensus autour de la variabilité thermique observée à une échelle locale (sous-tronçon) qui augmente considérablement dans les zones avec des barrages de castors. Ce facteur est donc un attribut important et plus généralisable des barrages de castors. Cette hétérogénéité thermique, alors qu'elle est négligée dans de nombreuses études, devrait être très favorable pour créer et maintenir des habitats plus divers, créer des refuges thermiques pendant les étiages et augmenter la résilience globale du cours d'eau ce qui fait partie des objectifs visés dans le cadre de restaurations, et pourrait donc être plus important pour la survie des espèces thermosensibles que la variation de température moyenne ou médiane. Une privation prolongée d'oxygène critique due aux activités des castors ne devrait pas être attendue dans des cours d'eau non pollués et de faible ordre (M. E. Smith et al., 1991), qui sont généralement ciblés dans les restaurations de type Low-Tech.

D'une manière générale, l'impact sur les populations de poissons est souvent observé depuis le prisme des salmonidés et l'étude bibliographique a révélé des contradictions, mais une tendance semble se dessiner. Il apparaît dans la recherche bibliographique que les castors ont un impact plus positif sur les salmonidés des cours d'eau froids des régions escarpées et pauvres en habitats lentiques que sur ceux des cours d'eau plats, plus chauds des zones de plus basse altitude où des impacts négatifs sont plus souvent répertoriés (Baker & Hill, 2003; Collen & Gibson, 2001; Lafontaine, 2000). Dans ces contextes les salmonidés peuvent être remplacés par d'autres espèces comme les cyprinidés (Collen & Gibson, 2001). Cela peut expliquer en partie les contrastes des résultats rencontrés dans la recherche bibliographique.

Aux Etats-Unis par exemple, où la littérature est plus documentée, les résultats sont plus nuancés ou défavorables dans l'est (Rupp, 1955), où le relief est généralement plus plat, alors que les résultats sont généralement montrés favorables à l'ouest et Midwest (Gard, 1961). Ces différences ont été observées par une revue de la littérature ciblée sur la région des grands lacs qui suggère que l'impact des castors sur les salmonidés varie spatialement et temporellement selon diverses caractéristiques écologiques locales, comme la pente ou la prévalence d'apport d'eaux souterraines. L'étude a constaté que l'activité

des castors peut être défavorable aux salmonidés dans les bassins à faible pente, mais généralement bénéfique dans les bassins à forte pente, et que des apports souterrains importants peuvent compenser les effets négatifs potentiels en stabilisant les régimes hydrologiques et thermiques. Cependant, les études examinées présentaient un manque évident de données empiriques et/ou de contrôles expérimentaux, soulignant selon les auteurs la nécessité de recherches plus rigoureuses sur les interactions castors-salmonidés (Johnson-Bice et al., 2018).

En Europe, le nombre d'études beaucoup plus faible empêche toute généralisation mais il est possible de confirmer cette tendance au vu des localisations géographiques des études :

- Pays à plus fort relief (Norvège, Écosse, Carpates polonaises) où les secteurs étudiés semblent clairement des zones à truites selon la classification de Huet²⁹, à dominance lotique, et tendent à avoir des résultats plus favorables pour les salmonidés (Bylak et al., 2014; Kukula & Bylak, 2010; Needham, 2024; Parker & Rønning, 2007).
- Dans les ruisseaux de plaine de basses altitudes et de zones plates (Suède, Lituanie, Estonie, Danemark, Pologne), où les conditions sont déjà lentiques et limitantes pour les salmonidés, les résultats de plusieurs études montrent des effets nuancés ou défavorables pour les salmonidés³⁰ (Domagała et al., 2013; Golski et al., 2023; Hägglund & Sjöberg, 1999; Kesminas et al., 2013; Tambets et al., 2005). Un relief plus plat entraîne des retenues plus larges et plus étendues moins favorables aux espèces lotiques.

Grudzinski et al., (2022) ont observé que les impacts positifs du castor étaient potentiellement plus marqués dans les zones arides et semi arides puisqu'elles pouvaient créer une oasis de végétation dans des zones très peu végétalisées. Il y a donc des opportunités sur le bassin méditerranéen, même si la faible présence de bois peut être une limitation dans la construction d'ouvrages de type LTBP. Knudsen, (1962) a identifié que l'activité des castors tend à bénéficier aux salmonidés durant les 2 à 4 premières années suivant la construction des barrages. Les salmonidés exploitent vraisemblablement les mouilles et l'hétérogénéité accrue des habitats offerts par les nouveaux plans d'eau, utilisant ces caractéristiques comme refuges et sources de nourriture. Cependant, avec le temps, l'accumulation de sédiments fins, de matière organique et les altérations de la qualité de l'eau et des régimes d'écoulement peuvent avoir un effet néfaste sur les populations locales de salmonidés (Johnson-Bice et al., 2018; Knudsen, 1962). Cet impact est plus marqué sur les ruisseaux plus plats que sur ceux avec une pente plus marquée (Knudsen, 1962).

Les suivis de projets de restaurations de restauration LTBP sont encore rares dans la littérature scientifique. Quelques projets de restauration ont été suivis de manière poussée aux États-Unis. Ce mémoire restitue les résultats d'un seul projet. Les résultats de ce projet sont très positifs sur le projet documenté, même si ces ils sont difficiles à transposer au contexte français, puisque les contextes géologiques, climatiques et biologiques peuvent être spécifiques.

En France, le nombre de retour d'expérience est encore faible et aucun suivi intensif n'a encore été documenté. Dans la Drôme, un suivi scientifique minimum devrait être mis en place sur un tronçon de la Véore (26) où seront intégrés des dispositifs de restauration LTBP.

²⁹ La classification de Huet (Huet, 1949) est une typologie piscicole longitudinale des cours d'eau, proposée par Marcel Huet et qui divise les rivières en quatre grandes zones successives, caractérisées par des conditions physiques (pente, température, type de substrat) et biologiques propres, notamment dans leur peuplement piscicole.

³⁰ La présence de brochets dans certaines stations de référence des études suédoise, lithuanienne et polonaise (Hägglund & Sjöberg, 1999; Kesminas et al., 2013) indiquent des contextes d'habitats lentiques, certainement pas dans une zone à truite selon la classification de Huet.

3. Etude d'enquêtes

3.1. Contexte et objectifs

Depuis le début des années 2010, les techniques de restauration « Low-Tech » des cours d'eau, telles que développées par Joseph Wheaton (J. M. Wheaton et al., 2019), sont largement mises en œuvre aux États-Unis. Leur introduction en France, en revanche, est relativement récente. Parmi les principaux acteurs de leur diffusion figurent Baptiste Morizot, philosophe du vivant à l'université d'Aix-Marseille, et Suzanne Husky, artiste engagée. Sur le terrain, la structure Valence-Romans Agglomération, sous la responsabilité de Cedric Cadet (GEMAPI), a été pionnière dans la mise en œuvre à grande échelle de ces techniques en France, conformément aux recommandations du manuel des techniques de restaurations LTBP (J. M. Wheaton et al., 2019). Tous trois ont joué un rôle central dans la médiatisation et l'expérimentation de ces méthodes, notamment à travers la réalisation des premiers ouvrages mimétiques de castors en France et en Europe, dans la Drôme. Ils ont également participé à la coordination de quatre sessions de formation organisées avec l'ARRA² en 2024 et 2025, invitant des experts internationaux tels que Kevin Swift (Swift Water Design, Californie)³¹ et Kate Linqvist (Occidental Arts & Ecology Center, OAEC)³². Leur engagement s'est manifesté dans de nombreux médias (émissions de radio sur France Inter, France Culture, vidéos en ligne, podcasts, etc.) ainsi que par la publication de l'ouvrage « Rendre l'eau à la terre », qui défend ces approches de manière philosophique et artistique (Morizot, 2024).

L'essor rapide et la médiatisation spectaculaire de ces techniques ont suscité de nombreux débats, tant dans les milieux professionnels que sur les réseaux sociaux (notamment LinkedIn). Les discussions portent notamment sur les impacts des barrages mimétiques de castors concernant la continuité piscicole, la température et la qualité physico-chimique de l'eau, ainsi que les effets sur les populations de poissons. La manière de communiquer autour de ces méthodes et le discours utilisé semblent aussi être une source de polarisation au sein des acteurs du monde de l'eau. Cette polarisation des opinions, observable dans les échanges formels et informels, révèle la nécessité d'une analyse approfondie des perceptions et des représentations des acteurs du secteur.

C'est dans ce contexte que qu'une approche sociologique est retenue dans cette étude, afin de mieux comprendre les points de vue, avantages perçus, limites et controverses liés à ces techniques, ainsi que sur les modalités de leur diffusion. Cette enquête vise à identifier les sources de cristallisation des débats, les désaccords, incompréhensions et divergences d'opinion. Il ne s'agit pas d'être exhaustif ou représentatif, mais d'approfondir la compréhension des positions de certaines structures vis-à-vis de ces méthodes et de leur potentiel d'application. Cette étude cherche à fournir des clés de compréhension permettant de :

- Mieux définir ces techniques, leur perception et le vocabulaire qui les entoure
- Mieux cerner l'origine des polarisations de points de vue
- Identifier les désaccords et éventuelles incompréhensions ou idées reçues
- Aider les acteurs souhaitant développer ces techniques à anticiper les freins et à valoriser les atouts
- Mieux comprendre les avantages, limites et obstacles à la mise en œuvre de ces approches

³¹ <https://swiftwaterdesign.com/>

³² <https://oaec.org/>

Ainsi, les objectifs de cette étude sont à la fois sociologiques et techniques : il s'agit d'éclairer les débats, mais aussi d'enrichir la connaissance des techniques « Low-Tech et basées sur les processus » à partir des retours d'expérience d'experts et de praticiens du terrain.

3.2. Méthode

Sélection des structures interrogées

Pour cette enquête, trois catégories d'acteurs majeurs du secteur de l'eau sont ciblées car reconnus pour leur expertise et leur rôle central dans la gestion et la restauration des milieux aquatiques. Cette sélection s'appuie également sur la diversité des points de vue observée au sein de ces groupes :

- Bureaux d'études spécialisés en hydromorphologie et/ou restauration des milieux aquatiques
- Structures exerçant la compétence GEMAPI
- Organismes liés au monde de la pêche

Au sein de chaque catégorie, sont privilégiées des structures disposant d'une connaissance approfondie des techniques de restauration Low-Tech et basées sur les processus. Pour ce faire, l'identification de participants aux sessions de formation de l'ARRA² sur ces techniques a servi de base au choix des bureaux d'études et des structures GEMAPI à interroger. Concernant les organismes du monde de la pêche, le choix des intervenants s'est porté sur ceux géographiquement concernés dans la gestion du site pilote de la Lierne et de la Véore (Drôme), à différents niveaux d'échelle.

Les structures ont été contactées par courriel, avec une proposition d'entretien d'un minimum de 45 minutes sur le sujet des restaurations LTBP.

Modalités de réalisation des entretiens

- Entretiens en présentiel : Lorsque cela était possible, notamment sur l'agglomération lyonnaise, les entretiens se sont déroulés en face à face afin de favoriser un échange plus spontané et convivial.
- Entretiens à distance : Pour les structures plus éloignées, les entretiens ont été menés en visioconférence ou en entretien téléphonique selon préférence des personnes consultées

Dans tous les cas, sauf lors d'entretien téléphoniques, l'enregistrement audio de l'entretien était proposé, sous réserve de l'accord explicite de la personne interrogée. En cas de refus, une prise de notes synthétique était réalisée. Certains enregistrements ont ensuite été retranscrits à l'aide d'outils en ligne (Turboscribe³³ ou outil de retranscription en direct de Microsoft Teams) afin de les consulter plus rapidement et stockés sur le serveur de l'AERMC pour consultation interne et afin de garantir la sécurité des données à caractère personnel.

Conduite des entretiens

Les entretiens étaient de type semi-directif : un guide d'entretien (*cf. Annexe 1 : Questionnaire d'enquête sociologique sur les techniques de restauration Low-Tech*) servait de fil conducteur pour aborder l'ensemble des thématiques jugées pertinentes. Toutefois, ce guide n'était pas suivi de manière rigide, afin de permettre à la discussion d'évoluer de façon naturelle et d'explorer librement les sujets émergents. Le questionnaire a été conçu pour explorer quatre grands axes thématiques :

³³ Outil en ligne : <https://turboscribe.ai/fr>

- **Perception générale des techniques de restauration** : Cet axe vise à comprendre comment les acteurs ont découvert ces méthodes, de quelle manière ils les définissent, et quelle représentation ils se font du bois en rivière ainsi que des barrages naturels de castors.
- **Connaissances sur les techniques** : Il s'agit ici d'évaluer la compréhension qu'ont les acteurs des objectifs de ces techniques, d'identifier les avantages et les limites qu'ils perçoivent, ainsi que de relever d'éventuelles incompréhensions.
- **Positionnement et débats** : Ce volet cherche à cerner la position des acteurs sur l'efficacité de ces techniques, à recueillir leurs craintes ou réserves, et à recueillir leurs avis sur les sujets sensibles qui suscitent des controverses, tels que la continuité écologique, la température de l'eau, la qualité physico-chimique, ou encore les impacts sur les populations piscicoles.
- **Perspectives** : Enfin, cet axe interroge la façon dont les acteurs envisagent l'intégration future de ces techniques de restauration dans le contexte français.

Analyse des entretiens

Les synthèses d'entretiens et analyses croisées ont toutes été anonymisées. L'approche sociologique requiert une posture de neutralité, de non-jugement et une prise de recul sur les propos recueillis. Ce mémoire respecte cette posture sociologique.

Pour chaque catégorie d'acteurs, un tableau de synthèse regroupe ensuite les messages clés ressortis lors des entretiens, organisés selon les différentes thématiques du questionnaire.

3.3. Résultats

Au total 10 entretiens ont été réalisés dans le cadre de cette étude d'enquête :

- 4 Bureaux d'études (BE1, BE2, BE3, BE4)
- 4 Gestionnaires des milieux aquatiques avec la compétence GEMAPI (GEMA1, GEMA2, GEMA3, GEMA4)
- 2 Organismes de Pêche (PE1 et PE2)

Trois entretiens ont été menés avec plus d'un intervenant, le nombre d'intervenants total a été de 16 intervenants. Trois entretiens ont été menés en présentiel, cinq en visioconférence et deux par téléphone. La durée des échanges a largement dépassé les attentes, variant de 1 h 05 à 2 h 40, pour une moyenne de 1 h 36. Cette implication témoigne d'un réel intérêt des participants pour le sujet abordé.

3.3.1. Analyse transversale des entretiens avec les bureaux d'études

Le tableau d'analyse transversale récapitulant les idées évoquées lors de chaque entretien a été présenté en *Annexe 2* : Tableau récapitulatif des entretiens avec les bureaux d'études.

L'émergence et la diffusion des techniques « Low-Tech » en restauration des cours d'eau, axées sur la régénération des processus naturels, suscitent des réactions variées parmi les bureaux d'études interrogés. Beaucoup estiment que des approches similaires étaient déjà pratiquées bien avant la médiatisation des méthodes développées par J. Wheaton : épis érosifs, gestion passive, absence d'entretien de la ripisylve, fixation d'embâcles, ou encore diverses méthodes intégrant le bois pour ralentir les flux et limiter le drainage. Toutefois, certains bureaux d'études mentionnent l'usage de techniques mobilisant des moyens mécaniques conséquents pour l'intégration de troncs et de souches, révélant ainsi une incompréhension possible autour de la notion même de « Low-Tech ». Cette confusion porte notamment sur le degré de technicité requis : un intervenant s'interroge sur le seuil à partir duquel une technique peut être qualifiée de « Low-Tech ». Plusieurs

*« Ce qui est du domaine de l'ambition, c'est-à-dire de flatter des tendances, d'accompagner des processus, de les relancer, et d'accepter que ça vous échappe. Ça, ça devrait être la base de la restauration morpho-écologique et fonctionnelle sur tous les cours d'eau ou tronçons de cours qui sont proposés à travailler. Ensuite, on peut parler des outils. » **BE2***

points de vue intéressants ont émergé : pour BE2, l'attention portée à la technique employée (qu'elle soit « Low-Tech » ou non) tend à éclipser l'objectif fondamental de restauration des processus naturels, qui devrait rester l'aspect prioritaire. BE3 adopte une posture plus radicale, prônant la non-intervention et considérant que ces techniques ne constituent pas une rupture de paradigme, puisque l'essentiel est de laisser les systèmes naturels évoluer sans intervention systématique.

Malgré ces nuances, tous les bureaux d'études interrogés partagent la volonté de restaurer les processus hydromorphologiques et biologiques lorsque le contexte du projet le permet. Pour certains, cette approche est même au cœur de leur philosophie professionnelle. Toutefois, ils reconnaissent que ce n'est pas encore la norme dans le secteur, où la plupart des projets tendent à figer les formes du cours d'eau plutôt qu'à favoriser leur évolution naturelle.

Tous les bureaux d'études interrogés considèrent le bois comme un élément fondamental du fonctionnement des cours d'eau, et intègrent désormais systématiquement sa présence dans leurs projets de restauration. Toutefois, ils se heurtent régulièrement à un manque d'ambition de la part des élus, souvent réticents face à l'image « désordonnée » ou « bordélique » que peut renvoyer un cours d'eau encombré de bois, même si l'acceptation sociale de cette pratique s'est nettement améliorée ces dernières années.

Le mouvement des techniques de restauration « Low-Tech » en France et la communication qui en est faite semble crispier davantage certains BE. Pour BE1, l'effet de mode n'a pas été lancé correctement et la communication autour de ce sujet est délétère et préjudiciable. Pour BE4, ces techniques sont « *trop vendus comme une solution miracle* » et manquent de nuance, ce qui peut entraîner des dérives. En témoignent des projets où des études réalisées par des maîtres d'ouvrage ont été brutalement interrompues, au profit d'une orientation finalement privilégiée vers des restaurations de type Low-Tech. Au contraire, le phénomène de médiatisation est vu comme positif et suscitant des réflexions intéressantes (BE2 et BE3). Le caractère poétique du castor est cité, de même que l'aspect visionnaire de s'inspirer de l'observation d'une espèce pour repenser la manière d'aborder les cours d'eau, mais un risque est perçu que cet engouement soit tourné en dérision ou divise les partis prenants.

De nombreux avantages de ces techniques ont été cités par les différents BE :

- La relance de processus naturels
- La création d'habitats

- La rapidité de mise en œuvre et la faible technicité
- L'action sur des secteurs peut visés par les programmes de restaurations habituels tels que les têtes de bassin,
- La réhumidification des sols
- Le fait de favoriser des marges de cours d'eau plus vivantes et la connectivité latérale
- Le faible coût carbone
- La facilitation de processus nappe/rivière.

BE3 évoque un autre atout majeur : le fait que ces techniques permettent aux structures GEMAPI de les réaliser en régie sans recourir systématiquement aux bureaux d'études. Cela peut permettre à ces structures de reprendre la main sur la gestion de leur cours d'eau et de gérer des problématiques sur des temps longs. Le faible coût est mentionné comme un avantage par deux BE alors qu'un autre BE est sceptique sur la différence de coût, mentionnant que les besoins de main d'œuvre humaine peuvent aboutir à des coûts élevés.

Certaines limites ont aussi été évoquées par les BE : pour BE1, les conditions permettent rarement de faire uniquement du Low-Tech. Pour BE2, l'approche par étapes peut aussi s'avérer être une limite. Pour BE1 et BE3, le risque d'incompréhension et d'utilisation inadaptée est réel. Les problèmes liés à la perception et à la communication vis-à-vis des riverains et agriculteurs sont aussi mentionnés. Les avis convergent sur la nécessité d'un diagnostic approfondi avant toute intervention et les bureaux d'études ont évoqué que ces techniques permettaient de répondre à certains objectifs précis mais n'agissait pas sur des causes profondes de dégradations telles que le déficit sédimentaire ou une incision trop marquée du cours d'eau. La plupart des BE pointent donc le fait que ces techniques ne peuvent donc pas être appliquées dans tous les contextes.

Sur le plan technique, des critères de contexte favorables et défavorables à ces techniques ont été listés par les BE :

- La nécessité d'énergie ou de puissance suffisante du cours d'eau pour recréer des processus est évoquée par trois BE. Cette puissance allie la pente et les conditions hydrologiques (présence de crues régulières). A l'inverse, un contexte trop torrentueux avec une pente trop élevée est évoqué comme bloquant par deux BE. BE4 a estimé un ordre de grandeur de pente du thalweg favorable entre 1/1000 et 1/100.
- Alors que les cours d'eau de tête de bassin sont mentionnés comme favorables à ces techniques, les trop grands cours d'eaux sont aussi évoqués comme peu appropriés. BE4 estime une limite à 10-15m de largeur.
- BE1 évoque des paramètres tels que la profondeur du matériel alluvial, en effet si un épi érosif (de type mange-berge³⁴ par exemple) vient diriger le courant vers une couche de substrat plutôt que sur le matelas alluvial alors il sera inutile. BE4 évoque aussi le substrat, par exemple un substrat marneux représente un contexte défavorable.
- BE1 évoque aussi la relation entre la rivière et la nappe phréatique, si localement la nappe draine le cours d'eau alors l'ajout de structure est vu comme inutile.
- La présence de matériel sur site est mentionnée par BE2. BE3 propose de cibler les secteurs où le castor est absent ou peine à se réimplanter estimant qu'il est préférable de les laisser agir naturellement que des réaliser des ouvrages mimant leurs actions.
- Les cours d'eau incisés représentent un contexte favorable pour la plupart des BE, même si deux BE voient un contexte défavorable lorsque l'incision est trop marquée où que le déficit

³⁴ Epi érosif ayant pour but l'érosion latérale d'une berge pour recruter du matériel alluvial

sédimentaire est structurel/trop important. Pour BE3, les bénéfiques à court terme sur un cours d'eau incisé concernent surtout la diversification d'habitats alors que les effets morphologiques visant à contrer l'incision ne se manifesteront qu'à plus long terme.

- Un BE mentionne le projet réalisé dans la Drôme sur la Lierne et la Véore comme le contexte parfait, alors qu'un projet à venir sur la Rize dans la métropole de Lyon est jugé comme peu favorable dû à sa très faible énergie. BE4 estime la Bourgogne Franche-Comté comme un territoire potentiellement favorable, mentionnant un secteur rural avec de nombreux cours d'eaux agricoles et chenalisés n'ayant pas toujours les moyens de bénéficier de programmes de restaurations plus coûteux.
- Le besoin en disponibilité foncière est évoqué comme une question centrale par BE2 et BE4.
- Ces techniques sont très favorables à la restauration de zones humides selon BE2.

Sur la question des impacts de ces techniques sur la continuité écologique, BE1 trouve que les méthodes sont présentées comme trop avantageuses en occultant les nuances, et que le franchissement des ouvrages ne sera pas aussi évident en France car le nombre de chenaux secondaires sera beaucoup plus restreint. Pour BE2 l'effet d'obstacle existe mais reste partiel et ne s'apparente en rien à un obstacle de génie civil, de plus les ouvrages sont 'fusibles' et temporaires à l'échelle d'une vie humaine. Il y a toutefois un impact potentiel sur le transit de certaines espèces mais l'impact zéro n'existe pas, tout comme un cours d'eau naturel sans obstacle n'existe pas, ceux-ci favorisant d'ailleurs refuges et habitats. Ces débats viennent selon BE2 rappeler les limites d'un système trop axé sur la maîtrise. BE3 regrette que l'on se focalise trop souvent sur un aspect isolé au lieu d'adopter une vision globale du fonctionnement des cours d'eau, et pense que dans un cours d'eau très préservé, l'apparition de barrages de castors ou d'embâcles se ferait de manière aléatoire et dynamique, pouvant naturellement générer de très grandes retenues, il lui paraît donc inutile de s'interroger sur ces sujets de façon binaire. BE1 ne pense pas que l'impact sur la thermie soit majeur mais que nous manquons de retours d'expérience, toutefois il doute qu'en milieu lentique ces dispositifs puissent améliorer la qualité de l'eau.

La question de la transférabilité des modèles nord-américains, souvent cités en référence, est également soulevée. BE1 et BE2 s'accordent pour dire que le contexte français, marqué par une forte densité d'occupation humaine et un manque d'espace pour la divagation des cours d'eau, rend difficile la reproduction à l'identique des expériences étrangères, alors que BE3 ne trouve pas cet argument déterminant, mais pense cependant que les Américains ont un rapport différent au vivant ('wilderness') que les Français.

Sur un 'état zéro' de référence des cours d'eau, il paraît à BE1 que l'idée que tous les cours d'eau étaient historiquement en tresse ou anastomosés comme erronée, et une généralisation énorme, alors que dans de nombreux cas de figure la pente, le manque de matériel alluvial ou l'encaissement ne permettent pas ce style fluvial. Il n'est de plus pas convaincu par l'idée que les cours d'eau n'aient naturellement pas de berge. BE2 a aussi exprimé des réserves sur la généralisation de ce modèle, alors que les débits diffèrent fortement et que les facteurs climatiques évoluent. BE4 a paru convaincu que les rivières aient pu passer par une phase de ce type dans leur existence mais pense que la végétation peut naturellement entraîner le système à se refermer en un chenal méandrique. BE3 pense probable que l'incision serait bien moins fréquente sans intervention humaine, mais pointe le manque de recul sur la distinction entre incision naturelle et anthropique et pense que certains contextes peuvent entraîner une incision naturelle, et que l'hypothèse d'un état de référence des cours d'eau anastomosés mérite d'être analysée et étudiée avec des études synchroniques, et qu'une question définitive à ce sujet est probablement hors de portée ce qui implique une part de croyance dans l'analyse de ces questions. Il est sceptique sur la pertinence de ce concept en contexte torrentiel, mais n'est pas opposé

à l'idée présenter le stade zéro comme objectif de restauration, il s'interroge seulement sur la faisabilité dans le contexte culturel actuel.

Concernant les perspectives de ces techniques dans le paysage de la restauration de milieux aquatiques, BE1 et BE4 soulignent un besoin d'objectivisation de ces techniques et du discours associé. Trois BE mentionnent que ces techniques devraient se développer en régie au sein des structures ayant la compétence GEMAPI, l'un d'eux évoquant la faible rentabilité pour les BE. BE3 évoque la résistance possible de certains BE qui peuvent se sentir dépossédés de certains projets, alors que BE3 et BE4 pensent que ces techniques devraient principalement compléter les autres projets de restaurations et ainsi augmenter le volume total de linéaire restauré. Plusieurs BE évoquent la possibilité d'être intégrés dans des projets hybrides (une partie Low-Tech et une partie utilisant des machines). L'acceptabilité sociale des projets constitue un enjeu majeur, particulièrement dans les contextes où la restauration implique une modification visible du paysage ou une tolérance accrue à l'érosion et au « désordre » naturel.

Au terme de cette analyse transversale des quatre entretiens menés avec des bureaux d'étude spécialisés en hydromorphologie et restauration des cours d'eau, il ressort une vision nuancée du développement des techniques « Low-Tech » axées sur la régénération des processus naturels. Si tous les bureaux d'études interrogés partagent l'objectif de restaurer les dynamiques hydromorphologiques et biologiques, ils insistent sur la nécessité d'adapter les méthodes au contexte local et de ne pas ériger les techniques Low-Tech en solution universelle. L'enthousiasme suscité par ces approches s'accompagne de réserves sur leur définition même, leur communication parfois excessive, et le risque d'incompréhension ou de mésusage, notamment face à la diversité des contextes hydrogéomorphologiques et des enjeux locaux. Les avantages cités, tels que la relance des processus naturels, la création d'habitats, la rapidité de mise en œuvre et le faible coût, sont contrebalancés par des limites techniques, économiques et sociales, notamment la difficulté d'acceptation par les élus et riverains, et la nécessité d'un diagnostic approfondi préalable. Les bureaux d'études soulignent également que ces techniques ne sauraient pallier des causes structurelles de dégradation, comme le déficit sédimentaire ou une incision trop marquée. En conclusion, les techniques Low-Tech sont perçues comme un outil complémentaire dans la palette de la restauration écologique, à intégrer de manière réfléchie et contextualisée, en veillant à une communication adaptée et à une évaluation objective de leurs effets et de leurs limites.

3.3.2. Analyse transversale des entretiens avec les structures GEMAPI

Le tableau d'analyse transversale récapitulant les idées évoquées lors de chaque entretien a été présenté en Annexe 3 : Tableau de synthèse des entretiens avec les structures GEMAPI.

Sur la perception générale de ces techniques, deux structures GEMA ont perçu qu'elles représentaient un terme nouveau pour nommer des choses déjà faites depuis longtemps. Des exemples sont cités tels que le rétablissement d'habitats piscicoles, les arbres abattus, les épis déflecteurs, les peignes pour encoche d'érosion, les haies sur le haut des bassins-versants pour retenir l'eau, certaines techniques de génie végétal utilisant des souches. La nouveauté des techniques Low-Tech vue par ces deux structures est l'élargissement des objectifs et l'utilisation de barrages transversaux de type castors. Pour GEMA1 ces techniques représentent toutefois un véritable changement de paradigme, le fait d'initier des processus

« Il y a un moment où c'est deux visions qui s'affrontent. Une vision qui est de l'ingénierie humaine avec du saupoudrage de vivant et puis une vision où tu respectes des processus naturels. » GEMA1

naturels par biomimétisme est en rupture avec les restaurations classiques qui ressemble souvent davantage à « *de l'ingénierie humaine avec saupoudrage de vivant* ».

Les structures GEMAPI ont d'ailleurs toutes considéré que les travaux de restauration tels qu'ils sont réalisés couramment consistaient majoritairement à figer la rivière et les berges et qu'en cela les techniques de restaurations Low-Tech basées sur la régénération des processus apportaient un réel changement de paradigme.

Sur le bois en rivière, toutes les structures sont convaincues que le bois a une place primordiale dans les cours d'eau et revêt une importance capitale pour leur bon état écologique, Le bois permet de diversifier les habitats et écoulements, apporter de la matière organique, de la rugosité hydraulique et augmenter la biomasse. Sur l'entretien du bois dans les cours d'eau, les pratiques semblent évoluer, alors que dans le passé le bois était systématiquement enlevé des cours d'eau, il est aujourd'hui laissé volontairement dès que possible, sur les secteurs à faible enjeu. Toutefois cela ne semble généralement pas représenter la majorité du territoire. Le mot schizophrénie a été mentionné par deux structures :

- À l'échelle sociétale, rechercher le bon état écologique des cours d'eau tout en rendant obligatoire l'entretien des cours d'eau (articles du code de l'environnement) est jugé schizophrénique
- À l'échelle d'une structure GEMAPI en contexte montagneux, les membres de la structure sont tout à fait conscients de l'importance du bois en rivière mais effectuent un entretien systématique, « *parfois justifié et parfois non* » (GEMA4)

Alors que toutes les structures parlent du risque d'embâcles qui peuvent favoriser les inondations, une structure dénote aussi des conflits liés à la présence de bois sur les activités de Canoé/Kayak. Certaines des structures tentent de remettre du bois dans les cours d'eau sur certains secteurs. Toutes les structures pointent du doigt les perceptions négatives des riverains et élus sur le sujet du bois en rivière, et l'importance du travail de communication et d'éducation. Les plaintes lorsque du bois est laissé et/ou remis dans le cours d'eau semblent courantes.

Sur le castor, toutes les structures sont sensibilisées aux effets positifs que peut avoir cet animal sur l'écosystème, même si les conflits de cohabitation avec les activités humaines semblent courants ou probables. GEMA1 mentionne qu'une entité devrait être dédiée à la médiation autour de cette cohabitation, GEMA4 affirme qu'elle a endossé le rôle de référent castor sur son territoire en cas de conflits (ennoyage de chemin ou prairies) alors que ça n'est pas censé être son rôle.

Plusieurs avantages des techniques LTBP ont été soulignés par les interlocuteurs. Parmi eux, le faible coût des interventions est fréquemment mentionné, notamment grâce à la rugosité hydraulique générée par les structures en bois, qui favorise la réinfiltration de l'eau dans les sols et la recharge des nappes phréatiques. Deux structures ont également indiqué que ces techniques pouvaient constituer une opportunité pour mobiliser des équipes d'insertion, en fournissant la main-d'œuvre nécessaire aux travaux. D'autres bénéfices ressortent, tels qu'un bilan carbone réduit, une meilleure résilience aux incendies, la diversification des écoulements, ainsi que l'aide apportée pour corriger l'incision des cours d'eau, stocker les matériaux et favoriser l'exhaussement des lits. Le fait de réintroduire un certain « chaos » dans le cours d'eau, en imitant des processus naturels, ainsi que la réversibilité des structures, sont également perçus comme des points forts. GEMA2 par ailleurs mis en avant l'aspect social de ces techniques, soulignant qu'elles permettent aux riverains de s'approprier davantage leur rivière et de recréer un lien affectif avec le milieu, ce qui peut constituer un véritable projet de société. Cette dynamique favorise la compréhension et l'acceptabilité, même auprès de personnes conservatrices sur certains sujets. Ces projets se prêtent particulièrement bien aux chantiers partagés et participatifs. Une

autre structure a évoqué le caractère rassurant de ces techniques pour les élus et riverains, du fait de leur maîtrise, en comparaison avec les embâcles ou les structures naturelles plus imprévisibles.

Certains avantages plus indirects ont été mentionnés, comme le fait que ces techniques invitent à se poser des questions intéressantes sur la gestion des milieux aquatiques, ou à faire preuve d'humilité, puisque leurs résultats sont souvent moins spectaculaires et visibles qu'à court terme, mais s'inscrivent dans une perspective à plus long terme.

Sur les limites de ces techniques, toutes les structures mentionnent le besoin d'espace et la nécessité d'une stratégie d'acquisition de foncier, comme un point critique, et souvent compliqué, et les conflits avec les terres agricoles sont aussi mentionnés. Deux structures mentionnent les risques de piégeage des déchets solides, particulièrement en contexte urbain ou à l'aval d'agglomérations. Une structure mentionne le risque de diviser et donc d'affaiblir les écoulements. GEMA3, ayant des projets de mettre en place évoque des limites comme le manque d'énergie d'un des cours d'eau, le coté insécurisant, délicat et inconfortable d'un projet expérimental où il y a moins de visibilité, la nécessité d'un suivi et d'une attention particulière. L'image dédagée par les structures qui instigent ces techniques la structure est aussi évoquée GEMA3 et GEMA4 comme une limitation : le risque de passer pour des « *huluberlus mangeurs de graines* », « *bobos écolos* » lorsqu'ils veulent remettre du bois ou des barrages de castors dans les cours d'eau ou de se faire une réputation d'incompétent si elle met en place des ouvrages peu pertinents. Ces deux structures mettent aussi en avant la communication nécessaire auprès de la population sur cette approche nouvelle, de plus GEMA4 mentionne que l'esprit humain a besoin de maîtrise et n'aime pas le chaos, ce qui fait que les élus veulent du « *naturel contrôlé* » pas du vrai naturel. L'administration et les démarches (telles que déclaration auprès de la DDT) sont jugées limitantes et inadaptées par deux structures, notamment sur les interventions par étapes, de plus GEMA4 trouve que la position des services de l'état est encore floue.

Toutes les structures ont adhéré à l'approche philosophique et au message véhiculé par ces techniques de restaurations, même si une structure observe que le mouvement a une volonté de s'inscrire en rupture avec ce qui a été fait au préalable par le monde de la restauration ce qui crée des crispations et de la polarisation, y compris au sein des acteurs de la GEMAPI. Le message apporte un peu de fraîcheur et d'humilité par rapport au vivant dans le discours sur la restauration des milieux aquatiques et donne des pistes de réflexion intéressantes, mais peut renvoyer à certains une image egocentrique ou dévalorisante sur le reste du monde de la GEMA. De plus une structure a observé faire très vite face aux difficultés de mise en application sur le terrain pour propager cette vision.

Sur les critères de pertinence pour l'implémentation de ces techniques, les contextes d'incision sont mentionnés par deux structures, l'une d'elle mentionnant qu'elles sont favorables lorsque l'incision est raisonnable ou modérée. Les critères de pente sont mentionnés par plusieurs structures, pour GEMA2 les ruisseaux à pentes faibles sont plus favorables, mais pour GEMA4 les contextes à forte pente ne sont pas forcément défavorables, tout dépend de l'objectif. GEMA2 évoque la nécessité d'un minimum de transport solide sinon le temps de réponse sera beaucoup plus lent, mais voit trop de transport solide comme défavorable. Deux structures mentionnent la restauration de zones humide comme contexte favorable, GEMA4 trouve idéal les lieux sans enjeux inondation ou autres. Le contexte agricole peut être vu comme une porte d'entrée selon GEMA2, et la disponibilité foncière et l'espace de liberté ont été observés comme critère crucial par toutes les structures. GEMA4 mentionne aussi la largeur des cours d'eau en évoquant 10m comme largeur maximale, et GEMA3 insiste sur la nécessité d'un accès aisé aux parcelles pour faciliter suivis et indicateurs et la nécessité d'une bonne énergie des acteurs et partenaires. GEMA3 évoque les têtes de bassin comme généralement favorables car ils ont moins d'usage et d'urbanisation, alors que GEMA1 pense que ces techniques font sens de partout.

Sur les sujets de continuité écologique, GEMA1 et GEMA2 évoquent que l'effet d'un barrage de castor sera plus important sur un cours d'eau mono-chenal et incisé mais que ça n'est pas l'état naturel de la rivière. GEMA1 mentionne la difficulté administrative pour tout ouvrage > 50cm de hauteur.³⁵ GEMA2 pense aussi que le nombre de chenaux plus élevés sur les projets aux États-Unis favorise la continuité piscicole, que le contexte est plus contraint en France et que la question de la continuité sédimentaire se pose en aval des ouvrages. Pour GEMA3 ces techniques ont permis une prise de conscience qu'il fallait « *arrêter d'être obsédé par la continuité piscicole* » qui a conditionné les acteurs dans une forme de doctrine, et qu'il est important de prendre de la hauteur en réalisant que le bois et les castors étaient historiquement abondants dans nos cours d'eau, et que les bénéfices associés sont parfois bien plus importants que de prioriser la continuité. Sur la thermie, GEMA1 évoque qu'une rivière en bonne santé a un matelas alluvial qui permet le refroidissement par les échanges avec la nappe, GEMA2 évoque un refroidissement possible mais la nécessité d'évaluer les situations au cas par cas. GEMA3 trouve utile de se reposer ce type de question.

Le temps d'échange n'a permis qu'à deux structures d'aborder le concept d'état zéro des cours d'eau. GEMA1 est convaincu que l'état naturel des cours d'eau, avant leur défrichement, correspondait à un régime anastomosé. En revanche, GEMA4 souligne que l'état initial des rivières est difficile à connaître avec précision, les modifications anthropiques remontant à plusieurs millénaires. Elle s'interroge sur l'apparence d'une rivière sauvage à l'époque, évoquant l'hypothèse qu'il s'agissait parfois d'un vaste marécage. GEMA4 questionne également la pertinence du stade zéro comme objectif de restauration aujourd'hui, notamment dans un contexte où les vallées ont été fortement aménagées pour être rendues exploitables. Elle considère donc que le contexte actuel est défavorable à un retour complet à cet état, mais trouve néanmoins le concept d'état zéro intéressant pour alimenter la réflexion sur les objectifs à viser lors d'un projet de restauration. La question se pose alors : doit-on chercher à se rapprocher au maximum de ce « stade zéro » ?

Concernant la transposabilité des techniques entre les États-Unis et la France, GEMA1 estime que le contexte climatique et hydrologique méditerranéen est comparable à celui de la Californie, soulignant par ailleurs que, de manière générale, « *toutes les rivières du monde parlent de la même chose* ». En revanche, GEMA2 souligne que le territoire français est plus densément occupé, ce qui engendre un contexte plus contraint. Par conséquent, la création de nombreux chenaux secondaires favorables à la continuité piscicole y sera plus limitée. Par ailleurs, GEMA4 met en avant le morcellement foncier français en très petites parcelles, résultat des politiques historiques de succession, qui complique les stratégies foncières nécessaires à la mise en œuvre de ces techniques en France.

Concernant l'avenir des techniques de restauration dans le paysage français, GEMA2 exprime l'espoir qu'elles se développent davantage, soulignant que les retours d'expérience seront précieux pour leur amélioration. GEMA3 estime que le rôle des services instructeurs sera déterminant dans leur diffusion, et considère que ces techniques sont mieux adaptées à une mise en œuvre par les régies et les maîtres d'ouvrage plutôt que par les bureaux d'études. Pour sa part, GEMA4 pense que ces techniques ont vocation à perdurer, mais que leur adoption prendra du temps en raison du besoin important de retours d'expérience.

³⁵ Rubrique R214-3 du code de l'environnement

3.3.3. Analyse transversale des organismes de pêche

Le tableau d'analyse transversale récapitulant les idées évoquées lors de chaque entretien a été présenté en *Annexe 4* : Tableau de synthèse des entretiens avec les organismes de pêche.

Sur la perception de ces techniques de restauration, PE1 a évoqué qu'elles donnent un nom nouveau pour des techniques « *déjà faites depuis des décennies* » citant certains guides (*cf. Annexe 4* : Tableau de synthèse des entretiens avec les organismes de pêche) et certaines techniques comme les épis ou les pieux tressés avec des branches de saule. Il trouve ces techniques trop assimilées aux barrages de castors, et comprend mal la différence et complémentarité avec les techniques labélisées Génie Végétal.

Sur les restaurations telles qu'elles sont généralement pratiquées, il évoque que la demande de figer les berges vient généralement des propriétaires, et qu'en dehors d'enjeu à proximités les restaurations s'orientent toujours vers des techniques de type génie végétal. Il évoque aussi que cela dépend de la culture des entreprises qui interviennent, les entreprises de génie civil et travaux publics aiment bien « faire les choses au carré » et figer un peu trop les choses. Toutefois, pour PE1, la tendance est à laisser la place aux processus naturels et le « process-based » est devenu la norme, même s'il faut continuer la pédagogie auprès des GEMAPIENS, certains ayant encore tendance à privilégier la gestion des inondations et la protection de berge par rapport aux milieux aquatiques.

Le bois en rivière est vu comme favorable par les deux organismes pour les processus naturels, et comme un matériau essentiel à la rivière par PE1. PE1 a tendance à favoriser dès que possible le dépôt d'embâcle, alors que PE2 est favorable à un entretien raisonné pour éviter les gros tas d'embâcles ou la ripisylve trop vieillissante. PE1 admet que certains pêcheurs peuvent être réticents aux changements et évolutions de tous types (seuils, bois en rivière etc...) et aux contraintes (accrochages, accès à la rivière...) et n'ont pas toujours toute la connaissance, pour cette raison un travail de pédagogie est nécessaire au sein du monde de la pêche.

Sur les barrages de castor, PE1 s'est montré « beaucoup plus réservé » et n'est pas d'accord avec le constat qu'un cours d'eau sans barrage de castor puisse être une anomalie. Il trouve que le retour du castor peut avoir des impacts sur le milieu et notamment sur les populations piscicoles. PE2 trouve que les barrages de castor « ne posent pas forcément soucis » et sont généralement ponctuels et dispersés, que leurs effets doivent être analysés au cas par cas.

Les avantages perçus des techniques de restauration LTBP sont :

- L'utilisation de matériaux naturels
- Des techniques douces et moins traumatisantes pour le milieu
- Permet de créer du lien social en mobilisant des associations et bénévoles
- Peut être intéressant pour recréer un état naturel plus proche du fonctionnement originel
- Peut être utile à rehausser le profil en long
- Peut aider à rehausser le niveau des nappes
- Favorable à la biodiversité, notamment macro-invertébrés et amphibiens
- Peut aider au soutien d'étiage ou à la restauration de zones humides

Toutefois, de nombreuses limites et inquiétudes sont exprimées par les deux organismes de pêche. Ils craignent notamment que la création d'un système de zone humide au sein d'un cours d'eau favorise les espèces piscicoles lenticques au détriment des espèces lotiques, telles que la truite, qui sont pourtant naturellement présentes dans ces milieux. Par ailleurs, la question de la continuité écologique suscite une forte préoccupation. En effet, les ouvrages,

« J'avais lu dans une présentation où il était indiqué 'qu'un cours d'eau sans barrage de castor était une anomalie'. Moi j'ai un peu du mal avec ce type de constat parce qu'on compare des choses qui ne sont pas comparables. Les cours d'eau d'il y a quelques siècles et les cours d'eau d'aujourd'hui. Aujourd'hui ça n'est pas une anomalie d'avoir un cours d'eau sans castor. D'ailleurs le retour naturel du castor peut causer des impacts sur le milieu, notamment sur les peuplements piscicoles. » PE1

même si initialement franchissables peuvent accumuler des embâcles et devenir infranchissables, créant ainsi des obstacles qui peuvent piéger les poissons et leur empêcher de rejoindre des zones refuges lors des périodes d'assec et entraver la migration des truites pour leur reproduction.

Ces techniques sont donc perçues comme peu adaptées aux têtes de bassins et aux systèmes d'eau courante, mais plutôt à des cours d'eau plus larges, moins encaissés, où les chenaux se forment naturellement. D'autres sources d'inquiétude concernent le réchauffement des eaux dans les retenues, la diminution de l'oxygène dissous, l'accumulation de sédiments et le colmatage, ainsi que la perte potentielle de zones de frayères. Sur la transposabilité du contexte américain, PE1 a exprimé que les systèmes ne sont pas du tout les mêmes, il faut donc beaucoup de prudence quant à l'interprétation des résultats nord-américains.

Sur la communication autour de ces techniques, PE1 regrette une communication centrée sur une espèce (le castor) plutôt qu'avoir une vision écologique de l'ensemble des espèces. La communication par les médias grand publiques est vue comme « un peu catastrophique » qui présentent ces techniques comme une solution miracle, laissant entendre qu'il faudrait en créer de partout, point sur lequel PE1 s'est montré en opposition.

Sur l'avenir de ces techniques, les fédérations de pêche peuvent amener un esprit critique et des garde fous pour éviter qu'un impact trop important se fasse sur les milieux. De plus, la nécessité de suivis et de retours d'expérience où sont impliquées les fédérations est mentionnée.

3.4. Discussion sur les entretiens d'enquêtes

Limites de la méthode

Concernant la méthode employée, l'outil de retranscription en direct de Microsoft Teams s'est révélé moins performant que la combinaison d'un enregistrement audio suivi d'une retranscription via TurboScribe. Dans les deux cas, les retranscriptions nécessitent un travail manuel de nettoyage et de correction conséquent. Les entretiens menés en présentiel étaient généralement de meilleure qualité : ils ont donné lieu à des échanges plus approfondis et ont duré plus longtemps. À l'inverse, les entretiens téléphoniques sans support vidéo se sont avérés globalement moins satisfaisants, rendant plus difficile l'identification d'éléments pertinents.

Il convient de rester prudent dans l'interprétation des résultats, car la taille très réduite de l'échantillon limite leur portée et d'importantes divergences d'opinions ont été constatées au sein même de certaines structures, à l'instar de l'un des bureaux d'études interrogés. Par ailleurs, un biais significatif

doit être pris en compte dans la sélection des participants : certaines structures ont été sollicitées en raison de leur implication dans les formations de l'ARRA², ce qui les rendait plus familières et sensibilisées à ces techniques.

Sur les résultats

L'analyse des entretiens montre des points de vue variés et permet de comprendre quelques tendances dans les perceptions de différents acteurs du monde de l'eau.

Le terme « Low-Tech » n'est pas interprété de façon homogène par l'ensemble des personnes interrogées, et des zones d'ambiguïté subsistent quant à sa signification. Un entretien met aussi en avant des incompréhensions potentielles sur les processus visés par ces restaurations. Un tiers des entretiens a mis en évidence que ces techniques ne sont pas perçues comme nouvelles par plusieurs professionnels : différents types d'ouvrages ont ainsi été mentionnés, mais aucun projet de restauration d'envergure reposant principalement sur ce type de techniques n'a été recensé.

L'ensemble des bureaux d'études interrogés manifeste un intérêt pour la restauration fondée sur les processus (« process-based restoration »), alors que les entretiens avec structures GEMA et BE ont clairement montré que cette approche n'est pas la norme dans le secteur de la restauration en général. De même, toutes les structures rencontrées reconnaissent l'importance du bois en rivière, contrairement à la perception bien plus négative qui prévaut à l'échelle de la société (Le Lay & Piégay, 2007). Cependant, depuis quelques années, la gestion des milieux aquatiques, ainsi que la société civile et les élus, apparaissent de plus en plus sensibilisés et réceptifs à ces enjeux.

Divers critères contextuels ont été mentionnés comme favorables ou défavorables à ces techniques, avec des opinions contrastées à ce sujet. Par exemple, les structures liées à la pêche affichent des désaccords notables avec les autres acteurs en voyant les têtes de bassins à dominante lotique comme défavorables à ce type de technique. Le projet réalisé sur la Lierne et la Véore dans la Drôme est par exemple perçu comme un contexte idéal par certaines structures, tandis que les pêcheurs y voient au contraire un cadre particulièrement défavorable. Le projet mené sur la Rize est jugé peu pertinent pour la relance efficace des processus fluviaux et hydromorphologiques, ce qui soulève la question de sa labellisation en tant que LTPBR.

De manière générale, les pêcheurs ne semblent pas percevoir de bénéfices potentiels des barrages de castors, naturels ou artificiels, sur les populations piscicoles, notamment celles des salmonidés, et sont très inquiets sur les impacts négatifs que ces structures peuvent avoir sur la continuité piscicole ou le régime thermique. Ces techniques alimentent en tout cas une forte discussion sur la continuité écologique qui polarise fortement le monde de l'eau.

Un point d'incompréhension qui a généré des discussions a été détecté sur la capacité des techniques à aggrader un cours d'eau incisé. Les BE doutent fortement que des restaurations ambitieuses puissent se faire sans machine et restaurer des cours d'eau fortement dégradés ou incisés alors que c'est un objectif affiché par les promoteurs de ces techniques.

Le concept de 'stade 0' et d'objectif de restauration correspondant à un cours d'eau en anastomose sur tout ou partie du fond de vallée semble encore un concept nouveau en France et les bureaux d'études semblent en général peu sensibilisés à cette approche et à ces objectifs de restauration. Aucun projet

de ce type n'a été recensé en France alors que plusieurs projets ont été menés avec succès aux Etats-Unis ou au Royaume-Uni ³⁶.

Les entretiens avec les structures GEMA ont permis d'approfondir les difficultés auxquelles les structures sont confrontées lorsqu'elles souhaitent mettre en place ces techniques sur les territoires.

Un aspect intéressant évoqué durant les entretiens est l'appropriation de ces techniques. De nombreux acteurs ont évoqué qu'elles auraient davantage leur place au sein des régies de structures GEMAPI plutôt que de passer systématiquement par des Bureaux d'études, et qu'elles pouvaient aussi favoriser la sensibilisation des riverains et des pêcheurs locaux. Ce point est évoqué comme un aspect positif de ces techniques.

Les entretiens ont confirmé la polarisation des acteurs de l'eau autour de la communication faite autour de ces méthodes, et des réactions émotionnelles ont été perçues ou évoquées durant les entretiens. Plusieurs intervenants ont montré une sensibilité particulière à la dimension poétique et philosophique des approches Low-Tech BP, estimant que celles-ci remettent en question les limites d'un système trop centré sur la maîtrise de la nature. En revanche, d'autres participants ont manifesté moins d'adhésion à cet aspect philosophique, certains allant jusqu'à le percevoir comme « ésotérique » et recourant à des simplifications excessives.

Des questions demeurent en suspens et devront être approfondies au fil des retours d'expérience futurs. La transférabilité des modèles nord-américains, fréquemment évoqués comme références, n'a pas suscité de consensus au cours des entretiens, aucun acteur ne semblant maîtriser en détail le contexte nord-américain. Plusieurs structures ont souligné que ces techniques invitent à s'interroger de manière pertinente sur les milieux aquatiques et les enjeux de restauration.

4. Champ d'application et étude d'opportunité sur le bassin RM&C

4.1. Critères de viabilité d'un projet Low-Tech basé sur les processus

4.1.1. Introduction

Afin d'explorer la possibilité de cartographier la pertinence des techniques de restauration Low-Tech et fondées sur les processus, une approche combinant revue bibliographique et échanges avec des spécialistes est privilégiée dans cette analyse, notamment à travers l'analyse d'enquêtes présentée au chapitre 2. Les critères cumulent les champs d'application de types de techniques :

- **Low-Tech** : techniques à faible technicité favorables sur des petits cours d'eau sur lesquels l'énergie humaine déployée peut contrecarrer positivement l'énergie fluviale et donc avoir des effets morphologiques via la régénération des processus
- **Process-Based** : restauration de processus fluviaux naturels tels que l'érosion, le dépôt, la connectivité latérale, la diversité d'écoulements et d'habitats, l'anastomose dans un contexte de cours d'eau morphologiquement simplifié et dégradé

³⁶ Carte des projets de restauration basés sur l'approche et les objectifs du 'stade 0' ou 'état 0' : <https://stagezeroriverrestoration.com/explore.html>

Si les techniques de restauration LTBP présentent un fort potentiel pour la réhabilitation de certains cours d'eau, il subsiste toutefois un déficit de critères de conception permettant d'évaluer la probabilité d'atteindre les objectifs de restauration fondés sur les processus (Ciotti et al., 2021). Ces auteurs proposent ainsi quatre critères fondamentaux pour apprécier ce potentiel :

1. L'extension de l'espace de bon fonctionnement
2. L'utilisation de l'énergie naturelle intrinsèque pour la restauration
3. L'emploi de matériaux locaux
4. L'intégration explicite du temps et de la gestion adaptative dans la conception

À ce jour, aucun travail cartographique n'est spécifiquement dédié aux opportunités des techniques de restauration LTBP. Cependant, plusieurs modèles se sont attachés à caractériser les tronçons et paramètres favorables à l'activité des castors, en particulier la construction de barrages, et semblent être utilisés pour identifier des tronçons favorables aux techniques de restauration LTBP en se basant sur les constats suivants :

- La fréquence, la densité et la taille de leurs barrages, davantage que la densité de la population de castors, déterminent l'ampleur des rétroactions positives hydrologiques, géomorphologiques et biotiques qui favorisent la création d'habitats aquatiques et terrestres diversifiés (Johnston & Naiman, 1990).
- Tous les cours d'eau ne peuvent pas soutenir un niveau élevé d'activité de construction de barrages par les castors (Persico & Meyer, 2009).

Les techniques de restauration Low-Tech et basées sur les processus utilisant des structures cherchant notamment à reproduire les effets des ouvrages de castors, ces modèles ont donc servi de référence dans cette étude. La capacité des castors à construire des barrages, tout comme les impacts environnementaux associés, dépendent fortement du contexte (A. Larsen et al., 2021). Ce contexte doit donc être au cœur de la planification et de l'évaluation des impacts potentiels et de leurs rétroactions. La compréhension fine des zones d'activité probable des castors, des secteurs où les impacts ou opportunités liés aux barrages peuvent se manifester, ainsi que de l'estimation du nombre potentiel de barrages à l'échelle d'un bassin versant, est donc essentielle (Graham et al., 2020).

Dans leur 'guide de la restauration par le castor' (Castro et al., 2017) proposent une matrice de critères de viabilité dans le but d'aider les chefs de projet à évaluer rapidement la probabilité qu'un barrage de castor persiste pendant au moins deux saisons – soit le temps nécessaire à un couple de castors pour élever avec succès leur progéniture. Cette matrice utilise deux axes, l'un représentant la viabilité des barrages de castors, l'autre la propension à ce que les barrages aient des impacts négatifs.

Plusieurs modèles de propension du castor à construire des barrages sont développés aux Etats-Unis comme le Beaver Restoration Assessment Tool (BRAT), (W. W. Macfarlane et al., 2017) et peuvent être utilisés pour déterminer les opportunités de restauration. Ce modèle est adapté au contexte britannique où un modèle de capacité de barrages de castor (Beaver Dam Capacity Model) a été développé pour classer la pertinence des tronçons de rivière à la construction de barrages et estimer leur nombre potentiel à l'échelle du bassin versant (Graham et al., 2020). En Suisse, une étude nationale approfondie des facteurs déterminant la présence de barrages de castor et le potentiel d'inondation des plaines alluviales par le castor a été réalisée afin de maximiser les bénéfices de la restauration et de minimiser les conflits (Dennis et al., 2024). Une approche innovante pour identifier les secteurs favorables à l'implantation des castors est récemment proposée par (Dittbrenner et al., 2018) à travers un modèle de Potentiel Intrinsèque basé sur des paramètres topographiques, indépendamment de l'occupation actuelle des sols.

En France, l'Office Français de la Biodiversité (OFB) a initié un programme d'étude sur les barrages de castor. Une étude menée en 2020 sur le bassin versant du Suran, basée sur de nombreux relevés de terrain, met en évidence l'influence de la section mouillée, de la pente du cours d'eau et de la présence d'éléments fins dans le lit. Cette démarche vise à mieux comprendre les déterminants environnementaux qui motivent la construction de barrages par le castor (Contant, 2023), tout en cherchant à adapter la méthodologie britannique (Graham et al., 2020) au contexte français. L'application de ces modèles nord-américains tels que le BRAT au contexte français a été étudiée par George, (2024) et s'est avérée complexe, notamment en raison de la structure des bases de données cartographiques locales.

Ces études et modèles constituent donc la base de cette analyse permettant d'identifier les critères jugés les plus pertinents pour évaluer la favorabilité des projets de restauration Low-Tech et axés sur les processus sur un tronçon.

4.1.2. Critère d'espace disponible, de largeur de fond de vallée et d'occupation des sols

Tout projet de restauration ambitieux visant à rétablir les processus morpho-dynamiques d'un cours d'eau nécessite une disponibilité d'espace latérale suffisante, un « espace de bon fonctionnement ». L'espace de mobilité, appelé aussi espace de liberté, est la composante morphologique de l'espace de bon fonctionnement (Terrier et al., 2016). La restauration fondée sur les processus naturels et les techniques de restauration Low-Tech Basées sur les Processus (LTBP) vise généralement à renforcer la connectivité latérale, favoriser la formation de chenaux secondaires, encourager l'érosion latérale, ainsi que reconnecter et inonder la plaine alluviale et le fond de vallée. Ces approches se focalisent ainsi sur des paysages fluviaux particuliers, caractérisés par la présence d'une plaine inondable, qu'elle soit restreinte ou étendue, et capable de soutenir une végétation riveraine. Les paysages fluviaux dépourvus de plaine inondable ne sont pas prioritaires, car ils présentent une capacité d'ajustement latéral réduite et sont moins susceptibles d'être ciblés par les efforts de restauration (J. M. Wheaton et al., 2019).

Dans les vallées fluviales non ou semi-confinées, où le chenal peut plus facilement se connecter hydrologiquement à sa plaine d'inondation, les retenues de castor peuvent s'étendre sur de grandes surfaces et évoluer en zones humides ou marécageuses, souvent appelées « prairies de castors » (Naiman et al., 1988). Généralement, les prairies de castors matures couvrent toute la largeur de la plaine inondable (Wohl, 2013).

Adam et al., (2007) indiquent qu'un score d'efficacité optimal des travaux est atteint lorsque l'emprise disponible dépasse dix largeurs de cours d'eau et la probabilité de succès de restauration fortement entravée lorsqu'elle est inférieure à trois largeurs de chenal. Ciotti et al., (2021) ne proposent pas de critères stricts pour définir un espace de processus suffisant, mais suggèrent qu'une évaluation relative peut être réalisée si trois types de données sont collectés sur le site du projet :

- L'étendue historique de l'espace de processus
- L'étendue de l'espace de processus actuellement déconnecté
- La largeur actuelle du chenal

La présence d'infrastructures urbaines dans la plaine inondable, telles que des habitations ou des routes, limitera l'étendue de l'espace de mobilité et donc des objectifs atteignables. Par ailleurs, les usages, par exemple agricoles peuvent également restreindre fortement la possibilité de restituer un espace de fonctionnement suffisant au cours d'eau. La stratégie foncière constitue donc un enjeu

central. L'étude technique pour délimiter l'EBF peut donc aussi être complétée par une étude socioéconomique, voire une étude historique ou de faisabilité foncière (par exemple évaluation de la difficulté à mobiliser ou à acquérir des terrains (Agence de l'eau Rhône Méditerranée & Corse, 2018; Terrier et al., 2016). Un facteur clé influençant la complexité de cette stratégie est le nombre de propriétaires différents sur le tronçon concerné, les usages concernés par les propriétés ainsi que les prix d'acquisition des terrains.

4.1.3. Analyse des risques d'embâcles

Même si la présence importante de bois en rivière ne favorise pas forcément les embâcles, il est tout de même important d'identifier la présence de verrous hydraulique ou d'ouvrages d'art sous-dimensionnés en aval de projets de restaurations impliquant du bois (Quiniou & Piton, 2022).

4.1.4. Critère d'érodabilité des berges

La propension du cours d'eau à favoriser des processus érosifs et latéraux est directement dépendant de l'érodabilité des berges. Il n'existe pas à ce jour de méthode normalisée de détermination de l'érodabilité des berges. Adam et al., (2007) proposent néanmoins quelques éléments méthodologiques accompagnés d'exemples visuels permettant une première approche de ce paramètre (cf. figure 28).



Fig 28. Exemples visuels pour la caractérisation de l'érodabilité des berges (Adam et al, 2007)

4.1.5. Critères de dégradation et d'apports solides

La suppression systématique du bois mort de grande taille et des barrages de castors a eu un impact significatif sur la santé des paysages fluviaux (Polvi & Wohl, 2013). Ainsi, l'une des premières questions à se poser dans le cadre d'un projet de restauration LTBP est la suivante : le cours d'eau est-il appauvri en structures ligneuses ? (Castro et al., 2017).

Les cours d'eau incisés ou enfoncés constituent généralement des candidats appropriés pour ce type de restauration (Pollock et al., 2014). Néanmoins, le niveau d'incision et le déficit sédimentaire représentent des critères déterminants pour évaluer la pertinence du recours aux techniques LTBP. Il est donc essentiel de réaliser un diagnostic hydromorphologique approfondi afin de bien comprendre le fonctionnement du système, l'origine des altérations observées ainsi que la capacité de réponse potentielle du cours d'eau. Cela implique de caractériser les changements passés, d'identifier les effets sur l'état morphologique et de comprendre les mécanismes de fonctionnement et le potentiel de réactivité du système (en fonction notamment de l'énergie en présence et de la résistance des berges). Une évaluation préalable et détaillée de la géomorphologie du site est incontournable pour quantifier la disponibilité sédimentaire, qu'elle soit longitudinale ou latérale, qui constitue ainsi un critère déterminant pour la réussite des projets de restauration, particulièrement si l'objectif recherché est l'aggradation d'un cours d'eau incisé (M. M. Pollock et al., 2014).

Lorsque l'objectif est l'aggradation du lit, il convient de souligner que la mise en œuvre de techniques « Low-Tech » nécessite souvent plusieurs années, avant de produire des effets significatifs, selon l'hydrologie, la dynamique et la puissance du système en question. De plus, ces projets de restaurations peuvent se prêter à un travail continu par étapes successives. Il est donc fondamental que les maîtres d'ouvrage et les décideurs soient pleinement informés de cette temporalité et qu'ils les intègrent dans leurs attentes et leur planification. Par ailleurs, dans les situations où l'incision du cours d'eau est très marquée et où le déficit sédimentaire est d'origine structurelle—aspect qui peut résulter de curages répétés ou d'une coupure prolongée de l'apport sédimentaire depuis les versants—et en l'absence de matériaux alluviaux disponibles dans la plaine, il s'avère irréaliste d'espérer une restauration hydromorphologique ambitieuse à l'échelle d'une vie humaine. Enfin, la présence d'ouvrages transversaux, tels que des digues ou des seuils sur le tronçon concerné ou à proximité immédiate, peut significativement limiter les objectifs de ce type de restauration. Il convient cependant de noter que certains contextes de forte incision peuvent offrir une disponibilité accrue de matériaux latéraux remobilisables, exploitables via les techniques LTBP.

4.1.6. Critère de pente du chenal

Une étude suisse a cherché à modéliser la probabilité de construction de barrages à l'échelle du pays et déterminer les facteurs déterminant la présence de barrages de castors et le potentiel d'inondation des plaines alluviales par ces animaux. Il en ressort que la pente du chenal est le principal facteur déterminant à la fois la présence de barrages et l'impact potentiel de ces barrages sur l'occupation des sols (Dennis et al., 2024). La pente du chenal, en particulier, présentait une forte association négative avec la présence de barrages, avec une probabilité élevée de barrages jusqu'à des pentes d'environ 4% (Dennis et al., 2024) (cf. figure 29). A l'échelle de la France métropolitaine, la pente est un paramètre explicatif lié à la probabilité de présence de barrages de castors, la probabilité de présence d'un barrage diminuant à mesure que la pente augmente (Contant, 2023).

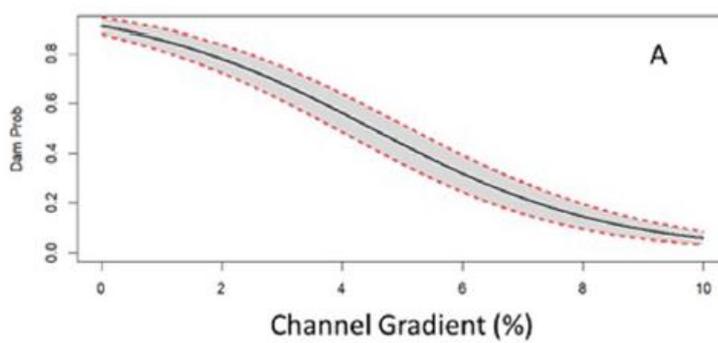


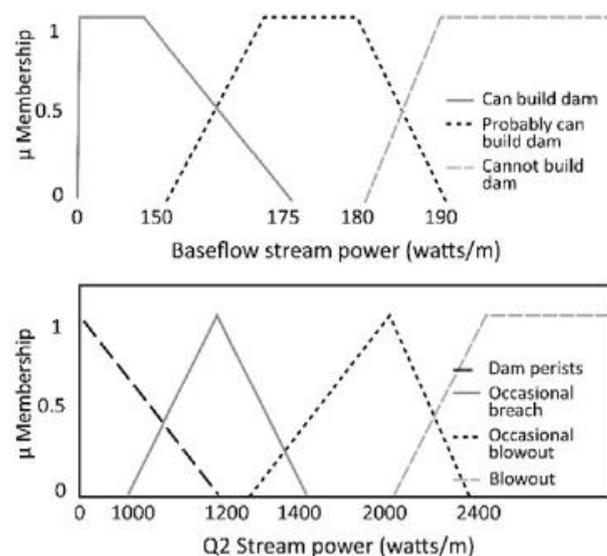
Fig 29. Probabilité de présence de barrage de castor en fonction de la pente du chenal (Dennis et al, 2024)

Castro et al., (2017) ont aussi jugé la pente du chenal comme un paramètre important dans leur matrice de viabilité des restaurations par le castor, jugeant une pente inférieure à 1% comme optimale et une pente > 3% comme défavorable. Ceci concorde une étude menée en Oregon qui a conclu, à l'échelle de leur bassin versant d'étude, qu'une pente de moins de 3% était optimale pour l'implantation d'un barrage, 67% des barrages présentant une pente de moins de 3% (Suzuki & McComb, 1998).

4.1.7. Critères de puissance

La puissance d'un cours d'eau est un paramètre essentiel expliquant sa capacité en mettre en œuvre des processus fluviaux et morpho-dynamiques. Plus un cours d'eau est puissant ; plus ses berges sont facilement érodables ; et plus les apports solides sont importants ; meilleure est la garantie de réponse positive du système ; plus rapides sont les résultats ; plus grande est la pérennité des bénéfices écologiques de la restauration ; moindre est le coût, puisque le cours d'eau effectue lui-même une partie

du travail de restauration (Adam et al., 2007). Toutefois, il existe aussi un seuil de surpuissance à partir de laquelle les ouvrages seront rapidement endommagés ou détruits avant de pouvoir mettre en œuvre les objectifs recherchés. Il faut donc calibrer la gamme de conditions hydrauliques rencontrées lors des différents débits, déterminer les emplacements précis où la construction de barrages est possible et si ces barrages sont susceptibles de résister aux hautes eaux. L'optimal est donc un contexte de crues morphogènes suffisamment fréquentes, mais pas trop puissantes et trop fréquentes pour détruire systématiquement les barrages, ainsi que des conditions d'étiages suffisantes.



Les actions de projet basés sur la régénération des processus tirent donc parti de l'énergie naturelle du système pour réaliser la restauration et minimisent le recours à l'énergie mécanique externe. Un bon concepteur de restauration sait quand, où et comment l'énergie fluviale et biologique naturelle d'un écosystème est créée, stockée, transmise et utilisée - par exemple, comment elle génère et déplace les sédiments, le bois et d'autres matières organiques. Cette compréhension permet de fixer des échéances réalistes pour atteindre les objectifs du projet, de définir des spécifications larges pour les types et configurations acceptables de formes fluviales, et de reconnaître que travailler avec les sources d'énergie naturelles implique d'accepter des résultats aléatoires (Ciotti et al., 2021).

Cette puissance peut être exprimée en puissance spécifique et dépend directement de l'hydrologie et de la pente du cours d'eau (cf. formule figure 30). Elle est généralement évaluée en utilisant la largeur moyenne naturelle à pleins bords et le débit moyen journalier de fréquence biennale (Adam et al., 2007). La puissance du cours d'eau en conditions d'étiage est aussi un paramètre important pour déterminer s'il était probable que les castors puissent physiquement construire un barrage lors des faibles débits. Macfarlane et al., (2017) ont approximé le débit d'étiage à l'aide d'une statistique de débit couramment disponible : le débit dépassé 80% du temps pendant le mois où l'écoulement est le plus faible (Qp80).

La puissance du cours d'eau (Ω) peut être facilement calculée pour n'importe quel tronçon si le débit (Q) est connu, car la pente peut être déduite d'un MNT (modèle numérique de terrain) et du réseau hydrographique, tandis que la densité de l'eau (ρ) et la gravité (g) sont des constantes.

Puissance unitaire (W/m)	Puissance spécifique (W/m ²)
$\Omega = \rho g Q S$	$\omega = \rho g QS/L$
Où Ω représente la puissance unitaire du cours d'eau (watts/m), ρ la densité de l'eau (1000 kg/m ³), g l'accélération due à la gravité (9,8 m/s ²), Q le débit (m ³ /s) et S la pente du chenal.	Où ω est la puissance spécifique du cours d'eau et L est la largeur d'écoulement.

Fig 30. Tableau de formules de la puissance unitaire et de la puissance spécifique

Comme l'ont souligné M. M. Pollock et al., (2014) la relation entre la probabilité de persistance d'un barrage de castor et les forces qui s'y exercent peut-être mieux décrite par la puissance spécifique par unité de largeur du cours d'eau (ω – watts/m²), une mesure plus appropriée et précise pour comparer les différences relatives des forces subies par les barrages : L'hydrologie doit donc être suffisante

Fig 31. Seuils de puissance unitaires utilisés dans la calibration du BRAT (Macfarlane et al, 2017)

(énergie) pour activer des processus hydromorphologiques, la présence de crue morphogènes est cruciale, toutefois, un contexte trop torrentueux de puissance de cours d'eau élevée détruira les structures trop fréquemment élevées et limitent la capacité des castors à maintenir leurs barrages (Andersen & Shafroth, 2010; Persico & Meyer, 2009).

Les seuils de puissance utilisés dans les différents modèles peuvent varier. (W. W. Macfarlane et al., 2017) ont calibré les valeurs suivantes dans leur modèle (cf figure 31). Alors que (Dennis et al., 2024) ont simplement utilisé la puissance du cours d'eau au module du cours d'eau (débit moyen) dans leur modélisation et ont observé une corrélation négative entre le module et la probabilité d'occurrence de barrages de castors en suisses.

4.1.8. Critère de largeur du cours d'eau, d'hydrographie et de section mouillée

L'approche des techniques de restauration LTBP telles que décrites dans le manuel de J Wheaton est destinée à être mise en œuvre principalement dans des cours d'eau praticables facilement à pied. Il existe une réelle opportunité d'augmenter considérablement notre empreinte de restauration en se concentrant sur ces cours d'eau (J. M. Wheaton et al., 2019).

Largeur, profondeur, section mouillée

Dans la littérature, de nombreux auteurs s'accordent à dire que la profondeur et la largeur du cours d'eau sont les paramètres déterminants du choix du site pour la construction d'un barrage. Hartman & Törnlov, (2006) ont par exemple réussi à classifier 93 % de leurs sites avec et sans barrages en utilisant seulement ces deux paramètres. McComb et al., (1990) ont été les premiers à utiliser la section mouillée pour s'affranchir de la corrélation entre la largeur et la profondeur du cours d'eau. Barnes & Mallik, (1997) expliquent l'influence de ce paramètre par deux raisons principales : premièrement, si la profondeur et la largeur du cours d'eau sont suffisantes, le castor peut se déplacer et immerger l'entrée de son gîte facilement, sans avoir à construire un barrage.

Parmi toutes les propriétés physiques des réseaux fluviaux, la largeur du chenal est souvent utilisée pour estimer les limites de la capacité des castors à construire des barrages (Dennis et al., 2024). Dans les rares études ayant compilé des informations sur la géométrie des cours d'eau là où des barrages de castors sont présents, on observe généralement une diminution de la fréquence d'occurrence des barrages à mesure que la largeur du cours d'eau augmente. En Suède, Hartman & Törnlov, (2006) ont constaté que les barrages sont généralement construits sur des rivières de moins de 6 mètres de large et de moins de 0,7 mètre de profondeur. En Allemagne, (Zahner et al., 2015) ont également observé une forte diminution de la fréquence des barrages pour des largeurs de chenal supérieures à 4 m, et (Neumayer et al., 2020) au-delà de 5 m. Il semble intuitif que les castors rencontrent des difficultés croissantes à barrer des rivières plus larges, en raison d'une combinaison de facteurs hydrauliques et de contraintes de force, mais il n'est pas certain qu'un seuil (par exemple 4 ou 5 m) soit réellement représentatif de ces limites physiques et donc utile aux gestionnaires souhaitant estimer la probabilité d'apparition de barrages de castors (depuis Dennis et al., 2024).

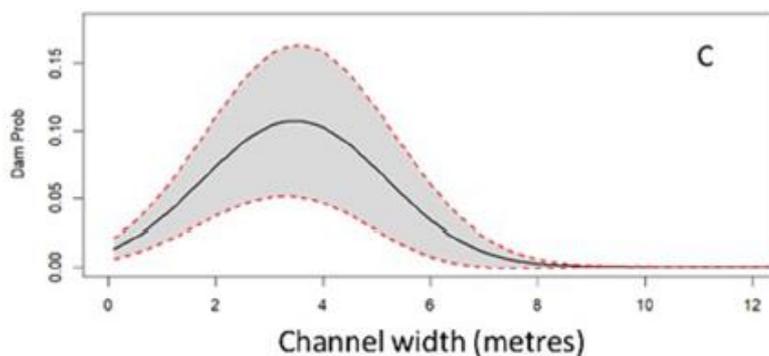


Fig 32. Probabilité de présence de barrage en fonction de la largeur du cours d'eau en suisse (Dennis et al, 2024)

En Suède, Hartman & Törnlov, (2006) ont constaté que les barrages sont généralement construits sur des rivières de moins de 6 mètres de large et de moins de 0,7 mètre de profondeur. En Allemagne, (Zahner et al., 2015) ont également observé une forte diminution de la fréquence des barrages pour des largeurs de chenal supérieures à 4 m, et (Neumayer et al., 2020) au-delà de 5 m. Il semble intuitif que les castors rencontrent des difficultés croissantes à barrer des rivières plus larges, en raison d'une combinaison de facteurs hydrauliques et de contraintes de force, mais il n'est pas certain qu'un seuil (par exemple 4 ou 5 m) soit réellement représentatif de ces limites physiques et donc utile aux gestionnaires souhaitant estimer la probabilité d'apparition de barrages de castors (depuis Dennis et al., 2024).

La probabilité de présence de barrages présentait une réponse non linéaire à la largeur du chenal, une augmentation de la largeur du chenal réduisant la probabilité d'occurrence jusqu'à zéro au-delà d'environ 8 mètres (Dennis et al., 2024) (cf. figure 32). Toutefois, Bien que souvent considérée comme une contrainte majeure, la largeur du chenal s'est révélée avoir un pouvoir explicatif nettement inférieur à d'autres paramètres comme la pente (Dennis et al., 2024).

Contant, (2023) a observé sur le bassin versant du Suran que les valeurs de sections mouillées sont significativement plus importantes et plus étalées pour les points sans barrages et que plus la section mouillée est grande, plus la probabilité de présence d'un barrage est faible jusqu'à devenir nulle vers 9 m² (cf. figure 33). À l'échelle du bassin-versant du Suran, la section mouillée ressort comme étant le paramètre clé expliquant la construction de barrages. Dans une autre étude, la construction d'un barrage est facilitée par une faible section mouillée. Les autres auteurs traitent les deux paramètres séparément (McComb et al., 1990; Swinnen et al., 2019). Swinnen et al., (2019) ont d'ailleurs montré que la profondeur du cours d'eau avait un effet plus important que la largeur sur la construction de barrages (Contant, 2023).

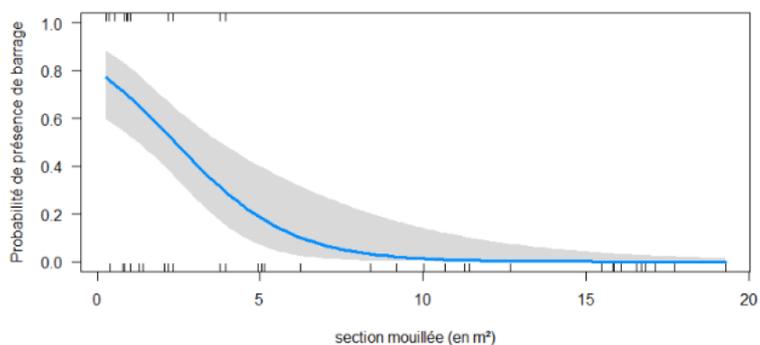


Fig 33. Probabilité de construction de barrage en fonction de la section mouillée sur le Suran (01) (Contant, 2023)

Rang de Strahler : Les résultats du modèle montrent que les barrages sont plus susceptibles de se former dans les cours d'eau de faible ordre (≤ 4 e ordre) (Graham et al., 2020). Contant, (2023) n'a pas observé de barrage situé sur des cours d'eau ayant un ordre de Strahler strictement supérieur à 4.

Surface de bassin versant drainée :

W. Macfarlane et al., (2014) ont constaté que la puissance spécifique du cours d'eau à elle seule ne suffisait pas à déterminer quand une rivière devenait trop grande pour permettre la construction et le maintien de barrages. Par conséquent, ils ont ajouté une valeur de seuil maximale de superficie drainée en amont, partant du principe qu'au-delà de cette valeur, un castor ne pourrait pas construire de barrage. Ce seuil de surface de bassin versant drainé a été fixé à 10 000km² dans le BRAT (W. W. Macfarlane et al., 2017).

4.1.9. Critère de boisement et de ripisylve

Les systèmes riverains et ripariens à travers l'Europe ont changé de manière significative depuis l'Holocène en raison de l'intensification de l'agriculture et de l'urbanisation (A. G. Brown et al., 2018b). Les techniques LTBP nécessitant un apport de matériel principalement ligneux idéalement sourcé localement, il faut donc la présence d'une quantité minimale d'arbres et de bois mort sur site pour pouvoir développer ces techniques.

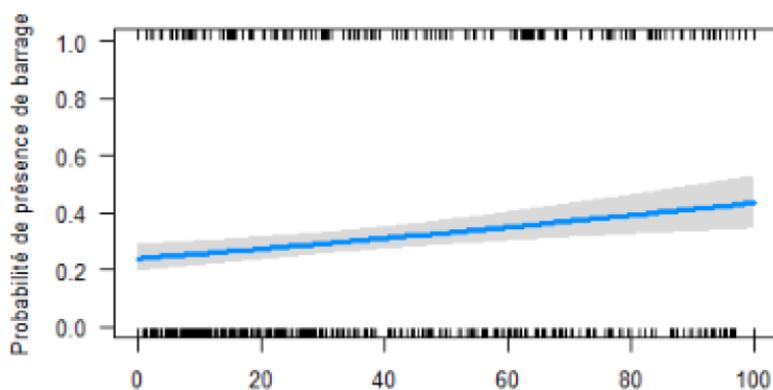


Fig 34. Courbe de corrélation entre forêt de feuillu et probabilité de présence de barrage de castor en France (Contant, 2023)

Il est aussi important de comprendre si le système pourra maintenir un apport de bois par lui-même sur le long terme, il est donc judicieux d'évaluer si il est probable qu'une source auto-entretenu de structures ligneuses puisse être restaurée (Castro et al., 2017). Les coûts d'entretien peuvent être réduits ou supprimés à long terme si des forêts riveraines sont plantées ou laissées en libre évolution, car l'apport naturel de bois permettra de maintenir ces aménagements (Moore & Rutherford, 2017). Il est judicieux par exemple de calculer un 'budget bois' ou 'bilan bois', c'est-à-dire un simple inventaire des apports, du stockage et des sorties au sein d'un tronçon de cours d'eau (Wohl, Scott, et al., 2019). De plus, si ces techniques visent à favoriser la présence du Castor, la présence d'une ripisylve est indispensable.

Dans une étude sur le bassin versant du Suran, le pourcentage de forêts de feuillus dans la zone tampon de 50 mètres de part et d'autre du cours d'eau est significativement corrélé à la présence de barrages de castors et les forêts de feuillus sont préférés à tous les autres milieux (Contant, 2023) (cf. figure 34). Les résultats du modèle anglais montrent que les barrages sont plus susceptibles de se former en présence d'une végétation riparienne ligneuse abondante (Graham et al., 2020).

4.1.10. Critères de présence potentielle du castor et son écologie

La présence possible ou confirmée de castors est avancée comme un argument supplémentaire en faveur de l'implantation des ouvrages de restauration LTPBP, dans la mesure où ces animaux pourraient, à l'avenir, contribuer à l'entretien des ouvrages existants, en créer de nouveaux, et ainsi participer durablement au bon fonctionnement de la restauration. Dans le cas où le castor n'est pas présent sur la zone, il est judicieux de voir s'il a été présent sur la zone dans un passé proche, ou si il est présent dans une zone proche de la zone de restauration (Castro et al., 2017). Pollock et al., (2014) ont suggéré d'utiliser des analogues de barrages de castors pour imiter, lorsque cela est possible, les barrages naturels construits par les castors, dans l'hypothèse que ces derniers seraient attirés pour entretenir et améliorer ces structures comme s'il s'agissait de leurs propres barrages.

Le castor préfère la disponibilité de plantes ligneuses feuillues appréciées, notamment les saules, les peupliers, les bouleaux, les aulnes et les érables (Baker & Hill, 2003; Wohl, Scott, et al., 2019). Une étude indique que la plupart des espèces ligneuses utilisées par le castor se trouvent à moins de 20 mètres du bord de l'eau (Barnes & Mallik, 2001).

Si le Castor d'Europe occupait initialement la quasi-totalité de l'Europe et de l'Asie, ses effectifs ont commencé à régresser à partir du XIIe siècle. Au début du XXe siècle, l'espèce avait quasiment disparu et le delta du Rhône faisait partie des dernières poches de population. En France, pour lutter contre la disparition de cette espèce emblématique, plusieurs opérations de réintroduction ont eu lieu à partir des années 50. Le Castor d'Europe a également obtenu le statut d'« espèce protégée » sur l'ensemble du territoire, en 1968. Son état de conservation est désormais en expansion depuis des bassins où l'espèce est présente (cf. Annexe 10 : Carte de présence du castor en France). La plupart du bassin RM&C aspire à la présence potentielle du castor sauf certaines zones particulièrement sur la partie sud du bassin comme les Pyrénées orientales et Languedoc.

4.1.11. Autres critères

La présence d'espèces menacées, ou le potentiel de colonisation d'espèces envahissantes sont des exemples de critères additionnels à prendre en compte lors de projets de restaurations. En France par

exemple, la cohabitation entre l'activité castor et l'écrevisse à pied blancs reste encore mal comprise. De plus, la coupe de végétation peut favoriser des espèces envahissantes, comme la renouée du Japon.

4.2. Cartographie des tronçons les plus favorables à la restauration

4.2.1. Introduction et objectifs

L'analyse cartographique est une démarche clé et de plus en plus communément utilisée pour appuyer la restauration des cours d'eau. Les techniques de restauration Low-Tech et basées sur les processus trouvent des contextes favorables qui sont abordés dans le chapitre précédent, et certains de ces critères sont cartographiables.

La caractérisation cartographique peut se faire à différentes échelles, depuis l'échelle d'un tronçon jusqu'à l'échelle d'un territoire ou d'un pays. L'objectif de l'Agence de l'eau est d'effectuer une première cartographie des tronçons soumis à une pression hydro-morphologique et favorables à ces techniques de restauration selon ces critères à l'échelle du bassin du Rhône et de la méditerranée et de la Corse pour avoir une première estimation du potentiel de restauration de techniques Low-Tech et basées sur les processus à l'échelle du bassin.

Objectifs :

1. Obtenir une première estimation du linéaire potentiel de restauration des cours d'eaux et masses d'eau dégradées ou soumises à pression sur le bassin RM&C
2. Identifier les secteurs cumulant le plus de critères favorables pour lesquelles ces techniques seraient particulièrement pertinentes
3. Développer une méthode très simple pour un premier niveau de filtrage et prioriser les secteurs dans lesquelles ces techniques ont un plus grand potentiel de restauration du bon état écologique sur le bassin RM&C
4. Donner des pistes de réflexion pour le développement d'une démarche cartographique pertinente en France

4.2.2. Matériel et méthode

L'analyse cartographique a été réalisée à l'aide du logiciel QGIS 3.34.7. Les couches et données exploitées proviennent de l'outil PHRYMO³⁷. Une approche descendante (« top-down ») a été adoptée, en sélectionnant et filtrant les données géospatiales pertinentes issues de PHRYMO selon des critères détaillés ci-après.

Présentation du dispositif PHRYMO

L'outil PHRYMO est un outil d'évaluation et d'observation des pressions exercées sur les milieux aquatiques, ainsi que de leurs conséquences potentielles sur l'environnement qui vise à actualiser, harmoniser et standardiser l'évaluation des pressions à l'échelle nationale, en intégrant les avancées scientifiques et l'amélioration continue des données. Il permet d'évaluer les gradients de pressions anthropiques et les risques d'altérations hydromorphologiques, conformément à la DCE, qui distingue trois éléments de qualité : hydrologie, morphologie et continuité (Grosprêtre & Kreutzenberger, 2024). Il offre un cadre méthodologique standardisé permettant d'analyser les interactions entre pressions,

³⁷ Plateforme Pressions et Risques d'impacts HYdroMORphologiques

fonctionnement et impacts hydromorphologiques, en intégrant les dimensions d'hydrologie, de morphologie et de continuité des cours d'eau.³⁸ Initialement conçu pour établir l'état des lieux des pressions affectant l'état écologique des cours d'eau français – information transmise tous les six ans à l'Union européenne – PHRYMO contribue également à l'élaboration des Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) et des Programmes de mesures (PDM) portés par les comités de bassin.

La géométrie du réseau PRHYMO est alignée sur celle des tronçons hydrographiques de la BD Topo version 3.0. Les réseaux Topo et Carthage constituent la base des réseaux TGH et USRA. PHRYMO constitue un socle pour la mise en œuvre de la DCE, mais il peut également être mobilisé pour alimenter divers programmes de recherche (Grosprêtre & Kreutzenberger, 2024). L'identification des pressions repose principalement sur l'exploitation de bases de données géographiques nationales. Les traitements géomatiques permettent également de prendre en compte les principaux contrôles naturels et, dans une moindre mesure, certains descripteurs d'état lorsque ceux-ci sont disponibles à grande échelle (Grosprêtre & Kreutzenberger, 2024).

Données d'entrée :

Sur chaque territoire, le réseau hydrographique est organisé selon trois échelles spatiales principales :

- **Tronçons géomorphologiquement homogènes (TGH)** : segments homogènes du point de vue des variables de contrôle hydromorphologique naturelles³⁹ (confluences majeures, taille du cours d'eau, type de fond de vallée). La plupart des TGH ont été définis et caractérisés par les dispositifs antérieurs tels que SYRAH-CE.
- **Unités spatiales de recueil et d'analyse (USRA)** : échelle de base pour le calcul des pressions et des probabilités d'altération. Chaque TGH est subdivisé en plusieurs USRA de longueur identique, déterminée en fonction de la longueur du TGH et de son rang de Strahler. En général, une USRA mesure environ 100 fois la largeur théorique à pleins bords du TGH et permettent ainsi d'améliorer à la fois la résolution spatiale et l'homogénéité des résultats par apport aux TGH, en terme de pressions qui seraient négligées à l'échelle du TGH.
- **Masses d'eau (ME)** : La division hydrographique en masses d'eau trouve son origine dans la Directive Cadre sur l'Eau qui a imposé aux États membres de l'Union européenne de découper leurs milieux aquatiques en unités homogènes pour évaluer et gérer la qualité de l'eau de manière cohérente à l'échelle européenne. Ces masses d'eau correspondent à des portions distinctes et significatives des milieux aquatiques, homogènes du point de vue écologique et des pressions anthropiques.

Le risque d'altération de chaque paramètre élémentaire est appréhendé selon des classes et selon une distribution de probabilité. L'échelle d'analyse est le grand bassin hydrographique, grand ensemble représentant l'entité du rapportage français au niveau européen, dans cette étude sont utilisées les données du bassin RM&C. Les couches hydrographiques suivantes ont été utilisées dans le cadre de cette étude :

- **Base de données USRA** : Cette base de données cartographique répertorie tous les tronçons de cours d'eau USRA pour lesquels elle renseigne des attributs de pressions divers.

³⁸ PHRYMO s'inscrit dans la continuité du SYRAH-CE (Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau), qui a longtemps constitué la référence nationale pour l'évaluation harmonisée des pressions hydromorphologiques et des risques d'altération des cours d'eau. Il est Développé par l'OFB en partenariat avec l'INRAE.

³⁹ Toutefois, il est à noter que si ces tronçons sont définis comme « géomorphologiquement homogènes » par PHRYMO ils ne le sont pas forcément en réalité. Ils sont plutôt « physiographiquement » homogènes puisqu'au sein de tels TGH il est possible de rencontrer des morphologies différentes

- **Base de données des tronçons USRA soumis à une pression morphologique** : Cette base de données identifie les tronçons USRA qui sont soumis à une pression hydro-morphologique significative, à l'origine d'un risque de non-atteinte du bon état écologique de la DCE⁴⁰.
- **Base de données des masses d'eau** : Référentiel géographique structurant le découpage des milieux aquatiques issue de la Directive Cadre Européenne (DCE) Elle intègre des données issues de référentiels hydrographiques nationaux (ex. Bd Carthage®) et des données scientifiques, administratives et techniques.
- **Base données Masses d'eau à risque** : recense et cartographie les masses d'eau (cours d'eau, plans d'eau, eaux souterraines, etc.) présentant un risque de ne pas atteindre les objectifs fixés par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), notamment le « bon état écologique et chimique » à horizon 2027. Cette base s'appuie sur les évaluations régulières de l'état des masses d'eau, réalisées tous les 6 ans dans le cadre des Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE). Elle intègre les données sur l'état écologique, chimique et quantitatif, ainsi que les pressions anthropiques identifiées (pollutions, prélèvements excessifs, altérations physiques, etc...)
- **Délimitations des zones hydrologiques** : correspond à un découpage du territoire en unités appelées zones hydrographiques, qui sont des subdivisions élémentaires du réseau hydrographique basées sur les limites des bassins versants topographiques.

Entre ces différentes couches, il existe des tables de correspondance d'identifiants permettant si nécessaires d'échanger des valeurs et attributs d'une couche vers une autre. Depuis les bases de données identifiant les différents tronçons USRA des cours d'eau, les données sont filtrées selon les attributs suivants disponibles dans le dispositif PHRYMO (Grosprêtre et al., 2024):

- **Taux de boisement à 10m** correspond à la largeur approximative d'un simple cordon rivulaire (un rideau d'arbres) et **Taux de boisement à 30m** de part et d'autre autour du cours d'eau, qui témoigne de la présence d'une ripisylve un peu plus large. Sont écartés les tronçons présentant des taux de boisement à 10m et à 30m classés faibles ou très faibles pour les raisons suivantes :
 - La présence d'une ripisylve est crucial pour pouvoir utiliser du matériel localement dans le cadre de ces techniques de restauration
 - Ces techniques de restauration sont plus favorables dans des contextes où un apport de bois pourra se faire naturellement dans le cours d'eau
 - La présence d'une ripisylve témoigne généralement d'un aménagement plus faible des berges du cours d'eau.
- **Taux d'aménagement** : Le Modèle PHRYMO calcule un taux d'aménagement du cours d'eau dans une bande de trois fois sa largeur (*cf. schémas figure 35*). Les contraintes latérales représentent toutes les structures et aménagements, implantés directement sur les berges ou aux abords immédiats du cours d'eau, susceptibles d'entraver le débordement des eaux en crue ou la divagation du lit. Le taux d'aménagements à proximité du lit mineur rend compte de la présence d'aménagements dans un rayon de 1,5 fois la largeur théorique à pleins bords autour de la polygone représentant l'axe du cours d'eau.

⁴⁰ Ce critère est la base pour évaluer la pertinence des restaurations et les prioriser dans le programme d'intervention, même s'il n'est pas exclusif. Il est à noter que l'évaluation est effectuée à l'échelle de la Masse d'eau et non des tronçons USRA.

Les aménagements considérés sont très nombreux et sont pour l'essentiel renseignés par la BD Topo de l'IGN⁴¹ : murs, quais, voies de communication (ex : routes, canaux, voies ferrées), plans d'eau artificiels (ex : gravières, bassins d'orage, bassins portuaire), autres équipements de transport (ex : aéroports, gares de triage, parkings), zones urbaines, terrains de sport, etc. Les

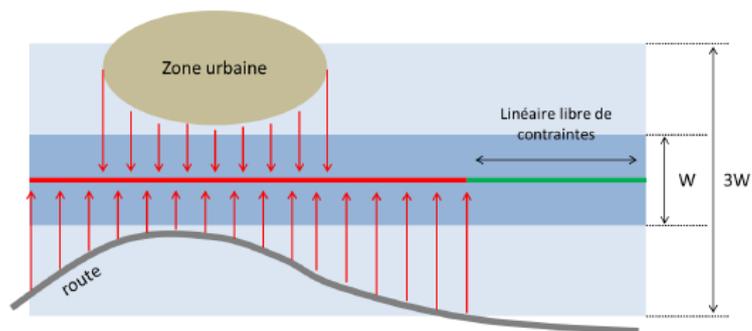


Figure 12. Principe de calcul du taux d'aménagements à proximité du lit mineur. Le taux est ici égal à 70% environ

digues sont prises en compte lorsqu'elles sont renseignées par une couche spécifique. Cet attribut est classé selon trois classes : faible moyen ou fort. Seuls les tronçons présentant une classe **faible** d'aménagement du cours d'eau sont conservés car ils sont jugés plus favorables à la connectivité latérale du cours d'eau.

Fig 35. Principe de calcul du taux d'aménagement dans le dispositif PHRYMO (Grosprêtre et al., 2024)

- **Taux d'agriculture intensive à proximité du lit mineur** : les petits cours d'eau ont souvent été recalibrés pour limiter les inondations et/ou favoriser le drainage (Dany, 2016). Le modèle PHRYMO intègre un paramètre de classement de la pression agricole sur le cours d'eau, celle-ci est très utile puisque l'agriculture fait partie des principales sources de pression sur la qualité morphologique et physico-chimique des cours d'eau. Les tronçons soumis à une forte pression agricole sont écartés car l'analyse des projets réalisés à l'agence de l'eau au cours des 30 dernières années montre que c'est un contexte très défavorable à la mise en place de projet de restauration alors même que les pratiques agricoles pourraient bénéficier de la restauration (observation interne Agence de l'eau).
- **Rang de strahler et Largeur du cours d'eau** : Ces techniques à faible technicité de mise en place rencontrent par nature un contexte favorable dans les petits cours d'eau pour plusieurs raisons :
 - D'abord parce les moyens techniques plus faibles permettent difficilement de travailler sur des cours d'eau trop importants
 - Parce que la profondeur des cours d'eau doit permettre aux techniciens de traverser allègrement le cours d'eau
 - Parce que le niveau de solidité des structures est limité, et donc qu'elles risquent de disparaître très rapidement si elles sont situées plus à l'aval de bassins versants qui drainent une hydrologie cumulée plus importante
- Dans le cadre de cette étude, les cours d'eau d'une **largeur supérieur à 8m** et les cours d'eau classés avec un **rang de Strahler strictement supérieur à 4** sont écartés.
- **Taux d'encaissement et Largeur de fond de vallée** : Le dispositif PHRYMO intègre un calcul d'encaissement des tronçons à l'échelle des tronçons Geomorphologiquement homogènes (TGH). Ces valeurs sont récupérées à l'échelle des tronçons USRA grâce à une table de correspondance entre ces deux couches qui permet d'effectuer une jointure de table

⁴¹ <https://geoservices.ign.fr/bdtopo>

attributaires. Ce taux correspond au résultat du calcul de la largeur du fond de vallée sur la largeur du cours d'eau à plein bords. Pour retenir les tronçons favorables aux LTPBR, sont retenus les tronçons ayant un fond de vallée d'au moins 30m de largeur et un rapport d'encaissement >10. Cela est dû à l'importance accordée à la connectivité latérale et à l'ouverture de chenaux secondaires dans le cadre de ces techniques de restauration, visant idéalement à laisser un espace de mobilité pour favoriser les processus du cours d'eau (Adam et al., 2007) et favoriser des objectifs de réhumidification du fond de vallée, d'avulsion et de connectivité latérale. Cela permet aussi d'écarter les tronçons dans des secteurs de gorges.

Couche de zones hydrologiques :

- **Données administratives et hydrographiques :**

Pour permettre une visualisation plus claire des cartes générées dans le cadre de cette analyse, des repères sont ajoutés, telles que les villes de plus de 100 000 Habitants, les chefs-lieux de chaque département ou les délimitations administratives du bassins RM&C.⁴²

Le bassin RM&C est divisé en 4 délégations, une couche de délimitation des délégations est utilisée afin d'interpréter les résultats à l'échelle des délégations (données internes à l'AERMC).

- **Pente**

Le dispositif PHRYMO intègre des classes de pente dont les seuils sont situés à 0.5%,1.5% et 6%. Ceux-ci ne semblaient pas pertinents dans le cadre de cette analyse, un calcul de pente est effectué grâce aux valeurs de hauteur amont, hauteur aval et longueur du tronçon disponibles à l'échelle des tronçons USRA (cf. formule figure 36). Un seuil de 3% a été fixé, valeur cohérente avec l'étude bibliographique (cf. Critère de pente du chenal).

$$Pente = \frac{z \text{ amont} - z \text{ aval}}{\text{Longueur}}$$

Fig 36. Formule de calcul de la pente

Etapas d'analyse :

1. **Rassembler les attributs dans une couche** : La première étape a été d'ajouter tous les attributs nécessaires à cette étude à la couche USRA soumise à pressions morphologiques, certains attributs ont été ajoutés depuis la couche USRA de base grâce à une jointure de table attributaire sur l'identifiant de l'USRA. D'autres attributs importants n'étaient pas présents dans la couche USRA de base, les données sont récupérées depuis la couche Tronçon géomorphologiquement homogènes (TGH) grâce à une table de correspondance entre TGH et USRA.
2. **Filtrer la couche des cours d'eau selon les valeurs des attributs** : Pour chacun des types d'attributs, la couche USRA soumise à pressions morphologiques est filtrée séparément grâce à l'outil 'filtrer par expression' de QGIS. L'effet du filtre de critères sur la cartographie est ainsi observable visuellement. Pour chaque catégorie d'attribut, l'outil 'statistique basique' sur le champ longueur de la couche filtrée est utilisé. Ceci permet d'extraire les indicateurs suivants :
 - o Le nombre de tronçons restant après application du filtre
 - o Le nombre de kilomètres linéaires cumulés que représentent ces tronçons
 - o Le pourcentage du linéaire total et le pourcentage du linéaire soumis à pression morphologique qu'il représente

⁴² Données publiques issues de l'INSEE et de l'IGN

3. **Calcul du potentiel de restauration des masses d'eau à risque** : Grâce à la table de correspondance entre les identifiants des masses d'eau et les identifiants USRA, toutes les masses d'eau à risque comprenant au moins un tronçon favorable aux techniques de restaurations LTBP sont identifiées. Cela permet de calculer les indicateurs suivants :
 - Nombre de Masses d'Eau comprenant au moins un tronçon favorable aux restaurations LTBP
 - Linéaire de ME comprenant au moins un tronçon favorable aux RLTPB
 - Pourcentage du linéaire de ME comprenant au moins un tronçon favorable aux RLTPB
4. **Calcul par délégation** : L'agence de l'eau RM&C étant divisée en 4 délégations (Besançon, Lyon, Marseille, Montpellier), le nombre de tronçons et le nombre de kilomètres linéaires favorables à ces techniques dans chaque délégation sont calculés.
5. **Représentation des résultats selon les secteurs hydrographiques et calcul des secteur hydrographiques avec le meilleur potentiel de restauration.** Afin de mieux visualiser les résultats cartographiques, une représentation est réalisée selon les zones hydrographiques possédant au moins un tronçon favorable aux LTBP.
6. **Contrôle des résultats cartographiques avec les projets existants ou en cours sur le bassin RM&C** : la présence ou absence de tronçons ayant fait l'effet de techniques de restaurations de ce type ou étant en projet sur le bassin RM&C sont étudiés sur les résultats cartographiques. Cette comparaison permet ainsi d'interpréter les résultats cartographiques de manière plus approfondie et détecter d'éventuelles incohérences entre cartographie et réalité terrain. Les projets considérés ont été les suivants :
 - Lierne et Véore (26) : Cours d'eau ayant fait l'objets d'un programme de restauration LTBP. Voir la fiche de présentation du projet située en *Annexe 11* : Fiche de présentation du Projet Lierne Véore.
 - La Brévenne (69) : Un programme de réintroduction de bois est en cours sur ce cours d'eau fortement dégradé afin de restaurer des fonctions hydromorphologiques.⁴³
 - La Clauge (25,39) : Cours d'eau sur lequel a été réalisée une restauration utilisant des techniques douces intégrant des épis de bois.⁴⁴
 - Le Sou (11) : cours d'eau géré par le SMMAR où un programme de restauration Low-Tech a été organisé en 2025 en collaboration avec l'ARRA² et Swift Water Design.⁴⁵
 - Le Ruisseau des planches (69) : projet porté par la métropole de Lyon⁴⁶ (information issue des entretiens).

⁴³https://www.le-pays.fr/arbresle-69210/actualites/a-l-arbresle-le-syndicat-de-rivieres-teste-l-approche-low-tech-pour-redonner-vie-a-la-brevenne_14656841/

⁴⁴<https://www.youtube.com/watch?v=H6Nj7gQACMw>

⁴⁵<https://www.lindependant.fr/2025/04/27/dans-laude-des-californiens-initient-le-monde-du-milieu-aquatique-aux-vertus-des-barrages-de-type-castor-pour-regenerer-les-rivieres-12655467.php>

⁴⁶ La Rize (69)⁴⁶ a aussi fait l'objet d'intégration de techniques LTBP mais n'a pas été considéré dans cette étude car ses objectifs de restauration hydromorphologique sont fortement limités par son contexte urbain et sa faible énergie (informations issues des entretiens).

- Le Chalon et la Savasse (26) : cours d'eau ayant fait l'objet de techniques de restaurations LTBP, coordonnées par Valence-Romans Agglo (notamment lors de formations menées avec l'ARRA² et Swift Water Design en 2025).

4.2.3. Résultats

La carte en *Annexe 6* : Cartographie des cours du bassin RMC selon la base USRA représente la carte des cours d'eau du bassin RM&C selon la couche USRA. Elle comprend 129 676 tronçons et 55 398km linéaires de cours d'eau.

Sur la carte présentée en *Annexe 7* : Cartographie des cours d'eau soumis à une pression morphologique représente le linéaire de cours d'eau du bassin RM&C soumis à une pression hydro-morphologique significative, à l'origine d'un risque de non-atteinte du bon état écologique. La comparaison de cette carte avec celle de l'*Annexe 6* : Cartographie des cours du bassin RMC selon la base USRA qui représente l'ensemble des cours d'eau, montre que les chevelus de têtes de bassin sont généralement moins considérés comme soumis à des pressions morphologiques. Plusieurs régions sont identifiables comme ayant des cours d'eau peu soumis à pression morphologique :

- La Corse
- Les Alpes et Préalpes (Vercors, baronnies, jura...)
- Ardèche et Cévennes

Les résultats chiffrés sur les nombres de tronçons USRA et le nombre de kilomètres linéaires cumulés après application de chaque filtre sont présentés dans le tableau situé en *Annexe 5* : Résultats chiffrés de l'analyse cartographique. La couche des cours d'eau soumis à une pression morphologique représente 40% du linéaire USRA total du bassin versant RM&C. Depuis ce linéaire soumis à pression, les différents filtres appliqués viennent réduire le linéaire et le nombre de tronçons favorables prioritaires, ce qui permet certains constats :

- L'application du filtre sur la présence agricole très forte au tour du cours d'eau ne filtre que 3% du linéaire soumis à pression morphologique.
- Le filtre sur le taux d'aménagement du cours d'eau (seule la classe faible est retenue) écarte 42% du linéaire de cours d'eau. Ce qui signifie que seul 58% des cours d'eau soumis à pression morphologiques ont un faible taux d'aménagement.
- Le filtre sur la pente du chenal inférieure à 3% filtre 14% du linéaire soumis à pression morphologique.
- Les filtres sur la présence de végétation rivulaire dans la bande à 10m et à 30m filtrent 44% du linéaire soumis à pression morphologique.

Lorsque tous ces filtres sont cumulés, il reste 13% du linéaire soumis à pression morphologique ce qui représente 5% du linéaire total pouvant être considéré comme ayant des critères particulièrement favorables à ces techniques pour rétablir le bon état écologique. Cela représente 2 811km linéaires divisés en 6656 tronçons, présenté sur la carte en *Annexe 8* : *Cartographie des tronçons favorables aux techniques* .

Sur la carte présentée en *Annexe 9* : Cartographie des sous-secteurs comprenant des tronçons favorables aux techniques de restauration Low-Techs et basées sur les processus, les zones hydrologiques présentant des tronçons favorables selon les critères définis sont représentées. Comme il apparait sur cette carte, l'arc alpin et la Corse sont jugés plutôt défavorables par les critères cartographiques imposés, ce qui n'est pas surprenant étant donné qu'ils sont considérés comme peu

soumis à pression morphologique et que les critères de pente inférieure à 3%, ainsi que les critères d'encaissement et de végétation potentiellement défavorables aux zones montagneuses et torrentueuses. Il en va de même pour les zones très vallonnées comme les monts d'Ardèche, les Pyrénées ou les baronnies provençales. D'autres zones ont montré une densité de tronçons particulièrement favorable, c'est le cas notamment :

- De l'arrière-pays toulonnais et la Provence autour d'Aix en Provence
- Des territoires Haut Languedoc et grands-causses,
- Des territoires nord Drôme, nord Ardèche, et l'ouest de l'Isère
- Tout le nord est du bassin (Ain, Jura, Doubs, Haute Saône)

L'Analyse par délégation a donné les résultats présentés dans le tableau ci-contre (cf. figure 37). Les résultats révèlent que la délégation de Besançon semble offrir un contexte favorable à la restauration du bon état des cours d'eau par les techniques de restauration LTBP avec 917 km de cours d'eau soumis à pression morphologique offrant un contexte favorable aux techniques de restauration LTBP. La délégation de Montpellier semble offrir une potentialité moins importante même si 476 km soumis à pression morphologique sont considérés favorables aux techniques de restauration LTBP.

USRA favorables à la restauration du bon état écologique par les techniques LTBP Par Délégation de l'AERMC			
Délégation	Nb de tronçons	km linéaire	% du linéaire
Besançon	2386	917	33%
Lyon	1778	768	27%
Marseille	1399	642	23%
Montpellier	1066	476	17%
Total	6629	2803	100%

Fig 37. Indicateurs du potentiel de restauration du bon état écologique par délégation du bassin RM&C

L'analyse sur les masses d'eau a montré les résultats présentés dans la table ci-dessous (cf. figure 38). Les masses d'eau à risque représentent 44% du linéaire total des masses d'eau, et 54% de ces masses d'eau à risque contiennent au moins un tronçon favorable aux techniques LTBP.

Couche utilisée		Critère appliqué	Nombre de tronçons	Nombre de km linéaire	Pourcentage du linéaire total	Pourcentage du linéaire soumis à risque
ME	Total	Total (aucun critère)	2821	42563,75	100%	NA
	a risque	Total (aucun critère)	1133	18775,41	44%	100%
	a risque et comprenant au moins un tronçon favorables aux LTPBR			580	10162,52	24%

Fig 38. Tableau des résultats du potentiel de restauration des techniques LTBP sur les masses d'eau à risque

Lors de la comparaison cartographique avec des projets Low-Tech connus sur le bassin :

- Les tronçons de La Lierne (affluent de la Véore) ayant été restaurés par Valence/Romans n'apparaissant pas sur les résultats cartographiques car ils ne font pas partie des cours d'eau considérés comme soumis à une pression morphologique à l'origine d'un risque de non atteinte du bon état et ne sont donc pas jugés prioritaires pour être restaurés afin d'atteindre ou de maintenir le bon état écologique de la DCE.
- La Véore apparaît bien sur les résultats cartographiques comme soumis à pression morphologique significative et favorable aux techniques LTBP.
- Plusieurs tronçons de la Brévenne apparaissent dans les résultats cartographiques comme favorables aux techniques LTBP.
- Le Sou apparaît bien sur le résultat cartographique final, sur la quasi-totalité de son linéaire ce qui signifie qu'il est considéré comme soumis à une pression morphologique et qu'il remplit les critères d'opportunité de restauration LTBP.
- La Clauge apparaît bien comme cours d'eau favorable dans les résultats de l'analyse cartographique, sur quasiment la totalité de son linéaire.

- Le Ruisseau des planches apparait bien sur les résultats cartographiques.
- La Savasse apparait bien sur les résultats cartographiques sur une bonne partie de son linéaire incluant les tronçons amont ayant fait l'objet de techniques LTBP.
- Le Chalon n'apparait pas comme soumis à pression morphologique à l'origine d'un risque de non atteinte du bon état, et de fait n'apparait pas dans la couche cartographique utilisée comme base de cette analyse. Il a une pression de niveau moyen selon l'état des lieux du bassin Rhône Méditerranée de 2025.

4.2.4. Discussion et perspectives sur la cartographie

La cartographie et la géomatique reposent toujours sur une représentation simplifiée du monde réel, dont la complexité ne peut être reproduite avec une précision absolue. Par ailleurs, lorsque l'analyse s'effectue à grande ou très grande échelle, la précision s'en trouve d'autant plus limitée, ce qui est le cas dans cette étude. Les couches cartographiques utilisées dans cette analyse ne reflètent pas pleinement la réalité, car elles ne prennent en compte que les cours d'eau de taille significative, laissant de côté une grande partie du chevelu des têtes de bassins. La représentation hydrographique se limite souvent aux cours d'eau pérennes ou d'une certaine importance, tandis que les drains agricoles et les très petits fossés peuvent être absents ou simplifiés. Or, les techniques de restauration Low-Tech sont particulièrement adaptées à ces petits cours d'eau et aux chevelus de tête de bassin. Elles peuvent ainsi être mises en œuvre sur un réseau hydrographique secondaire, rarement représenté dans les cartographies existantes.⁴⁷

Autre limite, l'évaluation des pressions morphologiques dans l'état des lieux s'effectue à l'échelle des masses d'eau, ce qui limite fortement sa précision à l'échelle des tronçons USRA des têtes de bassin. Ainsi, de nombreux tronçons restent soumis à pression morphologique à l'échelle du tronçon sans être pour autant identifiés à l'échelle de la masse d'eau comme nécessitant une intervention pour atteindre le bon état écologique. Par exemple, certains petits cours d'eau en têtes de bassin ne sont pas considérés comme sujets à une pression morphologique alors qu'ils ont fait l'objet d'un de dégradations (appauvrissement en boisements rivulaires et d'autres altérations de leur dynamique sédimentaire, entraînant une dégradation de leur morphologie et une perte de leur connectivité latérale. Restaurer leurs fonctionnalités écologiques d'origine demeure néanmoins possible et souhaitable. L'exemple de la Lierne, ainsi que du Chalon dans la Drôme illustrent ce constat : ces cours d'eau ont bénéficié de programmes de restauration Low-Tech (cf. *Annexe 11* : Fiche de présentation du Projet Lierne Véore) à la suite de dégradations hydromorphologiques importantes, bien qu'ils ne soient pas classés comme exposés à une pression morphologique selon le référentiel PHRYMO.

L'objectif de méthode cartographique limite les résultats recherchés, puisqu'il vise spécifiquement à comprendre comment ces méthodes pourraient viser à restaurer un 'bon état' écologique des cours d'eau selon les critères d'état écologique de la DCE. La définition du bon état est discutable puisqu'elle dépend de la référence utilisée, et cette référence évolue.⁴⁸ Les cours d'eau considérés en bon ou très bon état morphologiquement par l'évaluation des masses d'eau ne sont souvent pas exempts de dégradations diverses et correspondent rarement au modèle du cours d'eau naturel, abondant en structures de bois, multi-chenal et très connecté à son fond de vallée avec une zone humide alluviale riche (Cluer & Thorne, 2014). Ces techniques pourraient donc améliorer la qualité de nombreux cours d'eaux sans que cet objectif soit corrélé au passage vers le bon état hydromorphologique des masses

⁴⁷ L'une des limites à la cartographie plus précise des petits cours d'eau de tête de bassin est le manque de résolution des modèles numériques de terrains (MNT) à l'échelle nationale

⁴⁸ Comme décrit par le concept de « *shifting baseline syndrome* »⁴⁸ (Soga & Gaston, 2018)

d'eau du point de vue de la DCE. De façon générale, on peut supposer que de nombreux tronçons de tête de bassin ayant subi des dégradations morphologiques échappent à la détection des pressions morphologiques et sont considérés à tort comme « naturels », ou en bon état, alors que la simplification de leur habitat les affecte notablement. L'application des techniques LTBP concerne donc un linéaire plus étendu que celui pris en compte dans cette analyse.

Les données hydrologiques semblent particulièrement pertinentes dans plusieurs modèles pour quantifier les seuils de puissances (utilisation de la crue de retour deux ans et du débit dépassé 80% du temps durant le mois le plus soumis à l'étiage dans le BRAT (W. W. Macfarlane et al., 2017). Ces données hydrologiques sont importantes pour la construction des barrages et la survie d'une population de castors mais ne sont pas intégrées dans cette étude par manque de temps. Pourtant, des moyens existent pour les intégrer (George, 2024). L'INRAE a notamment produit un travail régionalisation de données de quantiles de débits (Organde et al., 2013) même si des adaptations seraient nécessaires pourraient être nécessaires (George, 2024). La surface de bassin versant drainé est aussi un indicateur pertinent (W. W. Macfarlane et al., 2017) qui n'a pas été utilisé car non disponible dans les données cartographiques du dispositif, il pourrait être calculé depuis des données géographiques existantes.

La disponibilité foncière est sans doute le critère le plus déterminant pour mettre en place un projet de restauration ambitieux sur la régénération des processus, pourtant elle n'a pas été intégrée dans cette étude. Il serait pertinent, par exemple, d'estimer le nombre de propriétaires riverains différents par tronçon, ce qui donnerait une indication précieuse sur la complexité de la stratégie foncière à déployer. Des informations sur les prix de vente des terrains constitueraient également des indicateurs utiles. En France, il n'existe pas à l'échelle nationale de jeux de données géographiques permettant de connaître la propriété foncière, ni de bases de données permettant d'identifier le nombre de propriétaires, alors que ces données sont essentielles à l'élaboration de plans de gestion, de restauration ou de conservation. Cela dit, certains registres ou bases recensent, avec coordonnées spatiales, le nombre de parcelles ainsi que leurs prix de vente, ce qui pourrait, en théorie, permettre la constitution de jeux de données exploitables (George, 2024).

Concernant les données relatives à l'occupation par le castor, il serait pertinent de les intégrer dans un modèle cartographique afin d'utiliser la proximité de cet animal comme un facteur favorable à des restaurations de type Low-Tech. Ces techniques pourraient ainsi encourager le retour du castor, dont l'activité contribuerait à maintenir la restauration du cours d'eau de manière autonome, avec peu ou pas d'intervention humaine. Cette piste n'a cependant pas été explorée dans le cadre de cette analyse, Il pourrait être possible de le faire en utilisant des données cartographiques issues du réseau castor de l'OFB.⁴⁹

Concernant le calcul du paramètre « Taux d'aménagement », celui-ci utilise une largeur à 3 fois la largeur théorique à pleins bords autour de la polyligne représentant l'axe du cours d'eau. Cette valeur peut être très faible comparée à la largeur réelle du fond de vallée ou de la plaine inondable, et ne fournit aucune information sur l'aménagement d'une zone plus étendue. Un paramètre calculant le taux d'aménagement dans une bande de largeur équivalente à 10 fois la largeur du cours d'eau serait idéal pour envisager une restauration ambitieuse des processus (Adam et al., 2007) ainsi que pour assurer la connectivité avec le fond de vallée.

⁴⁹ <https://professionnels.ofb.fr/fr/reseau-castor>

Aussi, tous les modèles cartographiques existants se concentrent sur les critères de propension du castor à fabriquer des barrages, il convient donc de se poser la question si les critères de propension du castor à faire du barrage doivent être les mêmes que les critères de viabilité de techniques de restauration LTBP. Cette question reste irrésolue pour l'instant. Si la philosophie derrière ces techniques prône le biomimétisme (Morizot, 2024; J. M. Wheaton et al., 2019), cette approche paraît cohérente mais il peut s'envisager des contextes dans lesquels ces critères pourraient diverger. De plus, les ouvrages de type castor ne sont pas les seules structures utilisées, de nombreux amas de bois visent à imiter les accumulations naturelles de bois et ne sont pas intégrés dans ces modèles.

Ensuite, il est difficile d'estimer la pertinence des valeurs utilisées pour les seuils puisqu'elles n'ont pas été calibrées avec des données empiriques ou observations venant du terrain. Même si les valeurs et paramètres utilisés se sont basés sur des sources bibliographiques et des entretiens avec des experts, les valeurs divergent fortement selon les sources et ne sont pas adaptées au contexte spécifique du bassin RM&C. Il conviendra donc, dans une analyse approfondie, de calibrer les valeurs utilisées grâce à des observations de terrain et d'identifier les incohérences de la méthode employée et des filtres utilisés. La présence de barrages de castors sur des secteurs à forte pente est par exemple documenté, et la pente minimale fixée à 0.1% n'est basée sur l'estimation que d'un seul expert (entretien avec BE4).

Malgré ces limites, la comparaison des résultats avec les projets de type LTBP réalisés ou en cours sur le bassin RM&C s'avère très encourageante. En effet, sur les huit cours d'eau recensés dans le cadre de cette étude, six apparaissent dans les résultats cartographiques. Ces derniers indiquent que 13 % du linéaire soumis à une pression morphologique (soit 5 % du linéaire total) présentent des conditions favorables à une restauration par ces techniques, ce qui représente environ 2 810 km de cours d'eau sur le bassin RM&C. Par ailleurs, 54 % des masses d'eau à risque morphologique incluent au moins un tronçon de cours d'eau jugé favorable à ce type de restauration. De véritables opportunités existent donc pour que ces techniques soient un outil supplémentaire pertinent et participent à l'effort de restauration sur le bassin RM&C.

Des données quantitatives plus précises, ainsi qu'une meilleure gestion des attentes, sont nécessaires de toute urgence pour aider les scientifiques et les gestionnaires à mettre en évidence les types d'environnements où la construction de barrages par le castor peut constituer un outil de restauration pertinent (W. W. Macfarlane et al., 2017). Dans le contexte français, il conviendra de développer un modèle cartographique cohérent et calibré sur des observations empiriques (Moravek et al., 2025). Ce modèle pourra être une adaptation de modèles existant tel que le BRAT (modèle open-source) au contexte français (George, 2024) comme a été réalisé au Royaume-Uni (Graham et al., 2020) ou pourra être un modèle cartographique complètement nouveau.

5. Discussion

Cette étude a mis en évidence les avantages apportés par le bois en rivière, ainsi que le fait que son absence constitue une source majeure de dégradation des cours d'eau. Elle est notamment bénéfique pour la biodiversité benthique, les habitats piscicoles, la qualité écologique et les processus fluviaux des milieux aquatiques. Cela souligne l'urgence de réintroduire du bois dans ces milieux par des approches de gestion et de restauration des cours d'eau et de leur ripisylve. Les entretiens réalisés dans cette étude ont montré que la tendance des gestionnaires, des bureaux d'études et des organismes de pêche semblait évoluer positivement vers la réintégration de bois dans les cours d'eau, même si les

décisionnaires et riverains ne sont pas encore suffisamment sensibilisés à ces enjeux. Sa perception doit changer pour passer d'un "corps étranger" et dangereux à celle d'un agent naturel, très disponible et bénéfique à la restauration environnementale (Quiniou & Piton, 2022). Jusqu'à récemment, l'introduction de bois mort était peu fréquente dans les projets français alors qu'elle est commune en Allemagne (Morandi & Piégay, 2017). Une étude a montré que les systèmes fluviaux au Canada et au Chili, ainsi qu'aux États-Unis et en Nouvelle-Zélande, contiennent significativement plus de bois que les systèmes fluviaux européens, ce qui est potentiellement lié à leur caractère plus naturel (Ruiz-Villanueva et al., 2016). Le projet GeniBois⁵⁰, mené en partenariat entre INRAE et l'OFB, lance une enquête nationale pour recenser les ouvrages de protection ou de restauration des cours d'eau qui utilisent le bois mort comme élément principal et ses résultats devraient permettre d'en savoir plus sur le sujet. L'évaluation des dangers et des risques liés à la présence de bois dans les cours d'eau est cruciale pour la planification, mais elle doit être menée de manière équilibrée afin de préserver ou restaurer un bon état écologique des rivières (Ruiz-Villanueva et al., 2016). Une cartographie des secteurs à risque ou ouvrages d'art sous-dimensionnés serait très utile pour guider les gestionnaires.

Les barrages de castors sont aussi des composants naturels d'une partie importante des paysages fluviaux, même si leur densité naturelle et historique en Europe est encore mal comprise, et que certains points de vigilance doivent être pris en compte dans leur cohabitation avec les activités humaines. La raréfaction des barrages de castors dans les paysages fluviaux est une altération courante affectant la santé des milieux aquatiques (A. G. Brown et al., 2018b; J. M. Wheaton et al., 2019; Wohl, Scott, et al., 2019). Dans les entretiens, les gestionnaires et bureaux d'études ont semblé plutôt favorables à leur présence alors que le monde de la pêche a semblé particulièrement méfiant au regard des impacts potentiels des barrages artificiels ou naturels de castors. Il n'y a d'une manière générale pas de consensus dans la littérature scientifique sur les bénéfices et risques des activités de castors sur les populations piscicoles, les effets dépendront fortement du contexte et un manque évident de recherche menée sur le territoire européen est constaté (Kemp et al., 2012). Toutefois, la littérature abonde d'exemples dans lesquels cette activité a favorisé les populations piscicoles, incluant celles de salmonidés (Kemp et al., 2010; Needham, 2024), potentiel qui ne semble encore pas perçu par le monde de la pêche en France (observation issue des entretiens menés). La recherche sur le sujet en France est encore inexistante et les retours d'expérience à venir permettront de mieux connaître ce sujet. Les barrages de castors naturels et les imitations apportent en tout cas des potentialités importantes en termes de bénéfices pour la biodiversité (macro-invertébrés, avifaune, amphibiens, reptiles...) et de résilience des paysages fluviaux face aux événements extrêmes, sécheresses incendies et crues. La littérature scientifique et les entretiens ont montré un consensus sur la capacité de ces techniques à retenir l'eau, notamment dans les sols, ce qui est un atout majeur pour retenir l'eau sur nos territoires dans un contexte croissant de tensions autour de la ressource.

Ces techniques apportent aussi en France une discussion autour de la continuité écologique. Le milieu de la restauration a passé les dernières décennies à lutter pour effacer des discontinuités anthropiques historiques ayant eu un effet dévastateur sur les cours d'eau et le fait d'intégrer des structures transversales dans les cours d'eau semble fortement polariser le monde de la gestion des milieux de ce point de vue. Pourtant, les structures transversales en bois (de type castor ou accumulation de bois) sont loin d'être assimilables à des seuils de génie civil en cela qu'elles ne sont pas totalement imperméables, qu'elles ne sont pas pérennes à l'échelle d'une vie humaine, qu'elles semblent franchissables par les populations piscicoles à minima en période de hautes eaux ou de crue et qu'elles ne bloquent pas complètement le flux sédimentaire du cours d'eau. Des points de vigilance doivent

⁵⁰ <https://www.araa.org/enquete-sur-l-utilisation-du-bois-mort-pour-la-restauration-des-cours-d-eau-participez-au-projet>

être maintenus lors des projets de restauration impliquant ce type de structures, notamment en ce qui concerne la mobilité des poissons en période d'étiage et l'accès aux zones de frayères. Cependant, les sources bibliographiques indiquent que certaines discontinuités peuvent exister naturellement et de manière dynamique dans un cours d'eau (Burchsted et al., 2010) et que les structures de type barrages de castors occupent une place importante dans les paysages fluviaux. Cela soulève une question essentielle : est-il réellement nécessaire d'assurer une continuité longitudinale permanente en toute saison et sur l'ensemble du linéaire fluvial ? Pouvons-nous envisager l'acceptation de certaines discontinuités saisonnières et structures semi-perméables, dès lors qu'elles soutiennent des processus écologiques majeurs tels que la diversification des habitats ? Il conviendra d'évaluer au cas par cas les bénéfices et les risques liés à la réintégration de structures transversales.

Ces techniques viennent aussi questionner les objectifs à atteindre dans la restauration des cours d'eau. Les programmes de restaurations basés sur les processus sont déjà pratiqués en France (Adam et al., 2007) mais les entretiens ont indiqués qu'ils sont loin d'être la norme dans le secteur de la restauration, et que beaucoup trop de programmes de restauration figent encore trop le cours d'eau plutôt que de privilégier sa dynamique naturelle, même lorsqu'un espace de bon fonctionnement est disponible. La connectivité latérale du cours d'eau est un objectif de restauration commun des programmes de restauration (Dany, 2016), toutefois les techniques de restaurations LTBP vont plus loin dans cette ambition en cherchant parfois ouvertement la remise en eau d'une partie importante du fond de vallée, à créer des chenaux secondaires, un profil en anastomose, de l'avulsion, et la création de zones humides alluviales. La littérature semble indiquer que ces caractéristiques étaient communes dans les cours d'eau d'Europe continentale avant les modifications humaines (Cluer & Thorne, 2014) alors que ces objectifs restent rares dans les projets français. L'analyse des entretiens a montré que ce concept est encore mal connu en France et beaucoup de scepticisme a été observé quant à cette hypothèse ou à ces objectifs de restauration. L'espace disponible dans les fonds de vallée français pour parvenir à des restaurations de ce type pose aussi question. Au Royaume-Uni, de nombreux projets de ce type ont vu le jour dans les dernières années. Il serait intéressant d'en apprendre plus sur ces programmes et de s'en inspirer pour étudier leur adaptation sur le territoire français et RM&C.

Un autre point de désaccord noté pendant cette investigation est celui de la capacité de ces techniques à favoriser des processus d'aggradation dans le contexte d'un cours d'eau incisé. Alors que cet objectif semble central dans son application aux Etats-Unis (M. M. Pollock et al., 2007a, 2014), ce point est loin de faire l'unanimité dans le contexte français. Étant donné la diversité naturelle des paysages fluviaux, il est essentiel d'effectuer un diagnostic hydromorphologique robuste, d'identifier des conditions de référence et des objectifs de restauration appropriés afin de garantir que les actions de restauration soient cohérentes avec le contexte local (J. M. Wheaton et al., 2019). La présence suffisante de charge sédimentaire grossière, provenant de l'amont ou de la plaine alluviale sera indispensable au succès dans l'aggradation du cours d'eau. De plus, ces techniques s'inscrivent dans une temporalité de restauration différente, les modules peuvent être construits par étapes et les effets de recrutement sédimentaire et d'aggradation peuvent être attendus sur des années voire des décennies, au fil des crues morphogènes. De plus, ces techniques pourront impliquer des linéaires plus importants à travailler à une échelle plus importante que celle du tronçon, qui limite le succès des projets de restaurations actuels. Sur un cours d'eau à faible puissance, faible transport solide et faible érodabilité des berges et sans un minimum d'espace nécessaire, il est peu probable que l'utilisation de techniques Low-Tech pour la restauration soit pertinente pour régénérer des processus fluviaux et l'utilisation de machines sera alors plus adaptée pour atteindre un minimum de résultats positifs. Toutefois, dans le cas d'un cours d'eau peu puissant, il est envisageable de restaurer une zone humide grâce à ces techniques. A l'inverse, un cours d'eau puissant, à berges érodables et encore abondamment fourni en

charge alluviale ne nécessitera que peu de travaux pour que les résultats soient rapidement positifs (Adam et al., 2007) et ces techniques de restauration seront particulièrement efficaces pour catalyser le processus d'auto-restauration du système.

L'étude cartographique a montré que ces techniques pourront être un outil supplémentaire aux programmes de restauration et participer activement à l'objectif d'atteint du bon état écologique des masses d'eau de la DCE. A ce titre, la région de Bourgogne Franche-Comté offre un territoire avec un contexte favorable à la restauration du bon état des masses d'eau, ce qui avait été perçu par un expert lors d'un des entretiens. Toutefois l'approche à large échelle utilisée dans cette étude nécessite d'être complétée avec des approches plus localisées pour approfondir l'analyse. Des critères de pertinence ont été dessinés pendant cette investigation. Ces techniques sont particulièrement favorables sur les cours d'eau de rang faible, ayant subi des dégradation et modifications intermédiaires telles que remodelations, rectification, canalisation, dégradations des ripisilves et de l'apport en bois, absence de castors, présence historique de seuils artificiels etc... parfois liées à un contexte agricole et ayant eu pour conséquence l'enfoncement du chenal dans son lit et la perte de connectivité avec sa plaine inondable. Des systèmes ayant une puissance suffisante pour réactiver des processus sur des pas de temps raisonnables sont favorables, même si un seuil de puissance existe à partir duquel ces techniques ne seront plus pertinentes. La restauration de zone humide alluviales sera aussi particulièrement pertinente, même lorsque le cours d'eau ne présente pas de dégradation majeure. Ces critères nécessiteront aussi des approches locales et empiriques pour être approfondis.

Si certaines structures cherchent à éviter l'utilisation de machines par engagement et volonté philosophique, d'autres pourront utiliser des moyens techniques plus importants de manière complémentaire lorsque jugé nécessaire tout en gardant l'approche et la philosophie de réintégration du bois dans le cours afin de restaurer des processus fluviaux (J. M. Wheaton et al., 2019). Comme l'a mentionné un interlocuteur entretenu dans cette enquête, les ambitions sont plus importantes que les outils utilisés, qui sont là pour maximiser l'efficacité du projet. Des projets hybrides mêlant Low-Tech et utilisant ponctuellement des engins plus conséquents pour gagner en efficacité peuvent être pertinents s'ils conservent l'approche de biomimétisme et de réintégration de structures en bois pour activer des processus fonctionnels. Par exemple des projets de restauration utilisant des troncs et/ou souches de tailles importante et nécessitant parfois des machines pour le transport (tracteurs) ou le dessouchage. Aux Etats-Unis, des cours d'eau de taille beaucoup plus importante sont par ailleurs restaurés avec du bois de grande taille⁵¹ et ces possibilités de restauration devront aussi être étudiées et développées en France.

La question du coût de ce type de restauration semble aussi faire débat. Aucune analyse économique n'a été intégrée à cette étude. Bien qu'il apparaisse que le coût de restauration au kilomètre de cours d'eau soit sensiblement inférieur avec ces approches, particulièrement sur les têtes de bassin, il reste nécessaire de mieux documenter cet aspect. Les coûts de restaurations sur le bassin RM&C sont souvent autour de 350 000€/km linéaire et l'ensemble du budget de l'AERMC consacré à la restauration pour le programme d'intervention de 6 ans est consommé pour 50 à 100km de cours d'eau restauré par an. Les retours d'expérience des projets en cours ou à venir seront essentiels pour évaluer plus finement la rentabilité et l'efficacité économique de ces actions de restauration en comparaison d'autres projets de restauration. Si les projets s'avéraient moins coûteux, le linéaire total restauré pourrait être augmenté et davantage de moyens financiers pourraient être alloués vers la stratégie foncière afin d'augmenter l'espace de mobilité du cours d'eau.

⁵¹ Souvent appelée « *Large Wood Restoration* » en anglais

Au-delà de l'aspect scientifique, ces techniques viennent approfondir le questionnement sur notre rapport à la nature et aux cours d'eau, nos manières de connecter à ceux-ci incluant nos façons de les restaurer. La crise de la biodiversité trouve son origine dans une rupture culturelle et dans un rapport à la nature devenu profondément dualiste, une construction intellectuelle issue de l'Europe de l'époque moderne (Descola, 2005). Ce rapport dualiste est observable à différents degrés au sein du monde de la gestion et de la restauration des milieux aquatiques et a pu être perçu dans les différents entretiens d'enquêtes. Il convient donc de se demander : quel niveau de « sauvagerie »⁵² cherchons nous dans un projet de restauration ? Quelle est notre approche de la nature lorsque nous cherchons à la restaurer ? Il y a-t-il des approches de gestion plus centrées sur les processus naturels et d'autres cherchant davantage à contrôler la nature et lui imposer des formes ? Avons-nous vraiment besoin de tout contrôler ou sommes-nous prêts à redonner de l'incertitude et relancer des dynamiques chaotiques ? Sommes-nous prêts à revoir des cours d'eau « bordéliques » ? A ce titre, les techniques de restaurations fondées sur le biomimétisme et les solutions fondées sur la nature paraissent particulièrement pertinentes pour adopter une approche moins dualiste et plus holistique dans la restauration écologique. Toutefois, un intervenant entretenu dans l'enquête a poussé la réflexion en évoquant qu'un vrai changement de paradigme serait de « laisser les cours d'eau tranquilles » plutôt que de toujours privilégier l'action sur les milieux, qui témoigne encore selon lui d'un rapport dualiste de l'homme cherchant à influencer son milieu. Bien que ces techniques aient pour objectif de stimuler la réactivité du système, le but ultime reste que ce dernier devienne autonome. Il convient donc de privilégier la gestion passive dès que possible. D'un point de vue pratique, cette approche est pertinente, car le linéaire dégradé est généralement trop étendu pour envisager une gestion active efficace.

À l'échelle de la société, il sera nécessaire de s'interroger sur notre volonté de restituer suffisamment d'espace aux cours d'eau, quitte à le soustraire aux usages agricoles ou urbanisés. Quels modèles agricoles choisirons-nous de privilégier ? L'habitabilité de la planète ainsi que la qualité de vie des générations futures dépendront largement des paradigmes sur lesquels nos sociétés se fonderont.

Un avantage majeur de ces techniques ayant émergé lors des entretiens d'enquêtes est l'aspect participatif et le potentiel de reconnexion des citoyens avec les cours d'eau. D'abord, elles offrent aux gestionnaires un outil supplémentaire puissant pour améliorer la santé des cours d'eau sur un temps de gestion long et continu sans avoir systématiquement besoin de sous-traitance par des bureaux d'études. De plus, elles se prêtent à la sensibilisation auprès des citoyens, des riverains, des agriculteurs, des pêcheurs et pourraient leur permettre de recréer un lien affectif avec les cours d'eau.

Les changements spectaculaires dans l'habitat physique et la reconfiguration des chenaux que les castors peuvent produire sont précisément le type de transformations que beaucoup tentent d'imiter dans des interventions de restauration beaucoup plus coûteuses, utilisant des équipements lourds, des conceptions de restauration basé sur l'ingénierie, des matériaux de construction importés et un processus d'autorisation complexe (M. Pollock et al., 2012). Puisque les castors constituent une source de travail gratuite et que les structures qu'ils construisent sont exemptées d'exigences administratives, s'ils peuvent atteindre les mêmes résultats ou de meilleurs résultats que les efforts de restauration des cours d'eau réalisés par l'homme, sur des linéaires bien plus importants, les implications économiques sont importantes. Il serait cohérent de corréliser ces techniques avec les programmes de conservation du castor, et de favoriser son retour sur les secteurs desquels il est encore absent. Le débat sur sa réintroduction sur certains territoires mérite donc d'être relancé. Il pourrait ainsi participer à l'effort de restauration et entretenir les ouvrages créés par les techniques LTBP.

⁵² Terme issu de (Delord, 2005)

6. Conclusion

Cette étude a permis d'approfondir les connaissances relatives aux techniques de restauration dites « Low-Tech » et fondées sur les processus naturels, ainsi que leur perception par différents acteurs du monde de la GEMA et leur domaine d'application potentiel sur le bassin RM&C. Si certaines structures, telles que les épis ou l'ajout de bois, étaient déjà utilisées de manière plus ou moins ponctuelle par des gestionnaires ayant observé leurs effets bénéfiques dans des cours d'eau dégradés, la littérature nord-américaine apporte un éclairage technique précieux. Elle permet d'envisager ces approches avec davantage d'ambition, en les mobilisant sur des linéaires plus étendus et dans une véritable logique de restauration écologique.

Ces techniques incluent parfois la mise en place d'ouvrages transversaux favorisant la rétention de l'eau et l'aggradation du lit, ce qui suscite des débats, notamment sur les effets sur les populations piscicoles. Néanmoins, cette étude suggère que ces approches présentent un réel potentiel pour la restauration écologiques des cours d'eau du bassin Rhône-méditerranée et Corse, à condition de rester attentif à certains points de vigilance. Les retours d'expérience à venir seront déterminants pour évaluer leurs effets dans des contextes variés et mieux comprendre leurs implications à différentes échelles hydro-morphologiques et écologiques.

Ces techniques constituent un outil supplémentaire pour les gestionnaires, mais leur succès dépendra de l'acceptation par les riverains et les élus de la présence de bois dans les cours d'eau, ainsi que de la mise en œuvre de stratégies foncières ambitieuses visant à restaurer l'espace nécessaire au bon fonctionnement des milieux aquatiques. L'implication de tous les acteurs concernés, notamment des pêcheurs, sera essentielle pour dépasser les clivages et mobiliser pleinement les moyens disponibles afin d'améliorer l'état des milieux aquatiques, dans un contexte de dégradation accrue. Par ailleurs, il est crucial d'instaurer des suivis rigoureux des projets à venir pour recueillir des retours d'expérience dans les prochaines années, qui permettront d'éclaircir certains points de discussion soulevés dans ce rapport.

7. Glossaire

Low-Tech: Antonyme du terme « high-tech » (haute technologie), la «Low-Tech», traduite par « technologies douces, sobres et résilientes » désigne tout type de produits, services, procédés ou autres systèmes permettant, via une transformation technique, organisationnelle et culturelle, le développement de nouveaux modèles de société intégrant, dans leurs principes fondamentaux, les exigences de durabilité forte et de résilience collective.

Stage 0, Etat zéro ou Stade zéro : (souvent aussi appelée en anglais « stage zero restoration ») vise à réhabiliter leur configuration naturelle avant les interventions humaines majeures. Elle cherche à retrouver un réseau de chenaux multiples (multichenal) en s'appuyant sur les processus naturels, pour reconnecter la rivière à sa plaine inondable et restaurer la dynamique fluviale d'origine. Ce modèle favorise la réhumidification du fond de vallée et la création d'une mosaïque d'habitats résilients et la capacité d'adaptation écologique du système au changement climatique ou aux perturbations.⁵³

Régénération fondée sur les processus / Basée sur les processus / Basées sur la régénération des processus : Approche de restauration visant à rétablir le rythme et l'ampleur naturels des processus physiques, chimiques et biologiques qui structurent et soutiennent les écosystèmes des cours d'eau et des plaines alluviales – tels que l'érosion et le dépôt sédimentaire, la migration des chenaux ou encore la dynamique de croissance et de renouvellement de la végétation riveraine (Beechie et al., 2010).

Hydromorphologie (ou Hydro-geomorphologie) : Science qui s'intéresse à la dynamique fluviale et plus largement au fonctionnement des cours d'eau.

Génie Végétal : Techniques utilisant des espèces végétales pour protéger et stabiliser des berges et limiter l'érosion dans des contextes où la capacité de divagation latérale du cours d'eau est réduite (Evette et al., 2022).

Anastomose : Style fluvial à chenaux multiples qui se distingue des rivières en tresse par le fait que les anastomoses sont moins mobiles et séparés par des îlots stables le plus souvent végétalisés qui s'opposent à la migration des chenaux (Terrier et al., 2019). Cette forme correspond à des cours d'eau dont le tracé a été peu modifié par les sociétés humaines et qui ont conservé leur espace de mobilité.

Avulsion : Abandon d'un lit de rivière au profit d'un nouveau tracé. Par exemple, lors de la formation de méandres, d'îlots ou d'embâcles, ou encore à la suite des travaux de barrages de castors, les alluvions bloquent un bras qui devient alors un bras-mort, la rivière ayant formé un autre passage.

Thalweg : Ligne de plus grande pente d'une vallée, suivant laquelle se dirigent les eaux courantes.

Rang de Strahler : Cet indicateur rend compte synthétiquement de la taille du cours d'eau. Dans cette méthode, deux tronçons de même ordre qui se rejoignent forment un tronçon d'ordre supérieur, tandis qu'un segment qui reçoit un segment d'ordre inférieur conserve le même ordre.

⁵³ <https://www.youtube.com/watch?v=lQzqE6wKjEM>

Bibliographie

- Abbe, T. B., Brooks, A. P., & Montgomery, D. R. (2003). *Wood in River Rehabilitation and Management*.
- Abbe, T. B., & Montgomery, D. R. (1996). Large woody debris jams, channel hydraulics and habitat formation in large rivers. *Regulated Rivers: Research & Management*, 12(2-3), 201-221. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199603\)12:2/3<201::AID-RRR390>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199603)12:2/3<201::AID-RRR390>3.0.CO;2-A)
- Abbe, T., & Brooks, A. P. (2011). *Geomorphologic, Engineering, and Ecological Considerations When Using Wood in River Restoration*.
- Adam, P., Debais, N., & Malavoi, J.-R. (2007). *Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau—Agence de l'eau Seine-Normandie* -.
- Agence de l'eau Rhône Méditerranée & Corse. (2018). *Elaborer une stratégie d'intervention foncière—Appui à la mise en œuvre des projets de reconquête du fonctionnement des milieux aquatiques et humides et / ou des ressources souterraines* (Eau & Connaissance).
- Agence de l'eau Rhône Méditerranée & Corse. (2024). *L'état des eaux des bassins Rhône méditerranée et de corse* (Eau & Connaissance).
- Albert, S., & Trimble, T. (2000). Beavers Are Partners in Riparian Restoration on the Zuni Indian Reservation. *Ecological Restoration*, 18(2), 87-92.
- Alexander, M. D. (1998). *Effects of Beaver (Castor canadensis) impoundments on stream temperature and fish*.
- Andersen, D. C., & Shafroth, P. B. (2010). Beaver dams, hydrological thresholds, and controlled floods as a management tool in a desert riverine ecosystem, Bill Williams River, Arizona. *Ecohydrology*, 3(3), 325-338. <https://doi.org/10.1002/eco.113>
- Andersen, D. C., Shafroth, P. B., Pritekel, C. M., & O'Neill, M. W. (2011). Managed Flood Effects on Beaver Pond Habitat in a Desert Riverine Ecosystem, Bill Williams River, Arizona USA. *Wetlands*, 31(2), 195-206. <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0154-y>
- Andrus, C. W., Long, B. A., & Froehlich, H. A. (1988). Woody Debris and Its Contribution to Pool Formation in a Coastal Stream 50 Years after Logging. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 45(12), 2080-2086. <https://doi.org/10.1139/f88-242>
- Angermeier, P. L., & Karr, J. R. (1984). Relationships between Woody Debris and Fish Habitat in a Small Warmwater Stream. *Transactions of the American Fisheries Society*, 113(6), 716-726.
- Anlanger, C., Attermeyer, K., Hille, S., Kamjunke, N., Koll, K., König, M., Schnauder, I., Nogueira Tavares, C., Weitere, M., & Brauns, M. (2022a). Large wood in river restoration: A case study on the effects on hydromorphology, biodiversity, and ecosystem functioning. *International Review of Hydrobiology*, 107(1-2), 34-45. <https://doi.org/10.1002/iroh.202102089>
- Anlanger, C., Attermeyer, K., Hille, S., Kamjunke, N., Koll, K., König, M., Schnauder, I., Nogueira Tavares, C., Weitere, M., & Brauns, M. (2022b). Large wood in river restoration: A case study on the effects on hydromorphology, biodiversity, and ecosystem functioning. *International Review of Hydrobiology*, 107(1-2), 34-45. <https://doi.org/10.1002/iroh.202102089>
- Arismendi, I., Penaluna, B. E., & Jara, C. G. (2020). Introduced beaver improve growth of non-native trout in Tierra del Fuego, South America. *Ecology and Evolution*, 10(17), 9454-9465. <https://doi.org/10.1002/ece3.6636>
- Ashbrook, J. D. (2020). *Assessing the effectiveness of Leaky Dams at Crimsworth Dean, Hebden Bridge*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11794.07368>
- Aumen, N., Hawkins, C., & Gregory, S. (1990). *Influence of woody debris on nutrient retention in catastrophically disturbed streams—Web of Science Core Collection*. <https://www-webofscience-com.bibelec.univ-lyon2.fr/wos/woscc/full-record/WOS:A1990CU06500001>
- Auster, R. E., Barr, S., & Brazier, R. (2021). Alternative perspectives of the angling community on Eurasian beaver (*Castor fiber*) reintroduction in the River Otter Beaver Trial. *Journal of Environmental Planning*

and *Management*.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09640568.2020.1816933>

Baker, B. W., & Hill, E. P. (2003). Beaver (*Castor canadensis*). *Wild Mammals of North America: Biology, Management, and Conservation.*, 288-310. In G. A. Feldhamer, B. C. Thompson, and J. A. Chapman, editors.

Barnes, D., & Mallik, A. (1997). Habitat Factors Influencing Beaver Dam Establishment in a Northern Ontario Watershed. *The Journal of Wildlife Management*, 61. <https://doi.org/10.2307/3802140>

Barnes, D., & Mallik, A. (2001). Effects of beaver, *Castor canadensis*, herbivory on streamside vegetation in a Northern Ontario watershed. *Aspen Bibliography*, 115. <https://doi.org/10.5962/p.363741>

Becker, A., Rey, P., & Willi, G. (2003). *Grossversuch Totholz: Strukturverbesserung von Alpenrheinzufliessen und Bdichen im Alpenrheintalmittels Toth* - [Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie 125]. Internationale Regierungskommission Alpenrhein, Austria.

Beechie, T. J., Sear, D. A., Olden, J. D., Pess, G. R., Buffington, J. M., Moir, H., Roni, P., & Pollock, M. M. (2010). Process-based Principles for Restoring River Ecosystems. *BioScience*, 60(3), 209-222. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.3.7>

Beechie, T. J., & Sibley, T. H. (2011). *Relationships between Channel Characteristics, Woody Debris, and Fish Habitat in Northwestern Washington Streams—Transactions of the American Fisheries Society*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1577/1548-8659%281997%29126%3C0217%3ARBCCWD%3E2.3.CO%3B2>

Beedle, D. (1991). *Physical Dimensions and Hydrologic Effects of Beaver Ponds on Kuiu Island in Southeast Alaska*.

Bihouix, P. (2014). *L'Âge des low tech. Vers une civilisation techniquement soutenable*. Guilwen MEUNIER. <https://low-techs.ec-nantes.fr/resume-de-lage-des-low-tech-vers-une-civilisation-techniquement-soutenable>

Bilby, R. E. (1981). Role of Organic Debris Dams in Regulating the Export of Dissolved and Particulate

Matter from a Forested Watershed. *Ecology*, 62(5), 1234-1243. <https://doi.org/10.2307/1937288>

Bisson, P. A., BILBY, R. E., Bryant, M. D., Dolloff, C. A., Grette, G. B., House, R. A., Murphy, M. L., Koski, K. V., & Sedell, J. R. (1987). *Large Woody Debris in Forested Streams in the Pacific Northwest: Past, Present, and Future*.

Błędzki, L. A., Bubier, J. L., Moulton, L. A., & Kyker-Snowman, T. D. (2011). Downstream effects of beaver ponds on the water quality of New England first- and second-order streams. *Ecohydrology*, 4(5), 698-707. <https://doi.org/10.1002/eco.163>

Bobst, A. L., Payn, R. A., & Shaw, G. D. (2022). Groundwater-Mediated Influences of Beaver-Mimicry Stream Restoration: A Modeling Analysis. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 58(6), 1388-1406. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.13044>

Bouwes, N., Weber, N., Jordan, C. E., Saunders, W. C., Tattam, I. A., Volk, C., Wheaton, J. M., & Pollock, M. M. (2016). Ecosystem experiment reveals benefits of natural and simulated beaver dams to a threatened population of steelhead (*Oncorhynchus mykiss*). *Scientific Reports*, 6(1), 28581. <https://doi.org/10.1038/srep28581>

Boyer, M., & Piégay, H. (1998). *Bassin Rhône Méditerranée Corse—La gestion des boisements re rivières—Guide Technique n1*.

Bravard, J.-P., & Petts, G. (1996). *Bravard & Petts 1996 Human impacts on hydrosystems*.

Brazier, R. E., Puttock, A., Graham, H. A., Auster, R. E., Davies, K. H., & Brown, C. M. L. (2021). Beaver: Nature's ecosystem engineers. *Wires. Water*, 8(1), e1494. <https://doi.org/10.1002/wat2.1494>

Bressan, Y., Michelot, J.-L., & Simon, L. (2006). *Les fonctions des zones humides: Synthèse bibliographique. Rapport annexe au document: Délimitation de l'espace fonctionnel par fonction et par type de zones humides du bassin Rhône-Méditerranée, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse*.

Brierley, G., Fryirs, K., & Hobbs, R. (2009). *River Futures: An Integrative Scientific Approach to River Repair. Bibliovault OAI Repository, the University of Chicago Press*.

- Brookes, A., Wiley, & Chichester. (1988). *Channelized rivers : Perspectives for environmental management*.
- Brown, A. G., & Barber, K. E. (1985). Late Holocene Paleocology and Sedimentary History of a Small Lowland Catchment in Central England. *Quaternary Research*, 24(1), 87-102. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(85\)90085-7](https://doi.org/10.1016/0033-5894(85)90085-7)
- Brown, A. G., Lespez, L., Sear, D. A., Macaire, J.-J., Houben, P., Klimek, K., Brazier, R. E., Van Oost, K., & Pears, B. (2018a). Natural vs anthropogenic streams in Europe : History, ecology and implications for restoration, river-rewilding and riverine ecosystem services. *Earth-Science Reviews*, 180, 185-205. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.001>
- Brown, A. G., Lespez, L., Sear, D. A., Macaire, J.-J., Houben, P., Klimek, K., Brazier, R. E., Van Oost, K., & Pears, B. (2018b). Natural vs anthropogenic streams in Europe : History, ecology and implications for restoration, river-rewilding and riverine ecosystem services. *Earth-Science Reviews*, 180, 185-205. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.001>
- Brown, D. J., Hubert, W. A., & Anderson, S. H. (1996). Beaver ponds create wetland habitat for birds in mountains of southeastern Wyoming. *Wetlands*, 16(2), 127-133. <https://doi.org/10.1007/bf03160686>
- Buffington, J. M., & Montgomery, D. R. (1999). Effects of hydraulic roughness on surface textures of gravel-bed rivers. *Water Resources Research*, 35(11), 3507-3521. <https://doi.org/10.1029/1999WR900138>
- Burchsted, D., Daniels, M., Thorson, R., & Vokoun, J. (2010). The River Discontinuum : Applying Beaver Modifications to Baseline Conditions for Restoration of Forested Headwaters. *BioScience*, 60(11), 908-922. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.11.7>
- Bureau of Reclamation, & U.S Army Corps of Engineers. (2015). *National Large Wood Manual : Assessment, Planning, Design, and Maintenance of Large Wood in Fluvial Ecosystems : Restoring Process, Function, and Structure*.
- Butler, D. R., & Malanson, G. P. (2005). The geomorphic influences of beaver dams and failures of beaver dams. *Geomorphology*, 71(1-2), 48-60. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.08.016>
- Bylak, A., Kukuła, K., & Mitka, J. (2014). Beaver impact on stream fish life histories : The role of landscape and local attributes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71(11), 1603-1615. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2014-0105>
- Castro, J., Pollock, M., Jordan, C., Lewallen, G., & Woodruff, K. (2017). *The Beaver Restoration Guidebook—Working with Beaver to Restore Streams, Wetlands, and Floodplains*. US Fish and Wildlife Service; National Oceanic and Atmospheric Administration; University of Saskatchewan; US Forest Service Kent Woodruff.
- Ciotti, D. C., Mckee, J., Pope, K. L., Kondolf, G. M., & Pollock, M. M. (2021). Design Criteria for Process-Based Restoration of Fluvial Systems. *BioScience*, 71(8), 831-845. <https://doi.org/10.1093/biosci/biab065>
- Cirno, C. P., & Driscoll, C. T. (1993). Beaver pond biogeochemistry : Acid neutralizing capacity generation in a headwater wetland. *Wetlands*, 13(4), 277-292. <https://doi.org/10.1007/BF03161294>
- Clark, T. (2020). Impacts of Beaver Dams on Mountain Stream Discharge and Water Temperature. *All Graduate Plan B and other Reports, Spring 1920 to Spring 2023*. <https://doi.org/10.26076/891b-18b3>
- Cluer, B., & Thorne, C. (2014). A Stream Evolution Model Integrating Habitat and Ecosystem Benefits. *River Research and Applications*, 30(2), 135-154. <https://doi.org/10.1002/rra.2631>
- Collen, P., & Gibson, R. J. (2001). *The general ecology of beavers (Castor spp.), as related to their influence on stream ecosystems and riparian habitats, and the subsequent effects on fish - a review*.
- Collier, E. (1959). *Three Against the Wilderness*. E.P. Dutton and Co., Inc, New York.
- Collins, B., Montgomery, D., Fetherston, K., & Abbe, T. (2012). The Floodplain Large-Wood Cycle Hypothesis : A Mechanism for the Physical and Biotic Structuring of Temperate Forested Alluvial Valleys in the North Pacific Coastal Ecoregion. *Geomorphology*, 139-140, 460-470. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.11.011>
- Contant, E. (2023). *Détermination des paramètres environnementaux expliquant la construction de barrages chez Castor fiber : De l'échelle du bassin versant à l'échelle nationale*. OFB; PSL Université Paris.

- Cook, D. B. (1940). Beaver-Trout Relations. *Journal of Mammalogy*, 21(4), 397. <https://doi.org/10.2307/1374874>
- Cunningham, J. M., Calhoun, A. J. K., & Glanz, W. E. (2007). Pond-Breeding Amphibian Species Richness and Habitat Selection in a Beaver-Modified Landscape. *The Journal of Wildlife Management*, 71(8), 2517-2526. <https://doi.org/10.2193/2006-510>
- Dalke, P. D. (1947). *The beaver in Missouri*. *Missouri Conservationist* 8:1-3.
- Dany, A. (2016). *Accompagner la politique de restauration physique des cours d'eau : Éléments de connaissance*. Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse. (Collection «eau & connaissance», p. 304 pages).
- De Brouwer, J. H. F., Verdonschot, P. F. M., Eekhout, J. P. C., & Verdonschot, R. C. M. (2020). Macroinvertebrate taxonomic and trait-based responses to large-wood reintroduction in lowland streams. *Freshwater Science*, 39(4), 693-703. <https://doi.org/10.1086/710710>
- De Visscher, M., Nyssen, J., Pontzele, J., Billi, P., & Frankl, A. (2014). Spatio-temporal sedimentation patterns in beaver ponds along the Chevril river, Ardennes, Belgium. *Hydrological Processes*, 28(4), 1602-1615. <https://doi.org/10.1002/hyp.9702>
- Delord, J. (2005). La « sauvagerie » : Un principe de réconciliation entre l'homme et la biosphère. *Natures Sciences Sociétés*, 13(3), 316-320.
- Dennis, M., Angst, C., Larsen, J. R., Rey, E., & Larsen, A. (2024). A national scale floodplain model revealing channel gradient as a key determinant of beaver dam occurrence and inundation potential can anticipate land-use based opportunities and conflicts for river restoration. *Global Ecology and Conservation*, 56, e03304. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03304>
- Descola, P. (2005, septembre 15). *Par-delà nature et culture*. Gallimard. <https://www.gallimard.fr/catalogue/par-dela-nature-et-culture/9782070772636>
- Devito, K. J., & Dillon, P. J. (1993). Importance of Runoff and Winter Anoxia to the P and N Dynamics of a Beaver Pond. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 50(10), 2222-2234. <https://doi.org/10.1139/f93-248>
- Devries, P., Fetherston, K., Vitale, A., & Madsen, S. (2012). Emulating Riverine Landscape Controls of Beaver in Stream Restoration. *Fisheries*, 37, 246-255. <https://doi.org/10.1080/03632415.2012.687263>
- Dittbrenner, B. J., Pollock, M. M., Schilling, J. W., Olden, J. D., Lawler, J. J., & Torgersen, C. E. (2018). Modeling intrinsic potential for beaver (*Castor canadensis*) habitat to inform restoration and climate change adaptation. *PLOS ONE*, 13(2), e0192538. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192538>
- Dixon, S. (2015). *Investigating the effects of large wood and forest management on flood risk and flood hydrology*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4923.2485>
- Dixon, S. J., Sear, D. A., Odoni, N. A., Sykes, T., & Lane, S. N. (2016). The effects of river restoration on catchment scale flood risk and flood hydrology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(7), 997-1008. <https://doi.org/10.1002/esp.3919>
- Domagała, J., Czerniawski, R., Pilecka-Rapacz, M., & Kesminas, V. (2013). *Do Beaver Dams on Small Streams Influence the Effects of Trout (Salmo trutta trutta) Stocking?*
- Dufour, S., & Piégay, H. (2009). From the myth of a lost paradise to targeted river restoration : Forget natural references and focus on human benefits. *River Research and Applications*, 25(5), 568-581. <https://doi.org/10.1002/rra.1239>
- Dynesius, M., & Nilsson, C. (1994). Fragmentation and Flow Regulation of River Systems in the Northern Third of the World. *Science*, 266(5186), 753-762. <https://doi.org/10.1126/science.266.5186.753>
- Ecke, F., Levanoni, O., Audet, J., Carlson, P., Eklöf, K., Hartman, G., McKie, B., Ledesma, J., Segersten, J., Truchy, A., & Futter, M. (2017). Meta-analysis of environmental effects of beaver in relation to artificial dams. *Environmental Research Letters*, 12(11), 113002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8979>
- Elliott, J. M. (2000). Pools as refugia for brown trout during two summer droughts : Trout responses to thermal and oxygen stress. *Journal of Fish Biology*, 56(4), 938-948. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2000.tb00883.x>
- Elosegi, A., Díez, J. R., Flores, L., & Molinero, J. (2017). Pools, channel form, and sediment storage in wood-

- restored streams : Potential effects on downstream reservoirs. *Geomorphology*, 279, 165-175. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.01.007>
- Evette, A., Janssen, P., Piton, G., Dommanget, F., Popoff, N., Jaymond, D., Guilloteau, C., Leblois, S., de Danieli, S., Recking, A., Jung, D., Vivier, A., Martin, F.-M., Jaunatre, R., Mira, E., & Didier, M. (2022). Le génie végétal sur les berges de cours d'eau : Des techniques aux multiples bénéfiques. *Comprendre pour agir*, 1-29.
- Fairfax, E., Whipple, A., Wheaton, J. M., Osorio, B., Miller, J., Kirksey, K., Perez, N., Gilbert, J. T., & Jordan, C. E. (2024). Impacts of beaver dams on riverscape burn severity during megafires in the Rocky Mountain region, western United States. In J. L. Florsheim, A. P. O'Dowd, & A. Chin, *Biogeomorphic Responses to Wildfire in Fluvial Ecosystems* (p. 131-151). Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2024.2562\(07\)](https://doi.org/10.1130/2024.2562(07))
- Fairfax, E., & Whittle, A. (2021). Smokey the Beaver : Beaver-Dammed Riparian Corridors Stay Green During Wildfire Throughout the Western USA. *The Bulletin of the Ecological Society of America*, 102. <https://doi.org/10.1002/bes2.1795>
- Finley, W. L. (1937). Beaver—Conservator of soil and water. *Transactions of the American Wildlife Conference* 2:295-297.
- Fisher, G. B., Magilligan, F. J., Kaste, J. M., & Nislow, K. H. (2010). Constraining the timescales of sediment sequestration associated with large woody debris using cosmogenic. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F1), 2009JF001352. <https://doi.org/10.1029/2009JF001352>
- Flores, L., Giorgi, A., González, J. M., Larrañaga, A., Díez, J. R., & Elosegí, A. (2017). Effects of wood addition on stream benthic invertebrates differed among seasons at both habitat and reach scales. *Ecological Engineering*, 106, 116-123. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.036>
- Francis, M. M., Naiman, R. J., & Melillo, J. M. (1985). Nitrogen fixation in subarctic streams influenced by beaver (*Castor canadensis*). *Hydrobiologia*, 121(3), 193-202. <https://doi.org/10.1007/BF00017543>
- Francis, R. A., Petts, G. E., & Gurnell, A. M. (2008). Wood as a driver of past landscape change along river corridors. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(10), 1622-1626. <https://doi.org/10.1002/esp.1626>
- Fuller, M., & Peckarsky, B. (2011). Ecosystem engineering by beavers affects mayfly life history. *Freshwater Biology*, 56, 969-979. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2010.02548.x>
- Gard, R. (1961). Effects of Beaver on Trout in Sagehen Creek, California. *The Journal of Wildlife Management*, 25(3), 221. <https://doi.org/10.2307/3797848>
- George, C. (2024). Critical analysis and reflection on the application and adaptation of the models of the Riverscapes Consortium to the French territory and context: The example of the Drôme watershed. *Université Lyon* 2. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30395.43045>
- Gibson, P. P., & Olden, J. D. (2014). Ecology, management, and conservation implications of North American beaver (*Castor canadensis*) in dryland streams. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 24(3), 391-409. <https://doi.org/10.1002/aqc.2432>
- Gilles, A. (2019). Impacts des barrages de castors eurasiens (*Castor fiber*) sur la reproduction de la truite fario (*Salmo trutta fario*) dans un ruisseau ardennais.
- Gippel, C. J., Finlayson, B. L., & O'Neill, I. C. (1996). Distribution and hydraulic significance of large woody debris in a lowland Australian river. *Hydrobiologia*, 318(3), 179-194. <https://doi.org/10.1007/BF00016679>
- Giriat, D., Gorczyca, E., & Sobucki, M. (2016). Beaver ponds' impact on fluvial processes (Beskid Niski Mts., SE Poland). *Science of The Total Environment*, 544, 339-353. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.103>
- Glassic, H. C., Al-Chokhachy, R., Wheaton, J., Macfarlane, W. W., Jordan, C. E., Murphy, B., Shahverdian, S., Bennett, S., Bouwes, N., Fryirs, K., Brierley, G., Ciotti, D., Bailey, P., Bartelt, K., Belletti, B., Brasington, J., Camp, R., Fairfax, E., Gilbert, J., ... Weber, N. (2025). Principles of Riverscape Health. *WIRES Water*, 12(Issue 4). <https://doi.org/10.1002/wat2.70028>
- Goldfarb, B. (2018). Beavers, rebooted. *Science*, 360(6393), 1058-1061. <https://doi.org/10.1126/science.360.6393.1058>
- Golski, J., Andrzejewski, W., Urbańska, M., Runowski, S., Dajewski, K., & Hoffmann, L. (2023). Pro-ecological

- and conservation activities are not always beneficial to nature : A case study of two lowland streams in Central Europe. *Scientific Reports*, 13(1), 15578. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42555-7>
- Gorczyca, E., Krzemień, K., Sobucki, M., & Jarzyna, K. (2017). *Can beaver impact promote river renaturalization? The example of the Raba River, southern Poland.*
- Goudard, E. (2024). *Rapport d'Etude Scientifique et Technique.*
- Grabowski, R. C., Gurnell, A. M., Burgess-Gamble, L., England, J., Holland, D., Klaar, M. J., Morrissey, I., Uttley, C., & Wharton, G. (2019). The current state of the use of large wood in river restoration and management. *Water and Environment Journal*, 33(3), 366-377. <https://doi.org/10.1111/wej.12465>
- Graham, H. A., Puttock, A., Macfarlane, W. W., Wheaton, J. M., Gilbert, J. T., Campbell-Palmer, R., Elliott, M., Gaywood, M. J., Anderson, K., & Brazier, R. E. (2020). Modelling Eurasian beaver foraging habitat and dam suitability, for predicting the location and number of dams throughout catchments in Great Britain. *European Journal of Wildlife Research*, 66(3). <https://doi.org/10.1007/s10344-020-01379-w>
- Green, K. C., & Westbrook, C. J. (2009). Changes in riparian area structure, channel hydraulics, and sediment yield following loss of beaver dams. *Journal of Ecosystems and Management*. <https://doi.org/10.22230/jem.2009v10n1a412>
- Gregory, K. J., & Davis, R. J. (1992). Coarse woody debris in stream channels in relation to river channel management in woodland areas. *Regulated Rivers: Research & Management*, 7(2), 117-136. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450070202>
- Gregory, K. J., Gurnell, A. M., & Hill, C. T. (1985). The permanence of debris dams related to river channel processes. *Hydrological Sciences Journal*, 30(3), 371-381. <https://doi.org/10.1080/02626668509491000>
- Gregory, S. V., Boyer, K., & Gurnell, A. (2007). The ecology and management of wood in world rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(8), 1129-1130. <https://doi.org/10.1002/esp.1546>
- Groffman, P. M., Dorsey, A. M., & Mayer, P. M. (2005). N processing within geomorphic structures in urban streams. *Journal of the North American Benthological Society*, 24(3), 613-625. <https://doi.org/10.1899/04-026.1>
- Grosprêtre, L., Despres, D., & Kreutzenberger, K. (2024). *Plateforme Pressions et Risques d'impacts HYdroMOrphologiques (PRHYMO) : Dictionnaire des attributs. Dynamique Hydro et OFB.*
- Grosprêtre, L., & Kreutzenberger, K. (2024). *Plateforme Pressions et Risques d'impacts HYdroMOrphologiques (PRHYMO) : Rapport méthodologique. Dynamique Hydro et Office Français de la Biodiversité.*
- Grover, A. M., & Baldassarre, G. A. (1995). Bird species richness within beaver ponds in south-central New York. *Wetlands*, 15(2), 108-118. <https://doi.org/10.1007/BF03160664>
- Grudzinski, B. P., Fritz, K., Golden, H. E., Newcomer-Johnson, T. A., Rech, J. A., Levy, J., Fain, J., McCarty, J. L., Johnson, B., Vang, T. K., & Maurer, K. (2022). A global review of beaver dam impacts : Stream conservation implications across biomes. *Global Ecology and Conservation*, 37, e02163. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02163>
- Grygoruk, M., & Nowak, M. (2014). Spatial and Temporal Variability of Channel Retention in a Lowland Temperate Forest Stream Settled by European Beaver (*Castor fiber*). *Forests*, 5, 2276-2288. <https://doi.org/10.3390/f5092276>
- Gurnell, A. (2013). 9.11 Wood in Fluvial Systems. In *Treatise on Geomorphology* (Vol. 9, p. 163-188). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00236-0>
- Gurnell, A. M. (2007). Analogies between mineral sediment and vegetative particle dynamics in fluvial systems. *Geomorphology*, 89(1-2), 9-22. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.07.012>
- Gurnell, A. M., Gregory, K. J., & Petts, G. E. (1995). The role of coarse woody debris in forest aquatic habitats : Implications for management. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 5(2), 143-166. <https://doi.org/10.1002/aqc.3270050206>
- Gurnell, A. M., Piégay, H., Swanson, F. J., & Gregory, S. V. (2002). Large wood and fluvial processes. *Freshwater Biology*, 47(4), 601-619. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00916.x>

- Gurnell, A. M., & Sweet, R. (1998). The distribution of large woody debris accumulations and pools in relation to woodland stream management in a small, low-gradient stream. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(12), 1101-1121. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199812\)23:12<1101::AID-ESP935>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199812)23:12<1101::AID-ESP935>3.0.CO;2-O)
- Hägglund, Å., & Sjöberg, G. (1999). Effects of beaver dams on the fish fauna of forest streams. *Forest Ecology and Management*, 115(2), 259-266. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00404-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00404-6)
- Halley, D. J., Saveljev, A. P., & Rosell, F. (2020). *Population and distribution of beavers Castor fiber and Castor canadensis in Eurasia—Halley—2021—Mammal Review—Wiley Online Library*. <https://onlinelibrary-wiley-com.bibelec.univ-lyon2.fr/doi/10.1111/mam.12216>
- Hankin, B., Hewitt, I., Sander, G., Danieli, F., Formetta, G., Kamilova, A., Kretzschmar, A., Kiradjiev, K., Wong, C., Pegler, S., & Lamb, R. (2020). A risk-based network analysis of distributed in-stream leaky barriers for flood risk management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(10), 2567-2584. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2567-2020>
- Hartman, G., & Törnlov, S. (2006). Influence of watercourse depth and width on dam-building behaviour by Eurasian beaver (*Castor fiber*). *Journal of Zoology*, 268, 127-131. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.2005.00025.x>
- Haskell, C., Puls, A., & Griswold, K. (2020). *Key Findings and Lessons Learned from Pacific Northwest Intensively Monitored Watersheds*.
- Hassan, M., Church, M., Lisle, T., Brardinoni, F., Benda, L., & Grant, G. (2005). Sediment Transport and Channel Morphology of Small, Forested Streams. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41, 853-876. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03774.x>
- Heede, B. H. (1985). Channel adjustments to the removal of log steps : An experiment in a mountain stream. *Environmental Management*, 9(5), 427-432. <https://doi.org/10.1007/BF01866341>
- Hering, D., Gerhard, M., Kiel, E., Ehlert, T., & Pottgiesser, T. (2001). Review study on near-natural conditions of Central European Mountains streams, with particular reference to Debris and Beaver dams : Results of the « REG meeting » 2000. *Limnologica*, 31(2), 81-92. [https://doi.org/10.1016/S0075-9511\(01\)80001-3](https://doi.org/10.1016/S0075-9511(01)80001-3)
- Herrero Ortega, S., Catalán, N., Björn, E., Gröntoft, H., Hilmarsson, T. G., Bertilsson, S., Wu, P., Bishop, K., Levanoni, O., & Bravo, A. G. (2018). High methylmercury formation in ponds fueled by fresh humic and algal derived organic matter. *Limnology and Oceanography*, 63(S1), S44-S53. <https://doi.org/10.1002/lno.10722>
- Hillman, G. R. (1998). Flood wave attenuation by a wetland following a beaver dam failure on a second order boreal stream. *Wetlands*, 18(1), 21-34. <https://doi.org/10.1007/BF03161439>
- Huet, M. (1949). Aperçu des relations entre la pente et les populations piscicoles des eaux courantes. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, 11(3), 332-351. <https://doi.org/10.1007/BF02503356>
- Jeffries, R., Darby, S. E., & Sear, D. A. (2003). The influence of vegetation and organic debris on flood-plain sediment dynamics : Case study of a low-order stream in the New Forest, England. *Geomorphology*, 51(1-3), 61-80. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00325-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00325-2)
- Johnson-Bice, S., Renik, K., Windels, S., & Hafs, A. (2018). A Review of Beaver-Salmonid Relationships and History of Management Actions in the Western Great Lakes (USA) Region. *North American Journal of Fisheries Management*, 38, 1203-1225. <https://doi.org/10.1002/nafm.10223>
- Johnston, C. A., & Naiman, R. J. (1990). *Aquatic Patch Creation in Relation to Beaver Population Trends*. <https://esajournals-onlinelibrary-wiley-com.bibelec.univ-lyon2.fr/doi/pdf/10.2307/1938297>
- Jones, C. G., Lawton, J. H., & Shachak, M. (1994). Organisms as Ecosystem Engineers. *Oikos*, 69(3), 373-386. <https://doi.org/10.2307/3545850>
- Jordan, C. E., & Fairfax, E. (2022). Beaver : The North American freshwater climate action plan. *WIREs Water*, 9(4), e1592. <https://doi.org/10.1002/wat2.1592>
- Jung, T., & Staniforth, J. (2010). Unusual beaver, *Castor canadensis*, dams in central Yukon. *Canadian Field Naturalist*, 124, 274-275. <https://doi.org/10.22621/cfn.v124i3.1090>

- Kail, J., Hering, D., Muhar, S., Gerhard, M., & Preis, S. (2007). The use of large wood in stream restoration : Experiences from 50 projects in Germany and Austria. *Journal of Applied Ecology*, 44(6), 1145-1155. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01401.x>
- Karran, D. J., Westbrook, C. J., & Bedard-Haughn, A. (2018). *Beaver-mediated water table dynamics in a Rocky Mountain fen* -. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ec o.1923>
- Kemp, P. S., Worthington, T. A., Langford, T. E. L., Tree, A. R. J., & Gaywood, M. J. (2012). Qualitative and quantitative effects of reintroduced beavers on stream fish. *Fish and Fisheries*, 13(2), 158-181. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2011.00421.x>
- Kemp, P.S, Worthington, T.A, & Langford. (2010). *A Critical Review of the Effects of Beavers Upon Fish and Fish Stocks. Scottish Natural Heritage Commissioned Report No. 349.*
- Kesminas, V., Steponėnas, A., Pliūraitė, V., & Virbickas, T. (2013). *Ecological Impact of Eurasian Beaver (Castor fiber) Activity on Fish Communities in Lithuanian Trout Streams.*
- Knudsen, G. J. (1962). *Relationship of beaver to forests, trout and wildlife in Wisconsin. Number 25 1962.*
- Kratzer, J. F. (2018). Response of Brook Trout Biomass to Strategic Wood Additions in the East Branch Nulhegan River Watershed, Vermont. *North American Journal of Fisheries Management*, 38(1415-1422). <https://doi.org/10.1002/nafm.10241>
- Kukula, K., & Bylak, A. (2010). *Ichthyofauna of a mountain stream dammed by beaver.*
- Lafontaine, L. (2000). *Dispersion des populations de castors Castor fiber galliae réintroduits dans les Monts d'Arrée (Finistère).*
- Lane, E. W. (1954). *The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering.*
- Larsen, A., Larsen, J. R., & Lane, S. N. (2021). Dam builders and their works : Beaver influences on the structure and function of river corridor hydrology, geomorphology, biogeochemistry and ecosystems. *Earth-Science Reviews*, 218, 103623. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103623>
- Larsen, L. G., & Harvey, J. W. (2011). Modeling of hydroecological feedbacks predicts distinct classes of landscape pattern, process, and restoration potential in shallow aquatic ecosystems. *Geomorphology*, 126(3), 279-296. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.03.015>
- Lassetre, N., & Kondolf, george 'mathias. (2012). Large woody debris in urban stream channels : Redefining the problem. *River Research and Applications*, 28. <https://doi.org/10.1002/rra.1538>
- Law, A., Gaywood, M. J., Jones, K. C., Ramsay, P., & Willby, N. J. (2017). Using ecosystem engineers as tools in habitat restoration and rewilding : Beaver and wetlands. *Science of The Total Environment*, 605-606, 1021-1030. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.173>
- Law, A., McLean, F., & Willby, N. J. (2016). Habitat engineering by beaver benefits aquatic biodiversity and ecosystem processes in agricultural streams. *Freshwater Biology*, 61(4), 486-499. <https://doi.org/10.1111/fwb.12721>
- Lazar, J., Addy, K., Gold, A., Groffman, P., McKinney, R., & Kellogg, D. (2015). Beaver Ponds : Resurgent Nitrogen Sinks for Rural Watersheds in the Northeastern United States. *Journal of Environment Quality*, 44. <https://doi.org/10.2134/jeq2014.12.0540>
- Le Lay, Y.-F., & Piégay, H. (2007). Le bois mort dans les paysages fluviaux français : Éléments pour une gestion renouvelée: *L'Espace géographique, Tome 36(1)*, 51-64. <https://doi.org/10.3917/eg.361.0051>
- Levine, R., & Meyer, G. A. (2014). Beaver dams and channel sediment dynamics on Odell Creek, Centennial Valley, Montana, USA. *Geomorphology*, 205, 51-64. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.04.035>
- Lokteff, R. L., Roper, B. B., & Wheaton, J. M. (2013). Do Beaver Dams Impede the Movement of Trout? *Transactions of the American Fisheries Society*, 142(4), 1114-1125. <https://doi.org/10.1080/00028487.2013.797497>
- Macfarlane, W. W., Wheaton, J. M., Bouwes, N., Jensen, M. L., Gilbert, J. T., Hough-Snee, N., & Shivik, J. A. (2017). Modeling the capacity of riverscapes to support beaver dams. *Geomorphology*, 277, 72-99. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.11.019>

- Macfarlane, W., Wheaton, J., & Jensen, M. (2014). *The Utah Beaver Restoration Assessment Tool: A Decision Support & Planning Tool*.
- Majerova, M., Neilson, B. T., & Roper, B. B. (2020). Beaver dam influences on streamflow hydraulic properties and thermal regimes. *Science of The Total Environment*, 718, 134853. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134853>
- Majerova, M., Neilson, B. T., Schmadel, N. M., Wheaton, J. M., & Snow, C. J. (2015). *Impacts of beaver dams on hydrologic and temperature regimes in a mountain stream*. *Ecohydrology/Theory development*. <https://doi.org/10.5194/hessd-12-839-2015>
- Malavoi, J.-R., Liebault, F., Piegay, H., Sureau-Blanchet, N., & Terrier, B. (2024). *Élaborer et Mettre en Oeuvre un plan de gestion sédimentaire - (Guide technique)*. Secrétariat Technique Bassin Rhône-Méditerranée.
- Malison, R. L., & Halley, D. J. (2020). Ecology and movement of juvenile salmonids in beaver-influenced and beaver-free tributaries in the Trøndelag province of Norway. *Ecology of Freshwater Fish*, 29(4), 623-639. <https://doi.org/10.1111/eff.12539>
- Margolis, B. E., Castro, M. S., & Raesly, R. L. (2001). The impact of beaver impoundments on the water chemistry of two Appalachian streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58(11), 2271-2283. <https://doi.org/10.1139/f01-166>
- Margolis, B. E., Raesly, R. L., & Shumway, D. L. (2001). The effects of beaver-created wetlands on the benthic macroinvertebrate assemblages of two appalachian streams. *Wetlands*, 21(4), 554-563. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2001\)021\[0554:TEOBCW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2001)021[0554:TEOBCW]2.0.CO;2)
- Maridet, L., Piégay, H., Gilard, O., & Thévenet, A. (1996). L'embâcle de bois en rivière: Un bienfait écologique? un facteur de risques naturels? *La Houille Blanche*, 82(5), 32-37. <https://doi.org/10.1051/lhb/1996049>
- Marston, R. A. (1982). The Geomorphic Significance of Log Steps in Forest Streams. *Annals of the Association of American Geographers*, 72(1), 99-108.
- Mason, R. R., Simmons, C. E., & Watkins, S. A. (1990). *Effects of channel modifications on the hydrology of Chicod Creek basin, North Carolina, 1975-87*. <https://doi.org/10.3133/wri904031>
- McComb, B., Sedell, J., & Buchholz, T. (1990). Dam-site selection by beavers in an eastern Oregon basin. *The Great Basin Naturalist*, 50, 273-281. <https://doi.org/10.2307/41712601>
- McDowell, D. M., & Naiman, R. J. (1986). Structure and function of a benthic invertebrate stream community as influenced by beaver (*Castor canadensis*). *Oecologia*, 68(4), 481-489. <https://doi.org/10.1007/BF00378759>
- McRae, G., & Edwards, C. J. (1994). Thermal Characteristics of Wisconsin Headwater Streams Occupied by Beaver: Implications for Brook Trout Habitat. *Transactions of the American Fisheries Society*, 123(4), 641-656. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1994\)123<0641:TCOWHS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1994)123<0641:TCOWHS>2.3.CO;2)
- Means, C. D. O. (2018). *Stream temperature variability in headwater beaver dam complexes in relation to hydrologic and environmental factors* [Master Thesis].
- Ministère de la transition écologique. (2021). *4ème Plan national milieux humides (2022-2026)*.
- Montgomery, D. R., Buffington, J. M., Smith, R. D., Schmidt, K. M., & Pess, G. (1995). Pool Spacing in Forest Channels. *Water Resources Research*, 31(4), 1097-1105. <https://doi.org/10.1029/94WR03285>
- Montgomery, D. R., Collins, B. D., & Buffington, J. M. (2003). *Geomorphic effects of wood in rivers*.
- Moore, H. E., & Rutherford, I. D. (2017). Lack of maintenance is a major challenge for stream restoration projects. *River Research and Applications*, 33(9), 1387-1399. <https://doi.org/10.1002/rra.3188>
- Morandi, B., & Piégay, H. (2017). *Restauration de cours d'eau en France: Comment les définitions et les pratiques ont-elles évolué dans le temps et dans l'espace, quelles pistes d'action pour le futur?*
- Moravek, J. A., Andruss, M., Connaughton, A., Miller, J., Garrity, M., Kirksey, K., & Fairfax, E. (2025). Using beaver capacity models: The importance of local knowledge. *Restoration Ecology*, n/a(n/a), e70135. <https://doi.org/10.1111/rec.70135>

- Morizot, B. (2024). *Rendre l'eau à la terre | Actes Sud*. <https://www.actes-sud.fr/catalogue/nature-et-environnement/rendre-leau-la-terre>
- Muhawenimana, V., Wilson, C. A. M. E., Nefjodova, J., & Cable, J. (2021). Flood attenuation hydraulics of channel-spanning leaky barriers. *Journal of Hydrology*, 596, 125731. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125731>
- Murphy, M. L., Heifetz, J., Johnson, S. W., Koski, K. V., & Thedinga, J. F. (1986). Effects of Clear-cut Logging with and without Buffer Strips on juvenile Salmonids in Alaskan Streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 43(8), 1521-1533. <https://doi.org/10.1139/f86-190>
- Nagayama, S., & Nakamura, F. (2010). Fish habitat rehabilitation using wood in the world. *Landscape and Ecological Engineering*, 6(2), 289-305. <https://doi.org/10.1007/s11355-009-0092-5>
- Naiman, R. J., Johnston, C. A., & Kelley, J. C. (1988). Alteration of North American Streams by Beaver: The structure and dynamics of streams are changing as beaver recolonize their historic habitat. *BioScience*, 38(11), 753-762. <https://doi.org/10.2307/1310784>
- Naiman, R. J., Melillo, J. M., & Hobbie, J. E. (1986). Ecosystem Alteration of Boreal Forest Streams by Beaver (*Castor Canadensis*). *Ecology*, 67(5), 1254-1269. <https://doi.org/10.2307/1938681>
- Naiman, R. J., Pinay, G., Johnston, C. A., & Pastor, J. (1994). Beaver Influences on the Long-Term Biogeochemical Characteristics of Boreal Forest Drainage Networks. *Ecology*, 75(4), 905-921. <https://doi.org/10.2307/1939415>
- Needham, R. J. (2024). *Quantification of the Response of Brown Trout (Salmo trutta) to Habitat Modification by Reintroduced Eurasian Beaver (Castor fiber): Implications for River Management in Great Britain* [Phd, University of Southampton]. <https://eprints.soton.ac.uk/491229/>
- Needham, R. J., Zabel, R. W., Roberts, D., & Kemp, P. S. (2025). The impact of reintroduced Eurasian beaver (*Castor fiber*) dams on the upstream movement of brown trout (*Salmo trutta*) in upland areas of Great Britain. *PLOS ONE*, 20(2), e0313648. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313648>
- Neumayer, M., Teschemacher, S., Schloemer, S., Zahner, V., & Rieger, W. (2020). Hydraulic Modeling of Beaver Dams and Evaluation of Their Impacts on Flood Events. *Water*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/w12010300>
- Nummi, P. (1989). Simulated Effects of the Beaver on Vegetation, Invertebrates and Ducks. In *Annales Zoologici Fennici* (Vol. 26, p. 43-52).
- Nyssen, J., Pontzele, J., & Billi, P. (2011). Effect of beaver dams on the hydrology of small mountain streams: Example from the Cheval in the Ourthe Orientale basin, Ardennes, Belgium. *Journal of Hydrology*, 402(1-2), 92-102. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.008>
- Oregon department of forestry, & Oregon department of fish and wildlife. (1995). *A guide to placing large wood in streams*.
- Organde, D., Arnaud, P., Fine, J. A., Fouchier, C., Folton, N., & Lavabre, J. (2013). Régionalisation d'une méthode de prédétermination de crue sur l'ensemble du territoire français: La méthode SHYREG. *Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science*, 26(1), 65. <https://doi.org/10.7202/1014920ar>
- Parker, H., & Rønning, Ø. C. (2007). Low potential for restraint of anadromous salmonid reproduction by beaver *Castor fiber* in the Numedalslågen River catchment, Norway. *River Research and Applications*, 23(7), 752-762. <https://doi.org/10.1002/rra.1008>
- Parkyn, S. M., Meleason, Mark A., & and Davies-Colley, R. J. (2009). Wood enhances crayfish (*Paraneohaps planifrons*) habitat in a forested stream. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 43(3), 689-700. <https://doi.org/10.1080/002883309090510034>
- Persico, L., & Meyer, G. (2009). Holocene beaver damming, fluvial geomorphology, and climate in Yellowstone National Park, Wyoming. *Quaternary Research*, 71, 340-353. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2008.09.007>
- Peterson, S. R., & Low, J. B. (1977). Waterfowl Use of Uinta Mountain Wetlands in Utah. *The Journal of Wildlife Management*, 41(1), 112-117. <https://doi.org/10.2307/3800099>
- Piégay, H., Arnaud, F., Belletti, B., Cassel, M., Marteau, B., Riquier, J., Rousson, C., & Vazquez-Tarrio, D. (2023). Why Consider Geomorphology in River Rehabilitation? *Land*, 12(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/land12081491>

- Piégay, H., Cottet, M., & Lamouroux, N. (2020). Innovative approaches in river management and restoration. *River Research and Applications*, 36(6), 875-879. <https://doi.org/10.1002/rra.3667>
- Piégay, H., & Gurnell, A. M. (1997). Large woody debris and river geomorphological pattern: Examples from S.E. France and S. England. *Geomorphology*, 19(1-2), 99-116. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(96\)00045-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(96)00045-1)
- Pilliod, D. S., Rohde, A. T., Charnley, S., Davee, R. R., Dunham, J. B., Gosnell, H., Grant, G. E., Hausner, M. B., Huntington, J. L., & Nash, C. (2018). Survey of Beaver-related Restoration Practices in Rangeland Streams of the Western USA. *Environmental Management*, 61(1), 58-68. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0957-6>
- Pollock, M. M., Beechie, T. J., & Jordan, C. E. (2007a). Geomorphic changes upstream of beaver dams in Bridge Creek, an incised stream channel in the interior Columbia River basin, eastern Oregon. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(8), 1174-1185. <https://doi.org/10.1002/esp.1553>
- Pollock, M. M., Beechie, T. J., & Jordan, C. E. (2007b). Geomorphic changes upstream of beaver dams in Bridge Creek, an incised stream channel in the interior Columbia River basin, eastern Oregon. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(8), 1174-1185. <https://doi.org/10.1002/esp.1553>
- Pollock, M. M., Beechie, T. J., Wheaton, J. M., Jordan, C. E., Bouwes, N., Weber, N., & Volk, C. (2014). Using Beaver Dams to Restore Incised Stream Ecosystems. *BioScience*, 64(4), 279-290. <https://doi.org/10.1093/biosci/biu036>
- Pollock, M. M., Heim, M., & Werner, D. (2003). *Hydrologic and Geomorphic Effects of Beaver Dams and Their Influence on Fishes*.
- Pollock, M. M., Naiman, R. J., Erickson, H. E., Johnston, C. A., Pastor, J., & Pinay, G. (1995). Beaver as Engineers: Influences on Biotic and Abiotic Characteristics of Drainage Basins. In *Linking Species & Ecosystems* (p. 117-126). Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1773-3_12
- Pollock, M., Wheaton, J., Bouwes, N., Volk, C., Weber, N., & Jordan, C. (2012). Working with Beaver to Restore Salmon Habitat in the Bridge Creek Intensively Monitored Watershed-Design Rationale and Hypotheses. *NOAA Technical Memorandum, NMFS-NWFSC-120*, 1-47.
- Polvi, L. E., & Wohl, E. (2012). The beaver meadow complex revisited - the role of beavers in post-glacial floodplain development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(3), 332-346. <https://doi.org/10.1002/esp.2261>
- Polvi, L. E., & Wohl, E. (2013). Biotic Drivers of Stream Planform: Implications for Understanding the Past and Restoring the Future. *BioScience*, 63(6), 439-452. <https://doi.org/10.1525/bio.2013.63.6.6>
- Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Tignor, M., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, L., Lösschke, M., Möller, O., Okem, & Rama. (2022). *IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Puttock, A., Graham, H. A., Ashe, J., Luscombe, D. J., & Brazier, R. E. (2021). Beaver dams attenuate flow: A multi-site study. *Hydrological Processes*, 35(2), e14017. <https://doi.org/10.1002/hyp.14017>
- Puttock, A., Graham, H. A., Cunliffe, A. M., Elliott, M., & Brazier, R. E. (2017). Eurasian beaver activity increases water storage, attenuates flow and mitigates diffuse pollution from intensively-managed grasslands. *Science of The Total Environment*, 576, 430-443. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.122>
- Quiniou, M., & Piton, G. (2022). *Embâcles: Concilier gestion des risques et qualité des milieux. Guide de diagnostic et de recommandations* (p. 135). hal-03621373. <https://hal.science/hal-03621373v1>
- Redin, A., & Sjöberg, G. (2013). Effects of Beaver Dams on Invertebrate Drift in Forest Streams. *Sumarski list*, 630*151(001), 597-607.
- Reverdy, Z., Girard, S., Carluer, N., & Pinjon, S. (2025). *Ralentir et conserver l'eau dans les têtes de bassin versant: Enjeux, solutions et évaluation des effets hydrologiques* [Report, INRAE; ENS de Lyon]. <https://hal.inrae.fr/hal-05094198>
- Richmond, A. D. (1994). *Large woody debris in mountain streams—Master Thesis*.
- Risch, A., & Pomati, F. (2025). *Castor et biodiversité | info fauna*.

https://www.infofauna.ch/fr/conservation/2024_cas-tor-et-biodiversite#gsc.tab=0

Roni, P., Beechie, T., Pess, G., & Hanson, K. (2015). Wood placement in river restoration : Fact, fiction, and future direction. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 72(3), 466-478. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2014-0344>

Roni, P., Hanson, K., & Beechie, T. (2008). Global Review of the Physical and Biological Effectiveness of Stream Habitat Rehabilitation Techniques. *North American Journal of Fisheries Management*, 28(3), 856-890. <https://doi.org/10.1577/M06-169.1>

Rosell, F., Bozsér, O., Collen, P., & Parker, H. (2005). Ecological impact of beavers *Castor fiber* and *Castor canadensis* and their ability to modify ecosystems. *Mammal Review*, 35(3-4), 248-276. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2907.2005.00067.x>

Ruedemann, R., & Schoonmaker, W. J. (1938). Beaver-Dams as Geologic Agents. *Science*, 88(2292), 523-525.

Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Gurnell, A. M., Marston, R. A., & Stoffel, M. (2016). Recent advances quantifying the large wood dynamics in river basins : New methods and remaining challenges. *Reviews of Geophysics*, 54(3), 611-652. <https://doi.org/10.1002/2015RG000514>

Rupp, R. S. (1955). Beaver-Trout Relationship in the Headwaters of Sunhaze Stream, Maine. *Transactions of the American Fisheries Society*, 84(1), 75-85. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1954\)84\[75:BRITHO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1954)84[75:BRITHO]2.0.CO;2)

Russell, K., Moorman, C., Edwards, J., Metts, B., & Guynn, D. (1999). Amphibian and Reptile Communities Associated with Beaver (*Castor canadensis*) Ponds and Unimpounded Streams in the Piedmont of South Carolina. *Journal of Freshwater Ecology - J FRESHWATER ECOL*, 14, 149-158. <https://doi.org/10.1080/02705060.1999.9663666>

Rutherford, W. H. (1955). Wildlife and Environmental Relationships of Beavers in Colorado Forests. *Journal of Forestry*, 53(11), 803-806. <https://doi.org/10.1093/jof/53.11.803>

Rutten, M. G. (1967). Flat-bottomed glacial valleys, braided rivers and the beaver. *Geologie en Mijnbouw*, 46(10)(3294), 356-360.

Ryan, S. E., Bishop, E. L., & Daniels, J. M. (2014). Influence of large wood on channel morphology and sediment storage in headwater mountain streams, Fraser Experimental Forest, Colorado. *Geomorphology*, 217, 73-88. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.046>

Salyer, J. C. (1935). *Preliminary report on the beaver-trout investigation.*

Sedell, J. R., Bisson, P. A., Swanson, F. J., & Gregory, S. V. (1988). *From the Forest to the Sea : A Story of Fallen Trees, Chapter 3. What We Know About Large.*

Shahverdian, S., Wheaton, J., Bennett, S., Bouwes, N., & Maestas, J. (2019). *Chapter 1 - Background and Purpose : In Low-Tech Process-Based Restoration of Riverscapes: Design Manual.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14138.03529>

Shetter, D. S., & Whalls, M. J. (1955). Effect of Impoundment on Water Temperatures of Fuller Creek, Montmorency County, Michigan. *The Journal of Wildlife Management*, 19(1), 47. <https://doi.org/10.2307/3797551>

Shields, F. D., & Smith, R. H. (1992). *Effects of large woody debris removal on physical characteristics of a sand-bed river.* <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aqc.3270020203>

Siemens, M. (2005). Praktische Erfahrungen mit dem Einbau von Totholz zur Förderung von Fischfauna und Fischerei. *Wertermittlungsfor*, 23(52-57).

Smith, M. E., Driscoll, C. T., Wyskowski, B. J., Brooks, C. M., & Cosentini, C. C. (1991). Modification of stream ecosystem structure and function by beaver (*Castor canadensis*) in the Adirondack Mountains, New York. *Canadian Journal of Zoology*, 69(1), 55-61. <https://doi.org/10.1139/z91-009>

Smith, R. D., Sidle, R. C., Porter, P. E., & Noel, J. R. (1993). Effects of experimental removal of woody debris on the channel morphology of a forest, gravel-bed stream. *Journal of Hydrology*, 152(1), 153-178. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90144-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90144-X)

Snodgrass, J. W., & Meffe, G. K. (1998). *Influence of Beavers on Stream Fish Assemblages : Effects of Pond Age and Watershed Position.*

Soga, M., & Gaston, K. J. (2018). *Shifting baseline syndrome : Causes, consequences, and implications.*

<https://esajournals-onlinelibrary-wiley-com.bibelec.univ-lyon2.fr/doi/10.1002/fee.1794>

Steeb, N., Badoux, A., Boes, R., Gasser, E., Rickenmann, D., Rickli, C., Ruiz-Villanueva, V., Schalko, I., Schmocker, L., Schwarz, M., Stoffel, M., & Weitbrecht, V. (2021). WoodFlow project—Large wood management in rivers. *14th Congress INTERPRAEVENT 2021. Natural Hazards in a Changing World*, 275-283. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/510993>

Steeb, N., Ruiz-Villanueva, V., Badoux, A., Rickli, C., Mini, A., & Rickenmann, D. (2023). *Geospatial modelling of large wood supply to rivers : A state-of-the-art model comparison in Swiss mountain river catchments*. <https://doi.org/10.5194/esurf-2022-69>

Stringer, A. P., & Gaywood, M. J. (2016). The impacts of beavers *Castor* spp. On biodiversity and the ecological basis for their reintroduction to Scotland, UK. *Mammal Review*, 46(4), 270-283. <https://doi.org/10.1111/mam.12068>

Suzuki, N., & McComb, W. (1998). *Habitat classification models for beaver (Castor canadensis) in the streams of the central Oregon Coast Range*. Washington State University. <https://rex.libraries.wsu.edu/esploro/outputs/journalArticle/Habitat-classification-models-for-beaver-Castor/99900502833901842>

Swanson, F. J., Lienkaemper, G. W., & Sedell, J. R. (1976). History, physical effects, and management implications of large organic debris in western Oregon streams. *Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-056*. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 15 p, 056. <https://research.fs.usda.gov/treesearch/22618>

Swanston, D. N. (1991). Natural processes. In *Influences of Forest and Rangeland Management on Salmonid Fishes and Their Habitats* (W. R. Meehan). American Fisheries Society. <https://fisheries.org/bookstore/all-titles/special-publications/x51015xm/>

Swinen, K. R. R., Rutten, A., Nyssen, J., & Leirs, H. (2019). Environmental factors influencing beaver dam locations. *The Journal of Wildlife Management*. <https://wildlife.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jwmg.21601>

Talabere, A. G. (2002). *Influence of water temperature and beaver ponds*.

Tambets, M., Jarvekulg, R., Veeroja, R., Tambets, J., & Saat, T. (2005). Amplification of negative impact of beaver dams on fish habitats of rivers in extreme climatic conditions. *Journal of Fish Biology*, 67, 275-276.

Tate, K. W., Lancaster, D. L., & Lile, David. F. (2007). Assessment of thermal stratification within stream pools as a mechanism to provide refugia for native trout in hot, arid rangelands. *Environmental Monitoring and Assessment*, 124(1-3), 289-300. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9226-5>

Terrier, B., Piégay, H., Liébault, F., Dufour, S., Belletti, B., & Le Lay, Y. F. (2019). *Les rivières en tresses, éléments de connaissance—Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse* (Eau et Connaissance).

Terrier, B., Sureau-Blanchet, N., Pressurot, A., Stroffek, S., Simmonot, J.-L., & Dubuis, J. (2016). *Délimiter l'espace de bon fonctionnement des cours d'eau—Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse* (Guide Technique du Sdage).

Thevenet, A., Citterio, A., & Piegay, H. (1998). A new methodology for the assessment of large woody debris accumulations on highly modified rivers (example of two French Piedmont rivers). *Regulated Rivers: Research & Management*, 14(6), 467-483. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199811\)14:6<467::AID-RRR514>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199811)14:6<467::AID-RRR514>3.0.CO;2-X)

Thompson, M. S. A., Brooks, S. J., Sayer, C. D., Woodward, G., Axmacher, J. C., Perkins, D. M., & Gray, C. (2017). *Large woody debris "rewilding" rapidly restores biodiversity in riverine food webs*.

Urabe, H., & Nakano, S. (1998). Contribution of woody debris to trout habitat modification in small streams in secondary deciduous forest, northern Japan. *Ecological Research*, 13(3), 335-345. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.1998.00273.x>

Van Leeuwen, Z. R., Klaar, M. J., Smith, M. W., & Brown, L. E. (2024). Quantifying the natural flood management potential of leaky dams in upland catchments, Part II: Leaky dam impacts on flood peak magnitude. *Journal of Hydrology*, 628, 130449. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130449>

Ward, J. v., Tockner, K., & Schiemer, F. (1999). Biodiversity of floodplain river ecosystems: Ecotones and connectivity1. *Regulated Rivers: Research & Management*, 15(1-3), 125-139. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-)

1646(199901/06)15:1/3<125::AID-RRR523>3.0.CO;2-E

Warren, D. R., Bernhardt, E. S., Hall Jr., R. O., & Likens, G. E. (2007). Forest age, wood and nutrient dynamics in headwater streams of the Hubbard Brook Experimental Forest, NH. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(8), 1154-1163. <https://doi.org/10.1002/esp.1548>

Weber, N., & Bouwes, N. (2017). *Lessons in Beaver Based Restoration from the Bridge Creek IMW*.

Weber, N., Bouwes, N., Pollock, M. M., Volk, C., Wheaton, J. M., Wathen, G., Wirtz, J., & Jordan, C. E. (2017). Alteration of stream temperature by natural and artificial beaver dams. *PLOS ONE*, 12(5), e0176313. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176313>

Webster, J. R., Tank, J. L., Wallace, J. B., Meyer, J. L., Eggert, S. L., Ehrman, T. P., Ward, B. R., Bennett, B. L., Wagner, P. F., & McTammany, M. E. (2000). Effects of litter exclusion and wood removal on phosphorus and nitrogen retention in a forest stream. *Internationale Vereinigung Für Theoretische Und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03680770.1998.11901453>

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*, 42(6), 2005WR004560. <https://doi.org/10.1029/2005WR004560>

Westbrook, C. J., Ronnquist, A., & Bedard-Haughn, A. (2020). Hydrological functioning of a beaver dam sequence and regional dam persistence during an extreme rainstorm. *Hydrological Processes*, 34(18), 3726-3737. <https://doi.org/10.1002/hyp.13828>

Wheaton, J. M., Bennett, S. N., Bouwes, N., Maestas, J. D., & Shahverdian, S. (2019). *Low-Tech Process-Based Restoration of Riverscapes : Design Manual. Version 1.0*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19590.63049/2>

Wheaton, J., Wheaton, A., Maestas, J., Bennett, S., Bouwes, N., Shahverdian, S., Camp, R., Jordan, C., Macfarlane, W., Portugal, E., & Weber, N. (2019). *Low-Tech Process-Based Restoration of Riverscapes : Pocket Field Guide*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28222.13123/1>

Wilén, B. O., Mac Connell, B. P., & Mader, D. L. (1975). *The effects of beaver activity on water quality and water quantity. Proceedings of the Society of American Foresters:235-240*.

Wohl, E. (2005). Compromised Rivers : Understanding Historical Human Impacts on Rivers in the Context of Restoration. *Ecology and Society*, 10(2). <https://www.jstor.org/stable/26267717>

Wohl, E. (2013). Floodplains and wood. *Earth-Science Reviews*, 123, 194-212. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.009>

Wohl, E. (2016). *Messy rivers are healthy rivers : The implications of physical complexity for river ecosystems*.

Wohl, E., & Inamdar, S. (2025). Beaver Versus Human : The Big Differences in Small Dams. *WIREs Water*, 12(2), e70019. <https://doi.org/10.1002/wat2.70019>

Wohl, E., Kramer, N., Ruiz-Villanueva, V., Scott, D. N., Comiti, F., Gurnell, A. M., Piegay, H., Lininger, K. B., Jaeger, K. L., Walters, D. M., & Fausch, K. D. (2019). The Natural Wood Regime in Rivers. *BioScience*, 69(4), 259-273. <https://doi.org/10.1093/biosci/biz013>

Wohl, E., Lane, S. N., & Wilcox, A. C. (2015). The science and practice of river restoration. *Water Resources Research*, 51(8), 5974-5997. <https://doi.org/10.1002/2014WR016874>

Wohl, E., Lininger, K. B., Fox, M., Baillie, B. R., & Erskine, W. D. (2017). Instream large wood loads across bioclimatic regions. *Forest Ecology and Management*, 404, 370-380. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.013>

Wohl, E., Rathburn, S., Dunn, S., Iskin, E., Katz, A., Marshall, A., Means-Brous, M., Scamardo, J., Triantafyllou, S., & Uno, H. (2024). Geomorphic context in process-based river restoration. *River Research and Applications*, 40(3), 322-340. <https://doi.org/10.1002/rra.4236>

Wohl, E., & Scott, D. N. (2017). Wood and sediment storage and dynamics in river corridors. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(1), 5-23. <https://doi.org/10.1002/esp.3909>

Wohl, E., Scott, D. N., & Yochum, S. E. (2019). *Managing for large wood and beaver dams in stream corridors* (No. RMRS-GTR-404; p. RMRS-GTR-404).

U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-404>

Yeager, L. E., & Hill, R. R. (1954). *Beaver management problems in western public lands. Transactions of the North American Wildlife and Natural Resources Conference, 19, 462-479.*

Zahner, V., Lorz, C., & Schloemer, S. (2015). *Die Wirkung des europäischen Bibers (Castor fiber) auf den natürlichen Wasserrückhalt.*

Zeedyk, B., & Clothier, V. (2009). *Let The Water Do The Work: Induced Meandering, an Evolving Method for Restoring Incised Channels | Stream*

Dynamics, Inc. <https://streamdynamics.us/let-water-do-work-induced-meandering-evolving-method-restoring-incised-channels>

Zigann, J. M., Gersberg, R. M., & Lüderitz, V. (2023). Effects of Deadwood on Macroinvertebrate Assemblages in Three Sand-Type Lowland Streams. *Ecologies, 4(1), Article 1.* <https://doi.org/10.3390/ecologies4010008>

Zika, U., & Peter, A. (2002). The introduction of woody debris into a channelized stream: Effect on trout populations and habitat. *River Research and Applications, 18(4), 355-366.* <https://doi.org/10.1002/rra.677>

Sitographie

- Sites Web Association Rivière Rhône-Alpes Auvergne. URL : <https://www.arraa.org/>
- Cartographie des projets LTBP. URL : <https://pbr.riverscapes.net/projects>
- Système de visualisation cartographique interactif du projet MAKAHO. URL : <https://makaho.sk8.inrae.fr/>
- Cartographie des projets de type 'Stage 0'. URL : <https://stagezeroriverrestoration.com/explore.html>
- Vidéo en ligne. RUIZ-VILLANUEVA, V. (2020). "Keynote Lecture - When a Tree Falls in a River... a Cascade Process Begins". 10th International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2020). Campus LyonTech la Doua, Villeurbanne, FRA. URL : <https://www.iahr.org/index/video/92?s=09>
- Site internet de l'entreprise Swift Water Design. URL : <https://swiftwaterdesign.com/>
- Site Internet de l'OAEC. URL : <https://oaec.org/>
- Site de l'association « A l'eau Castor » pour la réintroduction du castor en Arriège. URL : <https://www.helloasso.com/associations/a-l-eau-castor>
- Outil de retranscription en ligne Turboscribe. URL : <https://turboscribe.ai/fr>
- OFB, page du réseau Castor. URL : <https://professionnels.ofb.fr/fr/reseau-castor>
- Journal en ligne Le Pays Roannais –« À L'Arbresle, le syndicat de rivières teste l'approche "low tech" pour redonner vie à la Brévenne ». URL : https://www.le-pays.fr/arbresle-69210/actualites/a-l-arbresle-le-syndicat-de-rivieres-teste-l-approche-low-tech-pour-redonner-vie-a-la-brevenne_14656841/
- Vidéo en ligne. Réseau Rivière TV, Ecole de recherche H2O Lyon (10/06/2025). « Restauration des rivières selon le modèle 'stage 0': du concept à l'application ». URL : <https://www.youtube.com/watch?v=IQzqE6wKjEM>
- Site internet de l'entreprise Biohabitats. URL : <https://www.biohabitats.com/>
- Site internet de l'entreprise River Design Group. URL : <https://riverdesigngroup.com/>
- Making a Zuni Bowl. URL : <https://www.milkwood.net/2011/11/04/making-a-zuni-bowl-let-the-water-do-the-work/>
- Vidéo en ligne. Office national des forêts. « Zones humides : Zoom sur la restauration de La Clauge ». URL : <https://www.youtube.com/watch?v=H6Nj7gQACMw>
- Journal en ligne L'indépendant. « Dans l'Aude, des Californiens initient le monde du milieu aquatique aux vertus des barrages de type castor pour régénérer les rivières ». URL : <https://www.lindependant.fr/2025/04/27/dans-laude-des-californiens-initient-le-monde-du-milieu-aquatique-aux-vertus-des-barrages-de-type-castor-pour-regenerer-les-rivieres-12655467.php>
- Page de l'ARRA sur le projet Génibois : <https://www.arraa.org/enquete-sur-l-utilisation-du-bois-mort-pour-la-restauration-des-cours-d-eau-participez-au-projet>
- Bd Topo, base de donnée publiée par l'IGN. URL : <https://geoservices.ign.fr/bdtopo>

Table des matières

Sommaire	2
Table des abréviations.....	3
1. Introduction	4
2. Étude Bibliographique	9
2.1. Le bois en rivière	10
2.1.1. Hydromorphologie	10
2.1.2. Risques liés au bois en rivière	14
2.1.3. Perception et législation	14
2.1.4. Effets sur la faune piscicole	15
2.1.5. Impacts sur la faune aquatique non piscicole.....	17
2.1.6. Impact sur le régime hydrologique.....	18
2.1.7. Effets sur la qualité physico chimique de l'eau	18
2.2. Les barrages naturels de castors	19
2.2.1. Hydromorphologie	20
2.2.2. Effets sur la faune piscicole	21
2.2.3. Autres effets sur la faune	25
2.2.4. Effets sur la flore	26
2.2.5. Effets sur la qualité physico chimique de l'eau	26
2.2.6. Impact sur le régime hydrologique.....	31
2.3. Restauration Low-Tech basées sur les processus	33
2.3.1. Objectifs et processus ciblés	35
2.3.2. Retour d'expérience sur la rivière Bridge Creek.....	38
2.4. Discussion sur l'étude bibliographique.....	40
3. Etude d'enquêtes	43
3.1. Contexte et objectifs.....	43
3.2. Méthode.....	44
3.3. Résultats	45
3.3.1. Analyse transversale des entretiens avec les bureaux d'études.....	45
3.3.2. Analyse transversale des entretiens avec les structures GEMAPI.....	49
3.3.3. Analyse transversale des organismes de pêche.....	53
3.4. Discussion sur les entretiens d'enquêtes	54
4. Champ d'application et étude d'opportunité sur le bassin RM&C.....	56
4.1. Critères de viabilité d'un projet Low-Tech basé sur les processus	56
4.1.1. Introduction.....	56

4.1.2. Critère d'espace disponible, de largeur de fond de vallée et d'occupation des sols	58
4.1.3. Analyse des risques d'embâcles.....	59
4.1.4. Critère d'érodabilité des berges	59
4.1.5. Critères de dégradation et d'apports solides	59
4.1.6. Critère de pente du chenal	60
4.1.7. Critères de puissance	60
4.1.8. Critère de largeur du cours d'eau, d'hydrographie et de section mouillée	62
4.1.9. Critère de boisement et de ripisylve.....	63
4.1.10. Critères de présence potentielle du castor et son écologie.....	64
4.1.11. Autres critères.....	64
4.2. Cartographie des tronçons les plus favorables à la restauration	65
4.2.1. Introduction et objectifs	65
4.2.2. Matériel et méthode	65
4.2.3. Résultats	71
4.2.4. Discussion et perspectives sur la cartographie	73
5. Discussion	75
6. Conclusion	80
7. Glossaire	81
Bibliographie	82
Sitographie	97
Table des matières	98
8. Annexes.....	100
8.1. Annexe 1 : Questionnaire d'enquête sociologique sur les techniques de restauration Low-Tech.....	100
8.2. Annexe 2 : Tableau récapitulatif des entretiens avec les bureaux d'études	101
8.3. Annexe 3 : Tableau de synthèse des entretiens avec les structures GEMAPI	111
8.4. Annexe 4 : Tableau de synthèse des entretiens avec les organismes de pêche	119
8.5. Annexe 5 : Résultats chiffrés de l'analyse cartographique	124
8.6. Annexe 6 : Cartographie des cours du bassin RMC selon la base USRA.....	125
8.7. Annexe 7 : Cartographie des cours d'eau soumis à une pression morphologique	126
8.8. Annexe 8 : Cartographie des tronçons favorables aux techniques LTBP	127
8.9. Annexe 9 : Cartographie des sous-secteurs comprenant des tronçons favorables aux techniques de restauration Low-Techs et basées sur les processus.....	128
8.10. Annexe 10 : Carte de présence du castor en France.....	129
8.11. Annexe 11 : Fiche de présentation du Projet Lierne Véore	130

8. Annexes

8.1. Annexe 1 : Questionnaire d'enquête sociologique sur les techniques de restauration Low-Tech

Perception Générale

- Avez-vous entendu parler des techniques Low-Tech ? Si oui comment ?
- Qu'est que les techniques de restauration Low-Tech et basées sur les processus pour vous ?
- Quelle est votre perception générale du bois en rivière ?
- Quelle est votre perception du castor en rivière ?

Connaissance

- Selon vous, quel est leur objectif et leur fonctionnement ?
- Il y a-t-il des points que vous comprenez mal ? Ou qui sont généralement mal compris sur ces techniques ?
- Quelles sont les avantages de ces techniques de restaurations ?
- Quelles sont leur point faible / limites ?

Positionnement / Débat

- Pensez-vous que les techniques de restauration Low-Tech puissent aider à la restauration d'un cours d'eau ? Incision ?
- Quelles craintes peut-on avoir vis-à-vis de ces techniques nouvelles ?
- Que pensez-vous de leurs impacts sur la Continuité écologique / Qualité d'eau / Impacts sur les poissons / Température ?
- Seriez-vous intéressé pour mettre en place ces techniques au sein de votre structure ?

Pour aller plus loin / Perspectives

- Que pensez-vous du succès de ces techniques en Amérique du Nord ? Est-ce reproductible en France ?
- Ou ces restaurations ont-elles un potentiel ?
- Pensez-vous que ces techniques de restauration ont un avenir durable pour la restauration en France ou sont-elles plutôt un effet de mode passager ? Quelle peut être leur place sur le long terme ?
- Pensez-vous qu'elle puissent remplacer les méthodes de restauration traditionnelles ?
- Comment pensez-vous qu'elles puissent s'intégrer dans le paysage économique de la restauration ?
- Qui convaincre ? Comment ? Quels sont les freins ?

8.2. Annexe 2 : Tableau récapitulatif des entretiens avec les bureaux d'études

	BE1	BE2	BE3	BE4
Perception des techniques Low-Techs et basées sur les processus		<ul style="list-style-type: none"> • Choses similaires existent depuis longtemps (épis érosifs etc..) • Renouvellement de vocabulaire et des objectifs est une évolution positive • Attention portée aux techniques (« Low-Tech » ou non) prend le pas sur l'ambition des projets (relancer des processus) qui devrait rester primordiale • Partage pleinement l'ambition de relancer des processus mais n'est pas généralisé dans le monde de la restauration • L'efficacité de ces méthodes dépend étroitement des objectifs visés. • Ces techniques constituent un outil supplémentaire à disposition de l'ingénierie et de la conception, mais elles ne peuvent pas être appliquées de manière universelle sur l'ensemble des linéaires de cours d'eau • L'efficacité de ces méthodes dépend étroitement des objectifs visés. Si l'objectif est de créer des habitats, de reconnecter les marges du cours d'eau ou d'influencer la nappe phréatique pour faire remonter le niveau d'eau visible, ces techniques peuvent être pertinentes • A partir de quel niveau de complexité ou d'industrialisation une technologie cesse-t-elle d'être considérée comme Low-Tech ? 	<ul style="list-style-type: none"> • Nouveau nom donné à des techniques anciennes, telles que la gestion passive (absence d'intervention sur la ripisylve) ou la fixation d'embâcles à des fins piscicoles ou pour lutter contre l'érosion, qui existent depuis plusieurs décennies bien que la rapidité des résultats puisse varier • Le fait de restaurer les écosystèmes, de moins participer au drainage, à l'accélération des flux, à l'utilisation du bois est déjà discuté depuis un certain nombre d'années. Le concept a été un peu idéalisé • L'objectif principal est de changer nos modes d'action et accepter de laisser les systèmes naturels évoluer sans intervention systématique. Dans ce sens les techniques Low-Tech ne sont pas vues comme un franc changement de paradigme, on change seulement la manière de faire 	<ul style="list-style-type: none"> • Technique comme une autre qui va répondre à certains objectifs et intérêts dans certains contextes. Ne répond qu'à certaines fonctionnalités de l'hydrosystème • N'agit pas sur les causes profondes des dégradations (déficit sédimentaire...)
Sur le mouvement en France et l'effet de mode	<ul style="list-style-type: none"> • Effet de mode pas lancé correctement, communication délétère et préjudiciable • Buzz peut avoir du bon s'il peut éclairer sur les bénéfices du bois, mais 	<ul style="list-style-type: none"> • Visionnaire de s'inspirer de l'observation d'une espèce pour repenser la manière d'aborder et de restaurer les cours d'eau. L'esprit de cette 	<ul style="list-style-type: none"> • Phénomène de médiatisation et que certains auteurs arrivent à populariser et à atteindre une large audience est 'chouette' 	<ul style="list-style-type: none"> • Coté satisfaisant : déclenche des énergies et peut aider à la popularisation de la restauration des cours d'eau qui peut aider à baisser la lourdeur de la

	<p>peut aussi polariser et refermer les personnes plus conservatrices</p> <ul style="list-style-type: none"> •Risque que l'effet de mode se retourne de manière négative •Formation qui manque de profondeur et compétence technique •Effet de mode entraine des personnes qui recherchent de la visibilité, pas toujours les plus compétentes •L'effet de mode entraine une mise sous les projecteurs de ces types de restaurations, aujourd'hui très regardées. Le risque serait l'effet se renverse avec un événement négatif 	<p>démarche est totalement en accord avec leur propre approche</p> <ul style="list-style-type: none"> •Suscite des réflexions intéressantes •Risque qu'elles deviennent une « marque » à part entière, avec une dimension commerciale et une tendance à leur systématisation comme cela a déjà pu se produire avec le génie végétal 	<ul style="list-style-type: none"> •Ouvrage de B. Morizot plutôt comme un ouvrage de vulgarisation à destination du grand public. Si un certain nombre de choses était connues, le travail de mise en forme, de mise en valeur est chouette •L'engouement autour de ces techniques témoigne en partie d'un besoin de réappropriation des cours d'eaux, ce qui est assez chouette •L'engouement autour du castor peut devenir contre-productif, être tourné en dérision ou diviser les parties prenantes 	<p>communication auprès des décisionnaires</p> <ul style="list-style-type: none"> •Entraine des travers : deux projets stoppés pour faire du Low-Tech à cause de l'effet de mode autour du LowTech, première fois que l'on impose à ce BE une façon de faire. •Trop vendu comme une solution miracle, manque de nuance •OFB et Agence de l'eau suivent trop l'effet de mode •Comparaison avec l'arrivée du génie végétal : les deux types de techniques continuent à cohabiter, avec leurs avantages et inconvénients
Incompréhensions et Questionnements	<ul style="list-style-type: none"> •Définition du terme Low-Tech 	<ul style="list-style-type: none"> •Le fait que le terme Low-Tech définisse les moyens utilisés n'était pas complètement clair pour un des intervenants 	<ul style="list-style-type: none"> •Doute que les structures GEMAPI comprennent ces techniques si mal, alors qu'ils ont souvent fait les mêmes formations que les BE, estime que l'intérêt de ces techniques est bien compris •S'attend toutefois à ce que certains essaient d'implanter des barrages de castors dans des rivières très dynamiques ou dans des cours d'eau non incisés, ce qui pourra entraîner des erreurs d'application 	<ul style="list-style-type: none"> •Projets Low-Techs imposés dans des contextes pas forcément optimaux
Perception générale du bois en rivière et des castors	<ul style="list-style-type: none"> •Positive, y fait appel dans ses projets •Place centrale dans ses réflexions •Se heurte au manque d'ambition des élus 	<ul style="list-style-type: none"> •Positive, y fait appel dans ses projets depuis longtemps (en impliquant des machines) •Dimension poétique des castors appréciable •Castor peut rendre les milieux aquatiques plus attractif mais action limitée en contexte anthropisé •Si cette espèce favorise une meilleure acceptation sociale d'un certain désordre ou « chaos » dans les cours 	<ul style="list-style-type: none"> •Le bois constitue un élément fondamental des processus physiques et biologiques des milieux aquatiques • D'importantes sommes sont investies chaque année dans l'entretien de la végétation, alors que les situations nécessitant réellement ces interventions sont relativement rares=Gaspillage lié à la perception des élus •Dans les zones à faible enjeu, il serait préférable de laisser davantage de 	<ul style="list-style-type: none"> •Historiquement le bois n'était pas intégré dans les projets de restauration, cela a changé dans les dernières années. Depuis 10/15 ans il était proposé par ce BE mais très peu accepté, depuis 5/6 ans ce BE l'intègre systématiquement dans ses projets •Inspiration des états unis en avance sur ce sujet (conférence IS

		<p>d'eau, cela représente un aspect très positif</p> <ul style="list-style-type: none"> • Son action reste limitée en l'absence d'apports sédimentaires suffisants 	<p>bois dans les cours d'eau et de limiter les interventions sur les boisements riverains, favorisant ainsi une régénération naturelle du bois</p> <ul style="list-style-type: none"> • Peu cohérent de réintroduire du bois à l'aide de méthodes Low-Tech si, parallèlement, la végétation riveraine continue d'être entretenue de manière intensive • Castor pourrait être réintroduit plus largement, ce qui permettrait d'obtenir naturellement les effets recherchés par les dispositifs Low-Tech, sans intervention humaine supplémentaire 	<p>Rivers, Biohabitat BE américain.⁵⁴</p> <p>Une publication mentionne que la réponse écologique est 2x plus rapide avec du bois</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les financeurs et guides techniques ont joué un rôle pour éduquer sur l'importance du bois • Effets des barrages de castor positif mais dépend des usages humains autour. Il faut comparer les impacts avec services rendus 	
Avantage techniques	des	<ul style="list-style-type: none"> • Relancer des processus naturels • Recréer des habitats • Rapidité de mise en œuvre • Intervenir sur petits cours /tête de bassins ou les programmes de restauration ne sont pas prioritaires 	<ul style="list-style-type: none"> • Réintroduction de bois mort • Réhumidifier les sols • Favoriser des marges de cours d'eau beaucoup plus vivantes • Techniques invitent à s'interroger et exige une réflexion approfondie • Outil supplémentaire à disposition de l'ingénierie/conception 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible technicité, réduction des interventions • Coût carbone et financier moindre • Atout majeur : permet aux structures GEMAPI de réaliser ces techniques en régie sans recourir systématiquement aux Bureaux d'études. Permet à ces structures de reprendre la main sur la gestion de leur cours d'eau. Certaines problématiques nécessitent un temps long, et les structures GEMAPI sont les seules structures capables de suivre ce temps long 	<ul style="list-style-type: none"> • Favorise les interactions nappe/rivière. Les nappes alluviales sont un enjeu majeur pour stocker l'eau dans un contexte de changement climatique • Favorise la connectivité latérale • Faible coût
Limites		<ul style="list-style-type: none"> • Conditions permettent rarement de faire uniquement du Low-Tech • Pas forcément faible coût 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne peuvent pas être appliquées de manière universelle sur l'ensemble des linéaires de cours d'eau • difficile de traiter l'ensemble d'un tronçon perturbé en une seule fois, approche par étapes • Le bois mort, utilisé comme matériau principal, peut se détériorer plus rapidement que prévu en cas d'assèchement prolongé ou d'humidité 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque de mauvaise compréhension et d'utilisation inadaptée : Il existe une méprise possible sur le fait que ces techniques ne sont pas universelles et ne conviennent pas à tous les contextes. Leur application dans des milieux peu appropriés est regrettable • Problèmes de perception et de communication : Les élus, agriculteurs et riverains peuvent avoir des 	<ul style="list-style-type: none"> • Si l'incision est trop marquée ou structurelle avec déficit sédimentaire

⁵⁴ <https://www.biohabitats.com/>

		<p>excessive, ce qui peut conduire à des résultats inférieurs aux attentes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Il faut composer avec la réalité des crues et des événements hydrologiques majeurs : la chute d'un arbre ou une crue importante peuvent entraîner la disparition de ces dispositifs, qui sont par nature « fusibles » et donc temporaires • Dans certains cas, le déficit sédimentaire peut être structurel ou trop important pour que les solutions Low-Tech permettent de corriger une incision marquée 	<p>réticences ou des préjugés, percevant parfois ces approches comme de simples « inventions d'écologistes marginaux</p> <ul style="list-style-type: none"> • Limites structurelles du système décisionnel : Les décisions restent largement influencées par les conceptions personnelles des décideurs. L'introduction de ces nouvelles techniques ne remet pas fondamentalement en cause cette dynamique 	
<p>Sur les restaurations classiques</p>	<ul style="list-style-type: none"> • N'existe pas pour lui de restaurations 'classiques' ou 'traditionnelles' opposables à ces techniques, n'aime pas cette distinction 	<ul style="list-style-type: none"> • Selon une estimation grossière, au moins 60% des projets de restauration actuels manquent d'ambition car ils privilégient une vision statique du cours d'eau au détriment de son équilibre dynamique : il s'agit d'une écologie « construite et maîtrisée » • Evoque un exemple récent où, en l'absence de contraintes liées à l'occupation des sols ou à la présence d'infrastructures, il aurait été possible de laisser davantage de place à la dynamique naturelle du cours d'eau, plutôt que de chercher à tout maîtriser 	<ul style="list-style-type: none"> • Crucial d'abandonner l'idée d'une rivière idéale ou d'un écosystème « parfait » à atteindre par la gestion humaine • Laisser les systèmes évoluer sans intervention serait, à ses yeux, la meilleure garantie de leur bonne santé. Si l'objectif était réellement de préserver les milieux pour les générations futures, il serait plus pertinent de laisser la nature suivre son propre rythme • Le secteur de la restauration mobilise des métiers et des budgets importants, notamment ceux de l'Agence de l'eau, et la non-action reste difficilement acceptable dans notre société, où l'on attend des résultats concrets pour justifier les financements • Ses propositions de non-intervention ont souvent été mal reçues, certains estimant qu'il n'était pas légitime d'être rémunéré pour « ne rien faire ». Il critique une forme de gestion « à la 	<ul style="list-style-type: none"> • Le « form-based⁵⁵ » est une réalité dans la restauration • Si le cours d'eau n'a pas d'énergie il est plus pertinent d'agir sur la forme

⁵⁵ Restauration basée sur les formes plutôt que sur les processus

			testostérone », privilégiant des solutions techniques, du béton et des calculs, au détriment de la préservation naturelle <ul style="list-style-type: none"> • L'argument justifiant l'intervention humaine par le niveau de dégradation du milieu est discutable, car il relève davantage d'un choix de paradigme et de la volonté d'obtenir des résultats rapides, souvent dictée par des considérations politiques 	
Critères de conditions favorables/défavorables à leur implantation	<ul style="list-style-type: none"> •Energie suffisante et crues régulières •Profondeur du matériel alluvial • Si la nappe phréatique draine le cours d'eau, alors la structure est inutile • Si le mange berge tape dans du substrat/roche, alors il est inutile • Cours d'eau avec moins d'enjeu, têtes de bassin •Occupation des sols • Certaines caractéristiques topographiques comme la pente ne permettront pas d'implémenter ces techniques •Exemple du projet sur la Rize qui est une aberration technique 	<ul style="list-style-type: none"> •Matériel nécessaire sur site •Impossible sur les grands cours d'eau où l'intervention de machines est obligatoire pour manipuler les structures de bois • Grandes plaines fortement remaniées très adaptées • Ne conviennent pas à toutes les typologies de dysfonctionnements. Un faible transport solide ou une intermittence accrue du cours d'eau limite l'efficacité. Dans certains cas, le déficit sédimentaire peut être structurel ou trop important pour que les solutions Low-Tech permettent de corriger une incision marquée •Cours d'eau ayant la puissance nécessaire •Lorsque des calculs sont réalisés sur la balance sédimentaire et les volumes perdus au cours des dernières décennies (par extraction ou curage), on constate que certains secteurs pourraient retrouver un équilibre, tandis que dans d'autres, le déficit est si profond que l'on n'agit plus à une échelle réellement pertinente • Capacité d'érosion du cours d'eau : tous les cours d'eau n'ont pas aujourd'hui 	<ul style="list-style-type: none"> • Certains contextes sont peu appropriés : trop dynamiques, torrentiels, systèmes plus grands •Cibler en priorité les secteurs où le castor est absent ou peine à se réimplanter, estimant qu'il serait plus intéressant de favoriser la création d'écosystèmes propices à son retour et à sa recolonisation naturelle. Il serait préférable de réintroduire des castors et de les laisser agir naturellement, plutôt que de réaliser des ouvrages mimant leur action •Cours d'eau incisés constituent des contextes particulièrement adaptés à ces techniques de restauration, toutefois, les bénéfices attendus concerneraient surtout la diversification des habitats et les dynamiques biologiques, tandis que les effets morphologiques visant à contrer l'incision ne se manifesteraient qu'à plus long terme 	<ul style="list-style-type: none"> •Avoir les moteurs nécessaires à la régénération des processus : sur le bassin versant les moteurs sont géologiques, relief, climat. A l'échelle du tronçon les moteurs sont l'hydrologie et apports sédimentaires, pente, granulométrie, végétalisation des berges. En termes de géologie, exemple de cours d'eau enfoncés dans un substrat marneux, contexte défavorable. Besoin de puissance de la rivière (Hydrologie et pente) •Incision, perte de connectivité, grosse variabilité des débits sont des contextes favorables, permettent des réponses rapides •Besoin d'espace, le foncier est donc une question centrale •Ordres de grandeur : Puissance spécifique autour de 25/30W/m², seuil de réversibilité pour enclencher des processus. Pente entre 1/1000 et 1/100 •Largeur de cours d'eau inférieure à 10/20m •Bourgogne Franche-Comté pourrait être un territoire favorable : rural, cours d'eau chenalisé et

		<p>la puissance nécessaire pour exercer un travail latéral important</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les usages ainsi que l'occupation des sols jouent un rôle déterminant. Il faut que le contexte foncier et l'acceptabilité locale le permettent • Il est important de pouvoir travailler sur un tronçon homogène du cours d'eau : il serait peu pertinent de créer des structures transversales sur une courte portion si, juste en aval, un seuil en génie civil de deux mètres de haut vient interrompre la dynamique • Concernant la restauration de rivières fortement incisées, BE2 exprime des réserves, notamment lorsque l'apport alluvial est faible • Contexte favorable : restauration de milieux humides par rengorgement en eau 		<p>occupation agricole, pas toujours les moyens de dépenser dans des restaurations classiques trop chères</p> <ul style="list-style-type: none"> • Projet effectué sur la véore/lierne dans la Drôme : contexte parfait • Projet sur la Rize paraît peu pertinent, aucune pente ($P_s < 10 \text{ W/m}^2$)
Risques/craintes	<ul style="list-style-type: none"> • Baisse d'exigence de qualité d'études, Phase de conception raccourcie, projets bâclés • Techniques appliquées de manière généralisée et sans la connaissance nécessaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Sur des contextes peu pertinents, pas grave si les structures sont fusibles et adaptative, si elles sont définitives c'est problématique 	<ul style="list-style-type: none"> • Peut occulter l'objectif principal : changer nos modes d'action et accepter de laisser les systèmes naturels évoluer sans intervention systématique. Dans ce sens les techniques Low-Tech ne sont pas vues comme un franc changement de paradigme, on change seulement la manière de faire 	
Continuité écologique, qualité physico chimique, thermie	<ul style="list-style-type: none"> • Méthodes présentées comme trop avantageuses, sans prise en compte des nuances • Sur un cours d'eau déjà lent, doute que ça améliore la qualité • Facilité de franchissement pas aussi évidente en France car nombre de chenaux secondaires bien plus restreint 	<ul style="list-style-type: none"> • Effet d'obstacle existe mais reste partiel et ne s'apparente en rien à un obstacle de génie civil. Caractère 'fusible'. Temporaire à l'échelle d'une vie humaine • Potentiel impact sur le transit de certaines espèces • Pas d'impact zéro, comme il n'existe pas de cours d'eau dépourvu d'obstacle. Seuils existent dans la nature, favorisent refuges et habitats. 	<ul style="list-style-type: none"> • Enjeux piscicoles probablement moindres, études à venir nous permettront d'y voir plus clair • Certaines fédérations de pêche ont historiquement créé de petits barrages à vocation piscicole pour favoriser l'habitat ou retenir l'eau en période d'étiage, alors qu'elles s'opposent aujourd'hui aux barrages de castors, ce qui crée une certaine confusion 	

	<ul style="list-style-type: none"> • Sur la thermie, il ne pense pas que l'impact soit majeur mais nous manquons de retour d'expérience 	<ul style="list-style-type: none"> • Ces Débat rappellent les limites d'une approche trop axée sur la maîtrise 	<ul style="list-style-type: none"> • Dans un cours d'eau très préservé, l'apparition de barrages de castors ou d'embâcles se ferait de manière aléatoire, générant ponctuellement des zones lenticules sur de longues distances, mais ces effets évoluent et se dissipent avec le temps. Selon lui, il est donc inutile de s'interroger de façon binaire sur leur caractère bénéfique ou non • Regrette que l'on se focalise trop souvent sur un aspect isolé (température, continuité, sédiments, ripisylve...) au lieu d'adopter une vision globale du fonctionnement des cours d'eau 	
Transposabilité des techniques entre états unis et Europe	<ul style="list-style-type: none"> • En France il n'existe aucune rivière où il n'y a personne autour, ça n'est donc pas aussi simple qu'aux états unis • Aux états unis, la place disponible permet de recréer des cours d'eaux avec de multiples chenaux. En France, la place disponible est bien moindre et donc le nombre de chenaux possible de recréer sera beaucoup plus faible 	<ul style="list-style-type: none"> • Souvent impressionné par certains types de projets réalisés outre-Atlantique (exemple cité de River Design Group qui a mené des interventions ambitieuses de réintroduction de bois⁵⁶) • Conditions de densité très faible plus rares en France 	<ul style="list-style-type: none"> • Américains entretiennent un rapport particulier à la « wilderness » • Argument de la disponibilité de l'espace n'est pas, selon lui, déterminant • Ces techniques peuvent tout à fait être adaptées au contexte français 	
Sur le Stade 0 des rivières anastomosées	<ul style="list-style-type: none"> • L'idée que tous les cours d'eau étaient historiquement en tresse ou anastomosés est erronée, et un raccourci et une généralisation énorme. • Dans de nombreux cas de figure la pente, manque de matériel alluvial ou l'encaissement du cours d'eau ne permet pas ce type fluvial. Pour lui 'ils' imaginent que les cours d'eau n'ont naturellement pas de berges, ce qui ne le convainc pas 	<ul style="list-style-type: none"> • A exprimé des réserves quant à la généralisation de ce modèle. Les variations de débits diffèrent fortement entre les cours d'eau torrentiels et ceux de plaine, ce qui rend difficile l'établissement d'un état de référence unique • les facteurs climatiques, notamment le réchauffement global, modifient les débits et l'intensité des événements, ce qui complique encore cette démarche 	<ul style="list-style-type: none"> • Manque de recul sur la distinction entre l'origine naturelle et anthropique de l'incision des cours d'eau l'incision est généralement perçue comme un problème, il estime que, dans certains contextes, notamment dans d'anciens paysages de terrasses fluvio-glaciaires, elle pourrait avoir une origine naturelle. Cela soulève la question de la pertinence des techniques de restauration, qu'elles 	<ul style="list-style-type: none"> • Convaincu que les rivières sont passées par cette phase dans leur existence, mais la végétation peut entraîner naturellement le système à se refermer en un chenal méandrique

⁵⁶ <https://riverdesigngroup.com/>

		<ul style="list-style-type: none"> • Ce type d'état de référence pose également la question de la temporalité nécessaire pour obtenir l'efficience attendue 	<p>soient Low-Tech ou non, dans ces situations</p> <ul style="list-style-type: none"> •Concernant l'hypothèse selon laquelle l'abondance historique de structures en bois et de barrages de castors aurait été largement sous-estimée, conduisant à des états de référence de type multi-chenaux ou anastomosés (stade 0), BE3 considère qu'il serait pertinent d'examiner cette question au cas par cas. Il recommande de mener davantage d'études synchroniques, notamment dans des systèmes encore peu impactés par l'activité humaine, même en milieu tempéré. Il suggère également d'approfondir ce sujet avec des experts comme H. Piégay •Reste sceptique sur la pertinence du Stade 0 sur les cours d'eau torrentiels de sa région • N'est pas opposé à l'idée de présenter l'état zéro comme objectif de restauration, mais s'interroge sur la faisabilité de cette approche dans le contexte culturel actuel •Reconnaît la possibilité que l'incision serait bien moins fréquente sans intervention humaine, tout en admettant qu'une réponse définitive à ce sujet est probablement hors de portée, ce qui implique une part de croyance dans l'analyse de ces questions 	
<p>Sur l'avenir de ces techniques</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Besoin d'objectivisation de ces techniques 	<ul style="list-style-type: none"> • Ces solutions Low-Tech peuvent parfaitement trouver leur place dans des projets hybrides, adaptés à la diversité des contextes rencontrés sur le terrain même si dans la pratique, les projets hybrides nécessitent l'utilisation d'engins 	<ul style="list-style-type: none"> • Comme dans d'autres domaines (par exemple la musique), les modes laissent souvent une empreinte durable dans le paysage, même si elles évoluent, disparaissent, puis réapparaissent 	<ul style="list-style-type: none"> •Il faut oser y croire, dépasser le stade de 'buzz' •L'enjeu financier est favorable, ainsi que l'enjeu du bilan carbone •Permettra aux structures GEMAPI de faire des choses en interne

		<p>mécaniques, car les entreprises privilégient la rapidité et la rentabilité, sauf si le cahier des charges impose explicitement des interventions uniquement manuelles sur certains tronçons</p> <ul style="list-style-type: none"> • Projets peu rentables pour les bureaux d'études privés • Plus les techniques sont simples et faciles à mettre en œuvre, plus il est probable que la conception et la maîtrise d'œuvre soient directement assurées en interne, par les services de la maîtrise d'ouvrage • Il s'agit donc de trouver un équilibre entre l'ambition technique, la qualité du travail et la viabilité économique des missions 	<ul style="list-style-type: none"> • Ces méthodes auront un impact à long terme. Bien qu'elles ne soient pas entièrement nouvelles, elles viendront enrichir la palette d'outils et de solutions que les bureaux d'études, ainsi que les associations et structures GEMAPI, pourront proposer • Certains aspects, comme la question de la garantie décennale (assurance liée à la pérennité des ouvrages), devront être repensés • Certaine résistance de la part de certains bureaux d'études, qui peuvent se sentir dépossédés si une partie des projets de restauration est réalisée en régie • Réticence de certains élus, qui peinent à prendre ces techniques au sérieux • Ces méthodes ne remplaceront pas les techniques traditionnelles de restauration, mais viendront plutôt les compléter • BE3 serait intéressé pour préconiser ce type de techniques quand ça leur semble particulièrement approprié et les trouve tout à fait pertinentes 	<ul style="list-style-type: none"> • Besoin d'objectiver le discours • Pourrait baisser l'activité des BE, mais devrait surtout se rajouter aux restaurations classiques et augmenter le volume total de linéaire restauré
Autres points intéressants		<ul style="list-style-type: none"> • Le diagnostic reste donc l'étape clé, la technique venant ensuite, toujours en fonction du contexte local 	<ul style="list-style-type: none"> • Il est essentiel de privilégier la non-intervention, considérant la gestion passive comme la meilleure approche pour les cours d'eau. Selon lui, il faudrait cesser de multiplier les interventions et laisser les rivières évoluer librement. Dans de nombreux cas de restauration, définir un espace de bon fonctionnement et opter pour la non-intervention permettrait de résoudre les problèmes aussi efficacement que des actions techniques. Toutefois, cette approche 	

			se heurte à des obstacles institutionnels et économiques : le secteur de la restauration mobilise des métiers et des budgets importants, notamment ceux de l'Agence de l'eau, et la non-action reste difficilement acceptable dans notre société, où l'on attend des résultats concrets pour justifier les financements.	
--	--	--	--	--

8.3. Annexe 3 : Tableau de synthèse des entretiens avec les structures GEMAPI

	GEMA1	GEMA2	GEMA3	GEMA4
Perception des techniques Low-Techs	<ul style="list-style-type: none"> •Biomimétisme, initié par des ouvrages humains des processus qui existent déjà dans la nature, dans la vie normale d'une rivière Epis déflecteurs imitent un arbre tombé dans l'eau, ouvrages transversaux imitent les barrages de castors. •Changement de paradigme : 'une vision où tu respectes les processus naturels plutôt que de l'ingénierie humaine avec du saupoudrage de vivant' 	<ul style="list-style-type: none"> •Evolution des termes utilisés pour nommer des choses faites depuis longtemps. Les objectifs sont les mêmes mais élargis. Exemples donnés : rétablissement d'habitat piscicoles, arbres abattus, épis déflecteurs, peignes pour encoche d'érosion •Vise à créer du désordre hydraulique 	<ul style="list-style-type: none"> •Positive •Tout n'est pas forcément nouveau, par exemple : ralentissement dynamique porté depuis 20 ans, haies sur le haut des bassins versants étaient déjà de l'hydrologie régénérative. •Certaines techniques de génie végétale basées sur les processus tels que souches utilisées depuis une dizaine d'années •Barrages transversaux de castors sont une réelle nouveauté 	<ul style="list-style-type: none"> •Utilisation du végétal, pas forcément vivant pour gérer les flux et habitats créant de la rugosité avec un minimum de pétrole •Thématique abordée depuis 2 ans
Incompréhension identifiées		<ul style="list-style-type: none"> •Ou se trouve la frontière entre SFN et Low-Techs ? 	<ul style="list-style-type: none"> •Incompréhension sur les processus que l'on cherche à remettre en place avec ces techniques : n'a pas compris que l'on parlait de processus hydromorphologiques mais plutôt biologiques • Sur un projet, ces techniques utilisées pour favoriser des processus vivants, hydrologie régénérative plutôt que processus hydromorphologiques •Sur un autre site très plat, épis pour resserrer écoulements mais pas assez d'énergie pour relancer des processus 	
Sur les pratiques de restaurations communes	<ul style="list-style-type: none"> •Mainmise des bureaux d'études sur la restauration ont une vision très hydraulique •Restaurations trop formatées 'parcs et jardins'. Toucher un peu les berges, consolidation des berges géotextile, génie végétal, panneau pédagogique' 	<ul style="list-style-type: none"> •La restauration aujourd'hui reste majoritairement figée, les berges sont figées 	<ul style="list-style-type: none"> •Restauration classique généralement très cadrées, beaucoup de certitude sur le résultat finale, très calculatoire •On a toujours demandé aux bureaux d'études des garanties qui impliquent beaucoup de 	<ul style="list-style-type: none"> •Les projets de restauration actuels visent à figer la rivière, les gens ne comprennent pas que la rivière puisse bouger. Le dynamisme est indésirable car il peut entraîner une perte de foncier

	<p>et on considère que la rivière est restaurée. Cela ne correspond pas du tout à la réalité, surtout sur des rivières dynamiques.</p> <ul style="list-style-type: none"> •Coût de la restauration conventionnelle hors de prix et résultats peu probants sur les masses d'eaux en bon état (seul 39.5%, loin de l'objectif de 80%). Echec de la politique de restauration. •Exemple du Génie Végétal : phénomène de mode créant de choses qui n'existe nulle part alors que les LTPBR se rapprochent beaucoup plus de processus naturels 		<p>certitude et de précision dans la conception</p> <ul style="list-style-type: none"> •Bureaux d'études généralement interventionnistes puisqu'ils sont rémunérés pour cela, ils vont donc préconiser l'action (sauf un bureau d'étude) •Nécessité de maîtrise sur la trajectoire •Parfois les projets ressemblent à du copier/coller (exemple lits emboîtés) 	<ul style="list-style-type: none"> •Projets de restauration coûteux et utilisant de l'ingénierie sont beaucoup mieux acceptés, perçus comme 'plus classe' auprès de la population et élus •Politique très interventionniste •Le curage est vue comme une solution systématique pour prévenir les inondations
<p>Perception générale du bois en rivière et des castors</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Il y a naturellement beaucoup de bois • Malaise et Dilemme de la situation en France : l'entretien Sous-estimé et volontairement ignoré comme de la poussière mise sous le tapis •Problèmes est d'ordre politique et réglementaire, inscrit dans l'inconscient collectif en France •Dans les contextes sujets aux inondations, bois et embâcles vu comme le diable •Problème de schizophrénie auprès des institutions et OFB, réglementation pas adaptée, dogme du libre écoulement •Article du code de l'environnement sur l'entretien obligatoire témoigne d'un paradigme désuet et contradictoire avec le bon état •Médiation pour cohabitation avec le castor nécessaire, communication très importante 	<ul style="list-style-type: none"> •Convaincu que le bois à sa place dans les cours d'eau •Implémente le bois en rivière depuis 2/3 ans selon les opportunités, mais reste une pratique marginale sur seulement une fraction du territoire •Evolution des perceptions sur le bois en rivière ces dernières années. Historiquement il était systématiquement enlevé même s'il n'y avait aucun enjeu/besoin. Aujourd'hui il y a une volonté de la structure de le laisser dès que possible •Retours mitigés des riverains et élus •Peuvent observer que les embâcles peuvent avoir naturellement des effets similaires à ce qui est recherché dans des projets de restauration •Permet de diversifier les écoulements et apporter de la matière organique •Travail d'éducation à faire, stratégie de communication importante •Contexte de cette structure peu favorable, très urbain 	<ul style="list-style-type: none"> •Perception positive, inscrit dans leur plan de gestion sur les sites où les impacts pour les inondations sont limités •Attachement à la ripisylve, choc lorsque RTE réalise des coupes sous les lignes électrique •Riverains et pêcheurs plutôt conciliants, peu de conflits et d'inquiétudes autour de ce sujet, pourtant énormément d'arbres sur certains secteurs •Difficile de faire comprendre aux entreprises qui effectuent l'entretien des cours d'eau qu'il fallait laisser du bois mort dans les cours d'eau •Perception positive du castor en rivière, serait essentiel de partout mais dans le contexte actuel peut entrainer des conflits d'usage en milieu urbain 	<ul style="list-style-type: none"> •Schizophrénie : structure consciente de la nécessité du bois en rivière pour l'écosystème mais entretien systématique et suppression du bois, entraine des rivières stériles. Entretien parfois justifié, parfois non •Augmente la biomasse, les habitats mais risque d'embâcles et peut provoquer des dégâts •Abondance de bois dans une rivière naturelle •Présence de bois défavorable aux activités de canoe/kayak •Barrages de castors ont des effets positifs mais certains conflits observés après la construction de barrages par les castors (ennoyage de chemin et prairies). La structure est devenue par défaut le référent Castor alors que ça n'est pas leur rôle •Dans le passé l'entretien était réalisé de manière systématique,

				depuis quelques années le bois est laissé quand c'est possible <ul style="list-style-type: none"> •Des riverains peuvent se plaindre lorsqu'ils voient du bois dans le cours d'eau 	
Avantage techniques	des	<ul style="list-style-type: none"> • Bois en rivière entraîne de la rugosité et est donc essentiel •Se rapproche beaucoup des processus naturels •Coté maîtrisé qui rassure la perception humaine, plus rassurant pour les élus, riverains par apport à un embâcle naturel. 	<ul style="list-style-type: none"> •Coûts plus faibles, favorise le travail par des équipes d'insertion •Simplicité technique •Permet de diversifier les écoulements •Permet de rehausser la lame d'eau et de recharger les nappes •Bilan carbone avantageux •Réservoir biologique et résilience face aux incendies •Peut aider à pallier les problèmes d'incision, accentuer l'érosion, créer de l'exhaussement •Amènent à se questionner, intéressant localement •Se prêtent à des projets participatifs/partagés et peuvent permettre l'appropriation des cours d'eau par les riverains et recréer de l'attachement à la rivière. Peut-être un projet de société, et ainsi amener de l'acceptabilité et de la compréhension à certaines personnes conservatrices sur certains sujets 	<ul style="list-style-type: none"> •Objectif d'hydrologie régénérative pour aider les problèmes d'assecs et d'hydrologie dégradée, stocker les volumes dans les sols (sur un site) •Reconnecter le cours d'eau avec son lit majeur •Accroître l'habitat • Stocker des matériaux •Favorise les zones humides •Ralentissement dynamique de l'onde de crue •épis permettent de resserrer les écoulements et apporter de la diversité •Approche qui permet de reprendre un peu d'humilité, résultats moins spectaculaires et visibles sur un temps plus long •Caractère expérimental des techniques ouvre la porte à l'incertitude et à l'humilité •Permettent de se reposer des questions intéressantes sur la restauration 	<ul style="list-style-type: none"> •Réinjection d'eau dans les sols •Réversibilité, si on se rate ce n'est pas grave, structures démontables •Besoin de moins d'autorisation •Bon de remettre du chaos dans le système •Complémentaire avec le Génie Végétal qui peut fournir du bois •Adapté aux sociétés d'insertion qui ont de la main d'œuvre
Limites et risques		<ul style="list-style-type: none"> •Besoin d'un espace de bon fonctionnement, par exemple avec une stratégie foncière •Sur les grands cours d'eau, ces techniques ne permettront pas de récupérer une rivière qui a perdu des quantités énormes de matériaux 	<ul style="list-style-type: none"> •Complexité foncière car une surface importante est nécessaire et des processus d'érosion sont favorisés •Risque de diviser et affaiblir les écoulements •Si ouvrages transversaux en aval d'agglomérations, risques de piéger les déchets 	<ul style="list-style-type: none"> •Site mis en place par la structure manque d'énergie, difficile de créer des chenaux secondaires pérennes et peu gêner la continuité (mais peu d'enjeu sur ce cours d'eau) • Urbanisation limite les possibilités : exemple d'un site 	<ul style="list-style-type: none"> •Acquisition du foncier critique pour implémenter ces techniques, et très compliqué voire impossible sur la majorité de son territoire •Communication difficile auprès des riverains et élus, passe pour des bobos écolos lorsqu'ils veulent remettre du bois dans le

- Si les attentes sont trop grosses sur des grosses altérations hydromorphologiques
- Problème de communication sur la temporalité, le temps de la rivière n'est pas le temps de l'homme
-

- Perte de contrôle sur le milieu qui remet en place des processus érosifs, besoin de suivi plus rapproché et de maintenance des ouvrages Low-Techs
- Administration et DDT

contraint en rive droite pourra pas trop évoluer au niveau des processus

- Besoin d'accord des propriétaires
- Coté délicat et inconfortable, d'une démarche expérimentale
- Coté insécurisant non-maitrisé, pas de plan à présenter comme dans une restauration classique, difficulté d'anticipation de l'ensemble des effets induits
- Moins de lisibilité temporelle : une trajectoire mais on ne sait pas en combien de temps elle sera atteinte
- Risque de récupération des déchets, particulièrement en milieu urbain
- Lorsque le cours d'eau a été bétonné, pas possible de restaurer uniquement avec Low-Techs
- Résultats moins spectaculaires et immédiats et peut être moins vendeurs
- Blocages à anticiper et apaiser, comme la continuité piscicole
- Ouvrages qui demandent beaucoup de suivi et beaucoup d'attention, des surprises peuvent être au rendez-vous en positif comme en négatif
- Besoin de 'lâcher-prise'
- Communication nécessaires auprès de la population sur cette approche nouvelle et sur le caractère transitoire des dispositifs

cours d'eau. De plus les riverains veulent voir des gains directs et concrets sur des projets, dans le cas contraire ils voient les actions comme des dépenses inutiles d'argent

- Conflits avec les terres agricoles
- Besoin pas perçu pas la population, priorité donnée à la prévention des inondations
- Administration pas adaptée pour des interventions par étapes, services de l'état réticents, situation floue
- L'esprit humain a besoin de maitrise et n'aime pas le chaos, alors que la nature se gère toute seule. Les élus veulent du naturel contrôlé, dans le style des jardins à l'anglaise, pas du vrai naturel
- Techniques trop perçues comme faciles, mais dans la réalité leur implémentation ne laisse pas le droit à l'erreur et nécessite plus de réflexion, plus d'implication, d'observations des réactions de la rivière
- Les entreprises ne sont pas formées
- Risque pour la structure de se faire une réputation d'incompétent si elle met en place des ouvrages peu pertinents, qui est alors difficile à effacer

			<ul style="list-style-type: none"> •Image 'mangeur de graines' et hurluberlus auprès de riverains et partenaires •Moins lucratif pour les maitres d'œuvres peut empêcher ces techniques de se développer 	
Sur le mouvement en France		<ul style="list-style-type: none"> •Adhésion à l'approche philosophique •Peut aider à sortir d'un mode trop calculatoire 	<ul style="list-style-type: none"> •Volonté du mouvement de s'inscrire en rupture avec ce qui a été fait au préalable •Crée de la crispation et une polarisation en deux camps, y compris au sein des acteurs de la GEMAPI •Posture de B.Morizot peut être clivante car personnage médiatique, a fait beaucoup pour la méthode car l'a médiatisé très rapidement mais peut desservir car bloquer certaines personnes •Fond du message philosophique très bon, mais manière de communiquer sur la technique dévalorise les actions menées depuis des années par les acteurs de la GEMAPI notamment certaines actions similaires •Volonté de donner une vision disruptive de ces techniques dans le monde de la restauration ce qui est le cas sur certains aspects et •Porteurs peuvent renvoyer une image egocentrique qui veut tout révolutionner mais ça n'est pas voulu •Apporte un peu de fraîcheur et d'humilité par rapport au vivant dans le discours sur la restauration 	<ul style="list-style-type: none"> •Réceptif au message véhiculé lors de la Formation de l'ARRA, très philosophique, enseignent une vision à propager mais on fait très vite face à nos contradictions •Donne des pistes de réflexion intéressantes
Critères de conditions favorables/défavorables à leur implantation	<ul style="list-style-type: none"> • Favorable : incision et tous les problèmes qui en découlent : déconnexion avec les nappes 	<ul style="list-style-type: none"> •Ruisseaux à pente faible favorable •Trop de transport solide défavorable 	<ul style="list-style-type: none"> •Espace de liberté nécessaire, pas trop d'usage à proximité, 	<ul style="list-style-type: none"> •Cours d'eau de petit et moyen gabarit, <10m de largeur. (En dessus de 10m on peut utiliser des

	<p>d'accompagnement, disparition du sédiment qui entraîne la disparition des faciès radiers/mouille et donc la banalisation des rivières.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Critères combinés de pente avec hydrologie et pluviométrie car ces deux paramètres sont responsables de la puissance spécifique • Techniques ont du sens partout • Restauration de zones humides • 	<ul style="list-style-type: none"> • Contexte agricole peut être une porte d'entrée • Besoin d'un minimum de transport solide, si pas d'apport de matériau le temps de réponse sera très long 	<p>majorité des secteurs ne le permettent pas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Favorable si incision raisonnable/modérée, si incision trop marquée/profonde (2m) nécessite des structures très hautes et adapté • Accès aisé à la parcelle pour faciliter les suivis et indicateurs • Bonne énergie des acteurs et partenaires = facilitateurs, peu d'opposition • Particulièrement bienvenu sur amont des bassins versants où il y a moins d'usages, plus compliqué en aval avec urbanisation 	<p>trunks et souches pour la restauration mais on est plus dans le Low Tech)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Disponibilité du foncier • Potentiel pour restaurer des Zones Humides • Contexte torrentueux pas favorables, structures seraient ensevelis à la première pluie • Contexte à forte pente pas forcément défavorable, tout dépend de l'objectif • Idéal sur des lieux sans enjeu (inondation ou autre)
<p>Continuité écologique, qualité physico chimique, thermie</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Réglementation très compliquée pour ouvrages >50cm, autorisation très compliquée • Sur une rivière mono_chenal très incisée, effet barrière plus marqué, mais la rivière ne devrait pas être ainsi • Il y avait beaucoup de seuils il y a deux siècles et les populations étaient plus abondantes • Sur la thermie, une rivière en bonne santé avec matelas alluvial permet un refroidissement important • Vision de la rivière à truite magnifique sans algue et sans bois erronée, macro invertébrés ont besoin de matière organique pour se nourrir 	<ul style="list-style-type: none"> • Ce sont des points de vigilance à garder • Capacité potentiellement épuratoire des ouvrages • Dans certains cas peut diminuer la température de l'eau, mais reste à vérifier, au cas par cas • Nombre de chenaux plus élevé aux états-unis favorable à la continuité piscicole, contexte plus contraint en France • Question de la continuité sédimentaire se pose à l'aval des ouvrages • Question de temporalité importante, il faut des suivis sur une échelle de temps plus longue • Le contexte de cohabitation avec le castor a changé, un barrage dans un cours d'eau incisé n'a pas le même effet que dans une vallée ouverte 	<ul style="list-style-type: none"> • Sujet d'inquiétudes de la part des partenaires, même les partenaires éminents (chercheurs...) • Prise de conscience qu'il faut arrêter d'être obsédé par la continuité, nous sommes conditionnés par une doctrine et il est important de réaliser que le bois et les castors étaient historiquement abondant de même que les populations de poissons • Nécessité d'une transition et de comprendre les effets limitants de nos approches, comparer les effets bénéfiques qui sont peut-être bien plus importants que la continuité à tout prix • Nécessité de retour d'expérience mais pas trop d'inquiétude sur les résultats • C'est une bonne chose de se reposer ces questions 	<p><i>Pas évoqué pour faute de temps</i></p>

<p>Sur un Stade 0 anastomosé</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Convaincu que l'état naturel des cours d'eau avant défrichage étaient anastomosés •Guide technique de l'Agence de l'eau mentionnant les systèmes d'embâcles géants aux Etats unis au 17^{eme} siècle créant des défluviations de cours d'eau, confirme ces hypothèses⁵⁷ 			<ul style="list-style-type: none"> •Humain a toujours été présent depuis la glaciation de Würm et a modifié les hydrosystèmes en Europe depuis tellement longtemps qu'on ne connaît pas leur état initial. Tout était probablement boisé. A quoi ressemblait une rivière sauvage, Parfois à un vaste marécage ? •Est-ce que l'état zero est un objectif acceptable aujourd'hui ? Alors que des générations ont modifié les vallées pour les rendre exploitables. Exemple de l'Arve, historiquement 500m de large, aujourd'hui 50m de large. La présence industrielle et agricole rend compliquée/impossible la recherche de cet état. •Pour conclure, l'état zéro est intéressant pour nourrir les réflexions mais le contexte est défavorable. Cela pose donc la question de l'état à rechercher lors d'une restauration, doit on essayer de s'en rapprocher au maximum ?
<p>Transposabilité des techniques entre Etats-Unis et France</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Territoire méditerranée très similaire à la Californie : inondations, sécheresses, feux de forêts, viticulture, oliviers •De toute façon toutes les rivières du monde parlent de la même chose : de l'eau, un bassin versant, une pente •Foncier plus accessible en France qu'en Californie 	<ul style="list-style-type: none"> •Présence de grands espaces aux états-unis, contexte plus contraint en France •Nombre de chenaux plus élevé aux états favorable à la continuité piscicole, contexte plus contraint en France •Réglementation plus contraignante en France 		<ul style="list-style-type: none"> •Le foncier étant le nerf de la Guerre, il est probable que le territoire américain soit découpé en plus large sections qu'en France et rende les stratégies foncières plus simples. En France, beaucoup de petites parcelles liées à l'historique de nos politiques de successions et découpage rendent difficile ce travail

⁵⁷ (Boyer & Piégay, 1998)

Avenir des techniques		<ul style="list-style-type: none"> •Espèrent que ça n'est pas qu'un effet de mode et que ça va se développer •Les retours d'expérience à venir en France vont nous aider 	<ul style="list-style-type: none"> •Lorsque les techniques sortiront de la phase expérimentale : incertitude sur la perception des services instructeurs, recadrage pourra être demandé sur les éléments à fournir pour obtenir une autorisation •Plus adaptées pour la mise en place en régie et par les maitres d'ouvrages que Bureaux d'études 	<ul style="list-style-type: none"> •Ces techniques vont perdurer mais cela peut prendre du temps car il y a besoin de retours d'expérience, comme par exemple le Génie végétal a mis des années à s'implanter

8.4. Annexe 4 : Tableau de synthèse des entretiens avec les organismes de pêche

	PE1	PE2
Perception des techniques Low-Techs et basées sur les processus	<ul style="list-style-type: none"> •Nom nouveau pour des techniques déjà faites depuis des décennies, exemple de guides mettant en place du génie végétal pour régénérer des processus, plusieurs guides cités⁵⁸ •Exemple d'épis pour redynamiser les cours d'eau, pieux tressés avec des branches de saules •Trop assimilé aux barrages de castors 	<ul style="list-style-type: none"> •A entendu parler des projets effectués sur la Lierne et la Véore (26) et a effectué une visite sur le terrain. Les sources d'inquiétude ont plutôt été confirmées par la visite sur le terrain.
Incompréhension ou questionnements	<ul style="list-style-type: none"> •Différence et complémentarité avec le Génie végétal 	
Sur les pratiques de restaurations communes	<ul style="list-style-type: none"> •Demande de figer les berges vient généralement des propriétaires •En dehors d'enjeu particuliers à proximité (Inondations, propriétaires et agriculteurs) s'oriente toujours vers du génie végétal •Dépend aussi de la culture des entreprises qui interviennent, entreprises de Génie Civil/TP aiment bien faire 'les choses au carré' et figer un peu trop les choses - demande au porteur de projet d'insister pour laisser de la liberté au cours d'eau •Aujourd'hui on a tendance de plus en plus à laisser un peu de désordre pour laisser la place aux processus naturels, le « process-based » est devenu la norme •Il faut continuer la pédagogie notamment auprès des Gemapiens qui ont tendance à privilégier la gestion des inondations et faire beaucoup de protection de berges 	
Perception générale du bois en rivière et des castors	<ul style="list-style-type: none"> •Bois en rivière clairement favorable aux processus naturels des invertébrés aux populations piscicoles •Matériau essentiel dans la rivière •A tendance a favorisé dès que possible le dépôt d'embâcles •2 difficultés : obligation d'entretien du cours d'eau par la loi, et risque inondation par embâcles •Technique intéressante de laisser du bois et des embâcles (exemple Brévenne) 	<ul style="list-style-type: none"> •Plutôt favorable à laisser la nature et le bois en rivière mais avec un 'entretien minimal', •Nécessité d'un entretien raisonné pour éviter les gros tas d'embâcles ou entretenir une ripisylve trop vieillissante •Bois favorise l'ombrage et les caches piscicoles •Les barrages de castor 'ne posent pas forcément soucis' •Pas connaissance de présence de castor énorme, barrages généralement ponctuels et dispersés •L'espèce est protégée et les effets s'analyse au cas par cas

⁵⁸ Références citées lors de l'entretien :

- <https://www.trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/manuel-restauration-hydrromorphologique-cours-eau>
- https://www.trameverteetbleue.fr/sites/default/files/01manuel_restaurat.pdf
- (Adam et al., 2007)

	<ul style="list-style-type: none"> •Travail pédagogique un peu à refaire depuis le passage à la GEMAPI et le changement d'organisation, toutes les structures ne sont pas exemplaires et ont tendance à systématiquement entretenir la ripisylve et les embâcles même en l'absence d'enjeux. Travail de sensibilisation fait par les fédérations de pêche et l'Agence de l'eau notamment •Certains pêcheurs peuvent être réticents aux changements et évolutions de tous types (seuils, bois en rivière etc...) et aux contraintes (accrochages, accès à la rivière...) et n'ont pas toujours toute la connaissance, travail de pédagogie nécessaire au sein du monde de la pêche •Beaucoup plus réservé sur les techniques utilisant des barrages de castors qui arrivent 'un peu avec des grands sabots' •Sur les barrages naturels de castors : A pu lire par les défenseurs de ces techniques qu'un cours d'eau sans barrage de castor est une anomalie' → pas d'accord avec ce constat. Il y a une différence entre contexte actuel et celui d'il y a quelques siècles, les situations ne sont pas comparables. Baisse des débits, baisse des processus sédimentaires, donc le fonctionnement hydromorphologique n'est plus le même. •Le retour du castor peut avoir des impacts sur le milieu, notamment sur les populations piscicoles car il s'installe sur des secteurs ou les processus naturels de l'époque ne sont plus là et entraîne donc une rupture de la continuité 	
Avantage des techniques	<ul style="list-style-type: none"> •Utilisation de matériaux naturels •Techniques douces et moins traumatisantes pour le milieu •Permet du lien social : mobiliser des associations et bénévoles 	<ul style="list-style-type: none"> • Peut être très intéressant pour recréer un état naturel, retourner vers un fonctionnement originel •Rehaussement du profil en long •Hausse du niveau des nappes •Diversification de la biodiversité : favorables aux macro-invertébrés et amphibiens •Ouvrages non transversaux (type épis) très favorables et peuvent suffire à rehausser le niveau du cours d'eau •Peut être intéressant de faire du soutient d'étiage ou de restaurer des zones humides mais de manière 'moins brutale'
Limites et risques	<ul style="list-style-type: none"> •Créer un système de Zone humide sur un système d'eau courante qui n'était peut-être pas naturellement un système de zone humide •Besoin de mise en garde/ gardes fous et de diagnostic sur les endroits adaptés •Comparaison avec 'seuils piscicoles' créés par les associations de pêche dans les années 90 pour favoriser les habitats et créer des poches pendant la sécheresse → étaient franchissables à leur création mais avec 	<ul style="list-style-type: none"> •N'est pas adapté à tous les cas de figure •Par exemple pas adapté lorsque le cours d'eau est dégradé, incisé •Piège à embâcles •Accumulation de sédiments (jusqu'à 100m à l'amont) •Cumul des ouvrages pose question •En voulant faire bien on peut aggraver la situation

	<p>l'érosion sont devenus infranchissables et se sont avérés un échec sur de nombreux cours d'eau</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nécessité d'un diagnostic approfondi sur les barrages mimétiques de castors car impacts potentiels importants • Il ne faut pas hésiter à intervenir avec des moyens mécaniques là où c'est nécessaire • Techniques favorisent les espèces lenticules et défavorisent les espèces lotiques (comme les salmonidés) • Un peu du mal à voir les avantages des barrages mimétiques de castor sur le milieu, nécessité de suivi pour démontrer ces avantages • Indice Poisson Rivière (IPR) utilisé sur la Véore alors que le score ne représente pas bien la réalité des changements induits sur le milieu : suivi pas suffisant • Augmenter la ligne d'eau n'est pas l'action adaptée sur certains milieux qui sont sujets à trop de prélèvements, au lieu de se poser la question de réduire les prélèvements ont cherché à créer l'illusion d'avoir de l'eau en augmentant la ligne d'eau. On ne prend pas le problème par le bon bout 	<ul style="list-style-type: none"> • Ouvrages transversaux pas favorable aux poissons, notamment aux truites. Peut augmenter la diversité d'espèces piscicoles mais les nouvelles espèces ne correspondent pas au fonctionnement naturel de la rivière
<p>Sur le mouvement en France</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Effet de mode alors qu'on fait déjà du Low-Tech, et sans suffisamment mettre en avant les garde-fous et le diagnostic nécessaire • Présenté comme une solution miracle, qu'il faudrait en créer de partout : pas d'accord, il faut vraiment faire attention où elles sont utilisées • Les réserves sont bien mises pendant la formation de l'ARRA², mais la communication qui est faite derrière perd toutes ses réserves ce qui crée des cristallisations • Mouvement d'Alliance avec le Peuple Castor : appellation étrange, s'inquiète qu'ils veuillent faire des barrages de castor de partout. Vision centrée espèce plutôt que vision écologique pour l'ensemble des espèces • Communication par les médias un peu catastrophique (TF1, dauphiné libéré, progrès...) qui présentent comme une solution miracle • Tendance des défenseurs de barrages de moulins (Hydrauxois) de profiter de l'engouement autour des barrages de castors pour prêcher leur cause. Les arguments mis en avant pour les barrages mimétiques de castor sont parfois les mêmes 	
<p>Critères de conditions favorables/défavorables à leur implantation</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pas adapté sur des cours d'eau de tête de bassins, systèmes d'eaux courantes car on le transforme en un système d'eau stagnante 	<ul style="list-style-type: none"> • Le choix des secteurs n'est pas simple • Ces techniques ont un potentiel où les systèmes ne sont pas trop en déséquilibre, et où les systèmes ont naturellement tendance à faire des

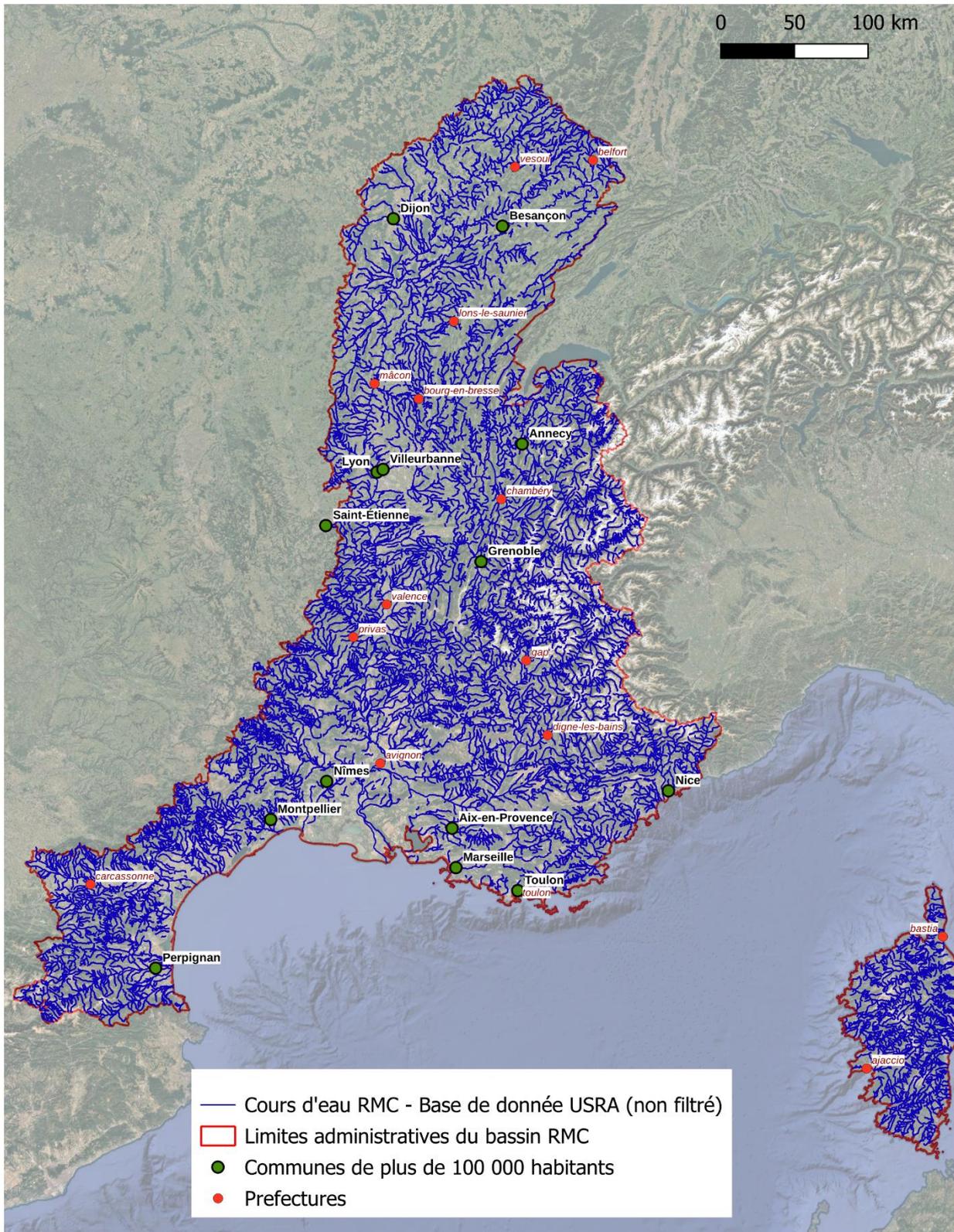
	<ul style="list-style-type: none"> •A plus sa place sur un petit cours d'eau de plaine qui va avoir tendance à tresser où anastomoser naturellement, et où il est plus facile de recréer des bras secondaires et favoriser la continuité 	<p>chenaux, donc sur des cours d'eau plus larges, moins encaissés et avec plus d'eau (<i>que sur la Lierne/Véore</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> •Sur la Véore les peuplements piscicoles étaient déjà en bon état, l'implantation de ces techniques pourrait déséquilibrer les populations de truites
Continuité écologique, qualité physico chimique, thermie	<ul style="list-style-type: none"> •Recréer des barrages pose question sur la compatibilité avec la politique de restauration de la continuité •Pas convaincu du caractère perméable des barrages de castors, peut être perméable à sa création mais va entraîner des dépôts (feuilles, embâcles etc...) et devenir un obstacle à la continuité •Peut entraîner un réchauffement des eaux avec l'effet plan d'eau créer •Peut créer un colmatage en amont du barrage qui peut être défavorable aux espèces lithophiles qui pondent sur des substrats grossiers, perte de secteurs de frayères •Espace plus contraint en France ne permet pas de recréer suffisamment de bras pour permettre la continuité, les bras de contournement sont nécessaires à la continuité •Barrage mimétique peut être perméable à sa construction mais accumuler des branches et feuilles dans le temps et devenir un obstacle infranchissable 	<ul style="list-style-type: none"> •Obstacle à la continuité •chenaux secondaires coulent peu lors de l'étiage •Piégeage potentiel des poissons lors des assecs qui les empêchent de trouver des zones refuge, et problème de continuité en période de reproduction •Potentielle baisse de l'O₂ dissout et augmentation de la température préjudiciable aux poissons
Sur un Stade 0 anastomosé	<i>Pas évoqué</i>	<ul style="list-style-type: none"> •Doute que les cours d'eau (Lierne et Véore (26)) avaient initialement une bande active large et des chenaux secondaires
Transposabilité des techniques entre Etats-Unis et France	<ul style="list-style-type: none"> •Systèmes très différents en Amérique du Nord, leur succès là-bas ne signifie pas que ça fonctionnera chez nous •Là-bas plutôt des cours d'eau de plaine avec de nombreux bras où la continuité n'est pas impactée •Pas les mêmes contraintes : le cours d'eau peut déborder sans poser de problème aux propriétaires riverains, en France en a beaucoup moins de place pour recréer des bras •Plus de déficit sédimentaire en France 	<ul style="list-style-type: none"> •Se demande si le contexte est similaire
Avenir des techniques	<ul style="list-style-type: none"> •Les fédérations de pêche peuvent amener un esprit critique et des garde-fous pour éviter qu'un impact trop important se fasse sur le milieu •Besoin de retours d'expérience pour prouver qu'elles fonctionnent sur certains contextes •Solution complémentaire au panel de solutions déjà existantes (génie végétal...) •Ne remplacera pas les opérations de restauration hydromorphologiques classiques (reméandrage, ...) mais plutôt agir dans certains cas spécifiques/ciblés 	<ul style="list-style-type: none"> •Nécessité de suivis, et besoin d'impliquer les fédérations de pêche dans les suivis pour qu'ils puissent donner leur avis sur les protocoles •Sceptique sur les bénéfices des ouvrages transversaux mais « la porte n'est pas fermée » • Il serait intéressant de faire des tentatives sur des cours d'eau avec différents niveaux de dégradation pour comprendre jusqu'où ces techniques s'adaptent le mieux

	<ul style="list-style-type: none">• Besoin d'une communication un peu plus objective, ne pas montrer que les avantages mais aussi les risques, sinon les projets entraineront	
--	---	--

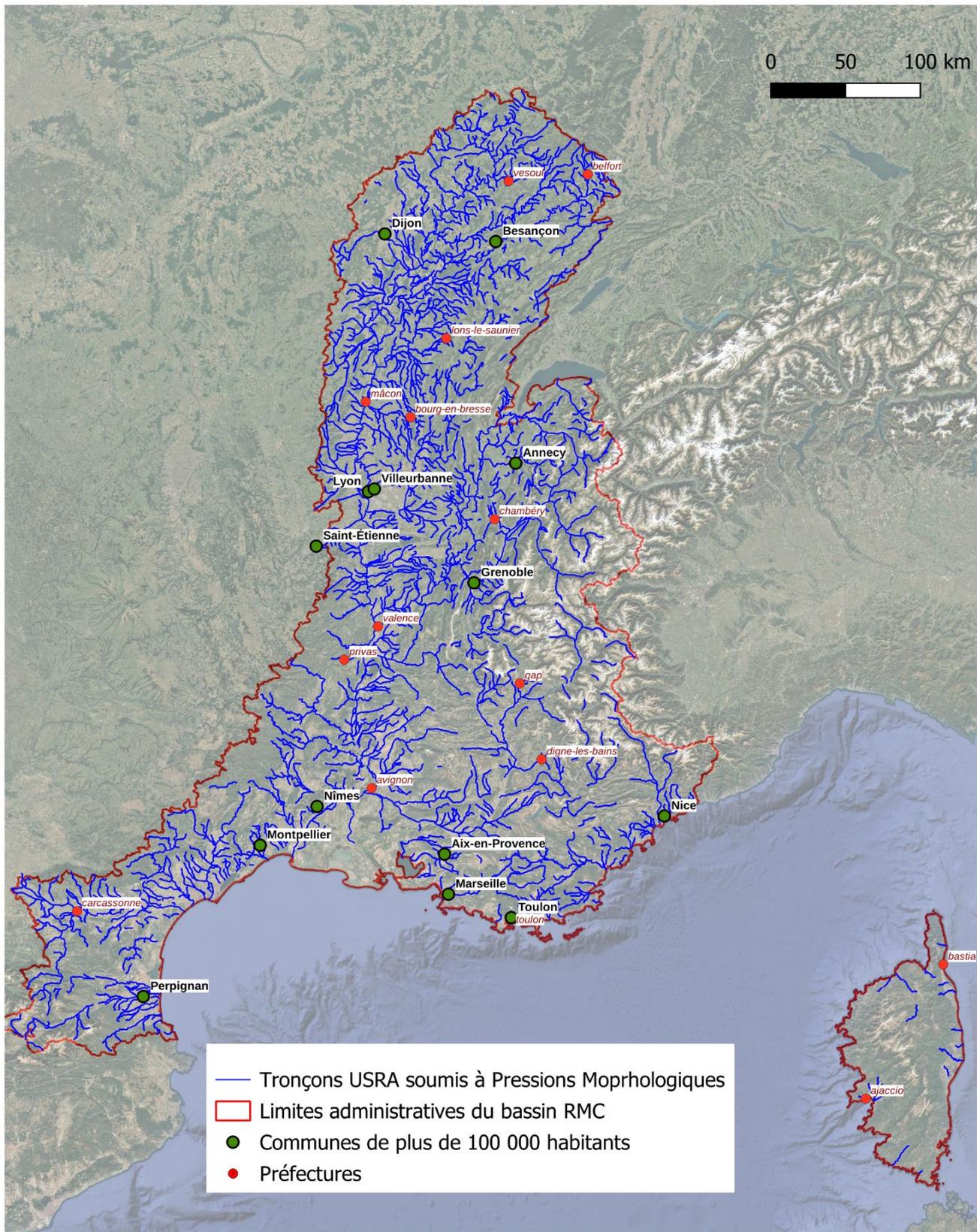
8.5. Annexe 5 : Résultats chiffrés de l'analyse cartographique

Couche utilisée		Critère appliqué	Nombre de tronçons	Nombre de km linéaire	Pourcentage du linéaire total	Pourcentage du linéaire soumis à risque
USRA	Total	Total (aucun critère)	129676	55398,00	100%	NA
	Soumis à pression morpho	Total (aucun critère)	38487	22160,39	40%	100%
	Soumis à pression morpho	Rang de strahler =< 4 et largeur de cours d'eau <8m	33491	13660,07	25%	62%
	Soumis à pression morpho	Pente =< 3%	29838	18986,21	34%	86%
	Soumis à pression morpho	Pente >= 0,1%	36473	19360,72	35%	87%
	Soumis à pression morpho	Vegetation à 10m n'étant pas très faible ou très faible et Vegetation à 30m n'étant pas très faible ou faible	20712	12453,69	22%	56%
	Soumis à pression morpho	Faible Taux d'aménagement autour du cours d'eau	27639	12755,35	23%	58%
	Soumis à pression morpho	Taux d'encaissement > 10 et largeur de fond de vallée > 30m	30224	17233,83	31%	78%
	Soumis à pression morpho	Pas de forte pression ag	36575	21429,45	39%	97%
	Soumis à pression morpho	Tous les critères cumulés	6656	2810,80	5%	13%

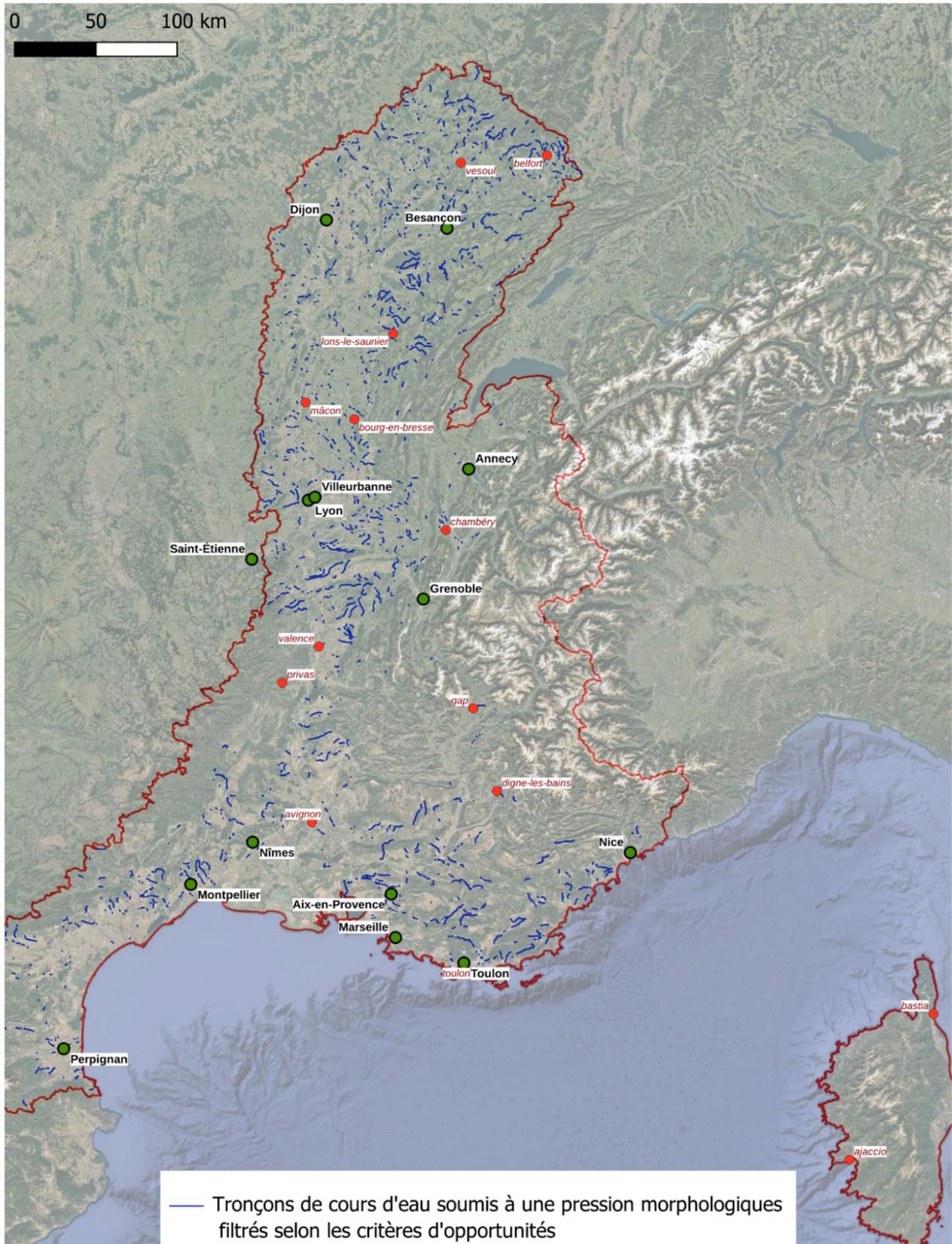
Cartographie des cours d'eau du bassin RM&C selon la couche des tronçons USRA



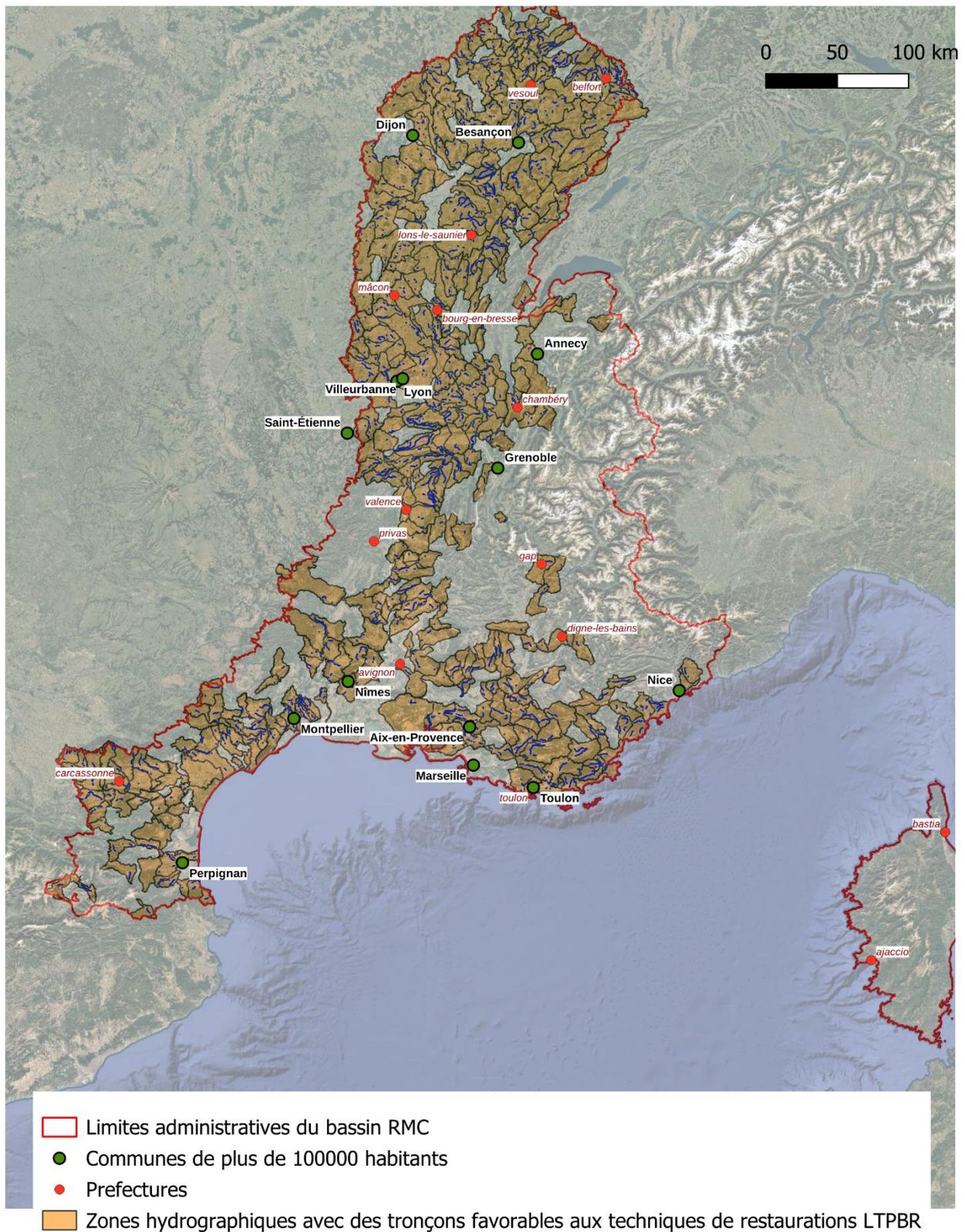
Cours d'eau soumis à une pression hydromorphologique selon le dispositif PHRYMO



Tronçons soumis à pression morphologiques et remplissant les critères optimaux pour être restaurés avec des techniques de restauration Low-Tech sur le bassin RM&C

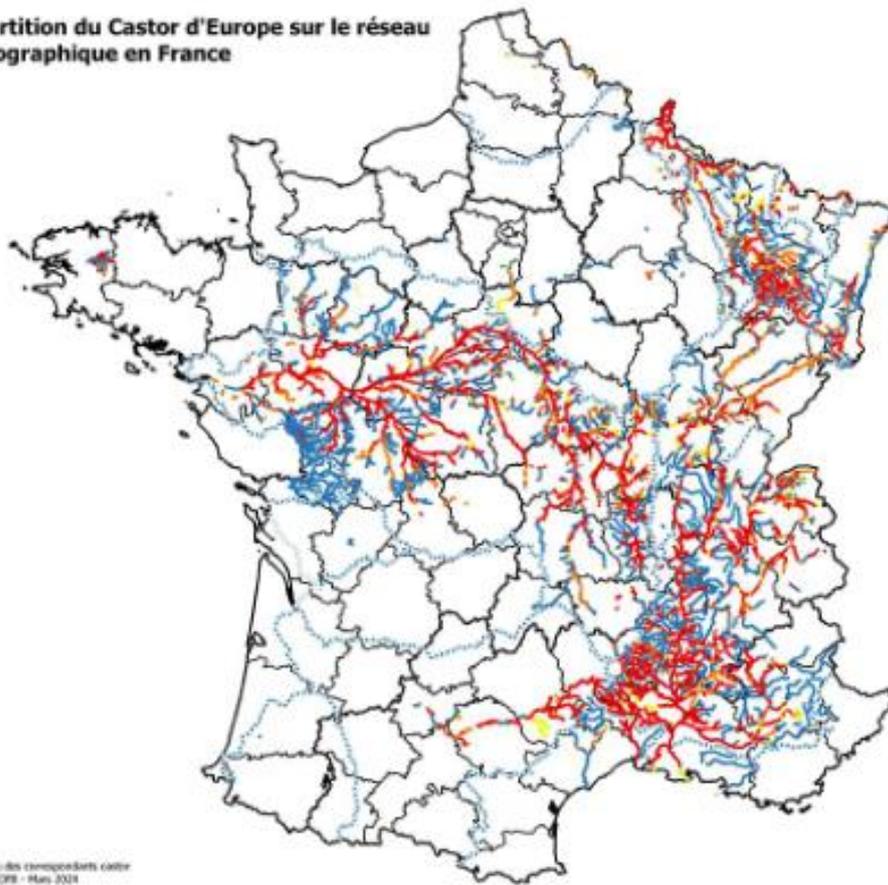


Zones hydrographiques ayant au moins un tronçon soumis à pression morphologique favorable aux LTBP



8.10. Annexe 10 : Carte de présence du castor en France

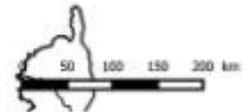
Répartition du Castor d'Europe sur le réseau hydrographique en France



Présence du castor :
— Présence possible
— Présence probable
— Présence certaine
— Absence vérifiée

Réseau hydrographique :
--- Limites de bassins versants

Limites administratives :
□ Régions
□ Départements



Source : réseau des correspondants castor
Cartographie : OFB - Mars 2014



Volet : Restauration de cours d'eau

Restauration des fonctionnalités des hydrosystèmes fondée sur la régénération des processus écologiques

Approche low-tech sur la Lierne et la Véore, inspirée de l'écologie du Castor et basée sur une gestion différenciée du bois immergé

Région : Auvergne-Rhône-Alpes

Département : Drôme

Délégation : Lyon

Communes concernées : Chabeuil, Chateaudouble

Bassin versant : Rhône

Interlocuteurs Agence : Benoît Terrier

PRESENTATION DU PROJET

MAITRE D'OUVRAGE

Valence Romans Agglo

1 Place Jacques Brel

26000 VALENCE

cedric.cadet@valenceromansagglo.fr

MAITRE D'ŒUVRE

Valence Romans Agglo

PARTENAIRES

Communes de Chabeuil et de Chateaudouble

CONTEXTE ET HISTORIQUE

Le projet naît suite à une rencontre entre Cédric Cadet (Valence Romans Agglo) et Baptiste Morizot (MCF en philosophie, université d'Aix-Marseille), de retour des Etats-Unis où il s'était familiarisé aux méthodes de restauration dites « low tech » des cours d'eau et zones humides. Avec une visée expérimentale, l'agglomération cherche alors à cibler sur son territoire un premier secteur marqué par une incision importante afin d'expérimenter ces nouvelles techniques. Une des conséquences de l'incision est la présence d'étiages de plus en plus sévères. Le secteur de la confluence de la Lierne et de la Véore à Chabeuil et Chateaudouble est identifié. La Lierne et la Véore prennent leur source sur les contreforts du Vercors, confluent à Chateaudouble, puis la Véore chemine dans la plaine jusqu'à sa confluence avec le Rhône. Il s'agit ainsi d'un secteur situé entre l'amont du bassin sur les pentes du Vercors, relativement préservé, et l'aval où les dégradations morphologiques (rectification) liées aux travaux hydrauliques de la seconde moitié du XXème siècle sont trop importantes pour qu'une régénération douce soit suffisante. Un travail mobilisant uniquement des techniques dites low-tech est ainsi mené sur ce site depuis 2023, le complexe étant agrandi, densifié et amélioré en fonction des effets observés.

PROBLEMATIQUE ET ENJEUX

La principale marque de dégradation des rivières est leur incision qui a simplifié le tracé des cours d'eau et accéléré l'écoulement. Cela a notamment amené une déconnexion entre le lit mineur et la terrasse alluviale / les annexes humides composant le lit moyen, qui se retrouve asséché. Sa réhydratation doit permettre de favoriser le retour d'une biodiversité aquatique et hydrophile associée. Les sécheresses de 2022 et 2023 ont aussi mis en évidence la nécessité de conserver des zones humides pour garantir un débit d'eau pendant l'étiage en aval, notamment dans le contexte du changement climatique.

OBJECTIFS

- Favoriser une reprise de la dynamique morphologique et stopper-inverser le processus d'incision,
- Complexifier l'hydrosystème et ralentir les flux pour lutter contre les sécheresses,
- Diversifier les faciès d'écoulement et les habitats aquatiques pour restaurer les communautés aquatiques.

DESCRIPTION DU PROJET

Sur un linéaire de 1000 m, une quinzaine de structures ont été réalisées exclusivement en matériaux naturels (bois vivants, bois morts, terre, pierres, galets). Elles miment des structures naturelles. Il peut s'agir d'embâcles érosifs, similaires à des embâcles, ou d'ouvrages mimant des barrages de castor. En favorisant l'érosion latérale, les structures doivent limiter l'incision et reconstituer le matelas alluvial. Elles permettent aussi de piéger du bois et des sédiments, de ralentir l'écoulement de l'eau et de remettre en eau des chenaux secondaires. Ainsi, cela permet d'hydrater un large espace latéral et de complexifier le tracé du cours d'eau, avec de nombreux bénéfices pour l'infiltration de l'eau dans le sol et la biodiversité.



Vue sur l'une des structures en avril 2025

COÛT DU PROJET

- ~ 100€ / m linéaire

DURÉE DU PROJET

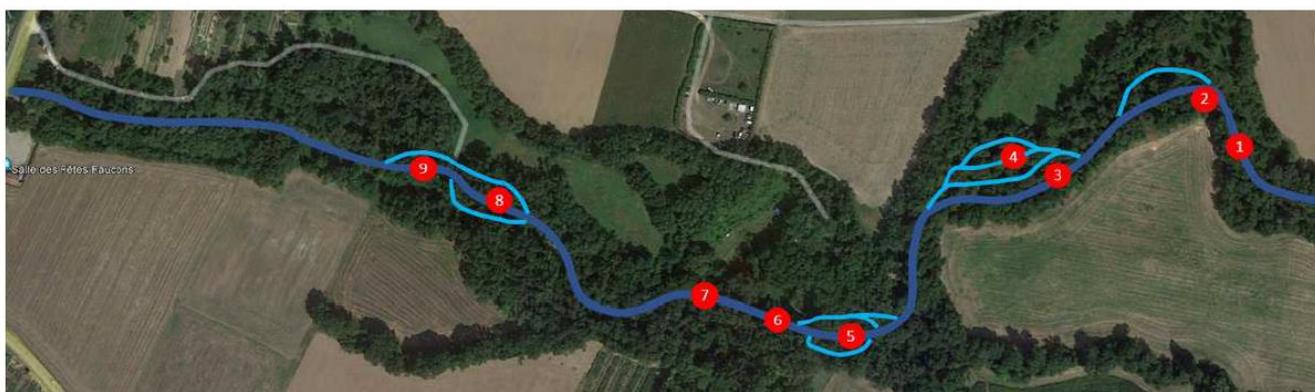
- 3 ans

PLAN DE FINANCEMENT

- Pas de financement spécifique au projet. L'intégralité des structures ont été mises en place par les équipes de Valence Romans Agglo.

LES OPERATIONS

Les structures mises en place entre le printemps 2023 et le printemps 2024 tout au long du linéaire sont de plusieurs types :



- 1 : 2 épis érosifs, mimant des embâcles en berge
- 2 : 1 ouvrage castor (1 structure principale) – stade 1
- 3 : 1 ouvrage castor (1 structure principale + 1 structure secondaire de stabilisation) – stade 1
- 4 : 2 ouvrages castor sur les bras réhydratés
- 5 : 1 ouvrage castor au droit de la confluence Lierne-Véore (1 structure principale + 1 structure secondaire de stabilisation) – stade 1
- 6 : 1 ouvrage castor – stade 2
- 7 : 1 ouvrage castor – stade 2
- 8 : 1 ouvrage castor (1 structure principale + 1 structure secondaire de stabilisation) – stade 1
- 9 : 1 ouvrage castor « complémentaire » - stade 1

Plan des ouvrages réalisés © Valence Romans Agglo

On distingue ainsi :

→ Les embâcles érosifs

Leur objectif principal est de réactiver une érosion latérale en face de l'embâcle. Cela permet de diversifier les faciès de la rivière et de recharger le matelas alluvial en sédiments à l'aval.

Erosion latérale en rive droite provoquée par l'embâcle implanté en rive gauche



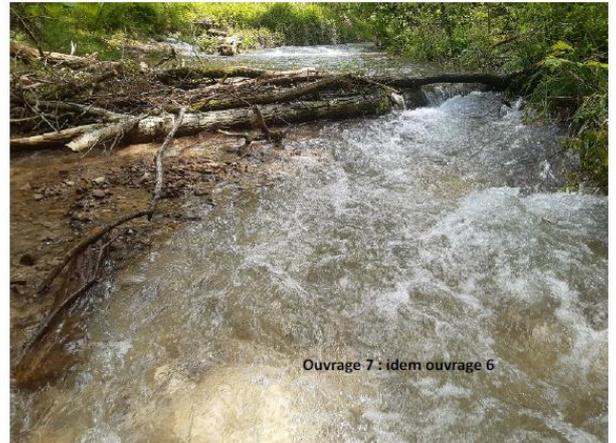
→ Les ouvrages castor

Ils miment différents stades d'évolution d'un barrage de castors. Un ouvrage qui occupe toute la largeur du lit mineur est dit de « stade 1 ». Un ouvrage ouvert sur un côté ou au milieu est dit de « stade 2 ». Le stade 3, qui n'a pas été mis en place artificiellement, correspond à un ouvrage qui s'est comblé et agrandi par la suite (notamment sous l'effet des crues et du piégeage de matériaux). Ces ouvrages vont :

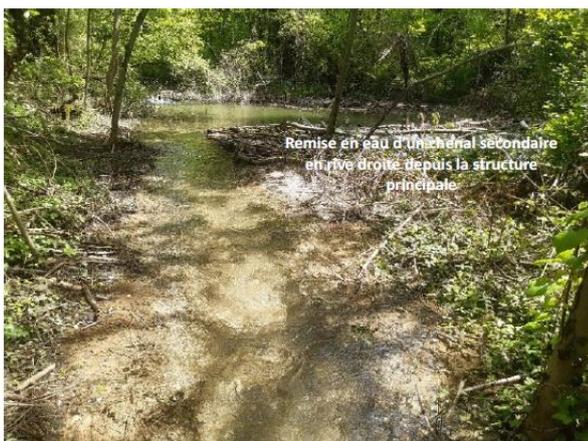
- Stocker les matériaux transportés par la rivière (sédiments et bois mort)
- Ralentir le flux d'eau tout en restant perméables
- Elever le niveau d'eau pour favoriser les débordements sur la terrasse alluviale
- Diversifier les faciès et habitats (en termes de hauteur d'eau, de vitesses d'écoulement)
- Oxygéner l'eau
- Ouvrir des bras secondaires, de part et d'autre des ouvrages « stade 1 »



Ouvrage castor au stade 1 (n°5), structures secondaire et principale © Valence Romans Agglo



Ouvrage castor au stade 2 (n°7) © Valence Romans



*Bras secondaire remis en eau au niveau de la structure principale de l'ouvrage stade 1 (n°8)
© Valence Romans Agglo*

*Zone lenticque et profonde en amont d'ouvrage castor (n°3)
© Valence Romans Agglo*



La zone en amont de l'ouvrage : diversification du lit mineur en créant une zone lenticque profonde et plus large

GAINS ATTENDUS POUR LES MILIEUX

→ Morphologiques

Reprise de la dynamique morphologique
Recharge sédimentaire et inversion de l'incision à l'œuvre
Complexification du réseau

→ Hydrauliques

Ralentissement des écoulements
Meilleure infiltration de l'eau dans le sol et recharge des aquifères

→ Ecologiques

Diversification des écoulements, des substrats, et donc des habitats aquatiques
Réactivation des milieux aquatiques annexes au cours d'eau et retour de la biodiversité associée

SUIVI ET EVALUATION

Visuellement, l'évolution du site est très positive : grâce à la création de bras secondaires, le linéaire en eau a été multiplié par 1,5 et la surface hydratée estimée est aujourd'hui 5 fois plus étendue. Bien que l'un d'eux ait été emporté par une crue depuis, les embâcles ont permis de réactiver l'érosion latérale à l'amont du site. Les ouvrages castor ont également évolué sous la dynamique de la rivière. Certains se sont renforcés tandis que d'autres se sont ouverts en un endroit, diversifiant d'autant plus les écoulements et habitats.

Des mesures de qualité physico-chimique de l'eau (oxygène, température, azote et phosphore, ...) et des prélèvements de macro-invertébrés benthiques ont été réalisés à l'état initial (2024). La qualité de l'eau est bonne, mais l'état biologique (peuplements de macro-invertébrés) est limité par l'homogénéité des habitats. Ces paramètres seront suivis sur le site restauré et sur un site témoin pour évaluer les effets du projet.

CADRE REGLEMENTAIRE

- Dossier loi sur l'eau

INTEGRATION DU PROJET DANS LA VIE DU TERRITOIRE

La zone est devenue très attractive et fréquentée par les riverains, promeneurs et baigneurs. De plus, de nombreuses visites ont été organisées à destination de scolaires ou de professionnels du milieu, le projet constituant ainsi une vitrine des techniques de restauration low-tech.

LES INGREDIENTS DE LA REUSSITE

- Le travail sur l'argumentaire pour convaincre des effets bénéfiques du bois en rivière. Les élus de la commune située en aval n'ont d'ailleurs pas manifesté de crainte particulière liée au risque d'embâcles.
- Suite à la sécheresse de 2022, les agriculteurs de la zone étaient convaincus de l'intérêt des actions visant à soutenir le débit d'étiage.

LES DIFFICULTES RENCONTREES

- Le coût important des suivis réglementaires au regard d'un projet peu coûteux dans l'ensemble.

LES POINTS FORTS

- Le coût très faible des techniques employées, qui n'utilisent que des matériaux présents sur place et ne génèrent aucune dégradation liée aux travaux
- Le caractère réversible et adaptable du projet. Il est possible de modifier ou supprimer une structure très rapidement et avec peu de moyens dans le cas où elle n'aurait pas l'effet escompté.

LES PERSPECTIVES

- Poursuivre la mise en place des structures pour agrandir la zone régénérée
- Intégrer les méthodes de régénération douce dans un Plan Pluriannuel de Gestion et de Régénération des fonctionnalités des cours d'eau de l'agglomération, pour faciliter leur mise en œuvre sur d'autres secteurs. L'idée est d'utiliser ces techniques seules sur les secteurs moyennement dégradés, et en complément de méthodes de restauration plus actives sur des secteurs présentant de trop fortes perturbations morphologiques.

SOURCES

- Valence Romans Agglomération, *Rapport d'intervention : Régénération low-tech des fonctionnalités de cours d'eau et de l'hydrosystème - La Lierne et la Véore à Chabeuil et Chateaudouble*, 2024
- Valence Romans Agglomération - Suivi GEMAPI – *État initial de la Véore à Chabeuil et Châteaudouble*, 2024
- *Entretien téléphonique avec Cédric Cadet (Valence Romans Agglomération) le 08/07/2025*

Date de rédaction : Juillet 2025