



HAL
open science

Pertinence et pérennité de la restauration de chenaux latéraux : modèles issus de 15 ans de suivi sur le Rhône

Jérémie Riquier, Hervé Piégay, Nicolas Lamouroux, Lise Vaudor

► **To cite this version:**

Jérémie Riquier, Hervé Piégay, Nicolas Lamouroux, Lise Vaudor. Pertinence et pérennité de la restauration de chenaux latéraux : modèles issus de 15 ans de suivi sur le Rhône. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, 2019, 2 (2), p. 101-108. 10.1051/lhb/2019020 . hal-02042601

HAL Id: hal-02042601

<https://hal.science/hal-02042601>

Submitted on 21 Oct 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PERTINENCE ET PERENNITE DE LA RESTAURATION DE CHENAUX LATERAUX : MODELES ISSUS DE 15 ANS DE SUIVI SUR LE RHÔNE

Jérémie Riquier⁽¹⁾, Hervé Piégay⁽¹⁾, Nicolas Lamouroux⁽²⁾, Lise Vaudor⁽¹⁾

⁽¹⁾CNRS UMR 5600 EVS - Université de Lyon - e-mail: jeremie.riquier@gmail.com

⁽²⁾IRSTEA UR MALY - Villeurbanne - e-mail: nicolas.lamouroux@irstea.fr

Au cours des dernières décennies, de nombreux projets de restauration de chenaux latéraux ont été mis en œuvre, notamment pour améliorer le fonctionnement écologique de tronçons fluviaux de plaine fortement anthropisés. Néanmoins, les retours d'expérience concernant les ajustements morphologiques s'opérant après les travaux restent rares ou peu partagés, alors qu'ils semblent essentiels pour améliorer la conception technique de tels projets et évaluer leur durabilité. Cet article constitue une synthèse des résultats acquis depuis plus de 15 ans dans le cadre du suivi de 18 bras restaurés du Rhône. Les ajustements morphologiques enregistrés par les bras depuis leur restauration en termes de granulométrie et de sédimentation sont décrits. Puis, une estimation de leur durée de vie potentielle en tant qu'habitat aquatique est réalisée s'appuyant sur des modèles tendanciels. L'analyse de ces résultats suggère que la restauration des bras du Rhône constitue une solution à la fois pertinente et pérenne dans le contexte rhodanien. Nous démontrons également que les patrons granulométriques et les vitesses d'accumulation des fines peuvent être bien prédits à partir de descripteurs simples du fonctionnement hydrodynamique des bras. Ces modèles empiriques constituent des outils opérationnels pour guider la conception technique des futurs bras à restaurer du Rhône et potentiellement d'autres hydrosystèmes.

MOTS CLEFS : bras morts ; restauration écologique ; suivi ; hydromorphologie ; évaluation

Relevance and sustainability of side channel restoration: models based on a 15-years monitoring along the Rhone River

Numerous projects of side channel restoration have been implemented during the last decades to improve the ecological functioning of highly regulated rivers. Feedbacks regarding the hydromorphological adjustment of restored channels are rare or not shared. Nevertheless, such information is crucial to improve the design of restoration measures and to assess their sustainability. In this paper, we report an overview of results derived from the monitoring of 18 restored side channels conducted over more than 15 years in the Rhône River. Firstly, hydromorphological adjustments of restored channels (bed material grain size longitudinal patterns, dynamics of fine sediment accumulation) are described. Then, an assessment of the potential persistence of channels as aquatic habitats is conducted using trend models. Our results suggest that side channel restoration can be a relevant and sustainable measure in the context of the Rhone River. We also demonstrate that grain size conditions and fine sediment accumulation rates can be successfully predicted using simple metrics reflecting the hydrodynamic functioning of side channels, that managers can target or modify: the frequency and magnitude (*i.e.* maximum shear stress) of upstream overflow events and the maximum intensity of backflow events (*i.e.* maximum backflow capacity). These empirical relationships are important operational tools for guiding future project design in the Rhone River and potentially elsewhere. They can be used to predict the effects and the sustainability of side channel restoration. They may reduce the uncertainty about the potential hydromorphological adjustments of side channels after restoration, and contribute to optimize the balance between local ecological gains and restoration costs.

KEY WORDS: side channels; ecological restoration; monitoring; hydromorphology; evaluation

46 INTRODUCTION

47 Les chenaux latéraux (ou bras fluviaux) constituent des unités emblématiques des rivières de plaine,
48 notamment lorsqu'elles ont conservé une certaine mobilité latérale. Les plaines alluviales peu
49 domestiquées jouxtant les cours d'eau latéralement dynamiques se composent souvent d'un réseau
50 de chenaux plus ou moins développés et interconnectés avec le cours principal. A l'échelle de la
51 plaine alluviale, les bras fluviaux présentent souvent des stades successionnels diversifiés et
52 disposent d'une forte hétérogénéité en termes de fonctionnement et d'habitat. Ils constituent *in fine*
53 le support de communautés biologiques variées [Ward *et al.*, 2002 ; Amoros et Bornette, 2002]. Les
54 grands cours d'eau de plaine, à l'instar du Rhône, comptent aujourd'hui parmi les écosystèmes les
55 plus altérés et menacés à l'échelle mondiale. En tant qu'axes de développement majeur, ils ont fait
56 l'objet d'aménagements (*e.g.* endiguements, barrages) à buts multiples (*e.g.* développement de la
57 navigation, protection contre les inondations, production d'hydroélectricité) relativement lourds
58 depuis le XIX^e siècle. Ces infrastructures ont induit de profondes mutations à la fois physiques et
59 biologiques, entraînant une diminution importante de la diversité structurelle et fonctionnelle des
60 habitats et donc de leur richesse écologique [Petts *et al.*, 1989 ; Ward et Stanford, 1995]. En limitant
61 certains processus clés de la dynamique fluviale, tels la divagation latérale ou encore le transit
62 sédimentaire, ces aménagements ont engendré un affaiblissement notable de la capacité des cours
63 d'eau à générer de nouveaux chenaux latéraux et à régénérer les plus anciens. Ces derniers tendent
64 inéluctablement à s'aterrir (par comblement sédimentaire et/ou abaissement des lignes d'eau) et à
65 disparaître des paysages fluviaux.

66 Dans de nombreux cas, le maintien des anciens chenaux latéraux au sein des corridors fluviaux ne
67 peut plus être assuré sans la mise en œuvre de mesures curatives. Depuis une trentaine d'années, la
68 prise de conscience de ces altérations a ouvert la voie à de nouvelles pratiques, visant à améliorer la
69 qualité éco-hydromorphologique des hydrosystèmes fluviaux. Les chenaux latéraux font l'objet
70 d'une attention croissante au sein des programmes de restauration des grands cours d'eau de plaine
71 fortement anthropisés, en particulier pour améliorer leur fonctionnement écologique [*e.g.* Schiemer
72 *et al.*, 1999 - Danube en Autriche ; Baptist *et al.*, 2004 - Waal et Rhin aux Pays-Bas]. Le suivi de
73 ces opérations de restauration est fondamental, dans la mesure où il permet de fournir des
74 informations essentielles pour la mise en œuvre de procédures de gestion adaptatives, pour guider la
75 conception technique de futures opérations ou encore pour évaluer la durée de vie des écosystèmes
76 restaurés qui est l'un des indicateurs du succès de ces opérations. Cependant, les retours
77 d'expérience concernant l'ajustement hydromorphologique des bras restaurés sont encore rares dans
78 la littérature scientifique internationale, alors que ces éléments de connaissance constituent un
79 prérequis indispensable pour évaluer l'efficacité des mesures de restauration. Dans ce contexte,
80 l'objectif de cette contribution est de déterminer si le recréusement des chenaux latéraux du Rhône
81 peut constituer une action de restauration à la fois pertinente, en termes de diversification des
82 habitats, et pérenne. Autrement dit, il s'agit de confirmer le bien fondé d'un tel investissement.

83 I RESTAURATION ET SUIVI DE CHENAUX LATÉRAUX DU RHÔNE

84 I.1 Objectifs de la restauration

85 La prise de conscience de la dégradation de l'hydrosystème rhodanien a conduit les décideurs à
86 engager en 1998 un programme de restauration ciblant certaines sections court-circuitées par les
87 aménagements hydroélectriques du fleuve (les vieux-Rhône). Les opérations ont concerné
88 l'amélioration des axes migrants et la restauration des habitats, avec deux mesures
89 complémentaires : (i) la modification raisonnée du régime des débits réservés qui doit permettre de
90 redonner un caractère "vif et courant" aux vieux-Rhône ; (ii) la remise en eau d'anciens chenaux
91 latéraux du fleuve, à partir d'actions mécaniques, qui vise à augmenter la diversité d'habitats dans
92 les plaines inondables et à favoriser les espèces caractéristiques de ces milieux. Ce rajeunissement
93 "artificiel" des bras repose sur la combinaison d'opérations de curage/dragage des alluvions fines
94 et/ou grossières, s'associant parfois à la reconnexion totale (création de bras courant permanent) ou

95 partielle (connexion permanente seulement par l'extrémité aval) des bras au chenal principal. Le
96 rétablissement d'une diversité de modes d'alimentation en eau, de stades successifs et de faciès
97 hydromorphologiques a été recherché afin de maximiser la diversité des conditions d'habitat au sein
98 et surtout entre les bras restaurés à l'échelle du tronçon fluvial (Amoros, 2001). En favorisant la
99 diversité et l'hétérogénéité des habitats du lit mineur et du lit majeur, ces deux actions
100 complémentaires visent à améliorer le fonctionnement écologique des tronçons fluviaux ciblés (e.g.
101 Lamouroux *et al.*, 2015). Entre 1999 et 2006, un total de 24 bras a été restauré sur 4 tronçons court-
102 circuités : Pierre-Bénite en 1999, Chautagne en 2004, Belley en 2005 et Brégnier-Cordon en 2006.
103 Dix-huit de ces bras font l'objet d'un suivi hydromorphologique, parmi d'autres thématiques
104 (Lamouroux *et al.*, 2015), dans le cadre plus général du programme d'accompagnement scientifique
105 des opérations de restauration. Les lecteurs peuvent trouver des cartes de localisation des différents
106 sites suivis dans Riquier (2015).

107 **I.2 Objectifs du suivi hydromorphologique des chenaux latéraux**

108 Le suivi hydromorphologique des bras a pour vocation de répondre à différents questionnements
109 scientifiques répondant aux attentes opérationnelles. En effet, la stratégie de restauration des
110 chenaux latéraux du Rhône, telle qu'elle est actuellement pratiquée, où l'on agit sur les symptômes
111 et non sur les causes de la dégradation et où en quelque sorte "l'Homme" se substitue à la "nature",
112 en créant des formes que le cours d'eau n'est plus capable de créer lui-même, pose question. De
113 nombreuses interrogations demeurent notamment quant à la pertinence et la pérennité de ces
114 mesures sur le long terme, car elles peuvent apparaître comme "contre-nature". La notion de
115 pertinence nous amène à questionner l'efficacité des travaux réalisés en termes de diversification
116 des conditions d'habitat entre les bras restaurés, à l'échelle des différents tronçons fluviaux ciblés.
117 La notion de pérennité renvoie, quant à elle, à la durée de vie potentielle des bras restaurés en tant
118 qu'habitat aquatique et donc à leur sensibilité aux processus d'atterrissement (*i.e.* comblement
119 sédimentaire, changement de niveau de base) ou d'auto-entretien (*i.e.* décapages des dépôts). Ainsi,
120 caractériser et comprendre les réponses hydrosédimentaires des chenaux latéraux restaurés et
121 caractériser les processus qui rendent compte de leur variabilité dans le temps et dans l'espace
122 constituent des enjeux importants à la fois sur le plan scientifique et opérationnel.

123 **II METHODES**

124 **II.1 Protocole de suivi**

125 *II.1.1 Granulométrie des dépôts et comblement des bras par les fines (caractérisation des réponses)*

126 Après restauration, les bras restaurés ont fait l'objet de relevés *in situ*, réalisés en moyenne tous les
127 deux ans, de manière à caractériser leur réponse morpho-sédimentaire. Nous disposons d'un état
128 avant restauration pour 12 des 18 chenaux latéraux suivis et de 5 à 7 campagnes de mesures post-
129 travaux offrant un recul temporel s'étendant de 7 à 15 années après restauration, selon les bras. Lors
130 de ces campagnes, pour rendre compte de la distribution granulométrique des alluvions à l'intérieur des
131 bras, cinq prélèvements équi-répartis sont réalisés longitudinalement dans l'axe du chenal avec une
132 benne d'Eckmann. Ces échantillons sont par la suite analysés en laboratoire à l'aide d'un
133 granulomètre laser. Tout échantillon dont la taille médiane estimée excède 2 mm est considéré
134 comme matériel grossier, sans distinction de taille plus précise, et seuls les échantillons de fines
135 sont prélevés. Ces mesures ont été utilisées dans le cadre de l'analyse de la diversité des conditions
136 d'habitat et repose sur le postulat selon lequel les caractéristiques granulométriques des dépôts
137 peuvent constituer un bon indicateur de la diversité des conditions fonctionnelles des bras. Au cours
138 de ces campagnes, nous mesurons également la hauteur d'eau et l'épaisseur des dépôts de fines
139 (fraction < 2mm) tous les 10 mètres de linéaire le long de l'axe médian de la zone en eau des bras.
140 Ces relevés sont effectués à la pige ; un topofil est utilisé pour connaître la distance parcourue
141 depuis un point de référence fixe d'une campagne à l'autre. Ce second type de mesures est utilisé
142 dans le cadre de l'analyse de la durée de vie des bras.

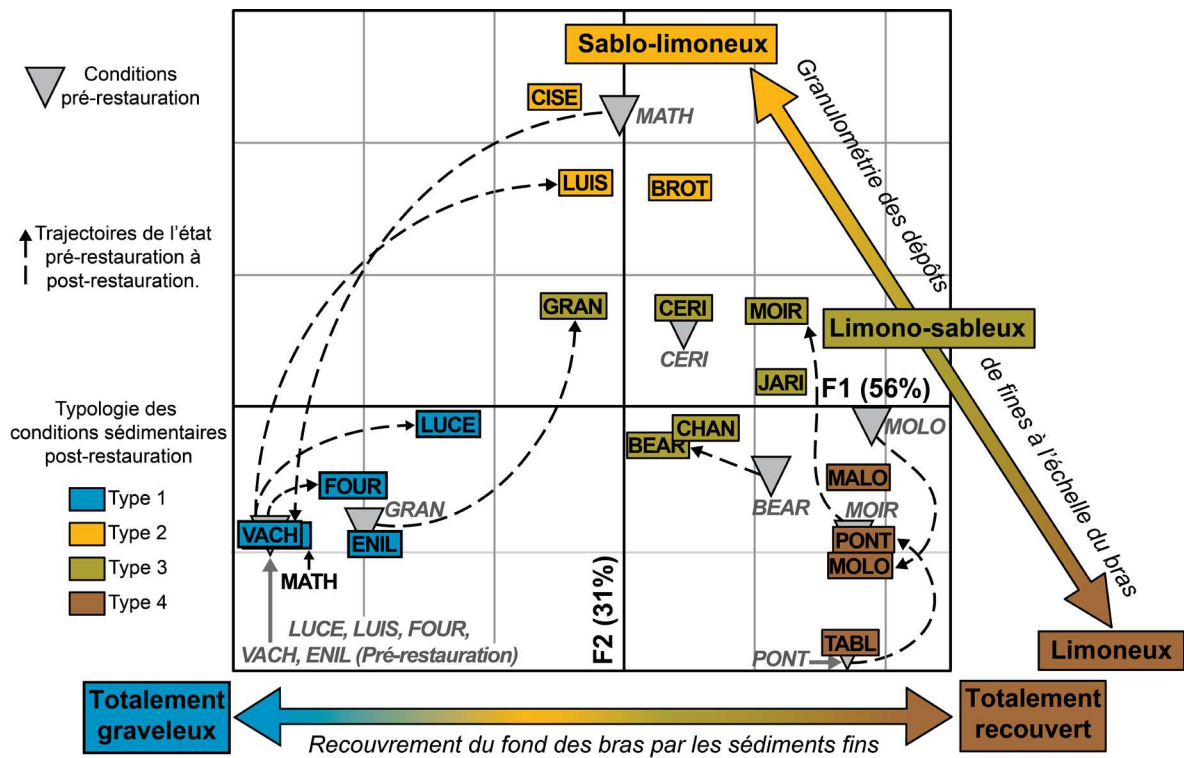
143 II.1.2 Hydrodynamisme des écoulements de crue (caractérisation des contrôles)

144 Afin de caractériser le régime d'écoulement en crue des bras, nous nous sommes appuyés pour
145 chaque tronçon d'étude sur des chroniques de débit horaire et sur les relations hauteur-débit établies
146 dans le chenal principal au droit de l'ensemble des bras étudiés et dans les bras connectés de
147 manière permanente avec le chenal principal uniquement par l'aval. Des relevés topographiques des
148 bouchons alluviaux amont de ces bras ont également été réalisés à l'aide d'un DGPS, pour
149 déterminer le cheminement préférentiel des écoulements superficiels lors de leur submersion et les
150 cotes altimétriques de débordement. L'ensemble de ces données nous ont permis d'estimer les
151 paramètres hydrologiques et hydrauliques qui constituent les facteurs de contrôle clés des
152 conditions sédimentaires observées dans les bras. Les trois variables retenues permettent de
153 quantifier : (i) la fréquence des débordements amont engendrant un fonctionnement lotique des bras
154 (*i.e.* fréquence de connexion amont, exprimée en jours.an⁻¹), (ii) la force maximale s'exerçant sur le
155 fond enregistrée par les bras depuis leur restauration en fonctionnement courant (*i.e.* contrainte de
156 cisaillement maximale, exprimée en N.m⁻² ; il s'agit d'une valeur moyenne à l'échelle du bras) et (iii)
157 l'intensité du reflux dans le bras lorsque celui-ci se trouve en phase d'alimentation par retours d'eau
158 depuis son extrémité aval (*i.e.* capacité maximale de reflux, exprimée en m.km⁻¹). Cette métrique
159 correspond au différentiel de hauteur d'eau mesuré entre le niveau observé juste avant la submersion
160 du bouchon alluvial amont et celui observé pour le débit minimal du vieux-Rhône (débit réservé),
161 rapporté à la longueur de la zone en eau permanente du bras.

162 III RESULTATS

163 III.1 Caractérisation de la diversité des conditions d'habitat (pertinence des actions)

164 L'analyse des données de granulométrie des sédiments échantillonnés dans les bras (Figure 1) a
165 permis de mettre en évidence que la part spatiale (inter-bras) de la variance totale des conditions
166 granulométriques observées après restauration est très forte (81%). Ce résultat souligne que la
167 diversité de ces conditions est bien plus importante entre les différents chenaux latéraux que celle
168 résultant des trajectoires temporelles individuelles de chaque bras. Une Analyse en Composantes
169 Principales et des classifications ont permis d'identifier quatre principaux types de conditions
170 granulométriques moyennes, *de facto* robustes et pour l'instant stables dans le temps (Figure 1). Les
171 chenaux de type 1 sont des bras à lit graveleux pouvant présenter des plaques sporadiques de sables,
172 voire parfois de limons. Les bras de types 2 et 3 constituent des cas intermédiaires présentant des
173 taux de recouvrement de leur fond par des dépôts de sédiments fins similaires. Les bras de type 2
174 enregistrent des dépôts plutôt sablo-limoneux, alors que ceux de type 3 s'inscrivent dans une gamme
175 plutôt limono-sableuse. Les bras de type 4 sont, quant à eux, totalement recouverts par des dépôts
176 limoneux. La plupart des bras présentent des conditions granulométriques après travaux très
177 proches de celles observées avant restauration. Ainsi, les travaux ont avant tout permis de rajeunir
178 les formes sans pour autant modifier les processus contrôlant les modalités de sédimentation des
179 bras.



180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190

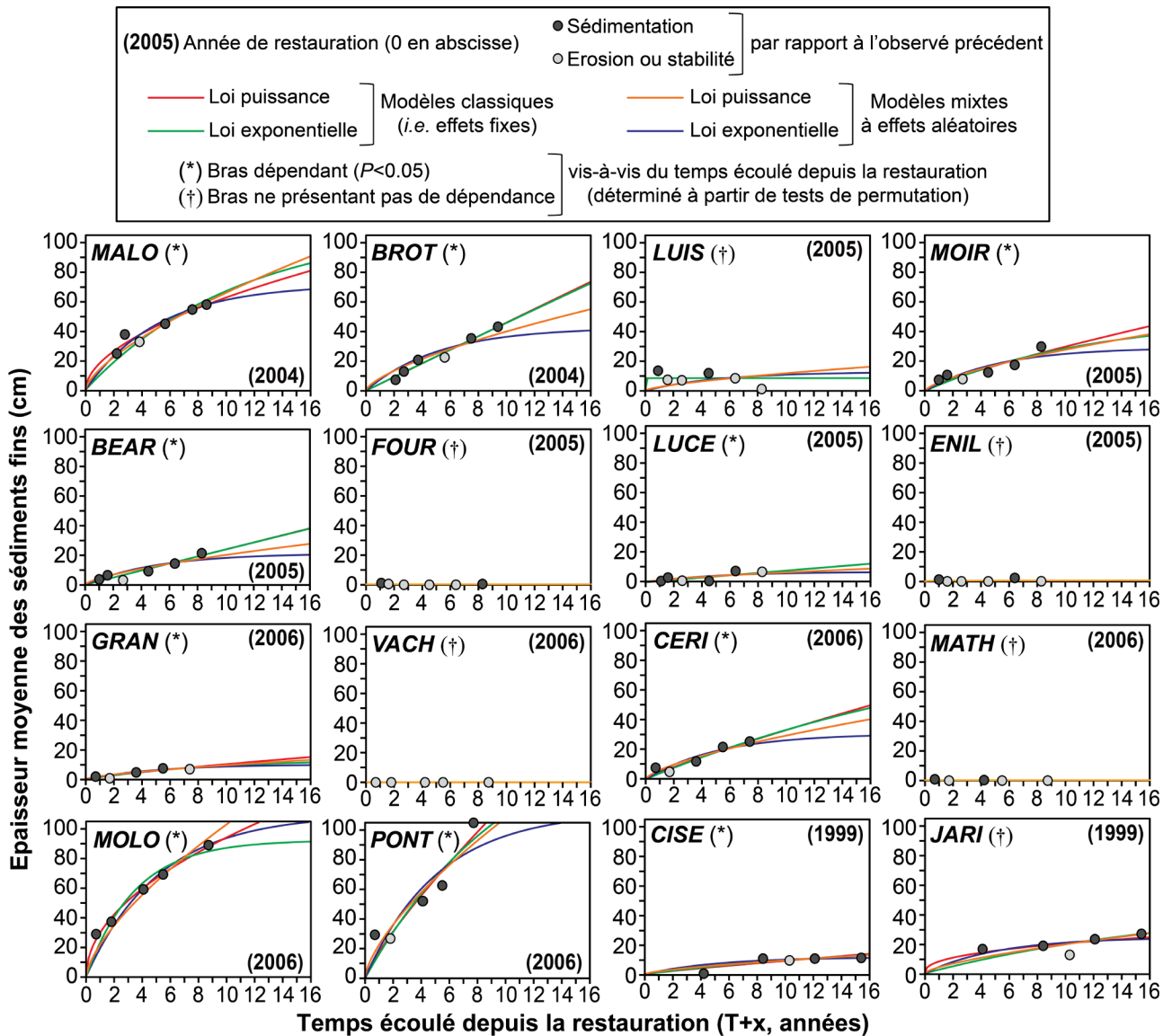
Figure 1 : Analyse de la diversité des conditions granulométriques de surface moyennes mesurées dans les bras étudiés (modifié et adapté d'après Riquier *et al.*, 2015).

Plan factoriel simplifié obtenu à partir d'une Analyse en Composantes Principales inter-bras. Les bras sont ordonnés principalement selon les caractéristiques granulométriques des dépôts sédimentaires et le taux de recouvrement de leur fond par les sédiments fins. Les types de conditions ont été déterminés à partir d'une Classification Ascendante Hiérarchique réalisée sur les deux premières composantes de l'analyse. La position des bras après restauration (Code à 4 lettres) correspond à une condition moyenne reposant sur l'ensemble des observés disponibles. Les observations disponibles réalisées avant restauration ont été projetées sur le plan factoriel, permettant ainsi d'apprécier l'effet des travaux réalisés sur les conditions granulométriques observées (*cf. ibid.* pour détails méthodologiques).

191 III.2 Estimation de la durée de vie des bras restaurés (pérennité des actions)

192 Les bras présentent une large gamme de patrons de sédimentation (Figure 2). L'ensemble des bras, à
193 l'exception de MOLO, enregistrent des processus de décapage lors d'évènements de crue
194 relativement fréquents (compris entre la crue biennale et quinquennale, selon le tronçon fluvial
195 considéré). Ceci souligne que ces bras possèdent une certaine capacité d'auto-entretien.

196 Pour aller plus loin dans cette analyse, nous avons exploré la significativité des relations observées
197 à partir de tests de permutation (Figure 2). Sur les 16 bras pouvant être intégrés dans cette analyse,
198 l'évolution de l'épaisseur moyenne des sédiments fins est significativement liée au temps pour 10
199 d'entre eux. En d'autres termes, ces chenaux tendent à accumuler de plus en plus de sédiments fins
200 au fur et à mesure que le temps s'écoule. Les processus de décapage dans ces bras peuvent les
201 rajeunir épisodiquement, sans pour autant assurer leur auto-entretien, leur capacité de
202 rajeunissement n'étant jusqu'à présent pas assez importante pour contrecarrer les processus de
203 sédimentation. Les 6 autres chenaux présentent, quant à eux, un effet non significatif du temps,
204 soulignant qu'ils sont a priori capables d'auto-entretenir leur stade aquatique sur le long terme.



205

206

207

Figure 2 : Evolution du comblement sédimentaire des bras étudiés après restauration (modifié et adapté d'après Riquier *et al.*, 2017).

208

Pour explorer la relation entre \overline{Ep} , l'épaisseur moyenne des sédiments fins accumulés et T le temps écoulé depuis la restauration des bras, nous avons utilisé deux formes d'ajustement potentielles comme indiqué dans les équations suivantes :

211

$$\overline{Ep} = \alpha \cdot T^{(1-\beta)} \quad (1)$$

212

$$\overline{Ep} = \alpha \cdot (1 - \exp[-\beta \cdot T]) \quad (2)$$

213

où α reflète la propension du bras à accumuler des sédiments fins, β est un paramètre de forme qui reflète la décroissance (ou non) de l'accumulation des sédiments fins au cours du temps. Deux types d'approche ont été testés. D'une part, nous avons construit des modèles "classiques" où les paramètres alpha et beta sont calculés individuellement pour chacun des bras (*i.e.* modèles à effets fixes). D'autre part, nous avons utilisé des modèles mixtes à effets aléatoires. Ici, le paramètre beta est représenté par une valeur unique et fixe pour l'ensemble des bras, représentant le comportement global des bras en termes de ralentissement (ou non) des vitesses de comblement au cours du temps. Le paramètre alpha est quant à lui dit aléatoire, dans la mesure où il est calculé pour chaque bras. Au final, on dispose donc de quatre tendances potentielles pour chaque bras.

221

A partir de ces modèles, nous avons pu fournir une première estimation des gammes de durée de vie potentielle des bras (Table 1). Quatre situations ont été identifiées pour les 16 bras analysés : 6 ont une durée de vie a priori infinie, car ils sont capables de s'auto-entretenir ; 4 ont une longévité potentielle supérieure à un siècle ; 3 ont des durées de vie que l'on qualifiera d'intermédiaire, s'étendant d'environ 3 à 9 décennies, c'est pour ces bras que l'incertitude est la plus forte (cette forte variation est liée au déclin ou non des vitesses de sédimentation au cours du temps) ; enfin 3 autres

222

223

224

225

226

227 bras ont une durée de vie courte, comprise entre *ca.* 2 et 5 décennies. Il convient toutefois de garder
 228 à l'esprit que ces estimations sont des projections des tendances actuelles. A ce titre, nous ne savons
 229 pas encore comment les bras réagiront à des crues moins fréquentes que celles qu'ils ont déjà subies
 230 (entre Q₅ et Q₂₀ selon le tronçon considéré). D'autre part, nos modèles considèrent que
 231 l'atterrissement des bras est seulement contrôlé par leur comblement par les fines. D'autres facteurs
 232 peuvent affecter les hauteurs d'eau mesurées dans les bras, comme par exemple une évolution du
 233 niveau de base dans les bras (*e.g.* incision du chenal principal), ou un engravement pour les bras
 234 présentant des écoulements très compétents.

Durée de vie (années)	MALO	BROT	LUIS	MOIR	BEAR	FOUR	LUCE	ENIL
	35-47	34-99	auto-entretien	51-90	35-93	auto-entretien	>100	auto-entretien
	GRAN	VACH	CERI	MATH	MOLO	PONT	CISE	JARI*
	>100	auto-entretien	>100	auto-entretien	21-32	17-22	>100	auto-entretien

235 * Ce bras semble avoir atteint un certain équilibre métastable. Cependant, rien ne nous permet d'affirmer
 236 que cet état va perdurer.

237 **Tableau 1 : Estimation de la durée de vie potentielle des bras restaurés en tant**
 238 **qu'habitats aquatiques (modifié et adapté d'après Riquier *et al.*, 2017).**

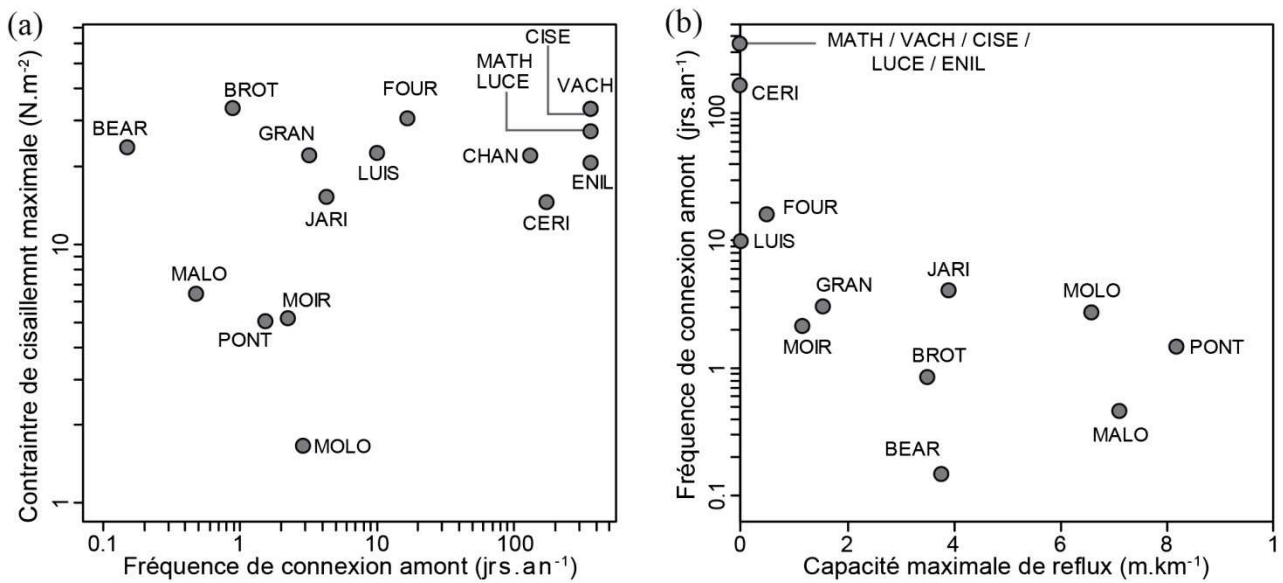
239 Pour estimer la durée de vie des bras en tant qu'habitat aquatique, nous avons extrapolé les tendances modélisées
 240 (Figure 2), afin d'obtenir différents scénarios d'évolution potentielles des épaisseurs moyennes de fines. Nous avons
 241 ensuite calculé le temps nécessaire pour que l'épaisseur sédimentaire moyenne soit équivalente à la hauteur d'eau
 242 moyenne des bras mesurées juste après restauration. Au final, seules les tendances les plus réalistes ont été retenues
 243 pour chaque bras.
 244

245 **III.3 Prédiction *a priori* du type fonctionnel et de la propension des bras à sédimenter**

246 Les bras restaurés présentent une diversité de fonctionnements hydrodynamiques. La figure 3a
 247 montre ainsi qu'ils enregistrent, plus ou moins fréquemment, un écoulement courant. Au cours de
 248 ces épisodes de connexion amont, l'intensité des écoulements varie de manière conséquente d'un
 249 bras à l'autre, indépendamment de la fréquence de cette connexion. La figure 3b permet de mettre
 250 en évidence ainsi deux principaux types de fonctionnement : d'une part des bras fréquemment
 251 connectés à l'amont (>10 jours.an⁻¹) avec une capacité maximale de reflux nulle ou très faible, et
 252 d'autre part des bras peu fréquemment connectés (<10 jours.an⁻¹) avec des capacités de reflux très
 253 variées s'étendant de 1 à 8 m.km⁻¹.

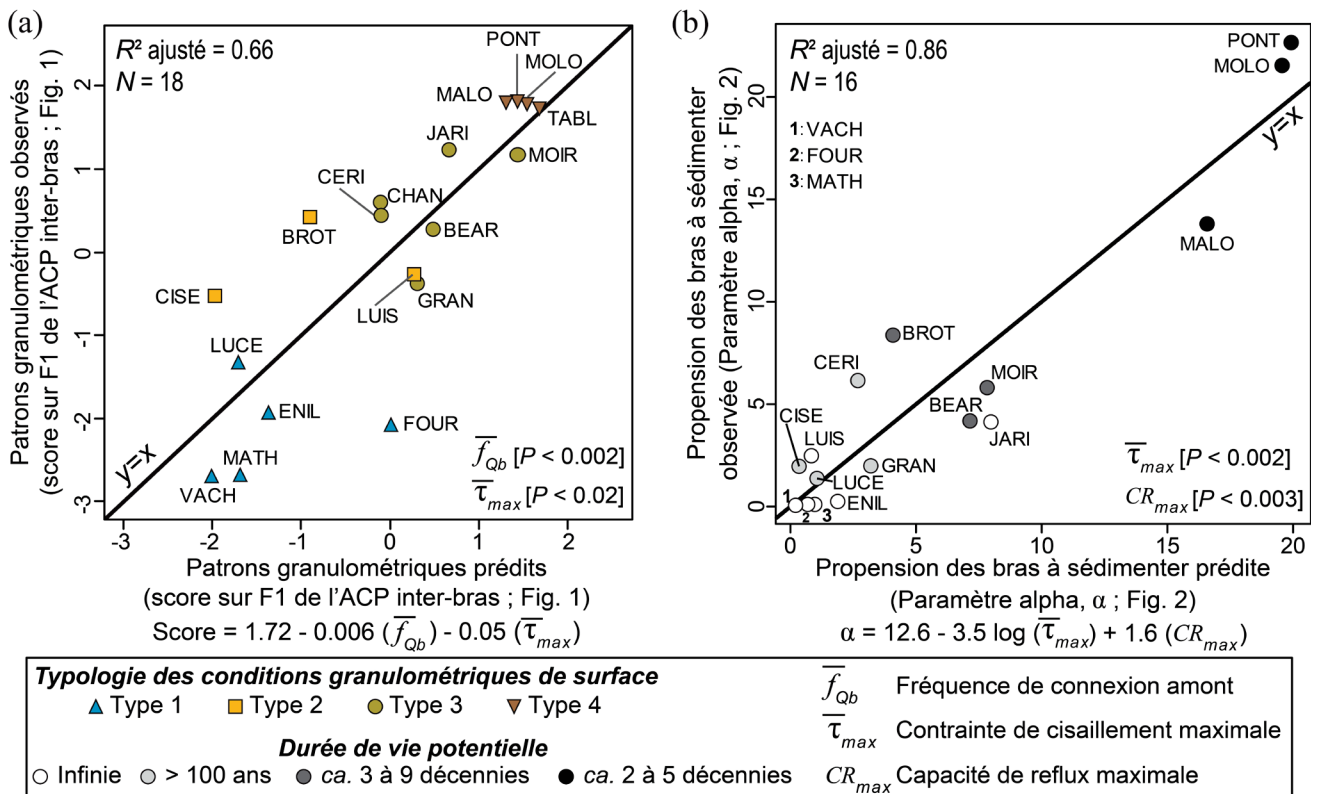
254 Les variables permettant de caractériser le régime d'écoulement des bras en crue (Figure 3) ont alors
 255 été utilisées pour tester notre capacité à prédire les ajustements hydromorphologiques s'opérant
 256 après leur restauration (Figure 4). Les conditions granulométriques moyennes observées en surface
 257 dans les bras après restauration (ainsi que les types associés) (Figure 4a) sont bien prédites à partir
 258 de ces descripteurs de l'hydrodynamisme de crue des bras, tout comme l'est également la
 259 propension des bras à accumuler des sédiments fins (ainsi que leur durée de vie potentielle dans une
 260 certaine mesure) (Figure 4b).

261



262
263
264

Figure 3 : Caractérisation de l'hydrodynamisme des bras en crue (modifiée et adaptée d'après Riquier, 2015).



265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279

Figure 4 : Exemple de relations empiriques permettant de prédire (a) les conditions granulométriques moyennes post-restauration et (b) la propension des bras à accumuler des sédiments fins à partir de leurs caractéristiques d'écoulement en crue (Figure 3) (modifiée et adaptée d'après Riquier et al., 2015 et Riquier et al., 2017).

Les modèles ont été construits à partir de régressions linéaires multiples. Les équations établies sont indiquées pour chaque exemple. Les types de conditions granulométriques moyennes observés en surface après restauration (c.f. Figure 1) et les gammes de durée de vie potentielle des bras restaurés (c.f. table 1 et § III.2) sont également représentés. En ce qui concerne la prédiction de l'accumulation de fines dans les bras, nous avons retenu les valeurs du paramètre alpha issues de la forme puissance du modèle mixte à effet aléatoire utilisant une loi puissance (c.f. Figure 2). Cette approche nous permet de comparer les bras sur une base commune étant donné que dans ce cas le paramètre beta est fixe. L'ajustement selon la loi puissance a été retenu puisqu'il est plus performant (erreur quadratique moyenne) que celui utilisant la forme exponentielle. Les lecteurs peuvent trouver des éléments d'interprétation supplémentaires dans Riquier et al. (2015, 2017).

281 L'évaluation de la pertinence des actions de restauration en termes de diversification des conditions
282 d'habitat repose sur la granulométrie des dépôts de surface prise comme indicateur. Quatre
283 principaux types fonctionnels ont ainsi été mis en évidence. Ceux-ci sont, jusqu'à présent, pérennes
284 dans le temps. Nous avons également démontré que ces types de bras sont régis par les conditions
285 hydrodynamiques observées lors des crues (Figure 4a). Ces travaux ont donc bien confirmé qu'il
286 existe une diversification des conditions hydrauliques et sédimentaires des bras restaurés,
287 diversification qui se maintient au cours du temps. Ces éléments de conclusion sont corroborés par
288 les résultats acquis par hydrobiologistes sur les bras restaurés des tronçons de Belley et de Brégnier-
289 Cordon, qui démontrent que la restauration a permis d'augmenter la diversité bêta des peuplements
290 de macroinvertébrés (Castella *et al.*, 2015). La stratégie mise en œuvre dans le cadre de la
291 restauration des chenaux latéraux du Rhône a donc bien permis de restaurer des bras disposant d'une
292 diversité de stades et de dynamiques successionales. Elle semble donc constituer une solution de
293 gestion pertinente des plaines rhodaniennes.

294 Les modèles tendanciels élaborés démontrent que les bras restaurés présentent des durées de vie
295 potentielles variées, qui sont pour la plupart en accord avec les objectifs initiaux des opérateurs. Ces
296 durées de vie s'étendent d'une vingtaine d'années, pour les bras les plus prompts à s'atterrir, à
297 plusieurs siècles pour les bras présentant les plus fortes capacités d'auto-entretien. Néanmoins, nous
298 devons encore observer comment les bras réagiront à des évènements de crue moins fréquents que
299 ceux qui ont été enregistrés jusqu'à présent (compris entre la crue biennale et quinquennale, selon le
300 tronçon fluvial considéré). A ce jour, nous avons considéré l'accumulation de sédiments fins comme
301 le seul facteur contrôlant l'atterrissement des bras. Cependant, les niveaux d'eau observés dans les
302 bras et de fait leur durée de vie peuvent également être affectés par d'autres facteurs, tels des
303 changements de niveau de base imputables à des ajustements locaux de la géométrie du lit mineur
304 (*i.e.* incision du lit, migration de radiers). Ce type de phénomène reste toutefois mineur sur le
305 Rhône, étant donné que sur les 18 bras étudiés ici, seuls 2 présentent de tels ajustements (Riquier,
306 2015). Ainsi, d'un point de vue général, agir sur les formes semble constituer dans le contexte
307 rhodanien une mesure pérenne. Cela est possible car la géométrie du lit mineur est souvent figée, le
308 transport solide est faible à nul et les concentrations en matières en suspension sont peu élevées,
309 comparativement à d'autres hydrosystèmes. Avec la mise en œuvre actuelle d'un schéma de ré-
310 élargissement des marges fluviales et la réintroduction prévue d'une charge de fond potentiellement
311 mobile, ce contexte va sans doute changer et la question de la pérennité de certains bras devra alors
312 être mieux évaluée. La nouvelle géométrie devrait en effet avoir des effets en termes de connectivité
313 hydrologique des bras en crue ou de niveau d'eau lors des écoulements en débit réservé.

314 Les relations statistiques établies (Figure 4) démontrent qu'il existe un lien entre l'hydrodynamisme
315 des écoulements de crue dans les bras restaurés, les conditions d'habitat physique et la durée de vie
316 potentielle des bras. L'intérêt des variables de contrôle utilisées réside dans le fait qu'elles sont, au
317 moins en partie, dépendantes de la géométrie des bras (*e.g.* cote de débordement amont ou
318 conditions de pente), sur laquelle il est possible d'intervenir lors des travaux. Ainsi, il est
319 maintenant possible d'évaluer *a priori* l'effet de la modification de la géométrie des bras restaurés
320 sur l'ajustement hydrosédimentaire des bras après restauration. Le cadre typologique et les modèles
321 statistiques produits constituent des outils opérationnels pertinents, qui vont permettre de mieux
322 encadrer la conception technique des futures actions de restauration sur le Rhône et potentiellement
323 ailleurs. Ces outils peuvent, en outre, permettre de réduire les incertitudes quant à la réponse
324 écohydromorphologique potentielle des bras restaurés ou encore de maximiser les gains
325 écologiques locaux et donc d'optimiser les futurs investissements financiers dans ce type
326 d'opération. La transférabilité de ces modèles à d'autres hydrosystèmes sera testée dans les années à
327 venir.

328 **V REMERCIEMENTS**

329 Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une thèse soutenue à l'Université Lumière Lyon 2 et financée
330 dans le cadre du programme de recherche "RhônEco". Ce dernier bénéficie du soutien technique et
331 financier de nombreux partenaires (Compagnie Nationale du Rhône, Agence de l'eau Rhône-
332 Méditerranée-Corse, régions Auvergne-Rhône-Alpes et Provence-Alpes-Côte d'Azur, Electricité de
333 France, Union Européenne *via* le Fond Européen de Développement Économique Régional et de
334 multiples collectivités rhodaniennes). Nous remercions vivement l'ensemble des personnes ayant
335 participé à la collecte des données sur le terrain et à la réflexion scientifique et plus spécifiquement
336 Jean-Michel Olivier, Emmanuel Castella et Monika Šulc Michalková.

337 **VI REFERENCES**

- 338 Amoros C. (2001). - The concept of habitat diversity between and within ecosystems applied to
339 river side-arm restoration. *Environnemental Management*, **28(6)**, 805-817.
- 340 Amoros C., Bornette G. (2002). - Connectivity and biocomplexity in waterbodies riverine
341 floodplains. *Freshwater Biology*, **47(4)**, 761-776.
- 342 Baptist M.J., Penning W.E., Duel H., Smits A.J., Geerling G.W., Van der Lee G.E., Van Alphen J.
343 S. (2004). - Assessment of the effects of cyclic floodplain rejuvenation on flood levels and
344 biodiversity along the Rhine River. *River Research and Applications*, **20(3)**, 285-297.
- 345 Castella E., Béguin O., Besacier-Monbertrand A.-L., Hug Peter D.H., Lamouroux N., Mayor
346 Siméant H., McCrae D., Olivier J.-M., Paillex A. (2015) - Realised and predicted changes in
347 the invertebrate benthos after restoration of connectivity to the floodplain of a large river.
348 *Freshwater Biology*, **60(6)**, 1131-1146.
- 349 Lamouroux N., Gore J.A., Lepori F., Statzner B. (2015). - The ecological restoration of large rivers
350 needs science-based, predictive tools meeting public expectations: an overview of the Rhône
351 project. *Freshwater Biology*, **60(6)**, 1069-1084.
- 352 Petts G.E., Möller H., Roux A.-L. [Eds.] (1989). - *Historical Change of Large Alluvial Rivers:*
353 *Western Europe*. John Wiley & Sons Ltd.
- 354 Riquier J. (2015). - *Réponses hydrosédimentaires de chenaux latéraux restaurés du Rhône français.*
355 *Structures spatiales et dynamiques temporelles des patrons et des processus, pérennité et*
356 *recommandations opérationnelles*. Thèse de doctorat, Université Lumière Lyon 2, 293 p.
- 357 Riquier J., Piégay H., Šulc Michalková M. (2015). - Hydromorphological conditions in eighteen
358 restored floodplain channels of a large river: linking patterns to processes. *Freshwater Biology*,
359 **60(6)**, 1085-1103.
- 360 Riquier J., Piégay H., Lamouroux N., Vaudor L. (2017) - Are restored side channels sustainable
361 aquatic habitat features? Predicting the potential persistence of side channels as aquatic habitats
362 based on their fine sedimentation dynamics. *Geomorphology*, **295**, 507-528.
- 363 Schiemer F., Baumgartner C., Tockner K. (1999). - Restoration of floodplain rivers: The 'Danube
364 restoration project'. *Regulated Rivers: Research & Management*, **15(1)**, 231-244.
- 365 Ward J.V., Stanford J.A. (1995). - Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its
366 disruption by flow regulation. *Regulated Rivers: Research and Management*, **11(1)**, 105-119.
- 367 Ward J.V., Tockner K., Arscott D.B., Claret C. (2002). - Riverine landscape diversity. *Freshwater*
368 *Biology*, **47(4)**, 517-539.