

Restaurer un espace de mobilité pour la Garonne

Réflexion sur un protocole de suivi
Analyse historique de sites potentiels
Comparaison avec l'Ebre

Convention SMEAG/CNRS : 061750

Eduardo González Sargas, Post-Doc EcoLab
Etienne Muller, Ingénieur de Recherche EcoLab

Date : 11 Mars 2011



EcoLab
Laboratoire
Ecologie fonctionnelle
et Environnement

UMR 5245 (CNRS-UPS-INPT)
Université Paul Sabatier
118 route de Narbonne
Bâtiment 4R1
31062 Toulouse Cedex 9, France

Index

1. Présentation de l'étude.....	1
2. Réflexion pour un suivi des écosystèmes riverains dans une perspective de restauration... 3	3
2.1 Introduction.....	3
2.2 Objectif.....	3
2.3 Contexte et bases scientifiques du protocole.....	3
2.4 Présentation du protocole.....	5
2.5 Liste des indicateurs.....	7
2.6 Manuel du protocole.....	9
2.7 Score global de la restauration.....	14
2.8 Références principales.....	15
2.9 Autres références.....	15
3. Analyse historique des sites d'étude.....	17
3.1 Objectif.....	17
3.2 Matériels et Méthodes.....	17
3.3 Présentation des résultats.....	20
3.4 Références.....	21
3.5 Analyse historique du site de Lizoun.....	23
3.6 Analyse historique du site de Bourret.....	35
3.7 Analyse historique du site de Mas-Grenier.....	47
3.8 Analyse historique du site de Verdun.....	59
3.9 Analyse historique du site de Fenouillet.....	71
3.10 Analyse historique du site d'Ondes.....	87
4. Approche comparée sur l'Ebre (synthèse bibliographique).....	99
5. Conclusion générale.....	103

1. Présentation de l'étude

La Garonne entre Blagnac et Saint Nicolas de la Grave s'inscrit dans le contexte de la Garonne débordante. Elle constitue le secteur le plus riche en zones humides alluviales (bras morts, boisements riverains,...) témoins de l'ancienne divagation du fleuve. Ces milieux abritent une faune et une flore riches et variées (poissons, oiseaux, mammifères, insectes,...) dont certains sont rares et protégés. Ces milieux et espèces sont reconnus d'intérêt patrimonial aux niveaux local, national et européen.

Ces milieux à fortes potentialités sont toutefois fragiles et menacés du fait notamment des aménagements et activités humaines qui ont profondément impacté le fonctionnement du fleuve. L'implantation des barrages en amont, l'extraction de granulats dans le lit mineur et la fixation des berges par des enrochements ont entraîné une importante incision du lit et une déconnexion des zones humides annexes.

Cette problématique est récurrente sur les bassins versants du sud ouest européen et il s'agit aujourd'hui d'apporter de nouvelles propositions de gestion de l' « espace fluvial » visant à respecter la dynamique fluviale, les équilibres écologiques et les fonctions naturelles des cours d'eau pour leur redonner la capacité d'améliorer l'état de leurs milieux naturels. Ces nouvelles modalités de gestion peuvent passer lorsque le contexte le permet par la levée de certaines contraintes sur le lit des cours d'eau (enrochements, merlons, etc.) afin de redonner de la mobilité aux cours d'eau.

Cependant, force est de constater que jusqu'à aujourd'hui aucune opération de ce type n'a été réalisée sur la Garonne et l'on dispose encore de peu de retour d'expériences au niveau national et international. C'est dans ce contexte que le Syndicat Mixte d'Etudes et d'Aménagement (SMEAG) a engagé dans le cadre du projet de coopération transnationale Sud'eau une réflexion sur l'opportunité de réaliser une ou des opérations pilotes à but démonstratif et incitatif sur le secteur de la Garonne débordante.

En 2009, dans le cadre d'une approche coordonnée des projets Sud'eau et Eau et Territoire menés par le SMEAG et des chercheurs de Toulouse (EcoLab, Géode) et de Clermont-Ferrand (GéoLab), cinq sites potentiellement intéressants ont été identifiés parmi les sites contraints par des enrochements pour la restauration de l'espace mobilité. Chacun de ces sites a fait l'objet d'une première caractérisation synthétique des atouts et contraintes environnementales et des enjeux associés.

C'est ainsi que, le Président du SMEAG a souhaité, pour continuer cette réflexion associer les chercheurs d'EcoLab (CNRS/Université de Toulouse) pour contribuer au diagnostic des sites identifiés ainsi qu'à la définition d'un protocole de suivi. Ces données seront mises à disposition du bureau d'études retenu pour proposer les esquisses d'aménagement afin de les intégrer dans le diagnostic des sites et dans le protocole de suivi.

L'étude, dont les objectifs sont définis ci-dessus, a été réalisée en 3 mois et demi par Eduardo González post-doctorant sous la direction d'Etienne Muller, Ingénieur de Recherche CNRS à EcoLab. Cette étude sur la Garonne s'articule donc en 3 parties complémentaires :

- la mise au point d'indicateurs spécifiques d'état et de suivi,
- l'analyse de l'évolution historique du lit de la Garonne et de ses annexes à l'échelle de chaque site sur une période de deux siècles, avec une synthèse des connaissances sur le site d'Ondes identifié comme « station témoin » potentielle car, semble-il, moins impactée que les 5 sites contraints.
- une approche comparée sur l'Ebre (synthèse bibliographique)

Les résultats de ces trois étapes de l'étude sont restitués dans les trois sections de ce rapport final. Sylvie Rocq, Directrice générale des services du SMEAG, Paul Simon et Fabienne Sans, Chargés de mission, ont accompagné la réalisation de cette étude. Cet accompagnement s'est concrétisé sous la forme d'un comité de suivi.

2. Réflexion pour un suivi des écosystèmes riverains dans une perspective de restauration

2.1 Introduction

A l'heure actuelle, il n'existe pas en France d'outils standards d'évaluation de l'état hydromorphologique des milieux aquatiques et des écosystèmes riverains associés, ceux-ci n'étant pas requis par la Directive Cadre Européenne sur l'eau (DCE, 2000/60/CE), contrairement à ceux relatifs à l'état chimique ou biologique de l'eau. Le mot « forêt » ou « arbre » n'est d'ailleurs pas utilisé dans le texte de la DCE. Cependant deux outils de connaissances seront bientôt disponibles : (1) le protocole de terrain CarHyCE pour recueillir des données hydromorphologiques à l'échelle de la station et ainsi pour en déduire les caractéristiques physiques du cours d'eau et (2) le système d'évaluation SYRAH qui procède au contraire par une approche descendante où les données spatiales analysées à une vaste échelle servent à évaluer les indicateurs locaux. SYRAH permet essentiellement d'identifier les risques d'altération de l'hydromorphologie. Par contre, pour les milieux riverains (ripisylve en particulier) aucune norme de collecte de données ou de guide de terrain ne sont prévus. Cependant, les projets de restauration ont de plus en plus comme objectif l'amélioration de tous les compartiments de l'écosystème, pas seulement l'aquatique. Ce dernier est d'ailleurs sous la dépendance des compartiments adjacents.

2.2 Objectif

L'objectif principal de cette partie est de proposer une réflexion sur la mise au point d'un protocole permettant d'évaluer l'état des écosystèmes riverains et d'assurer leur suivi dans une perspective de restauration globale et en insistant plus particulièrement sur le compartiment végétal. Jusqu'à présent, peu de projets de restauration prévoient un tel suivi. Cette démarche suppose le choix d'indicateurs biotiques et abiotiques adaptés et cohérents. Cependant, il n'existe pas encore de norme pour assurer efficacement un tel suivi.

2.3 Contexte et bases scientifiques du protocole

Un écosystème riverain a la particularité de pouvoir être complètement contrôlé de façon naturelle par le régime hydrologique du cours d'eau et ainsi d'être un système extraordinairement dynamique, avec une hétérogénéité d'habitats et un taux de renouvellement beaucoup plus fort que dans d'autres écosystèmes. Ce contrôle par le régime hydrologique s'exerce de façon intégrale : sur tous les compartiments de l'écosystème (géomorphologie, végétation, faune) et à différentes échelles spatiales et temporelles et d'une façon hiérarchique. Par exemple, les variations quotidiennes de la nappe sont responsables de la disponibilité de l'eau pour les plantes et de la mobilisation de nutriments, et déterminent sa croissance et son fonctionnement. Par contre, ils sont incapables de générer de nouveaux habitats pour renouveler périodiquement le système. En effet, seules les grandes crues de fréquence décennale ou centennale peuvent jouer ce rôle. En général, on peut dire que la structure de l'écosystème riverain est contrôlé par les événements hydrologiques extraordinaires à macro- et méso-échelles spatiales et que son fonctionnement est contrôlé par les événements ordinaires à micro-échelles spatiales. De plus, lorsque ces systèmes sont structurellement équilibrés et exercent des fonctions écologiques telles que le recyclage des nutriments, l'accumulation de matière organique et divers autres services gratuits à la société, il est normal d'essayer de les préserver et de faciliter leur régénération périodique.

Les activités humaines produisent deux types de dysfonctionnements sur cet écosystème riverain : directs, par son élimination et sa substitution pour d'autres usages (par exemple remplacement de la ripisylve naturelle par une plantation de peupliers) et indirects, par un changement du régime hydrologique entendu au sens large (régulation des débits, construction de barrages, protection des berges, mise en place d'enrochements, changements climatiques, etc.).

Un protocole d'état et de suivi doit donc être capable de décrire dans l'espace et le temps ces changements survenus dans l'intégrité de l'écosystème et d'apprécier l'efficacité des mesures d'aménagement et de restauration qui sont mises en place pour y remédier. Cela suppose des mesures efficaces et pertinentes des différents compartiments de cet écosystème, à des échelles appropriées. Par exemple, le Manuel de Restauration Hydromorphologique des cours d'eau de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (Adam, Debiais, Malavoy 2007) considère trois niveaux d'actions pour préserver ou restaurer le bon fonctionnement morphologique et écologique d'un cours d'eau : la

préservation (catégorie P) lorsque le fonctionnement morpho-écologique est encore bon, la limitation des dysfonctionnements (catégorie L) lorsque le fonctionnement est légèrement dégradé mais encore correct, et la restauration (catégorie R) lorsque l'état est dégradé. Dans ce dernier cas, trois niveaux d'ambitions sont prévus : le niveau R1= restauration d'un compartiment de l'hydro-système, le niveau R2= restauration fonctionnelle plus globale et le niveau R3= niveau R2 + restauration d'un espace de mobilité ou d'un espace de fonctionnalité. Dans le cas de cette étude, le protocole proposé a pour objectif le suivi des actions de restauration au niveau fonctionnel global (ce qui correspond aux niveaux R2 et R3 du Manuel de Seine-Normandie), c'est-à-dire, qui intègre l'amélioration de tous les compartiments aquatiques et terrestres: transport solide, habitat aquatique, nappe alluviale et ripisylve, avec l'idée de récupérer l'espace de mobilité et le plus de fonctionnalités possibles de la Garonne.

Traditionnellement, la restauration écologique a eu comme objectif la restitution de conditions qui existaient avant l'action négative de l'homme. Ainsi, la Directive Cadre Européenne sur l'eau (2000/60/CE) propose d'utiliser un état de référence pour définir le bon état écologique qui doit atteindre tous les milieux aquatiques et écosystèmes associées en 2015. Cependant, ce concept d'état de référence commence à être remis en question par la communauté scientifique pour deux raisons principales. Premièrement, les impacts humains sont si anciens et profonds tout au long de l'histoire qu'il est pratiquement impossible de trouver aujourd'hui des endroits idéaux pouvant être considérés comme références. La deuxième raison, et sans doute la plus importante, vient du fait que les écosystèmes sont dynamiques et que dans leur trajectoire ils ne se retrouvent pas deux fois dans le même état. C'est pourquoi, fondamentalement, le concept de système de référence ne serait pas valide. En fait, il existe tout un gradient de fonctionnalités et aujourd'hui, dans la littérature on préfère souvent parler de *trajectoire* de l'écosystème afin de représenter à la fois l'idée de dynamisme des écosystèmes et celle (plus récente) de leur valeur écologique pour les *services rendus à la société* (ce qui peut constituer, en soit, un objectif principal de restauration). En l'absence d'objectif de restauration plus spécifique qu'il est d'ailleurs souvent difficile à atteindre isolément (comme par exemple d'augmenter la capacité épuratrice de l'eau), on peut considérer que mettre en place une trajectoire vers la restauration de l'intégrité fonctionnelle globale de l'écosystème (situation où les services potentiels à la société sont en principe optimisés) est un objectif de restauration valide.

Sur la base ce raisonnement, le protocole ne va pas proposer une description exhaustive de tout le système mais un choix d'indicateurs qui permettent de suivre l'état écologique du système dans son ensemble, c'est-à-dire, dans ses différentes compartiments à un moment donné et plusieurs fois au cours de la période de suivi. **L'idée clé du protocole est de mesurer les indicateurs plusieurs fois avant et après la restauration afin de comparer les trajectoires qu'ils indiquent.** Pour cette raison, on ne parle pas de valeurs absolues positives ou négatives, mais de trajectoires positives ou négatives. Enfin, l'idée d'établir une trajectoire s'intègre dans une approche théorique de mise en place d'un système de référence, comme le propose l'ONEMA dans le cas où il est difficile de trouver une référence « classique » (un site sans perturbations dans le même secteur géographique, ou un site de même typologie géodynamique et de même zonation écologique) (Carrouée 2010). En ce sens, l'avantage de travailler avec des trajectoires comme on le propose dans ce protocole est que l'application du protocole à un moment donné sur un site donné sert, en fait, de référence à ce site pour la prochaine application du protocole. Au cas où il faudrait des systèmes de référence « classiques » pour la Garonne, on recommanderait l'utilisation d'un tributaire de la Loire : l'Allier (van Looy et al. 2008) et d'un tributaire du Rhône : l'Eygues (Kondolf et al. 2007).

Pour pouvoir bénéficier d'une aide financière, un projet de restauration doit fournir une étude préalable sur le contexte hydro-morphologique, écologique, sociologique et foncier du tronçon concerné et prévoir un suivi. Le Manuel de Restauration de l'Agence Seine-Normandie (Adam, Debiais, Malavoy 2007) suggère un suivi géomorphologique sur 6 ans au minimum (état initial, état n+3 et état n+6, soit 3 campagnes de mesures sur 6 ans). Pour le suivi écologique, il suggère de prévoir un pas de temps minimum de 3 ans après une campagne initiale de travaux. Il propose également d'évaluer a priori un « score d'efficacité probable » de la restauration envisagée (avec une note de 0 à 50) en fonction de cinq paramètres (puissance spécifique, apports solides, érodabilité des berges, emprise disponible et qualité de l'eau). Il propose enfin de déterminer la longueur minimale pertinente du tronçon à restaurer sur la base du rapport entre le linéaire restauré et la largeur du cours d'eau. Ainsi l'effet sera uniquement local si le linéaire restauré est inférieur à 20 fois la largeur du cours d'eau. La longueur pertinente serait proche de 100 fois la largeur (ou plus).

Mais comme il est impossible de mesurer tout ce qui a un intérêt potentiel dans l'écosystème, le choix pertinent des paramètres et indicateurs à mesurer reste entier. Le protocole proposé ici fait donc appel à une sélection d'indicateurs biotiques et abiotiques qui représentent l'ensemble du système. Conformément à la littérature existante, ces indicateurs ont été choisis en fonction des critères suivants :

1. être anticipatif
2. être facilement mesurable
3. être sensible au stress et aux impacts anthropiques
4. être capable de fournir une évaluation continue sur une large gamme de valeurs et de préciser l'intensité du stress.
5. répondre au stress et aux impacts anthropiques d'une manière prédictible
6. être intégratif de la totalité de l'écosystème
7. indiquer des changements positifs et négatifs

2.4 Présentation du protocole

En assumant que la restauration va être réalisée à l'échelle du site (c'est-à-dire, en incluant une partie de la plaine inondable délimitée par un méandre sur un linéaire du cours d'eau compris entre 20 et 100 fois sa largeur) et que chaque compartiment de l'écosystème répond à une échelle différente, le protocole prévoit trois échelles d'action et d'analyse:

- A. l'échelle du contexte (supérieure au site)
- B. l'échelle du site
- C. l'échelle des habitats (inférieure au site)

Chaque échelle comprend des domaines principaux (par exemple, au sein de l'échelle du contexte : la géomorphologie et l'hydrologie) avec un code spécifique (par exemple A1 = Géomorphologie, A2 = Hydrologie) et comprend une liste d'indicateurs qu'il faut calculer au bureau ou mesurer sur le terrain, chacun avec son code spécifique (par exemple A1.2 = Indice de sinuosité). La liste d'indicateurs doit être impérativement appliquée au moins deux fois (par exemple avant la restauration et après) parce que l'objectif de ce protocole est l'analyse d'une trajectoire entre deux moments donnés, comme on l'a déjà expliqué ci-dessus. Ainsi, appliquer le protocole « n » fois va permettre d'avoir l'information de « n - 1 » trajectoires. Par exemple, le suivi proposé dans le Manuel de Restauration (Adam, Debais, Malavoy 2007) sur 6 ans (état initial, état n+3 et état n+6) nous donnerait des informations pour analyser 2 trajectoires. En maintenant cette fréquence d'application du protocole tous les 3 ans on disposera de 5 trajectoires au bout de 15 ans.

Dans une première partie (*liste des indicateurs*), on présentera rapidement les indicateurs proposés (ainsi que leurs codes respectifs), qui devront être suivis au niveau de chacune des trois échelles d'action proposées A, B et C. Ensuite, on détaillera chaque indicateur de cette liste dans un document plus large (*manuel du protocole*) en expliquant pour chaque code comment effectuer chaque action ou comment collecter l'information sur le terrain. Pour certains indicateurs (identifiés comme *indicateurs clés*), on donnera un exemple numérique de ce qui pourrait être considéré comme une trajectoire positive ou négative. Cependant, le choix de ces seuils devrait faire l'objet d'études plus exhaustives qui dépassent le cadre de cette simple réflexion. Ces seuils devraient être adaptés aux objectifs particuliers de chaque restauration envisagée, du site concerné, du contexte socio-économique et finalement être ajustés progressivement au sein d'un processus itératif ou par comparaison avec d'autres cas similaires. Enfin, cette liste d'indicateurs n'est en aucun cas définitive et devrait pouvoir évoluer au fur et à mesure des expériences acquises.

Certains indicateurs sont optionnels pour plusieurs raisons et sont mentionnés à l'aide de quatre symboles :

- (*) = ne sont pas facilement modifiables par la restauration ou pas adaptés à la restauration à l'échelle du site (par exemple, le débit à plein bord)
- (+) = ils ont une forte variabilité naturelle (par exemple la température de l'eau)
- (\$) = ils sont chers à mesurer
- (?) = ils exigent des connaissances très spécialisées et ne sont pas détaillés ici

La raison pour les inclure malgré tout dans le protocole est qu'ils peuvent apporter une information de base qui sera potentiellement utile pour des études futures.

Les autres indicateurs qui ne sont ni des indicateurs clés ni des indicateurs optionnels, sont nécessaires pour le calcul des indicateurs clés.

On proposera pour finir différents moyens pour évaluer l'ensemble des informations obtenues et fournir une indication globale (très positive, positive, neutre, négative ou très négative) sur l'efficacité de la restauration entre deux périodes données.

2.5 Liste des indicateurs

A. ECHELLE DU CONTEXTE

A1. Calcul des caractéristiques géomorphologiques moyennes du segment de rivière (à compléter avec le protocole national « CarHyCE »):

- A1.1 Longueur d'onde (m)
- A1.2 Sinuosité (sans dimension) *Indicateur clé*
- A1.3 Rapport largeur / profondeur du lit en débit à plein bord (m/m) *Indicateur clé*
- A1.4 Taux d'embrochements (%) *Indicateur clé*
- A1.5 Largeur du lit moyen (crues décennales)
- A1.6 Largeur du lit majeur (crues centennales)

A2. Calcul des caractéristiques hydrologiques moyennes du segment de rivière (sur 10, 30 et 50 ans):

- A2.1 (*+) Débit maximum observé (m³/s)
- A2.2 (*) Débit annuel moyen (m³/s)
- A2.3 (*) Débit à plein bord (m³/s)
- A2.4 (*) Débit d'étiage (m³/s)

A3. Mesure de la qualité physico chimique de l'eau :

- A3.1 (*+) Température (°C)
- A3.2 (*+) pH (sans dimension)
- A3.3 (*+) Oxygène dissous (%)
- A3.4 (*+) Conductivité (µS/cm)
- A3.5 (*+\$) Cations et anions (mg/L)
- A3.6 (*) Solides dissous (mg/L)
- A3.7 (*) Solides en suspension (mg/L)

A4. Macrostructure du corridor fluvial :

- A4.1 (*) Continuité longitudinale *Indicateur clé*
- A4.2 (*) Largeur du corridor *Indicateur clé*

A5 (*). Contexte socio-économique (à compléter avec le protocole national « Syrah »)

B. ECHELLE DU SITE

B1. Production d'une carte des habitats dans un SIG, comprenant les catégories suivantes:

- B1.1 Lit du chenal principal (lit mineur)
- B1.2 Atterrissements
- B1.3 Bras secondaires
- B1.4 Etangs artificiels
- B1.5 Végétation herbacée
- B1.6 Arbres diffus
- B1.7 Forêt spontanée (ripisylve)
- B1.8 Plantation d'arbres
- B1.9 Cultures non forestières
- B1.10 Urbain
- B1.11 Sols nus d'origine anthropique

B2. Calcul des paramètres du paysage :

- B2.1 Surface de chaque catégorie spécifiée au point B1 *Indicateur clé*
- B2.2 Surface relative de chaque catégorie naturelle spécifiée au point B1
- B2.3 Hétérogénéité *Indicateur clé*
- B2.4 Taux de renouvellement des habitats *Indicateur clé*
- B2.5 Taux de renouvellement des atterrissements *Indicateur clé*
- B2.6 Taux de renouvellement des bras secondaires *Indicateur clé*

C. ECHELLE DES HABITATS

C1 Caractérisation de la structure ligneuse de la ripisylve :

C1.1 Densité des individus (individus / hectare)

C1.2 Surface basale (totale et par espèce ligneuse) (m^2 ligneuse / hectare)

C1.3 Taux de renouvellement des espèces ligneuses *Indicateur clé*

C1.4 Indice d'importance du saule blanc (sans dimension, entre 0 et 1) *Indicateur clé*

C1.5 Taux de dépérissement du peuplier noir et du saule blanc *Indicateur clé*

C1.6 (*) Présence d'espèces envahissantes *Indicateur clé*

C1.7 (\$) Teneur en nutriments de la litière *Indicateur clé*

C1.8 (*?) Taux de croissance des espèces ligneuses *Indicateur clé*

C2 (?) Caractérisation de la structure des communautés herbacées

C3 (?) Caractérisation de la faune (aquatique et terrestre)

2.6 Manuel du protocole

A. ECHELLE DU CONTEXTE

L'échelle du contexte comprend toute l'information relative à la géomorphologie, l'hydrologie, la qualité de l'eau, le corridor naturel et la dimension socio-économique du segment du cours d'eau où le site est localisé. Même si les aspects hydro-géomorphologique et socio-économiques seront prochainement couverts par les protocoles nationaux CarHyCE et Syrah, on propose ici quelques indicateurs qui nous paraissent indispensables dans une vision dynamique des écosystèmes et qui pourront éventuellement les compléter lorsqu'ils seront connus.

A1. Géomorphologie

La première étape sera le choix de la limite longitudinale du segment du cours d'eau où le site à suivre est localisé. Il s'agit toujours d'un choix arbitraire mais on suggère d'établir un 'segment' minimum tel que défini par Le Manuel de Restauration (Adam, Debiais, Malavoy 2007), c'est-à-dire, une centaine de fois le largeur du lit mineur. Par exemple, lorsque la Garonne a 100 m de largeur, on recommande le choix d'un segment de 10 km de longueur avec le site localisé au milieu du segment. Une fois le segment choisi, les mesures suivantes doivent être collectées (sachant qu'elles seront éventuellement complétées avec le protocole national CarHyCE):

A1.1 Longueur d'onde du lit (m)

La longueur d'onde est la distance la plus longue du chenal principal. En cas d'une ou plusieurs îles (exceptionnellement plusieurs bras), le secteur du lit le plus large sera considéré comme chenal principal afin de calculer la distance.

A1.2. Sinuosité du lit (sans dimension) *Indicateur clé*

La sinuosité est obtenue en divisant la longueur d'onde par la longueur du chenal à vol d'oiseau. *Une augmentation >0.3 de la sinuosité entre le moment n-1 et le moment n pourra être considérée comme une trajectoire très positive. Une augmentation entre 0.1 et 0.3 comme une trajectoire positive. Un changement <0.1 comme une trajectoire neutre. Une diminution entre 0.1 et 0.3 comme une trajectoire négative. Une diminution >0.3 comme une trajectoire très négative.*

A1.3 Rapport largeur / profondeur du lit en débit à plein bord (m/m) *Indicateur clé*

La largeur sera calculée comme la largeur moyenne du lit en débit à plein bord dans le segment choisi et la profondeur du lit comme la profondeur moyenne du lit en débit à plein-bord dans le segment choisi (en m). *Une augmentation >10 du rapport largeur/profondeur entre le moment n et le moment n-1 serait considéré comme une trajectoire très positive. Une augmentation entre 3 et 10 comme positive. Un changement <3 comme neutre. Une diminution entre 3 et 10 comme négative. Une diminution >10 comme très négative.*

A1.4 Taux d'embrochements (%) *Indicateur clé*

Le taux d'embrochements est la proportion de la longueur d'onde qui est affecté par des embrochements. *Une diminution >25% du taux d'embrochements entre moment n et le moment n-1 serait considéré comme une trajectoire très positive. Une diminution entre 0 et 25% comme positive. L'absence de changement comme neutre. Une augmentation entre 0 et 25% comme négative. Une augmentation >25% comme très négative.*

A1.5 Largeur du lit moyen (crues décennales)

Il doit être calculé en utilisant des données hydrologiques actualisées (par exemple sur les 10, 30 ou 50 dernières années)

A1.6 Largeur du lit majeur (crues centennales)

Il doit être calculé en utilisant des données hydrologiques actualisées (par exemple sur les 10, 30 ou 50 dernières années)

A2. Hydrologie

Les mesures hydrologiques historiques et instantanées seront obtenues dans la station la plus proche du site d'étude et seront utilisées pour calculer les paramètres hydrologiques A2.1, A2.2 et A2.4 sur les 10, 30 ou 50 dernières années.

A2.3 Débit qui correspond à une fréquence de crue de 1.58 ans. Il s'agit d'un paramètre important pour le contrôle de la morphologie du chenal et de la plaine inondable.

A3. Mesure de la qualité physico chimique de l'eau

Un protocole de contrôle de la qualité de l'eau doit être établi parce que, bien qu'il dépende de plusieurs facteurs hors de l'échelle de la restauration, il s'agit de paramètres potentiellement utiles pour expliquer les caractéristiques d'autres compartiments de l'écosystème et sa réponse à la restauration. Par exemple, les communautés de faune aquatique ne dépendent pas seulement de l'existence d'un réseau d'habitats diversifiés mais aussi de la qualité de l'eau. Le protocole de suivi de la qualité de l'eau doit être exécuté dans tous les bras secondaires et morts, dans le chenal principal et dans la nappe avec une fréquence saisonnière (3 mois) et à la même heure du jour.

A4. Macrostructure du corridor fluvial

L'écosystème riverain se caractérise avant tout par son caractère linéaire. Son fonctionnement dépend du maintien d'une structure de base à l'échelle du paysage, ce qu'on pourrait appeler la macrostructure du corridor fluviale. Les deux indicateurs compris ici donnent une information utile pour caractériser la continuité écologique des milieux riverains, paramètre fortement recommandé par l'ONEMA (Carrouée 2010).

A4.1 Continuité longitudinale *Indicateur clé*

Un système continu est celui qui n'a pas des discontinuités longitudinales. On considère comme discontinuité toute surface occupée par une catégorie anthropique (voir B1 dans ce protocole). Le maintien de la connectivité longitudinale est crucial pour assurer les possibilités de migration des espèces animales à l'intérieur du corridor, et de flux de gènes entre les populations de plantes. *Une diminution >25% de la longueur des discontinuités entre le moment n et le moment n-1 serait considéré comme une trajectoire très positive. Une diminution entre 5 et 25% comme positive. Un changement <5% comme neutre. Une augmentation entre 5 et 25% comme négative. Une augmentation >25% comme très négative.*

A4.2 Largueur du corridor *Indicateur clé*

Plus la zone riveraine est large, plus il existe de place pour le développement de leurs fonctions et comme habitats pour les plantes et les animaux. On considère la zone riveraine comme la zone occupée par des catégories naturelles, soit aquatiques soit terrestres (voir description des catégories B1). *Une augmentation >25% de la largeur moyenne de la zone riveraine entre le moment n et le moment n-1 serait considéré comme une trajectoire très positive. Une augmentation entre 5 et 25% comme positive. Un changement <5% comme neutre. Une diminution entre 5 et 25% comme négative. Une diminution >25% comme très négative.*

A5. Contexte socio-économique (à compléter avec le protocole national « Syrah »)

On recommande de mettre en place un SIG détaillé à l'échelle du segment. La limite longitudinale pourrait être celle du segment choisi et la limite latérale celle de la largeur du lit majeur. On devrait y inclure les catégories suivantes (habitats aquatiques naturels; habitats terrestres naturels, cultures par type, et urbain). Des informations supplémentaires comme la population des villages, les surfaces irriguées, les activités d'extraction de graviers, les activités de pêche et autres loisirs, etc. peuvent être collectées et seront utiles pour de futures études, mais n'auront pas une application directe sur le protocole d'état et suivi de l'intégrité de l'écosystème à l'échelle du site tel qu'on le propose ici.

B. ECHELLE DU SITE

L'échelle du site correspond à la zone de la plaine inondable qui va être restaurée

B1. Production d'une carte des habitats dans un SIG

La première étape est la préparation d'une carte d'habitats dans un SIG. Il faut utiliser une orthophoto actuelle du site et la géoreferencer. Le critère de numérisation des habitats doit inclure l'utilisation d'une échelle fixe (environ 1:3000 – 1:5000), la non considération de catégories linéaires (routes, chemins, etc.) inférieures à 10 m de largeur (sauf les enrochements, digues et autres travaux de stabilisation) et leur intégration dans les parcelles annexes, l'établissement d'une taille minimale de parcelle de 0.25 ha. Onze catégories principales d'habitats ont été identifiées.

B1.1 Lit du chenal principal (Lit mineur du cours d'eau).

B1.2 Atterrissements. Dépôts alluvionnaires le long du fleuve (îles, bancs de sable ou de galets, berges sans végétation).

B1.3 Bras secondaires. Bras actifs ou morts. Dans le cas d'une ou plusieurs îles (exceptionnellement plusieurs cours d'eau), le secteur du lit le plus large doit être considéré comme catégorie B1.1 « Lit du chenal principal » et le reste (les plus étroits) comme catégorie B1.3. Cette catégorie est spécialement intéressante parce qu'elle représente, avec les atterrissements, des éléments essentiels des annexes hydrauliques et des zones humides pour évaluer la continuité transversale du système, dont la caractérisation est fortement recommandée par l'ONEMA (Carrouée 2010).

B1.4 Etangs artificiels. Ils proviennent majoritairement des extractions de graviers passées et présentes.

B1.5 Végétation herbacée. Végétation spontanée avec une couverture d'arbres < 25%

B1.6 Arbres diffus. Végétation spontanée avec une couverture d'arbres > 25% et < 75%

B1.7 Forêt spontanée (ripisylve). Végétation spontanée avec une couverture d'arbres > 75%

B1.8 Plantation d'arbres, notamment de peupliers

B1.9 Cultures non forestières. Il s'agit de surfaces en cultures autre que peupliers

B1.10 Urbain. Surfaces de type urbain et utilisées intensivement (y compris jardins et autres boisements artificiels)

B1.11 Sols nus d'origine anthropique. Anciennes surfaces anthropisées qui ont été abandonnées et apparaissent comme des sols nus

Les catégories B1.1, B1.2, B1.3, B1.5, B1.6, et B1.7 peuvent être considérées comme 'naturelles'. Par contre, les catégories B1.4, B1.8, B1.9, B1.10 et B1.11 sont 'anthropiques'.

B2. Calcul des paramètres du paysage

À effectuer avec l'aide du logiciel SIG

B2.1 Surface de chaque catégorie spécifiée au point B1 *Indicateur clé*

On détermine les surfaces de chaque catégorie et, en plus, le total des surfaces des 6 catégories « naturelles » (B1.1, B1.2, B1.3, B1.5, B1.6, et B1.7) et le total des 5 surfaces « anthropiques » (B1.4, B1.8, B1.9, B1.10 et B1.11). Mesuré en hectares. *Une augmentation >50% de la somme des catégories naturelles entre le moment n-1 et le moment n serait considéré comme une trajectoire très positive. Une augmentation entre 10 et 50% comme positive. Un changement <10% comme neutre. Une diminution entre 10 et 50% comme négative. Une diminution >50% comme très négative.*

B2.2 Surface relative de chaque catégorie naturelle spécifiée au point B1

Mesuré en % du total des 6 catégories naturelles.

B2.3 Hétérogénéité des habitats naturels *Indicateur clé*

Ecart-type des 6 pourcentages calculés en B2.2. *Une diminution >50% de l'écart-type entre l'application du protocole au moment n-1 et le moment n serait considérée comme une trajectoire très positive. Une diminution entre 10 et 50% comme positive. Un changement <10% comme neutre. Une augmentation entre 10 et 50% comme négative. Une augmentation >50% comme très négative.* L'intérêt de cet indicateur est de montrer que, pour avoir une trajectoire positive il n'est pas uniquement important d'avoir une augmentation des catégories naturelles au niveau de l'indicateur B2.1, mais qu'il est aussi essentiel que leurs proportions soient équilibrées parce qu'il s'agit d'un écosystème naturellement hétérogène.

B2.4 Taux de renouvellement des habitats *Indicateur clé*

Superposer les cartes B1 effectuées aux moments n et n-1 puis calculer le pourcentage de chaque catégorie naturelle qui reste dans la même catégorie (*surface naturelle stable*) et le pourcentage qui

change vers les autres catégories naturelles (*surface naturelle renouvelée*). Le taux de renouvellement est calculé à partir du ratio *surface naturelle renouvelée / surface naturelle stable*. *Un taux de renouvellement de 1 signifie que la moitié des surfaces naturelles a été renouvelée et l'autre moitié est restée stable. Un renouvellement >1 serait donc considéré comme une trajectoire très positive dans la mesure où les surfaces naturelles renouvelées sont supérieures aux surfaces naturelles stables. Un taux entre 0.5 et 1 comme une trajectoire positive. Un taux entre 0.25 et 0.5 comme neutre. Un taux entre 0.1 et 0.25 comme négative. Un taux <0.1 comme très négative.*

B2.5 Taux de renouvellement des atterrissements *Indicateur clé*

Superposer les cartes B1 effectuées aux moments n et $n-1$ puis calculer le ratio entre la surface des atterrissements renouvelés et la surface totale du site. *Une augmentation >50% du taux de renouvellement des atterrissements entre les dates n et $n-1$ et les dates $n-1$ et $n-2$ serait considérée comme une trajectoire très positive. Une augmentation entre 10 et 50% comme positive. Un changement <10% comme neutre. Une diminution entre 10 et 50% comme négative. Une diminution >50% comme très négative.* L'intérêt de cet indicateur est que le manque d'atterrissements est une conséquence fréquente de la régulation et indique un blocage de l'activité géomorphologique. Un taux renouvellement élevé montre que le système est sain du point de vue de la dynamique géomorphologique. De plus, les atterrissements jouent un rôle clé comme espaces pour la régénération de la végétation riveraine.

B2.6 Taux de renouvellement des bras secondaires *Indicateur clé*

Suivre la même procédure que B2.5 mais avec la catégorie « bras secondaires ». L'intérêt de cet indicateur est aussi important que pour les atterrissements. La régulation tend à éliminer ces habitats et à réduire le cours d'eau à un seul chenal. De plus, les bras secondaires jouent un rôle clé comme habitats pour la faune aquatiques et terrestre.

C. ECHELLE DES HABITATS

C1 Caractérisation de la structure ligneuse de la ripisylve

Pour chaque site d'étude considéré, établir trois transects perpendiculaires au chenal principal (transect aval, transect central et transect amont) sur la carte B1 correspondante. Chaque fois que le transect traverse une catégorie naturelle terrestre (catégories B1.2, B1.5, B1.6 et B1.7) on délimite une (ou plusieurs) parcelle de 20 x 5 m où la structure de la végétation sera décrite sur le terrain. La collecte des données concerne tous les individus adultes ligneux dont le diamètre est > 7.5 cm à hauteur de poitrine (~1.3 m), en particulier l'identification de l'espèce, la mesure du diamètre (à hauteur de poitrine) et l'état de dépérissement ligneux. Pour les individus ligneux jeunes (diamètre < 7.5 cm à hauteur de poitrine ou hauteur <1.3 m) la collecte des données porte sur l'identification de l'espèce et leur statut vivant ou mort. L'état de dépérissement présente quatre niveaux : Mort (individu mort), Sévère (la mortalité affecte le tronc), Modéré (la mortalité affecte au moins 25% des branches principales qui partent du tronc) et Sain (la mortalité affecte moins de 25% des branches principales). Les arbres qui possèdent plusieurs tiges sont traités comme des individus distincts si le point de division est situé en-dessous de 1,3 m. Au contraire, si le point de division est au-dessus de 1.3 m, la tige principale représente l'individu et les autres tiges ses branches.

C1.1 Densité des individus (individus / hectare)

Multiplier par 100 le nombre d'individus de la parcelle (la surface de la parcelle de 20 x 5 m représente 100 m², soit un centième d'hectare). L'indicateur peut être calculé de plusieurs façons, par exemple pour le total des individus, le total des individus adultes, le total des individus jeunes, les individus adultes d'une espèce, les individus jeunes d'une famille d'espèces, etc...

C1.2 Surface basale (m² ligneux / hectare)

La surface basale ou terrière représente la somme des surfaces des sections des individus mesurées à hauteur de poitrine dans chaque parcelle et multipliée par 100 pour se ramener à un hectare. Comme en C1.1, cet indicateur peut être calculé aussi de plusieurs façons. Il néglige les individus de taille <1.3 m.

C1.3 Taux de renouvellement des espèces ligneuses *Indicateur clé*

Il s'agit de la moyenne de la densité des individus jeunes des espèces pionnières (peuplier noir et saule blanc) calculée selon la méthode C1.1 sur les parcelles les plus proches du chenal principal et les plus récentes. *Une trajectoire sera très positive quand les deux espèces auront à la date n une*

densité significative de jeunes individus (densité > 1000 individus / ha) alors qu'ils ne l'avaient pas à la date n-1. Elle sera positive quand seulement une des deux espèces aura une densité > 1000 individus / ha. Une trajectoire sera neutre quand aucune des deux espèces ne change sa densité de jeunes individus. Une trajectoire sera négative quand une des deux espèces perd sa densité significative de jeunes individus (cet-à-dire passe d'une densité_{n-1} > 1000 ind. / ha à une densité_n < 1000 ind. / ha). Une trajectoire très négative sera quand les deux espèces perdent la densité significative. L'intérêt de cet indicateur est que la régénération des espèces ligneuses pionnières est directement contrôlée par le régime hydro-géomorphologique, donc il donne une idée du caractère 'naturel' de ce régime.

C1.4 Indice d'importance du saule blanc (sans dimension, entre 0 et 1) *Indicateur clé*

L'indice d'importance d'une espèce est une mesure du degré de dominance de l'espèce par rapport aux autres avec lesquelles elle partage son l'habitat. Bien qu'il puisse être calculé de différentes façons, on recommande la formule synthétique suivante: [(nombre d'individus de l'espèce dans la parcelle / nombre total d'individus de toutes les espèces dans la parcelle) + (surface basale de l'espèce dans la parcelle / surface basale de toutes les espèces dans la parcelle)] / 2. Cet indice d'importance varie de 0 (absence de l'espèce) à 1 (dominance totale). L'intérêt de calculer l'indice d'importance pour le saule blanc vient du fait qu'il s'agit d'une espèce très dépendante de l'existence d'une dynamique hydro-géomorphologique soumise à une faible régulation. Donc sa dominance peut indiquer de bonnes conditions hydrogéomorphologiques locales. *Une augmentation >25% de l'indice d'importance moyen du saule blanc entre la date n-1 et la date n serait considérée comme une trajectoire très positive. Une augmentation entre 5 et 25% comme positive. Un changement <5% comme neutre. Une diminution entre 5 et 25% comme négative. Une diminution >25% comme très négative.*

C1.5 Taux de dépérissement du peuplier noir et du saule blanc *Indicateur clé*

Calculer la proportion moyenne d'individus adultes (taille > 1.3 m) de ces deux espèces qui présentent un dépérissement sévère dans les parcelles localisées à la périphérie du site. *Une diminution >50% de ce taux entre la date n-1 et la date n serait considéré comme une trajectoire très positive. Une diminution entre 10 et 50% comme positive. Un changement <10% comme neutre. Une augmentation entre 10 et 50% comme négative. Une augmentation >50% comme très négative.* L'intérêt de cet indicateur est que les deux espèces (peuplier noir et saule blanc) répondent rapidement au stress hydrique en sacrifiant des branches pour maintenir un équilibre hydrique. La régulation entraîne souvent un abaissement de la nappe qui peut perturber la disponibilité de l'eau pour les arbres et pour autres compartiments, donc le dépérissement est un bon indicateur du niveau des impacts anthropiques sur l'écosystème.

C1.6 (*) Présence d'espèces envahissantes *Indicateur clé*

Calculer la densité moyenne d'individus d'espèces ligneuses envahissantes dans les parcelles du site. *Une diminution >50% de la densité d'espèces envahissantes entre la date n-1 et la date n serait considérée comme une trajectoire très positive. Une diminution entre 10 et 50% comme positive. Un changement <10% comme neutre. Une augmentation entre 10 et 50% comme négative. Une augmentation >50% comme très négative.* Bien que la présence d'espèces envahissantes dépende de plusieurs facteurs non corrélés à l'échelle de la restauration prévue (par exemple des introductions volontaires dans l'écosystème au cours du passé, le changement global, etc.), plusieurs études ont montré que la ré-naturalisation du régime hydro-géomorphologique tend à bénéficier davantage aux espèces natives qu'exotiques.

C1.7 (\$) Teneur en nutriments de la litière *Indicateur clé*

Pourcentage d'azote (N) et de phosphore (P) dans les feuilles des espèces pionnières, qui sont récemment tombées. Les plantes ont la capacité de récupérer des nutriments avant la chute des feuilles pour disposer de réserves suffisantes au cas il y aurait un déficit l'année suivante. Mais toutes les espèces et des individus d'une même espèce ne récupèrent pas toujours la même quantité de nutriments. Ils sont capables d'adapter cette stratégie en fonction de la disponibilité en nutriments au cours de l'année considérée. Dans le cas des plantes riveraines, le régime hydrologique contrôle l'apport des nutriments. Alors, des pourcentages de N > 1% et de P > 0.08% indiquent que la récupération n'a pas été complète et probablement qu'il s'agit d'un milieu riche en nutriments. Par contre, des pourcentages N < 0.7 % et P < 0.05% indiquent que la récupération est complète, c'est-à-dire, que les arbres adoptent une stratégie conservatrice parce que le milieu est sans doute pauvre en nutriments. *Ainsi, une trajectoire très positive sera celle où le %N augmente > 0.3 et où le %P augmente > 0.03 de la date n-1 à la date n. Une trajectoire sera positive si le %N augmente entre 0.1*

et 0.3 et le %P entre 0.01 et 0.03. Une trajectoire sera neutre si les changements du %N sont < 0.1 et de %P < 0.01 . Une trajectoire sera négative si le %N diminue entre 0.1 et 0.3 et le %P entre 0.01 et 0.03. Une trajectoire sera très négative si la diminution de %N est > 0.3 et si la diminution de %P est > 0.03 . La teneur en nutriments des feuilles est un nouvel indicateur qui a été utilisé efficacement dans le cas de l'Ebre où il s'est révélé parfois plus efficace que certains paramètres hydrogéomorphologiques classiques pour caractériser le milieu (González et al. 2010).

C1.8 (*) Taux de croissance des espèces ligneuses *Indicateur clé*

Le taux de croissance doit être calculé à partir du comptage des cernes sur des échantillons de bois prélevés dans le tronc. Bien que la croissance des arbres dépende aussi d'autres facteurs (comme les variations du climat), ce taux peut donner une idée des disponibilités locale en eau et des surexploitations possibles des aquifères. *Ainsi, une augmentation du taux de croissance $> 25\%$ entre la date $n-1$ et la date n serait considérée comme une trajectoire très positive. Une augmentation entre 5 et 25% comme positive. Un changement $< 5\%$ comme neutre. Une diminution entre 5 et 25% comme négative. Une diminution $> 25\%$ comme très négative.*

C2 (?) Caractérisation de la structure des communautés herbacées

Premièrement, il faut préciser qu'on ne recommande pas d'inclure des indicateurs des communautés herbacées comme des indicateurs clés du protocole, car les informations qu'ils fournissent sont trop complexes et difficiles à interpréter. Des études plus approfondies et une main-d'œuvre très qualifiée sont nécessaires pour tirer des conclusions fiables sur les trajectoires de l'écosystème à l'échelle du site à partir d'études sur les communautés herbacées. Toutefois, au cas où l'on souhaite prendre en compte, les transects décrits au point C1 du protocole pourront servir aussi pour caractériser la végétation herbacée et ainsi obtenir des indicateurs complémentaires aux espèces ligneuses. Ainsi, dans chaque parcelle de 20 x 5 m on pourrait établir 10 mini-parcelles de 1 m² où toutes les espèces herbacées seraient identifiées et auxquelles on assignerait un indice d'abondance de 1 à 5. Cette information pourrait être utilisée pour calculer différents descripteurs de la biodiversité (richesse en espèces, rareté, uniformité, etc.) à différentes échelles (diversité alpha, beta et gamma) et pour suivre leur évolution entre deux protocoles pour définir des trajectoires positives ou négatives.

C3 (?) Caractérisation de la faune (aquatique et terrestre)

Comme dans le cas C2, les indicateurs de la faune ne sont pas faciles à mesurer et, dans certains compartiments, fournissent des informations peu adaptées à la restauration d'un espace de liberté qui est l'objet de ce protocole. Par exemple, la présence de ramifications dans le chenal principal et de bras secondaires est fondamentale pour l'existence des nombreuses populations de poissons, macro-invertébrés, zooplancton et phytoplancton, mais la caractérisation de ces populations exige des compétences techniques très élevées, des campagnes de capture et un travail d'identification très laborieux. Au cas où on souhaiterait les prendre en compte, on recommanderait l'utilisation des habitats décrits dans la carte B1 pour établir les parcelles de suivi et pour le calcul des différents descripteurs de la biodiversité à différentes échelles (voir C2) qui pourraient être utilisés pour évaluer les trajectoires positives, négatives ou neutres. Cependant, dans la mesure où la caractérisation de la faune aquatique est utilisée pour le suivi de la qualité de l'eau et pour l'identification des zonations écologiques et typologiques des cours d'eau, comme le recommande l'ONEMA (Carrouée 2010), ces données ainsi que leurs protocoles spécifiques pourront servir utilement à la description des trajectoires à la suite d'actions de restauration.

2.7 Score global de la restauration

On propose d'attribuer à chaque indicateur clé un score selon le critère suivant:

- Trajectoire très positive = 4
- Trajectoire positive = 3
- Trajectoire neutre = 2
- Trajectoire négative = 1
- Trajectoire très négative = 0

Ensuite, on calcule la moyenne arithmétique des scores sur l'ensemble de ces indicateurs clé pour avoir le score global de la trajectoire de l'écosystème. Une restauration effective doit s'approcher le plus possible d'une trajectoire avec un score de 4 (ou au moins supérieure à 2) durant les premières trajectoires du suivi et se stabiliser ensuite vers 2 avec les années. En effet, si l'écosystème est

réparé, il ne peut pas maintenir des trajectoires positives ou très positives indéfiniment. Par contre, si la moyenne est inférieure à 2, la trajectoire est négative et la restauration n'a pas réussi.

Un avantage de ce système d'évaluation basé sur la moyenne des indicateurs clé est que chaque indicateur dispose du même poids dans l'évaluation globale et que le score de la trajectoire globale peut être calculé même s'il venait à manquer l'information d'un indicateur clé. C'est un indicateur global qui peut aussi être adapté à chaque projet en fonction des indicateurs clés effectivement retenus et éventuellement en affectant une pondération différente à chaque indicateur clé en fonction des objectifs de la restauration.

Enfin, lorsqu'on dispose des scores globaux de plusieurs trajectoires successives, on peut évaluer l'efficacité de la restauration de différentes manières. Le plus simple est de calculer la moyenne des scores globaux au cours de la période de suivi, ce qui peut être complété par l'analyse plus fine de l'allure générale de leur évolution.

2.8 Références principales

Adam P, Debiais N, Malavoi JR (2007) Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau. Ed : Agence de l'eau Seine-Normandie. 64 pp.

Carrouée M (2010) Des étapes et des outils. Ed : ONEMA 31 pp.

González E, Muller E, Comín FA, González-Sanchis (2010) Leaf nutrient concentration as an indicator of Populus and Tamarix response to flooding. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 12: 257-266

Kondolf GM, Piégay H, Landon N (2007) Changes in the riparian zone of the lower Eygues River, France, since 1830. *Landscape Ecology* 22: 367-384.

Van Looy K, Meire P, Wasson LG (2008) Including riparian vegetation in the definition of morphologic reference conditions for large rivers: a case study for Europe's Western Plains. *Environmental Management* 41: 625-639.

2.9 Autres références

On recommande ici des références qui abordent principalement la description et le suivi de l'état de l'écosystème riverain

Baptist MJ, Penning WE, Duel H, Smits AJM, Geerling GW, Van der Lee GEM, Van Alphen JSL (2004) Assessment of the effects of cyclic floodplain rejuvenation on flood levels and biodiversity along the Rhine River. *River Research and Applications* 20: 285-297

Carignan V, Villard MA (2001) Selecting indicator species to monitor ecological integrity: a review. *Environmental Monitoring and Assessment* 78: 45-61.

Dale VH, Beyeler SC (2001) Challenges in the development and use of ecological indicators. *Ecological Indicators* 1: 3-10.

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: 568-581.

González del Tánago M, García de Jalón D (2006) Attributes for assessing the environmental quality of riparian zones. *Limnetica* 25: 389-402.

Hughes FMR (2004). The flooded forest: guidance for policy makers and river managers in Europe on the restoration of floodplain forests. Flobar2 project, Department of Geography, university of Cambridge, UK, 96 p.

Hughes FMR, Colston A, Owen Mountford J (2005) Restoring riparian ecosystems: the challenge of accommodating variability and designing restoration trajectories. *Ecology and Society* 10: 12.

Palmer MA, Bernhardt ES, Allan JD, Lake PS, Alexander G, Brooks S, Carr J, Clayton S, Dahm CN, Follstad Shah J, Galat DL, Loss SG, Goodwin P, Hart DD, Hassett B, Jenkinson R, Kondolf GM, Lave R, Meyer JL, O'Donnell TK, Pagano L, Sudduth E (2005) Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of Ecology* 42: 208-217.

Shafroth PB, Beauchamp VB, Briggs MK, Lair K, Scott ML, Sher AA (2008) Planning riparian restoration in the context of Tamarix control in Western North America. *Restoration Ecology* 16: 97-112.

Stromberg JC, Lite SJ, Rychener TJ, Levick LR, Dixon MD, Watts JM (2006) Status of the riparian ecosystem in the Upper San Pedro River, Arizona: Application of an assessment model. *Environmental Monitoring and Assessment* 115: 145-173.

3. Analyse historique des sites d'étude

3.1 Objectif

L'objectif principal de cette partie est l'analyse historique du lit de la Garonne et des principaux habitats sur les 5 sites d'étude pré-sélectionnés par le SMEAG (Lizoun, Bourret, Mas-Grenier, Verdun St Pierre et Fenouillet) et sur le site d'Ondes, considéré *a priori* comme station témoin (Fig. 1). Un certain nombre d'indicateurs seront calculés en fonction des informations disponibles dans ces documents d'archive.

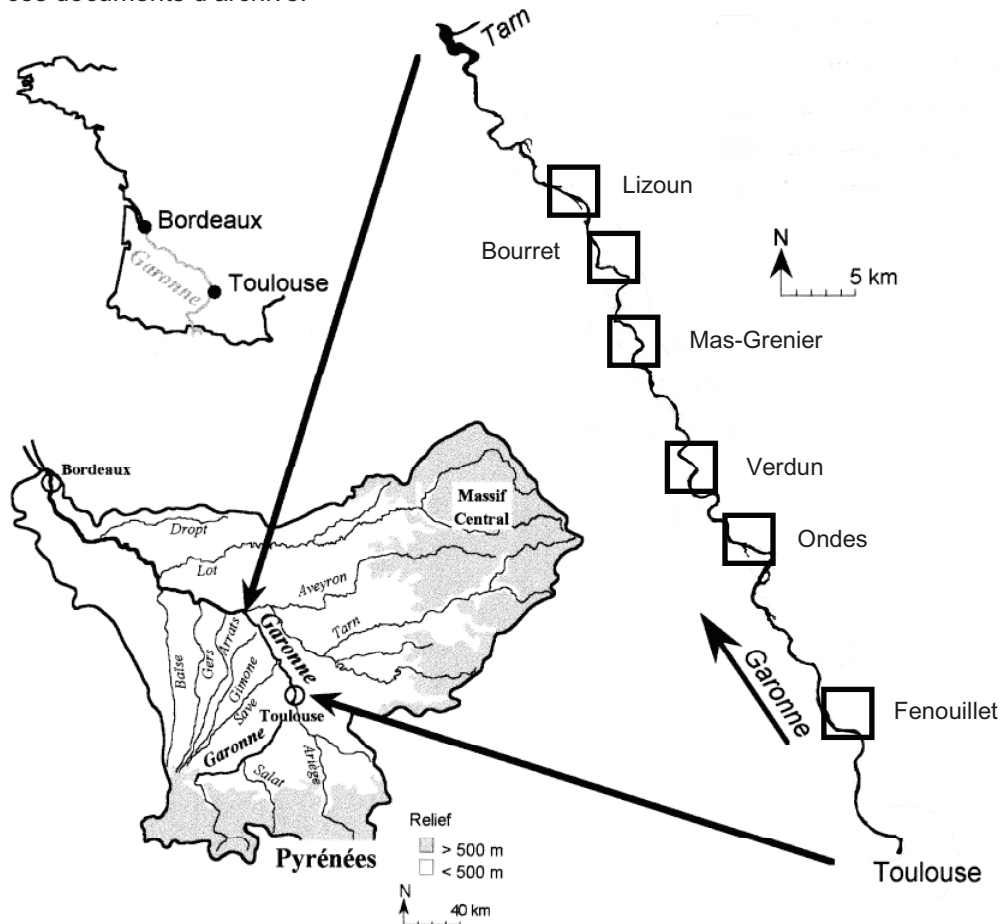


Fig. 1. Secteur de la Garonne débordante entre Toulouse et la confluence avec le Tarn et des six sites d'étude

3.2 Matériels et Méthodes

-Type de documents utilisés

L'évolution historique des 6 sites a été suivie sur une période de deux siècles, grâce à cinq séries de cartes anciennes et de deux missions de photographies aériennes, trouvées dans divers lieux (Tableau 1).

Pour le site de Fenouillet, une carte additionnelle seulement disponible pour ce site (Plan général de la Garonne et des terrains adjacents situés sur la rive droite entre la métairie de Sant-Jaumet et Le Hameau de Castilate, effectuée par Mondat de Lagorce en 1835) et obtenue aux Archives départementales de la Haute-Garonne a été utilisée. La carte IGN de 1945 a été remplacée pour la photographie aérienne de 1950 série S.G.A.C.C (Echelle = 1 : 5000), obtenue aux Archives d'EcoLab.

Type d'information	Source	Année	Échelle
Carte du cours de la Garonne	Archives départementales de la Gironde	1810	1:5 000
Minutes de la carte d'état-major	Cartothèque de l'Institut Géographique National	1849	1:40 000
Carte du cours de la Garonne	Archives départementales de la Haute-Garonne	1868	1:10 000
Carte d'état-major type 1889	Cartothèque de l'Institut Géographique National	1908	1:50 000
Carte IGN	Cartothèque de l'Institut Géographique National	1945	1:20 000
Photographie aérienne infrarouge	Vol privé SPHAIR. Mission 75.AGR.1.IRC	1975	1:10 000
Orthophoto aérienne	Géoportail IGN	2005-06	Numérique

Tableau 1. Liste des documents utilisés pour l'étude historique des sites candidats à la restauration de la Garonne, entre Toulouse et la confluence du Tarn.

-Mise en place d'une base de données cartographique par site

Une partie des cartes historiques (de Granade à la confluence du Tarn) avaient déjà été numérisées à EcoLab (Muller et al. 2002). Les autres cartes historiques et les photographies aériennes de 1975 ont été scannées, puis les secteurs correspondants aux sites d'étude ont été extraits pour les géo-référencer (erreur quadratique moyenne = 5 m en x,y) à l'aide du logiciel ArcMap v 9.0 en utilisant les photographies aériennes de 2005-06 comme référence. Ces photographies aériennes de 2005-06 ont été obtenues sur le Géoportail de l'IGN et étaient déjà géo-référencées dans la projection RGF Lambert 93. Toutes les données correspondant à chaque site ont ainsi été intégrées dans un SIG.

La limite de chaque site potentiel de restauration, indiqué en jaune dans chaque carte, correspond (en général) à celle du Domaine Public Fluvial (DPF). Pour chaque site, la zone d'étude effective est légèrement plus grande et correspond à un cadre rectangulaire d'environ 2.5 km x 3.5 km (variable selon le site considéré). Dans chacune de ces zones ont été vectorisées la plaine centennale et la terrasse alluviale (lorsqu'elle est visible) à partir de la carte géomorphologique de Lambert (1988).

-Cartographie des habitats

Au sein de la « plaine inondable » (centennale) ont été identifiées et digitalisées à partir des cartes et photographies les 8 catégories d'habitats suivantes:

Habitats aquatiques :

1. Lit principal de la Garonne : Lit mineur du cours d'eau
2. Atterrissements : Dépôts alluvionnaires le long du fleuve (îles, bancs de sable ou de galets, berges sans végétation). Seulement visibles dans certaines cartes (1810, 1868 et 1945) et dans les photographies aériennes (1975 et 2006). Cette catégorie est considérée comme habitat aquatique parce que la fréquence d'inondation y est normalement annuelle, et par conséquent fonctionnellement il s'agit d'habitats aquatiques temporels.

3. Bras secondaires : Bras actifs ou morts de la Garonne. En cas d'une ou plusieurs îles (exceptionnellement plusieurs cours d'eau), le secteur du lit le plus large a été considéré comme catégorie 1 « Lit de la Garonne » et le reste (les plus étroits) comme catégorie 2 « Bras secondaires ».
4. Étangs artificiels : Majoritairement ils proviennent des extractions de gravier passées et présentes.

Boisements :

5. Ripisylve : Boisements spontanés. Une information plus détaillée (structure et composition de la forêt) est absente dans toutes les cartes, par conséquent une description floristique de la ripisylve et une division en plusieurs sous-catégories ne sont pas possible.
6. Plantations de peupliers
7. Boisements indifférenciés : Le manque d'information dans certaines cartes (1908) ne permet pas une définition plus précise du type de boisements.

Autres :

8. Cultures, urbain et sol nu (qui diffère de la catégorie « atterrissements » en ce que son origine n'est pas un événement hydro-géomorphologique naturel mais une perturbation anthropique, par exemple, l'arrachage d'une plantation de peupliers)

Dans chacun des 3 grands groupes de catégories (habitats aquatiques, boisements et autres), certaines catégories ont été considérées comme « anthropiques » (catégories 4, 6 et 8) et d'autres comme « naturelles » (catégories 1, 2, 3 et 5).

-Evolution des surfaces

Une fois digitalisée, la surface de chaque catégorie pour chaque année disponible a été calculée à l'aide du logiciel ArcMap v 9.0. Ce calcul a permis d'effectuer une évaluation de l'évolution des sites d'étude au cours des deux siècles analysés.

Il faut préciser que le choix de ces catégories a été conditionné par la qualité des cartes et par la volonté de disposer d'une clef de description commune à chaque date. Par exemple, on peut admettre que des formations végétales spontanées herbacées ne sont pas indiquées comme les boisements sur les cartes historiques et par conséquent ont été probablement considérées comme sol nu. C'est pour cette raison qu'on a délibérément classé ces formations herbacées comme sol nu dans les photos aériennes de 1950 (à Fenouillet), de 1975 et de 2005/06, ce qui permet une comparaison plus réaliste entre années. De la même façon, on a considéré quelques boisements plantés (par exemple des jardins annexes à la rivière) comme boisements naturels car on assume qu'ils ont été représentés comme boisements sur les cartes historiques. Les statistiques relatives à la surface de chaque catégorie doivent donc être prises avec une certaine précaution et analysées avec un certain esprit critique.

-Analyses complémentaires

Afin de disposer d'informations complémentaires sur la dynamique géomorphologique et écologique des sites, trois analyses supplémentaires ont été effectués pour chaque site d'étude:

1. **Indice de sinuosité.** Cet indicateur a été calculé à partir de la catégorie 1 « Lit principal de la Garonne » en faisant le rapport entre la plus longue et la plus courte distance entre les deux extrémités du lit mineur. Il s'agit d'une mesure qui permet la quantification du degré de chenalisation d'un cours d'eau. Une valeur de 1 correspond à un tracé rectiligne et par conséquent peu dynamique. La comparaison entre années permet d'évaluer le potentiel du site à récupérer un certain dynamisme géomorphologique, bien que les conditions hydro-géomorphologiques (par exemple augmentation de l'incision, régulation plus forte du lit, etc.) aient changées. Par conséquent, cette comparaison doit se faire avec une certaine précaution.

2. **Cartographie de l'âge relatif de la ripisylve actuelle.** Les surfaces correspondantes à les catégories 5 « Ripisylve » des années 1945 (1950 pour Fenouillet), 1975 et 2006 ont été superposées à l'aide du logiciel ArcMap v 9.0 pour obtenir une carte de l'âge de la ripisylve actuelle en considérant trois classes d'âge : « ripisylve jeune » (boisements spontanés présents en 2006 mais absents en 1975, âge maximal de 30 ans), « ripisylve adulte » (boisements spontanés présents en 2006 et 1975 mais absents en 1945, âge entre 30 et 60 ans) et « ripisylve ancienne » (boisements spontanés présents en 2006, 1975 et 1945, âge minimal de 60 ans). La surface de chacune des 3 classes d'âge a donc été calculée pour chaque site. En absence d'une information plus détaillée de la structure et de la composition de la forêt dans la catégorie « Ripisylve » à chaque date, cette carte d'âge permet de faire une classification de la forêt actuelle qui peut être utilisée par exemple pour choisir des parcelles qui doivent être protégées et d'autres qui n'ont pas le même intérêt de conservation parce qu'elles sont plus nombreuses.

3. **Cartographie de l'origine (hydrologique ou anthropique) de la ripisylve actuelle.** Le même protocole que pour l'élaboration de la carte de l'âge de la ripisylve a été suivi, mais avec une complexité supplémentaire : au lieu de superposer seulement la catégorie 1 « ripisylve » extraite aux différentes dates, on a superposé les 8 catégories de chaque date avec les 8 catégories de la date précédente. On a alors divisé la « ripisylve jeune » en « ripisylve jeune d'origine hydrologique » (boisements spontanés présents en 2006 et appartenant à « Habitats aquatiques » en 1975) et « ripisylve jeune d'origine anthropique » (boisements spontanés présents en 2006 et appartenant à « Plantation de peupliers » ou « Autres » en 1975). De la même façon, la ripisylve adulte a été classée en « ripisylve adulte d'origine hydrologique » (boisements spontanés présents en 2006 et 1975 et appartenant à « Habitats aquatiques » en 1945) et « ripisylve adulte d'origine anthropique » (boisements spontanés présents en 2006 et 1975 et appartenant aux catégories « Plantation de peupliers » ou « Autres » en 1945). Même si la catégorie 4 « Étangs artificiels » est une catégorie anthropique, elle a été classée comme origine hydrologique. La raison de ce choix est lié à la volonté d'essayer de délimiter les parcelles qui ont suivi un processus de succession écologique primaire, c'est-à-dire, à partir d'un événement qui a remis à zéro le système (typiquement une grande crue, donc d'origine hydrologique), des autres parcelles qui ont suivi un processus de succession secondaire, en conservant quelques propriétés antérieures à la perturbation (essentiellement un changement d'usage du sol, donc d'origine anthropique). Par exemple, après une coupe de plantation de peuplier, quelques espèces herbacées et des rejets de souches de peupliers apparaissent, d'autres espèces arborées peuvent s'implanter mais la structure du sol reste inchangée. Cette répartition des ripisylves en trois classes d'âge et deux types d'origine peut être utilisé pour analyser la trajectoire de l'écosystème en fonction de l'origine, et ainsi prévoir sa réponse après une éventuelle restauration basée sur la ré-inondation du site (restauration à dominante hydrologique) par rapport à une autre restauration basée sur la reconversion des plantations de peupliers, des cultures et des sols nus, etc. en ripisylve (restauration anthropique).

3.3 Présentation des résultats

Les résultats sont présentés par site, en respectant dans chaque cas la même progression des textes, figures et tableaux :

1. Présentation du site

La Fig. 1 représente la localisation du site considéré et de la zone d'étude correspondante dans la section de la Garonne débordante.

La Fig. 2 est l'extrait de la carte géomorphologique de Lambert (1988) dans la zone d'étude

2. Évolution historique du lit

La Fig. 3 représente l'évolution du lit mineur au cours de deux siècles (1 carte pour chacune des 7 dates disponibles + une carte de synthèse de cette évolution).

3. Évolution historique des habitats dans la plaine inondable au niveau du site

La Fig.4 représente l'évolution des 8 habitats au cours des 2 siècles (1 carte pour chacune des 7 dates disponibles)

Elle est accompagnée des tableaux 1 et 2 représentant l'évolution des surfaces de ces 8 catégories d'habitats (respectivement en hectare et en pourcentage)

La Fig. 5 compare, par des diagrammes en bâtons, l'évolution des 3 grandes catégories d'habitats (catégories « aquatiques - 1 a 4 », catégories « boisements - 5 a 7 » et catégorie « autres - 8 ») ; des habitats d'origine anthropiques (catégories 4, 6 et 8) par rapport aux naturels (catégories 1, 2, 3 et 5) ; des habitats d'origine anthropiques (catégories 4, 6 et 8) par rapport aux naturels divisées entre aquatiques (catégories 1-3) et terrestres (catégorie 5) ; des habitats aquatiques naturels (catégories 1, 2 et 3) ; et des boisements (catégorie 5 par rapport a catégorie 6).

4. Evolution des habitats sur le site d'étude

La Fig. 6 contient la même information que la Figure 4 mais limitée au site potentiel de restauration. Les tableaux 3 et 4 contiennent la même information que les tableaux 3 et 4 mais limitée au site potentiel de restauration.

5. Age et origine de la ripisylve sur le site de d'étude

La Fig. 7 représente la carte de l'âge relatif de la ripisylve actuelle et la même carte avec l'indication de l'origine hydrologique ou anthropique de la ripisylve actuelle.

3.4 Références

Lambert R (1988) Atlas géomorphologique du lit de la Garonne, du Pont du Roy au Bec d'Ambès, 46 planches couleurs au 1/25 000e, SMEPAG, Toulouse.

Muller E, Guilloy-Froget H, Barsoum N, Brocheton L (2002) *Populus nigra* L. en vallée de Garonne : legs du passé et contraintes du présent. C. R. Biologies 325 : 1129-1141.

4. Approche comparée sur l'Ebre (synthèse bibliographique)

L'Ebre est l'un des plus grands fleuves de la région Méditerranéenne et le deuxième de la Péninsule Ibérique en termes de longueur (~930 km), de volume d'eau versé annuellement dans la mer Méditerranée (~12000 hm³) et de surface du bassin versant (~86000 km²). Il traverse le nord-ouest de l'Espagne en direction du sud-est et son bassin versant est entouré par les Pyrénées au nord et par le Système Ibérique au sud (Fig. 1). Géographiquement, on pourrait le considérer comme un système jumeau de la Garonne, de l'autre côté des Pyrénées. Hydrologiquement, il s'agit aussi d'un régime pluvionival, bien que les étiages estivaux soient plus sévères que dans la Garonne. L'essentiel du cours de l'Ebre est situé dans un climat semi-aride.

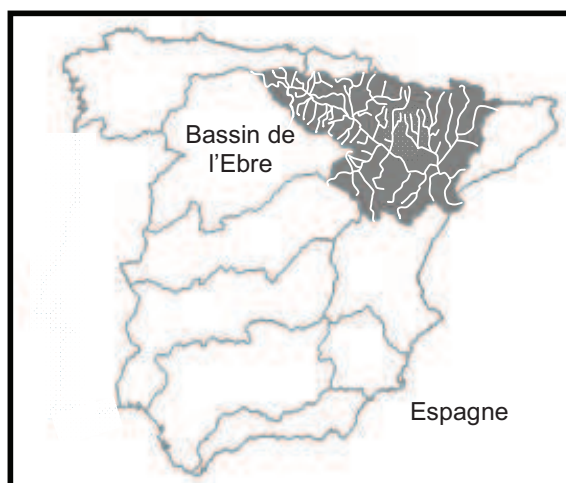


Fig. 1. Situation géographique du bassin de l'Ebre

Comme dans le cas de la Garonne, l'Ebre est profondément impacté par des aménagements et des activités humaines. L'implantation de barrages dans tout le bassin versant, avec des objectifs d'atténuation de crues, de production d'énergie et d'irrigation, a été très fréquente, en particulier dans les années 50 et 60 lorsque de grands barrages ont été construits, comme par exemple le barrage de l'Ebre (1952) ou le barrage de Yesa (1959). La régulation a entraîné d'importants changements sur l'hydrologie. Ainsi, la fréquence des inondations à la station de la ville de Saragosse a diminué de 7.6 événements par an avant les années 50 à 4.2 événements par an aujourd'hui (Fig. 2). Des études très détaillées sur les changements hydrologiques provoqués par les impacts anthropiques sur l'Ebre ont été réalisées par Cabezas et al. (2009a) et Magdaleno et Fernández (2010).



Fig. 2. Crue ordinaire de l'Ebre 8 km en aval de la ville de Saragosse

D'un autre côté, la fixation des berges par des enrochements est aussi fréquente tout le long du cours du fleuve. Elle a été spécialement intense pendant les années 70 et 80, ce qui fait que les migrations du lit mineur ont été pratiquement inexistantes pendant les 30 dernières années. Ainsi, le tracé méandrique actuel est stabilisé et reste comme un vestige d'une ancienne dynamique géomorphologique dans la majorité du secteur moyen, qui pourrait être équivalent au secteur de la Garonne débordante étudiée dans ce document. L'extraction de granulats a été important au cours de la deuxième moitié du XXe siècle mais sans doute moins intense que dans le cas de la Garonne débordante et plus concentré dans le lit majeur. Ainsi, quelques auteurs (par exemple, Ollero 2007) ont suggéré que des processus d'incision sont présents sur l'Ebre, bien que contrairement à la Garonne, ils n'ont pas été bien quantifiés.

Ces impacts ont eu logiquement une influence sur les milieux riverains associés, comme cela a été observé dans le cas de la Garonne. Des différentes analyses historiques (Cabezas et al. 2009a, González et al. 2010a, Magdaleno et Fernández 2010) n'ont pas montré une augmentation notable des surfaces occupées par les catégories anthropiques (Tab. 1), par exemple les cultures au cours du XXe siècle. Par contre, les habitats aquatiques (bras secondaires, bras morts...) sont progressivement en train de disparaître. Ils ont été réduits au chenal principal. Suite au manque de perturbations hydro-géomorphologiques, la végétation a pu coloniser des endroits annexes au chenal principal ce qui fait que la surface boisée totale et la continuité forestière longitudinale dans le corridor fluvial ont augmenté en général. Toutefois, pour la même raison, la régénération des espèces pionnières est très limitée et met en péril la future existence de la ripisylve. Le dépérissement de ces espèces comme le peuplier noir ou le saule blanc est aussi très fréquente (Fig. 3) (González et al. 2010a, Sous presse).

	1927	1957	1981	2003
Lit mineur et ses ramifications	9	8	8	6
Atterrissements	11	7	3	2
Ripisylve	29	20	15	19
Anthropique	51	65	74	73
TOTAL	100	100	100	100

Tableau 1. Pourcentages des différentes catégories dans le lit moyen (décennal) de l'Ebre au niveau de la Réserve Naturelle de l'Alfranca au cours du XXe siècle. Source. González et al. (2010a)



Fig. 3. Ripisylve de l'Ebre au niveau de la Réserve Naturelle de l'Alfranca (quelques kilomètres en aval de la ville de Saragosse) avec de nets symptômes de dépérissement

Dans ce contexte, de nouvelles propositions de gestion de l'espace fluvial ont été suggérées pour l'Ebre (voir par exemple les travaux d'Ollero, 2010), avec pour objectif d'enlever certaines contraintes sur le lit afin de redonner une certaine mobilité du cours d'eau. Cependant, et comme dans le cas de la Garonne, aucune opération significative de ce type n'a encore été réalisée sur l'Ebre. Seules quelques expériences pilotes (la récupération de bras secondaires ou l'élimination des enrochements obsolètes) ont été faites à la hauteur de la Réserve Naturelle de l'Alfranca (quelques kilomètres en aval de la ville de Saragosse). Bien au contraire, un nouveau barrage au niveau de la ville de Saragosse a été construit en 2008 (Fig. 4) et un projet ambitieux pour augmenter la capacité du barrage de Yesa est prévu. Par contre, quelques efforts pour la récupération de l'espace de mobilité du lit et pour une certaine restauration écologique ont été réalisés dans plusieurs affluents de l'Ebre comme les fleuves Aragón et Arga dans la région de Navarre. Un plan de récupération de l'espace de liberté du Rio Piedra dans les régions de Castille et d'Aragón est en cours d'exécution.



Fig. 4. Travaux pour le nouveau barrage sur l'Ebre dans la ville de Saragosse

Aujourd'hui, il n'existe pas de plan de suivi de l'état de l'intégrité de l'écosystème riverain. Ainsi, il n'existe pas non plus de protocole de suivi. Ce qui n'exclut pas l'existence d'un réseau de stations de suivi de la qualité de l'eau géré par l'organisme responsable de la gestion de l'Ebre (Confederación Hidrográfica del Ebro) et des descriptions ponctuelles de l'état des milieux riverains avec un approche systémique, par l'Institut Pyrénéen d'Ecologie (Conseil National de la Recherche Scientifique) pendant la deuxième moitié de la décennie de 2000 (Cabezas 2008, Cabezas et al. 2008, 2009a, 2009b, 2009c, Cabezas et Comín 2010, Gallardo 2009, Gallardo et al. 2007, 2008, 2009a, 2009b, González 2010, González et al. 2010a, 2010b, 2010c, González et al. sous presse).

En conclusion, on peut noter que de nombreuses similitudes existent entre l'Ebre et la Garonne. Il serait donc intéressant d'essayer de partager les expériences menées de part et d'autre des Pyrénées pour essayer de redonner un espace de liberté aux deux fleuves, à travers des projets communs.

Références

Cabezas A (2008) The role of the river disturbance regime on floodplain structure and organic matter accretion at the Middle Ebro River. Thèse de Doctorat. Université de León (León, Espagne). 123 pp

Cabezas A, González E, Gallardo B, García M, González M, Comín FA (2008) Effects of hydrological connectivity on the substrate and understory structure of riparian wetlands in the Middle Ebro River (NE Spain): implications for restoration and Management. *Aquatic Sciences* 4: 361-376

Cabezas A, Comín FA, Beguería S, Trabucchi M (2009a) Hydrologic and landscape changes in the Middle Ebro River (NE Spain): implications for restoration and management. *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 1-12

Cabezas A, García M, Gallardo B, González E, González-Sanchis M, Comín FA (2009b) The effect of anthropogenic disturbance on the hydrochemical characteristics of riparian wetlands at the Middle Ebro River (NE Spain) *Hydrobiologia* 617: 101-116

Cabezas A, Comín FA, Walling DE (2009c) Changing patterns of organic carbon and nitrogen accretion on the middle Ebro floodplain (NE Spain) *Ecological Engineering* 35: 1547-1558

Cabezas A, Comín FA (2010) Carbon and nitrogen accretion in the topsoil of the Middle Ebro River floodplain (NE Spain): implications for their ecological restoration. *Ecological Engineering* 36: 640-652

Gallardo B, García M, Cabezas A, González E, Ciancarelli C, González M, Comín FA (2007) First approach to understanding riparian wetlands in the Middle Ebro River floodplain (NE, Spain): Structural characteristics and functional dynamics. *Limnetica* 26: 373-386

Gallardo B, García M, Cabezas A, González E, González M, Ciancarelli C, Comín FA (2008) Macroinvertebrate patterns along environmental gradients and hydrological connectivity within a regulated river-floodplain. *Aquatic Sciences* 70: 248-258

Gallardo B (2009) Aquatic community patterns across environmental gradients in a Mediterranean floodplain and their application to ecosystem restoration. Thèse de Doctorat. Université de Girona (Girona, Espagne). 169 pp

Gallardo B, Gascón S, González-Sanchis M, Cabezas A, Comín FA (2009a) Modelling the response of floodplain aquatic assemblages across the lateral hydrological connectivity gradient. *Marine and Freshwater Research* 60: 924-935

Gallardo B, Gascón S, García M, Comín FA (2009b) Testing the response of functional structure and biodiversity to flooding and confinement. *Journal of Limnology* 68: 315-326.

González E, González-Sanchis M, Comín FA, Muller E (sous presse) Hydrologic thresholds for riparian forest conservation in a regulated large Mediterranean River. *River Research and Applications*

González E (2010) Contribution to the Ecology of the Middle Ebro Riparian Woodlands: Implications for Management. Thèse de Doctorat. Université d'Alcalá (Madrid, Espagne). 162 pp

González E, González-Sanchis M, Cabezas A, Comín FA, Muller E (2010a) Recent changes in the riparian forest of a large regulated Mediterranean River: implications for Management. *Environmental Management* 45: 669-681

González E, Muller E, Gallardo B, Comín FA, González-Sanchis (2010b) Factors controlling litter production in a large Mediterranean river floodplain forest. *Canadian Journal of Forest Research* 40: 1698-1709

González E, Muller E, Comín FA, González-Sanchis (2010c) Leaf nutrient concentration as an indicator of *Populus* and *Tamarix* response to flooding. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 12: 257-266

Magdaleno F, Fernández JA (sous presse) Hydromorphological alteration of a large Mediterranean river: relative role of high and low flows on the evolution of riparian forests and channel morphology. *River Research and Applications*

Ollero A (2007) Channel adjustments, floodplain changes and riparian ecosystems of the Middle Ebro River: assessment and management. *Water Resources Development* 23: 79-90

Ollero A (2010) Channel changes and floodplain Management in the meandering middle Ebro River, Spain. *Geomorphology* 117: 247-260

5. Conclusion générale

Dans la perspective d'une restauration de l'espace mobilité d'un ou de plusieurs des sites d'étude, on a réfléchi à la mise au point d'un protocole d'état et de suivi des écosystèmes riverains. En l'absence de normes de collecte des données ou de guides de terrain adaptés au compartiment végétal que ce soit dans la Directive Cadre Européenne sur l'eau (qui s'intéresse avant tout au compartiment eau) ou dans les nouveaux protocoles nationaux CarHyCE et SYRAH (qui s'intéressent plutôt au cadre géomorphologique), on s'est concentré sur les aspects végétation, mais dans une perspective de gestion globale des écosystèmes. L'idée principale du protocole proposé est de mesurer quelques indicateurs clés à trois échelles d'actions complémentaires (le contexte, le site et l'habitat) avant et après la restauration afin de comparer les trajectoires qu'ils indiquent. Ainsi, l'établissement de trajectoires écologiques s'intègre dans une approche théorique renouvelée du concept de 'système de référence', en particulier dans le cas où il est difficile de trouver une référence classique. L'ONEMA suggère alors de trouver des alternatives. Cette démarche est indispensable dans le cas de la Garonne. Le protocole proposé consiste en un système d'évaluation quantitative qui doit être complété par des études plus exhaustives mais qui peut servir de base pour le suivi de l'intégrité de l'écosystème et de l'efficacité des mesures de restauration écologique.

L'analyse historique des sites d'étude au cours des deux derniers siècles a montré l'importance des impacts de l'activité humaine sur le fonctionnement de la Garonne débordante. La tendance la plus importante observée grâce à l'analyse d'orthophotos et de cartes anciennes est que, en général, les migrations du lit dans les sites d'étude ont été fréquentes au cours du XIXe siècle et par contre peu significatives pendant le XXe siècle, notamment depuis les travaux de stabilisation des années 50-60. Ainsi, le chenal principal reste aujourd'hui fixe avec un tracé rectiligne dans quelques sites et avec un tracé méandrique mais stable dans d'autres, témoignage d'un ancien dynamisme géomorphologique.

La stabilisation du lit a eu d'importantes conséquences sur la surface occupée par différents habitats dans la plaine inondable. La tendance vers la terrestrialisation et la perte d'habitats aquatiques sont les plus notables (Tab. 1). Ainsi, la fixation du lit et sa conséquence, le manque de migrations ont limité la création de nouveaux atterrissements et de bras secondaires et, en même temps, ont accéléré les processus de colmatation et de conquête par la végétation des anciennes annexes fluviales. Simultanément, avec un lit contrôlé, la réduction des risques d'inondations a facilité la conquête des terrains riverains par l'homme en certains sites. Un exemple très représentatif de ce fait est la présence d'activités d'extraction de granulats, visible dans l'orthophoto de 1975 sur presque tous les sites. Toutefois, l'interdiction de ces activités et son abandon a permis de récupérer plusieurs terrains pour les milieux naturels, ce qui, avec la perte d'habitats aquatiques, a permis à la végétation de coloniser de nouveaux endroits et aux ripisylves d'augmenter notablement leur surface pendant les dernières 30 années (Tab. 2). On a pu aussi identifier l'âge relatif et l'origine (selon que la catégorie précédente était hydrologique ou anthropique) de cette ripisylve dans chacun des sites. Cette information a un intérêt essentiel pour la conservation car elle révèle que la ripisylve avec une origine antérieure aux travaux de stabilisation des années 50-60 a disparu pratiquement dans sa totalité.

L'analyse historique du site d'Ondes a montré qu'il n'y a pas de raisons objectives pour considérer ce site comme une station témoin qui aurait pu conserver une dynamique géomorphologique plus ou moins intacte et servir de conditions de référence. Cela n'exclut pas qu'à l'échelle des habitats on puisse trouver des parcelles avec une origine et une histoire qui permettent de les considérer comme des parcelles témoin. Au cas où il faudrait absolument utiliser des systèmes de référence pour mener à bien cette restauration, l'alternative qu'on propose est donc de travailler avec une approche basée sur la notion de trajectoires écologiques et cela, si possible, en parallèle avec des démarches simultanées menées sur d'autres fleuves similaires ou dans un meilleur état de conservation (comme par exemple l'Ebre et l'Allier respectivement).

Enfin, l'étude comparée de l'Ebre a montré que c'était un système géographiquement 'jumeau' de la Garonne avec des disfonctionnements et des états de gestion par rapport à la restauration écologique très similaires. Il serait donc intéressant d'essayer de partager les expériences menées pour essayer de redonner un espace de liberté aux deux fleuves dans le cadre de projets communs.

Tableau 1 Evolution relative des surfaces occupées par les différents habitats dans la plaine inondable (moyenne des six sites d'étude, en %)

	1810	1849	1868	1908	1945	1975	2006
Habitats aquatiques							
<i>Lit de la Garonne</i>	10	10	8	12	7	8	7
<i>Ramifications du canal</i>	1	2	2	2	2	1	1
<i>Atterrissements</i>	1	-	3	-	3	0	1
<i>*Etangs artificiels</i>	0	0	0	0	0	1	1
SUB-TOTAL	12	12	13	14	12	10	10
Boisements							
<i>Ripisylve</i>	12	4	5	-	9	9	14
<i>*Plantations de peuplier</i>	9	20	26	-	16	16	14
<i>Boisements indifférenciés</i>		-	-	26	-	-	-
SUB-TOTAL	21	24	31	26	25	25	28
*Autres (cultures, urbain, nu)							
	67	64	56	60	63	65	62
TOTAL							
	100	100	100	100	100	100	100

* Catégories anthropiques

Tableau 2 Evolution des surfaces relatives de ripisylves dans chaque site d'étude (%)

	1810	1849	1868	1908	1945	1975	2006
Lizoun	11	9	32	-	29	45	47
Bourret	30	10	8	-	48	40	60
Mas-Grenier	31	5	17	-	39	16	52
Verdun	0	0	7	-	36	35	46
Fenouillet	23	2	4	-	3	12	32
Ondes	60	6	9	-	29	17	40

Restaurer un espace de mobilité pour la Garonne

Réflexion sur un protocole de suivi
Analyse historique de sites potentiels
Comparaison avec l'Ebre

Convention SMEAG/CNRS : 061750

Eduardo González Sargas, Post-Doc EcoLab
Etienne Muller, Ingénieur de Recherche EcoLab

Date : 11 Mars 2011



EcoLab
Laboratoire
Ecologie fonctionnelle
et Environnement

UMR 5245 (CNRS-UPS-INPT)
Université Paul Sabatier
118 route de Narbonne
Bâtiment 4R1
31062 Toulouse Cedex 9, France