

Synthèses

# La Loire fluviale et estuarienne

Un milieu en évolution

Florentina Moatar, Nadia Dupont, coord.



éditions  
Quæ



# La Loire fluviale et estuarienne

Un milieu en évolution

## Collection *Synthèses*

Restaurer la nature pour atténuer les impacts du développement  
Analyse des mesures compensatoires pour la biodiversité  
H. Levrel, N. Frascaria-Lacoste, J. Hay, G. J. Martin  
et Sylvain Pioch, coord.  
2015, 320 p.

Parasites et parasitoses des poissons  
P. de Kinkelin, M. Morand, R. Hedrick, C. Michel  
2014, epub

La reproduction animale et humaine  
M. Saint-Dizier, S. Chastant-Maillard  
2014, 752 p.

Une ville verte  
Les rôles du végétal en ville  
M. Musy, coord.  
2014, 200 p.

Ingénierie écologique  
Action par et/ou pour le vivant ?  
F. Rey, F. Gosselin, A. Doré, coord.  
2014, 174 p.

Plancton marin et pesticides : quels liens ?  
G. Arzul, F. Quiniou, coord.  
2014, 144 p.

# La Loire fluviale et estuarienne

Un milieu en évolution

Florentina Moatar, Nadia Dupont,  
coordinatrices

# Remerciements

---

Ce livre n'aurait pu être mené à bien sans le soutien de l'université François-Rabelais de Tours et de l'ensemble des acteurs du bassin ligérien *via* la plateforme « Recherche, données, information du plan Loire grandeur nature III (2007-2013) », animée par l'Établissement public Loire et l'appui du Feder (Fonds européen de développement régional).

Les bases scientifiques ont été acquises grâce au soutien financier et technique de l'Établissement public Loire, de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, du GIP (groupement d'intérêt public) Loire Estuaire et de la Dreal Centre-Val de Loire (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement), dans le cadre des différentes phases du plan Loire grandeur nature depuis 1994, de l'Onema (Office national de l'eau et des milieux aquatiques) et de la Zone-Atelier Loire du CNRS (Centre national de la recherche scientifique).

La disponibilité et la confiance en ce projet des nombreux organismes présents sur le bassin ont grandement facilité le travail. Les coordinatrices et contributeurs remercient tout particulièrement l'Agence de l'eau Loire-Bretagne (Xavier Bourrain, Olivier Coulon, Jean-Noël Gautier, Éloïse Quérault), le GIP Loire Estuaire (Stéphanie Aumeunier, Sylvain Cerisier, Lise Lebailleur, Kristell Lebot, Denis Musard, Bernard Prud'homme-Lacroix), la Dreal Centre-Val de Loire (Jean Maurin, Fabien Paquier, Didier Reinbold), l'Établissement public Loire (Armelle Denis, Jean-Claude Eude, Benoît Rossignol, Pierre Serrano, Mamy Tombozafy), EDF (Christine Bertier, Jean-Pierre Bouchard, Philippe Gosse, Alain Poirel, Thibault Mathevet).

Les coordinatrices remercient également Michel Meybeck, Jean-Paul Bravard et Gilles Pinay pour leur relecture avisée, apport essentiel à l'élaboration de cet ouvrage, et Ghislain de Marsily, Daniel Fréchet et Claude Gitton pour avoir accepté de le préfacer.

Vifs remerciements au CNRS d'avoir permis à Florentina Moatar de septembre 2014 à septembre 2016, de s'investir pleinement dans la coordination de ce travail.

# Table des matières

---

<b>Remerciements</b> .....	4
<b>Préfaces</b> .....	9
<b>Introduction</b> .....	17

## PARTIE I

### VISIONS GÉOGRAPHIQUE ET HISTORIQUE DU BASSIN

<b>Chapitre 1. Le fleuve et son bassin</b> .....	23
<i>Nadia Dupont, Florence Curie, Stéphane Rodrigues</i>	
<b>Chapitre 2. Un fleuve et son estuaire très tôt aménagés</b> .....	35
<i>Annie Dumont, Rémy Arthuis</i>	

## PARTIE II

### DYNAMIQUE DES FLUX D'EAU

<b>Chapitre 3. Régimes hydrologiques, thermiques et leurs évolutions à long terme</b> .....	51
<i>Florentina Moatar, Fulvia Baratelli, Nicolas Flipo, Éric Sauquet, Jean-Philippe Vidal, Florence Habets</i>	
<b>Chapitre 4. Étiages et crues</b> .....	63
<i>Nadia Dupont, Florentina Moatar</i>	
<b>Chapitre 5. L'estuaire et son hydrodynamisme spécifique</b> .....	73
<i>Pierre Le Hir, Alain Ménesguen</i>	

## PARTIE III

### DYNAMIQUE DES FLUX PARTICULAIRES

<b>Chapitre 6. Transferts de particules dans le continuum fluvio-estuarien</b> .....	85
<i>Stéphane Rodrigues, Pierre Le Hir, Florentina Moatar, Nicolas Claude</i>	
<b>Chapitre 7. Évolution morphologique récente et gestion de la continuité sédimentaire en Loire</b> .....	112
<i>Stéphane Rodrigues, Stéphane Braud, Pierre Bona, Coraline L. Wintenberger, Audrey Latapie</i>	

PARTIE IV  
QUALITÉ DE L'EAU ET DES SÉDIMENTS

<b>Chapitre 8. Micropolluants dans les eaux, les sédiments et le biote .....</b>	125
<i>Cécile Grosbois, Alexandra Coynel, Frédérique Eyrolle-Boyer, Charles Lemarchand, Catherine Mouneyrac, Laurence Poirier</i>	
<b>Chapitre 9. Eutrophisation et processus biogéochimiques du continuum fleuve-estuaire .....</b>	147
<i>Camille Minaudo, Cécile Poisvert, Alain Ménesguen, Gilles Billen</i>	
<b>Chapitre 10. La reconquête de la qualité des eaux.....</b>	165
<i>Nicolas Rollo, Étienne Chauveau</i>	

PARTIE V  
ÉCOLOGIE ET BIODIVERSITÉ

<b>Chapitre 11. Habitats et végétation de la plaine inondable .....</b>	174
<i>Sabine Greulich, Hermann Guitton, Pascal Lacroix</i>	
<b>Chapitre 12. Phytoplancton et microphytobenthos.....</b>	186
<i>Maria Leitão, Jean-Pierre Descy, Laurent Barillé</i>	
<b>Chapitre 13. Faune invertébrée .....</b>	192
<i>Karl Matthias Wantzen, Nina Richard</i>	
<b>Chapitre 14. Faune piscicole.....</b>	198
<i>Catherine Boisneau, Éric Feunteun</i>	
<b>Chapitre 15. Focus sur quelques oiseaux et mammifères remarquables du bassin versant de la Loire.....</b>	209
<i>Paul Hurel, Benoît Marchadour</i>	
<b>Chapitre 16. Aspects de protection et de gestion de la biodiversité ligérienne.....</b>	214
<i>Sabine Greulich, Céline Chadenas, Stéphane Braud</i>	

PARTIE VI  
IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

<b>Chapitre 17. Trajectoires hydroclimatiques du bassin et impacts possibles .....</b>	229
<i>Jean-Philippe Vidal, Dominique Thiéry, Florence Habets, Josette Garnier, Florentina Moatar</i>	
<b>Chapitre 18. Tendances actuelles et trajectoires de la faune piscicole sous changement climatique.....</b>	243
<i>Laetitia Buisson, Yves Souchon</i>	
<b>Chapitre 19. Trajectoires hydromorphologiques possibles de l'estuaire et conséquences sur son fonctionnement.....</b>	252
<i>Pierre Le Hir, Régis Walther</i>	
<b>Chapitre 20. Un exemple d'enjeu du changement climatique après 2050 : le vignoble du Val de Loire .....</b>	262
<i>Hervé Quénot, Olivier Planchon, Étienne Neethling, Cyril Bonnefoy, Gérard Barbeau</i>	

PARTIE VII  
CONCLUSION ET PERSPECTIVES

<b>Chapitre 21. Le fleuve et son bassin à l'Anthropocène .....</b>	<b>268</b>
<i>Michel Meybeck</i>	
<b>Chapitre 22. Enjeux du bassin et recherches futures.....</b>	<b>278</b>
<i>Florentina Moatar, Nadia Dupont</i>	
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>291</b>
<b>Liste des auteurs .....</b>	<b>316</b>



# Préface

---

Quel sera l'avenir des « grands fleuves » à l'échelle de la planète ? Cette question se pose avec de plus en plus d'acuité, en particulier en raison du changement climatique, de l'aménagement de plus en plus complexe des cours d'eau, et des innombrables demandes qui sont faites aujourd'hui aux fleuves. Les fleuves vont-ils remplir demain les mêmes rôles que par le passé ? Des rôles nouveaux vont-ils être proposés et mis en œuvre ? À ce titre, en octobre 2015, a été créée par la Compagnie nationale du Rhône « Initiative pour l'avenir des grands fleuves », dont le président est Erik Orsenna, membre de l'Académie française, et qui réunit déjà une quinzaine de représentants des grands fleuves de différents pays, ce nombre étant amené à croître. L'idée est de confronter les expériences acquises, heureuses ou malheureuses, dans l'aménagement ou l'utilisation des fleuves, sachant qu'aujourd'hui les fleuves « naturels » non anthropisés sont rares ou inexistantes. Ce groupe de réflexion s'intéresse par exemple au transport fluvial, bien plus économe en énergie que les transports routiers, et aux obstacles qui empêchent son extension, au potentiel hydroélectrique, et à la façon de l'exploiter en minimisant les effets délétères sur l'environnement, aux besoins d'irrigation et de transfert d'eau, à la lutte contre les inondations et à la prévision des crues, à l'élimination après traitement des eaux usées urbaines, industrielles et agricoles, qui sont rejetées dans les fleuves, à la faune aquatique, à sa protection et son utilisation pour la pêche, à l'avifaune et aux mammifères habitant ces milieux, et enfin au devenir des deltas avec la remontée du niveau de la mer. Les fleuves peuvent-ils jouer un rôle dans la lutte contre le changement climatique, et comment ? Par ailleurs, dans certaines villes, par exemple à Lyon, le fleuve est de plus en plus mis en valeur quand il traverse la ville, par ses aspects esthétiques, par l'aménagement des berges qui sont des lieux de promenade, de rencontres et de convivialité, par les baignades, la navigation de plaisance, les spectacles et jeux d'eau... Certains aménagements remplissent à la fois ce rôle ludique au service des urbains, et aussi un rôle technique pour le traitement des eaux urbaines, ou pour la protection contre les inondations... Ailleurs, ce sont des voies de halage le long des fleuves qui sont réouvertes et aménagées pour la promenade et la bicyclette, comme cela se fait déjà sur certaines portions de la Loire, ou sur le Rhône avec la ViaRhôna qui devrait à terme permettre de suivre le fleuve de Genève à la mer...

Ces préoccupations très récentes demandent au premier chef de bien connaître le fonctionnement actuel du fleuve, son histoire, ses aménagements et son utilisation. C'est ce que nous apporte, de façon brillante, cet ouvrage sur la Loire, qui est peut-être le fleuve français le plus passionnant à étudier, par la beauté et la diversité de ses paysages, de ses aménagements urbains (ponts, quais, ouvrages en façade sur le fleuve...), par l'empreinte laissée par les aménagements antérieurs, qui ont façonné le tracé actuel et permis à la présence humaine de s'organiser autour du fleuve. Tous les éléments sont réunis dans ce livre pour réfléchir à l'avenir du fleuve, à sa meilleure utilisation écologique, énergétique, urbaine, sociale, à son évolution morphologique, au devenir de ses faunes. Les auteurs l'ont déjà commencée, cette

réflexion prospective, dans les parties VI et VII, éclairée tout d'abord par l'estimation des impacts du changement climatique, en particulier sur le vignoble ou la flore et la faune, puis s'attachant à quantifier les variations des débits, des flux de matière solide ou de contaminants, en fonction des travaux d'amélioration programmés dans l'esprit de la Directive cadre sur l'Eau pour atteindre le « bon état écologique », ou pour restaurer et protéger la morphologie et le fonctionnement du fleuve. Il s'agit maintenant d'élaborer, en sus de ces approches essentiellement physiques, une réflexion à caractère humaniste sur les attentes de la société vis-à-vis du fleuve, dans ses dimensions paysagère, économique, écologique, ludique, architecturale... Le classement du Val de Loire au patrimoine mondial de l'Unesco, en 2000, a déjà évoqué « sa valeur universelle exceptionnelle fondée sur la densité de son patrimoine monumental, architectural et urbain, l'intérêt du paysage fluvial et la qualité exceptionnelle d'expressions paysagères héritées de la Renaissance et du siècle des Lumières ». Ailleurs, à Hambourg en Allemagne, une terrible inondation de l'Elbe tua en 1962 trois cents personnes, ce qui engendra une rénovation urbaine de grande ampleur, alliant la maîtrise du foncier à d'importantes réformes de la gouvernance. Faut-il s'en inspirer, pour par exemple doter la Loire d'un ouvrage prestigieux, comme le viaduc de Millau ? Reconstituer des paysages d'un passé aujourd'hui disparu, comme le bocage ? Gérer l'eau du fleuve en faveur de l'agriculture, de la production énergétique, du fonctionnement écologique du milieu, de la protection contre les crues ? Autant de questions auxquelles la société devrait répondre, pour demander aux chercheurs et aux outils qu'ils ont développés la façon d'y parvenir, ou les risques que ces nouvelles dimensions de l'aménagement pourraient faire courir à l'ensemble du milieu ligérien... Parmi ces questions, se pose bien sûr, en préalable, la façon dont un consensus pourra être bâti sur ces choix, chose difficile, mais dont l'Établissement public Loire nous a déjà montré qu'il est possible. Comme le dit Erik Orsenna, les « fleuves sont pour nous tous, et pour le meilleur comme pour le pire, des partenaires essentiels. Donnons-leur toute l'attention qu'ils méritent » !

**Ghislain de Marsily**  
Académie des sciences





La Loire à La Charité-sur-Loire © F. Moatar.

# Préface

---

Acteur de bassin au service de l'ensemble de ses collectivités membres, dans leur diversité, l'Établissement public Loire s'est vu confier l'animation de la plateforme Recherche, données, information du plan Loire III (2007-2013).

Cette mission est à rattacher notamment au rôle décisif qu'il a joué en faveur de l'émergence et de la structuration de ce volet, accompagnées par l'Europe (Feder) *via* le programme opérationnel plurirégional Loire 2007-2013.

L'Établissement, avec ses partenaires, a eu pour objectif de renforcer les liens et les synergies entre chercheurs et « gestionnaires », *via* le développement et le partage d'une connaissance globale, fondamentale et opérationnelle du fleuve et de son écosystème, dans une logique d'innovation, facteur de compétitivité pour le bassin.

Ainsi focalisé sur la mobilisation de l'expertise scientifique au service de la décision publique pour la gestion du bassin de la Loire et ses affluents, il a mis l'accent sur, entre autres, l'émergence d'une communauté de jeunes chercheurs (vingt et une thèses soutenues), le développement d'outils facilitant la mobilisation et l'accès à l'information tels que le plateau collaboratif d'échange du plan Loire, la diffusion et la vulgarisation des données et des résultats obtenus permettant leur intégration opérationnelle, ou encore l'organisation de rencontres régulières entre chercheurs et gestionnaires.

L'appui sur un conseil scientifique très majoritairement « extra-ligérien » ou encore un mode opératoire basé sur l'ouverture et la transparence témoignent d'une préoccupation « gestionnaire » dépassant le local et le court terme pour chercher à donner de la densité et de l'envergure à la recherche ligérienne, tout en renforçant sa lisibilité et sa visibilité.

Dans ce contexte, il était normal d'appuyer le travail de synthèse réalisé dans le cadre de l'ouvrage coordonné par Florentina Moatar et Nadia Dupont, complétant utilement le tableau de bord 2014 Recherche-développement-innovation relatif à la gestion intégrée du bassin de la Loire produit par ailleurs par l'Établissement.

**Daniel Fréchet**  
Président de l'Établissement public Loire



Les gorges de la Loire à Chadron © Établissement public Loire.

# Préface

---

La Loire est un espace remarquable depuis sa source et celles de ses nombreux affluents jusqu'à son estuaire.

Son bassin versant est le lieu de nombreuses activités humaines qui ont un impact sur la qualité de la Loire fluviale et estuarienne et de ses milieux aquatiques associés.

La directive du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, dite « Directive cadre sur l'Eau », nous invite à porter un regard rénové sur la qualité des milieux. Leur qualité écologique occupe une place centrale. Les leviers sur lesquels il convient d'agir sont multiples. Maîtrise des pollutions ponctuelles, maîtrise des pollutions diffuses, maîtrise des prélèvements d'eau, amélioration de la morphologie et de la continuité des cours d'eau figurent parmi les leviers sur lesquels agir pour offrir des habitats favorables aux êtres vivants de nos cours d'eau. Le Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (Sdage) 2016-2021 du bassin Loire-Bretagne adopté le 4 novembre 2015 par le Comité de bassin établit des objectifs, des orientations et des dispositions adaptés au bassin pour atteindre le « bon état » des eaux.

Les acteurs à mobiliser sont nombreux. Sans gouvernance adaptée, certaines actions essentielles auront du mal à voir le jour. De nombreuses structures sont à l'œuvre, dont certaines sont spécifiques à la gouvernance dans le domaine de l'eau. On peut notamment citer le Comité de bassin Loire-Bretagne, l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, les commissions locales de l'eau et les établissements publics territoriaux de bassin.

Les actions à mettre en œuvre doivent se fonder sur des connaissances solides et partagées. C'est un gage d'efficacité et d'efficience de l'action. Le présent ouvrage participe à ce partage de connaissances, notamment en abordant la question des impacts du changement climatique.

**Claude Gitton**

Directeur général adjoint de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne



La Loire à Blois © F. Moatar.

# Introduction

---

La Loire et son estuaire forment, suivant les points de vue, un continuum de corridor fluvial de mille kilomètres de long, un bassin versant hydrologique de plus de cent mille kilomètres carrés, aux mille paysages façonnés au cours du temps. Cet ensemble est suffisamment contrasté pour être représentatif de la diversité géographique de la France. Pour beaucoup, la Loire se distingue, aujourd'hui, des autres grands fleuves de la façade atlantique de l'Europe comme « l'un des derniers fleuves sauvages ». Ce concept fait-il référence à son espace de liberté dans la plaine alluviale, à sa faune et à sa flore, notamment ses poissons migrateurs, à son écoulement saisonnier très contrasté, ou à son intégration au patrimoine national reconnu au niveau mondial par l'Unesco le 30 novembre 2000 ?

Dans le contexte de changements profonds du climat et des sociétés, prévus dans les prochaines décennies, comment un système naturel et social comme celui du Bassin ligérien va-t-il évoluer ? Comment concilier, sur un tel bassin, la demande croissante en eau et l'amélioration de la qualité des milieux aquatiques ? Très tôt, la Loire et son corridor ont fait partie intégrante du développement économique de son bassin, par l'utilisation précoce des voies d'eau, puis par le développement de sa plaine alluviale. Peut-on répondre à ces questions sans considérer la trajectoire du système sur le long terme ?

Le Bassin ligérien a fait l'objet, depuis une cinquantaine d'années, de plus de quatre cents publications scientifiques répertoriées (Web of Science), dont une certaine concerne son estuaire. C'est peu, au regard de la place du bassin dans le territoire national, de sa diversité et de sa richesse, et comparé aux bassins de la Seine et du Rhône, comptabilisant chacun plus de mille publications, dont des monographies (Bravard et Clemens, 2008 ; Meybeck *et al.*, 2000).

Ces vingt dernières années, plusieurs entités de recherche ont consacré leurs travaux à ce bassin. Citons notamment la Zone-Atelier Loire, portée depuis 2007 par le CNRS, les programmes scientifiques soutenus par les plans Loire grandeur nature depuis 1994, notamment le PLGN III (2007-2013), et le GIP Loire Estuaire, créé en 2004. Chacun de ces projets a eu ses propres stratégies de diffusion. Certains d'entre eux se sont adressés à la seule communauté scientifique ; d'autres, au contraire, aux partenaires économiques et aux gestionnaires du bassin ou de l'estuaire. Le moment était donc venu de rédiger une synthèse sur ces travaux de recherche menés sur le Bassin ligérien. Celle-ci a pour objectif de dégager une vision intégrée du bassin (et non présenter une mosaïque de connaissances dispersées) accessible aux étudiants et aux gestionnaires du bassin. Cette synthèse de connaissance pluridisciplinaire présente ainsi les aspects physiques, chimiques, écologiques du bassin et de son estuaire, sans oublier de faire un lien entre ces recherches et la gestion des hydrosystèmes ligériens. La démarche d'écriture de cette communauté de chercheurs a permis de croiser, d'enrichir les visions et les expériences de nombreuses disciplines.



La Loire à Gien © F. Moatar.

Dans cette synthèse, les approches spatiales et temporelles ont été privilégiées. D'un point de vue spatial, l'estuaire interne et externe est analysé dans la continuité du bassin fluvial. Cette prise en compte est recommandée par les grands programmes scientifiques internationaux qui s'adressent au système Terre, à l'interface continent-océan, à la société et au milieu naturel, comme le Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone (Crossland, 2005). Les communautés scientifiques travaillant sur le milieu estuarien sont souvent séparées de celles traitant du système fluvial. Les résultats obtenus sur ces différents espaces sont publiés dans des supports spécialisés distincts. Au niveau temporel, les trajectoires à long terme sont essentielles pour comprendre et déterminer les futurs possibles du fonctionnement de ce continuum. Les hydro-systèmes naturels reflètent une intégration continue des évolutions des pratiques de gestion, des aménagements et des transformations des compartiments qui le constituent. La compréhension du présent nécessite celle de l'évolution passée, les deux permettant de mieux envisager le futur grâce à des scénarios explorés par les modèles. Couplée à ces deux approches, l'analyse de l'interface entre les milieux naturels et la société (activités économiques, usages de l'eau, politique de gestion) est tout aussi essentielle. Ces interactions se sont développées graduellement au cours des siècles et se sont accélérées depuis deux cents ans, souvent sans que leur nature ou leur intensité soient clairement perçues. Nous nous sommes efforcés de tenir compte de ces trois visions tout au long de cet ouvrage, en multipliant les points de vue selon la place de l'observateur dans le bassin, ses intérêts, son histoire.

Effectuer une synthèse sur un bassin aussi vaste et intégrant l'ensemble des connaissances sur le fonctionnement de ce continuum fluvio-estuarien est un exercice complexe qui suppose des choix. Les grandes composantes du fonctionnement hydrosédimentaire, chimique et écologique de ce continuum sont présentées dans cette synthèse et l'axe ligérien a été privilégié. Certains points, notamment ceux concernant les aspects de gestion et de préservation, ne sont abordés qu'à travers des focus. Le livre est ainsi découpé en sept parties. La première présente le contexte géographique du Bassin ligérien et dans un second temps les aménagements et les usages anciens du fleuve. La deuxième partie est consacrée à la dynamique des flux d'eau. Elle traite successivement des régimes hydrologiques et thermiques des eaux fluviales, des extrêmes et de leur gestion, et enfin de l'hydrodynamique estuarienne. La Loire, depuis sa source jusqu'à son estuaire, est un agent majeur d'érosion, de transport et de dépôt de matières