



HAL
open science

Biodiversité et capacité d'accueil trophique : évolution temporelle dans l'estuaire de la Loire & recommandations pour préserver les zones de nourricerie (BioTroL)

Hervé Le Bris, Catherine Laidin, Romain Lecuyer, Anne-Laure Barillé, Anik Brind'Amour, Marie Lesueur, Thomas Le Berre, Céline Chantre, Gabin Droual, Nicolas Harin, et al.

► To cite this version:

Hervé Le Bris, Catherine Laidin, Romain Lecuyer, Anne-Laure Barillé, Anik Brind'Amour, et al.. Biodiversité et capacité d'accueil trophique : évolution temporelle dans l'estuaire de la Loire & recommandations pour préserver les zones de nourricerie (BioTroL). Institut agro Rennes Angers. 2024, 43 p. <hal-05373106>

HAL Id: hal-05373106

<https://institut-agro-rennes-angers.hal.science/hal-05373106v1>

Submitted on 19 Nov 2025

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

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



HAL Authorization



Biodiversité et capacité d'accueil trophique : évolution temporelle dans l'estuaire de la Loire & recommandations pour préserver les zones de nourricerie (BioTroL)

Livrable final



Avec le soutien financier de



Ce livrable final présente les résultats du projet BioTroL mené en partenariat entre L'Institut Agro (collaboration entre l'UMR Decod et l'UMR ESO dans le cadre du Pôle halieutique, mer et littoral), l'Ifremer (UMR Decod) et le bureau d'étude Bio-Littoral.

La citation de ce document se fait comme suit :

Le Bris H., Laidin C., Lécuyer R., Barillé A. L., Brind'Amour A., 2024. Biodiversité et capacité d'accueil trophique : évolution temporelle dans l'estuaire de la Loire & recommandations pour préserver les zones de nourricerie. Livrable final du projet BioTroL. Les publications du Pôle halieutique, mer et littoral de L'Institut Agro n° 56, 44 p.

Contact :

Hervé LE BRIS

Pôle halieutique, mer et littoral de L'Institut Agro

65 rue de Saint-Brieuc - CS 84215

35042 Rennes Cedex

© L'Institut Agro Rennes-Angers 2024

© Photos L'Institut Agro Rennes-Angers

Cette œuvre est mise à disposition sous licence Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale -

Pas de Modification 4.0 International. Pour voir une copie de cette licence, visitez

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> ou écrivez à Creative Commons, PO

Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

Biodiversité et capacité d'accueil trophique : évolution temporelle dans l'estuaire de la Loire & recommandations pour préserver les zones de nourricerie (BioTrol)

Livrable final

Décembre 2024

Hervé Le Bris, L'Institut Agro Rennes-Angers (UMR DECOD), Rennes
Catherine Laidin, L'Institut Agro Rennes-Angers (UMR ESO), Rennes.
Romain Lécuyer, doctorant (UMR DECOD), Nantes, Rennes
Anne-Laure Barillé, Bio-Littoral, Nantes
Anik Brind'Amour, Ifremer (UMR DECOD), Nantes

En collaboration avec

Thomas Le Berre, UMR DECOD Rennes
Céline Chantre, UMR DECOD Nantes
Gabin Droual, UMR DECOD Nantes
Nicolas Harin, Bio-Littoral, Nantes
Maroussia Delemarre, Bio-Littoral, Nantes
Nicolas Truhaud, Bio-Littoral, Nantes
Annaik Cocard, Bio-Littoral, Nantes
Benoît Devienne, Bio-Littoral, Nantes
Eva Rondeau, Bio-Littoral, Nantes
Marie Lesueur, Pôle Halieutique, L'Institut Agro Rennes-Angers, Rennes

&

Michaël Demortier, stagiaire M1, Université de Lille
Claire Pollet, stagiaire M2, Université Littoral Côte d'Opale, Boulogne sur Mer
Felipe March, stagiaire M2, Université de Bretagne Occidentale, Brest
Armand Benoit, stagiaire M2, Université Champolion, Albi

Table des matières

1. Cadre général du projet BioTroL	4
2. Organisation, pilotage et suivi	4
3. Problématique et questions de recherche	5
4. Objectifs et méthodologie générale du projet	6
5. Données mobilisées	8
6. L'estuaire de la Loire	11
6.1. Principaux traits hydrologiques.....	11
6.2. Les aménagements.....	12
6.3. Effets des changements globaux.....	13
7. Biodiversité et capacité d'accueil trophique	14
7.1. Pressions environnementales et réponses écologiques des communautés estuariennes.....	14
7.1.1. Intrusion de taxons marins vers l'amont de l'estuaire.....	14
7.2. Diversité et production macrobenthiques sur les vasières : comparatif Loire / Seine.....	18
7.3. Capacité d'accueil trophique de la nurricerie : évolutions spatiales et temporelles.....	21
8. Vers des recommandations pour préserver la biodiversité et la fonction de nurricerie de l'estuaire	23
8.1. L'estuaire de la Loire, activités socio-économiques et soutiens publics.....	23
8.2. Des enjeux perçus très éloignés de la protection de la fonction de nurricerie.....	27
8.3. Projection sur l'avenir par des usagers et des gestionnaires.....	29
8.4. Premières pistes de recommandations.....	34
9. Conclusions et perspectives	35
10. Rapports et valorisations du projet BioTroL	37
10.1. Mémoires de thèse de Doctorat et de stages de Master.....	37
10.2. Articles dans des revues scientifiques.....	37
10.3. Communications scientifiques.....	38
Références citées	39

1. Cadre général du projet BioTroL

Les zones estuariennes et côtières sont sous pressions locales (activités portuaires, dragages, aménagements, contaminations chimiques) et globales (diminution des débits fluviaux pourvoyeurs de nutriments, augmentation de la température et du niveau des eaux). Ces pressions font courir à terme un impact sur leur biodiversité et, par conséquent, sur leur potentiel de résilience aux perturbations. Les fonctions écologiques peuvent en être affectées, particulièrement le renouvellement des populations marines à travers la fonction de nurricerie de ces zones. Ces dernières sont essentielles pour les stades juvéniles de nombreuses espèces d'invertébrés et de poissons dont certaines sont exploitées par pêche. C'est le cas notamment d'espèces benthodémersales dont l'écologie alimentaire est étroitement liée aux communautés benthiques hébergées. Dès lors, l'étude de ces dernières revêt un double intérêt. Le premier est lié à leur aptitude à rendre compte de la stabilité ou de plasticité de l'écosystème face à l'évolution des forçages environnementaux. Le second intérêt concerne leur rôle en tant que ressource alimentaire des juvéniles, critère important de la fonction de nurricerie.

Les préoccupations quant à l'altération de la fonction de nurricerie des zones estuariennes et côtières et leur impact sur les pêcheries motivent de nombreuses recherches en Europe. L'estuaire de la Loire est bien reconnu dans cette fonction grâce notamment aux travaux réalisés au début des années 80 (CSEEL, 1984). Depuis, plusieurs études ou campagnes d'échantillonnage ponctuelles ou des suivis sectoriels ont été réalisés. L'enjeu du projet BioTroL est pour une grande part de mobiliser les données pour appréhender la dynamique d'évolution temporelle de la biodiversité et de la capacité d'accueil trophique de l'estuaire prenant en compte ses différents secteurs.

2. Organisation, pilotage et suivi

Le projet BioTroL déposé en octobre 2020 a été retenu dans le cadre de l'appel à initiatives 2020 de l'Agence de l'Eau Loire Bretagne pour la biodiversité marine. Il a été porté par l'UMR DECOD dans ses composantes Institut Agro Rennes-Angers (Rennes, H. Le Bris) et Ifremer (Nantes, A. Brind'Amour) en prolongement d'un partenariat de recherches communes menées depuis plus de 10 ans sur les nurriceries côtières et estuariennes de Manche et d'Atlantique. Il a été également porté par Bio-Littoral (Nantes, A.-L. Barillé) qui, grâce au suivi régulier de l'estuaire, possède une connaissance experte du domaine d'étude. Enfin, sous l'égide du Pôle halieutique mer et littoral (Rennes, M. Lesueur), l'UMR ESO (Rennes, C. Laidin) a été associée dans ce portage, plus particulièrement pour le volet recommandations en interface avec les acteurs liés à l'usage et la gestion de l'écosystème.

La réalisation du projet a mobilisé une partie de l'activité des porteurs et un appui technique d'ingénieurs et de techniciens des structures impliquées : C. Chantre et G. Droual (Ifremer, UMR DECOD, Nantes), T. Le Berre (L'Institut Agro, UMR DECOD, Rennes), N. Harin, M. Delemarre, N. Truhaut, A. Cocaud, B. Devienne et E. Rondeau (Bio-Littoral, Nantes). Le volet « Biodiversité et capacité d'accueil trophique » a été particulièrement confié à un doctorant de l'Institut Agro (R. Lécuyer, UMR DECOD, Nantes-Rennes). Plusieurs stagiaires de M1 (M. Demortier, Université de Lille) ou de M2 (C. Pollet, Université du Littoral Côte d'Opale et F. March Université de Bretagne Occidentale) ont participé aux travaux sur des sujets délimités sur ce même volet. En lien avec les connaissances acquises dans le premier volet, un troisième stagiaire de M2 (A. Benoit, INU Champollion) a été particulièrement impliqué sur le volet « Recommandations ».

Un comité de pilotage composé des porteurs a permis d'assurer l'organisation, la coordination et de l'avancement des travaux sur la durée du projet. Trois états annuels ont été établis et présentés au comité suivi. Ce dernier était composé d'acteurs et de gestionnaires de l'estuaire de la Loire, relevant de différentes structures dont les financeurs.

Le support financier du projet a été majoritairement assuré par l'Agence de l'Eau Loire Bretagne (70 %), la Région des Pays de la Loire (20 %) et le Grand Port Maritime Nantes Saint Nazaire (10 %). En complément, l'UMR DECOD a apporté un soutien financier via deux allocations de stage de Master 2.

3. Problématique et questions de recherche

L'estuaire de la Loire, est l'un des trois plus grands estuaires de France métropolitaine, aux côtés de ceux de la Seine et de la Gironde. C'est un système macrotidal dont la morphologie a été profondément modifiée par l'être humain (comblement de vasières intertidales, chenalisation). Il s'agit également d'un estuaire hyper-turbide, caractérisé par un bouchon vaseux dont l'extension dépend de la marée et du débit fluvial (Jalon-Rojas *et al.*, 2016). Ce dernier détermine également le développement du panache qui influence les zones littorales du nord, où la dessalure est la plus ressentie, et également celles du sud, selon l'orientation des vents (Lazure et Jégou, 1998).

La production primaire de l'estuaire est fortement stimulée par les apports nutritifs convoyés par le fleuve (Lunven *et al.*, 2005). Cette production repose sur du phytoplancton en estuaire externe, et sur du microphytobenthos dans l'estuaire interne. Ces deux sources de production primaire forment le socle des réseaux alimentaires pélagique et benthodémersal de l'estuaire et des zones côtières voisines.

Les consommateurs primaires benthiques, tels que les invertébrés dépositivores et suspensivores, consomment cette matière sous forme vivante ou détritique. Ils sont particulièrement abondants dans les communautés macrobenthiques, dont la diversité est en grande partie déterminée par des contraintes physico-chimiques. Ces contraintes, notamment les variations de salinité, de turbidité, d'oxygène ou encore de temps d'émersion, deviennent de plus en plus marquées à mesure que l'on progresse vers l'amont. Dans ces conditions, seules quelques espèces tolérantes arrivent à se développer (Dauvin *et al.*, 2009).

Ces consommateurs primaires benthiques sont à leur tour consommés par de nombreux prédateurs benthodémersaux invertébrés et vertébrés, notamment la faune piscicole dont certains stades juvéniles. L'abondance de nourriture et les températures printanières et estivales, plus élevées qu'en mer ouverte en raison de la faible profondeur, favorisent ainsi la croissance et la production des jeunes stades, conférant à ces zones une fonction de nourricerie (Beck *et al.*, 2001). Ces conditions caractérisent l'estuaire de la Loire reconnu comme une nourricerie importante du golfe de Gascogne pour le renouvellement des stocks halieutiques (Gilliers *et al.*, 2004, Trimoreau *et al.* 2013).

Les questions qui se posent sont les suivantes :

- La biodiversité de cet écosystème dans son gradient estuaire / mer, son fonctionnement et sa capacité d'accueil trophique ont-ils été modifiés en l'espace de plus d'une trentaine d'années ?
- Quels en sont les facteurs déterminants, notamment ceux liés au changement climatique en œuvre (augmentation de la température, baisse des débits fluviaux, marinisation de l'estuaire interne, déplacement du bouchon vaseux, Le Hir & Walther, 2016) ?
- La fonction de nourricerie peut-elle en être affectée particulièrement à travers la disponibilité de la ressource alimentaire ?
- Certains secteurs sont-ils plus vulnérables que d'autres ?
- Comment se situe la dynamique par rapport à celles des estuaires de la Seine et de la Gironde ?
- Au vu des données spécifiques au domaine d'étude et de l'expérience sur les autres écosystèmes, quelles recommandations doivent être faites pour préserver cette fonction ?

4. Objectifs et méthodologie générale du projet

Dans le cadre de l'AAI AELB 2020, ce projet se place sur un objectif d'amélioration de la connaissance et de suivi dans le but de contribuer à la préfiguration de programmes opérationnels de gestion de cet écosystème. Il participera également à la prise de conscience du fonctionnement et des services rendus par les eaux de transition et du littoral dans un enjeu de préservation. Il s'inscrit ainsi dans les objectifs du PACC (Plan d'Adaptation au Changement Climatique) pour le bassin Loire-Bretagne.

En se basant sur l'étude de l'évolution temporelle et spatiale de la biodiversité et de la capacité d'accueil trophique de l'estuaire de la Loire pour les juvéniles d'espèces benthodémersales, ce projet a pour objectif

- 1) d'apprécier comment la biodiversité et la fonction de nourricerie ont évolué dans le temps, et à partir de ces résultats,
- 2) d'élaborer les recommandations nécessaires à la préservation du rôle de cet écosystème dans le renouvellement des ressources halieutiques du golfe de Gascogne.

L'évaluation de la biodiversité s'est appuyée sur deux composantes écologiques essentielles permettant d'appréhender la capacité d'accueil trophique de l'estuaire de la Loire : les communautés benthiques et les juvéniles de poissons benthodémersaux. Le projet s'est d'abord concentré sur les caractéristiques des communautés macrobenthiques, en tant que composantes importantes de la biodiversité de l'estuaire depuis l'amont (oligohalin) jusqu'au marin (cf. CSEEL, 1984).

Les traits structurels et fonctionnels de ces communautés reflètent les réponses spécifiques des populations (en termes de densités, biomasses, etc.) aux facteurs environnementaux et aux pressions exercées sur l'écosystème. Ainsi, le projet s'est proposé d'étudier conjointement les biodiversités taxonomique et fonctionnelle de ces communautés, afin de mieux comprendre les mécanismes de fonctionnement écologique de l'estuaire (McLean *et al.*, 2019). Cette approche a été menée à différentes échelles spatiales et temporelles, en tenant compte des gradients de forçages naturels et anthropiques, supposés variés en nature et en intensité selon les secteurs de l'estuaire.

Par ailleurs, en raison de la grande part de consommateurs primaires qui les composent, ces communautés jouent un rôle fonctionnel majeur par leurs liens trophiques avec les prédateurs benthodémersaux. En continuité de la première approche, comme diversité et production sont couramment considérées comme liées (Duffy *et al.*, 2007), le projet a cherché à estimer la production de ces communautés en tant que ressource alimentaire des juvéniles de poissons sur les différents secteurs.

Le projet s'est également appuyé sur l'étude des caractéristiques de ces communautés de juvéniles de poissons, afin d'estimer la consommation nécessaire pour satisfaire leurs besoins énergétiques dans les différents secteurs de l'estuaire. La démarche suivie s'inspire de celle élaborée en baie de Vilaine, un écosystème proche de l'estuaire externe de la Loire, par Tableau *et al.* (2015, 2019) et appliquée également à l'estuaire et la baie de Seine (Saulnier *et al.*, 2020). L'analyse conjointe de la production de proies benthiques et de la consommation de juvéniles de poissons benthodémersaux visait à évaluer l'évolution de la capacité d'accueil trophique de l'écosystème dans le temps et l'espace. Cette capacité est l'élément clé de la fonction de nourricerie, tant dans l'estuaire externe que dans l'estuaire interne.

Dans l'estuaire interne, une attention particulière a été portée à la contribution des vasières intertidales à la fonction de nurricerie (Rochette *et al.*, 2010 ; Day *et al.*, 2021). Ces zones, essentielles au soutien alimentaire des poissons, ont fait l'objet d'une analyse approfondie en raison de leur importance écologique, mais également de leur exposition et de leur vulnérabilité aux pressions environnementales et anthropiques (Bio-Littoral, 2015). Pour mener cette analyse, le projet s'est appuyé sur plusieurs états de référence antérieurs, définis selon la composante biologique et les données disponibles. Parmi ces références figure notamment l'état des communautés au début des années 80, tel qu'établi par les travaux du Comité Scientifique pour l'Environnement de l'Estuaire de la Loire (Marchand et Elie, 1983 a & b).

Le second volet « Recommandations » du projet BioTroL a débuté par une description diachronique des usages et aménagements anthropiques de l'estuaire de la Loire, en parallèle d'une étude concernant les mesures de gestion passées et actuellement en place. La poursuite des travaux a été alimentée par la production de connaissances écologiques ayant trait aux différentes évolutions et modifications observées au niveau des communautés benthodémersales et de la fonction de nurricerie de l'estuaire. Un effort de synthétisation a notamment permis de dresser une grille d'entretien en vue de recueillir les perceptions des usagers et des gestionnaires sur les enjeux liés à l'estuaire. Conjointement, ces recherches ont mené à l'identification des conditions nécessaires à une gestion durable de l'estuaire de la Loire, notamment afin d'en préserver le fort intérêt écologique en termes de biodiversité et de fonction de nurricerie.

Ce livrable s'appuie principalement, pour le volet « Biodiversité et capacité d'accueil trophique », sur des extraits de la thèse de doctorat de Romain Lécuyer, complété par le support de sa présentation orale et des valorisations associées. En ce qui concerne le volet « Recommandations », le manuscrit intègre des éléments issus du mémoire de stage de M2 d'Armand Benoit. La liste des mémoires, des articles et autres valorisations est fournie dans la dernière section du présent rapport.

5. Données mobilisées

Le projet s'est basé sur des séries historiques de données de densités et de biomasses majoritairement récoltées des années 1980 jusqu'à nos jours, et remontant parfois jusqu'à la fin du XIX^e siècle. Au démarrage du projet, une fraction de ces données était déjà bancarisée dans une base de données dédiée. Ce projet, visant l'exhaustivité des données existantes, a identifié le maximum de sources disponibles pour en collecter les données, y compris à partir de documents au format papier. Des étapes de collecte, d'harmonisation puis de bancarisation ont été nécessaires dans une perspective d'étude la plus étendue possible, dans l'espace comme dans le temps. Cette étape s'est révélée très chronophage, mais a permis de disposer d'une base de données harmonieuse, facilitant grandement les analyses ultérieures.

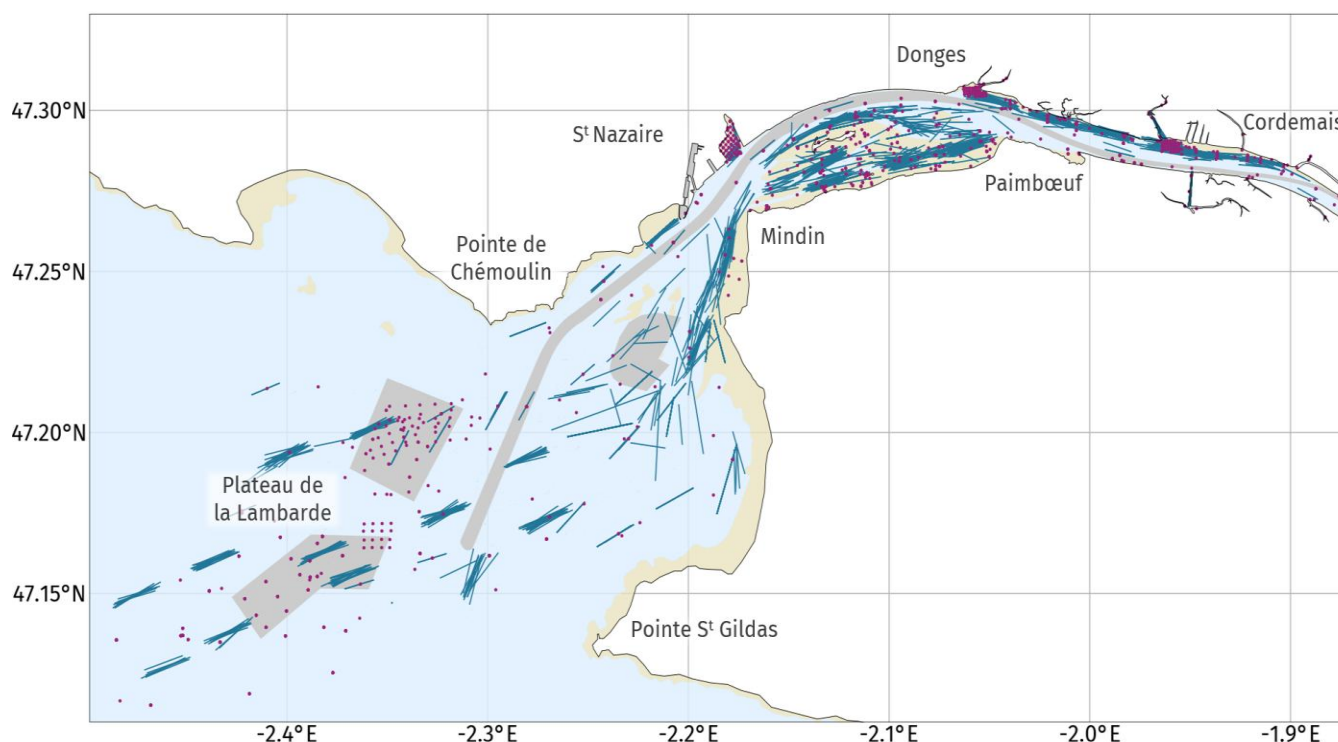


Figure 1. Cartographie des stations d'échantillonnage formant le jeu de données exploité dans le projet. Les prélèvements effectués à la benne sont représentés par des points en couleur magenta, et ceux au chalut à perche par des segments bleu d'eau (Lécuyer, 2024a).

Conscients dès l'élaboration de l'avant-projet du caractère très fragmenté des données disponibles pour certains secteurs de l'estuaire, nous avons choisi de mener une étude spécifique prenant en compte le continuum estuarien, allant de Cordemais à l'océan Atlantique. Ainsi une campagne d'échantillonnage dédiée au projet a été conduite en 2021. En plus des composantes de macrobenthos (invertébrés > 1 mm) et d'ichthyofaune benthodémersale précédemment collectées, cette campagne a également permis de prendre en compte la mégafaune benthique (invertébrés > 1 cm), le suprabenthos (invertébrés de faible taille vivant à proximité du fond) et le méibenthos (invertébrés < 1 mm).

L'objectif de cette campagne dédiée était de fournir un état des lieux le plus complet possible, servant de référence pour les études antérieures et ultérieures. Cela a nécessité la réalisation de deux campagnes de prélèvements : l'une en fin d'hiver / début de printemps (avril 2021) et l'autre en fin d'été (septembre 2021). Ces campagnes ont également permis de collecter des échantillons nécessaires pour les analyses de contenus digestifs et de compositions isotopiques, essentielles pour caractériser le réseau trophique de l'estuaire, les relations trophiques entre ses composantes et la contribution des secteurs à l'alimentation des juvéniles de poissons.

En complément des données issues des échantillonnages biologiques, les données environnementales (profondeur, substrat sédimentaire, température, salinité, turbidité, production primaire, oxygène, contaminants chimiques), provenant de différentes sources selon les secteurs, ont également été compilées. Le tableau 1 recense les données biologiques et environnementales exploitées pour la réalisation des analyses écologiques, notamment au travers des travaux de recherche de la thèse de R. Lécuyer.

Composante écologique		Couverture temporelle			Source des données		Nature des recherches menées	
		période	année(s)	mois	production (réseau de mesure, campagne de suivi, etc.)	responsable(s) (établissement public, acteur privé, etc.)		
Environnement abiotique	Morphologie du lit	1845-2008	—		Cartographies et photographies diverses	IGN	Evolution des surfaces au fil du temps	Compression latérale du lit
	Bathymétrie	2008 & 2015	—		MNTU Loire, projet HOMONIM	GIP Loire Estuaire, SHOM	Sectorisation de l'estuaire	Localisation des vasières intertidales
	Débit de la Loire	1900-2021	—		Banque Hydro	EauFrance	Identification de périodes de crue/d'étiage	Étude de la tendance long-terme
	Salinité	1995-2021	—		Système de veille en Loire (SYVEL)	GIP Loire Estuaire	Gradient et front de salinité	Pression osmotique sur les organismes
	Température						Étude de la tendance long-terme	Pression thermique sur les organismes
	Oxygène dissous						Suivi des événements hypoxiques	Pression oxybiontique sur les organismes
	Turbidité						Teneur en matière en suspension	Localisation du bouchon vaseux
	Température de surface						Modulation de la productivité des organismes	Paramètre d'estimation bioénergétique
	Contenu phytoplanctonique	2006-2021	—		Satellite ODYSSEA	Programme Copernicus (Union européenne)	Ressource alimentaire des larves de poissons	Effets sur la consommation des poissons
	Concentration en phosphates				Global Ocean Biochemistry		Facteur limitant la productivité primaire	
Compartiments biologiques de l'écosystème	Ichtyofaune bento-démersale et méga-invertébrés benthiques	1980-2021	2021	avril & septembre	Inventaire (Bio-Littoral, IARA, Ifremer)	Projet BioTroL — AELB, Région PdL, GPMNSN	Biodiversité et dynamique saisonnière de l'ichtyofaune bento-démersale Réponse aux variations abiotiques liées aux pressions anthropiques locales et globales	Étude de la fonction de nourricerie de poissons et de la capacité d'accueil trophique
			2018-2019	octobre à octobre	Inventaire (Bio-Littoral)	GPMSN		
			2014	juin à octobre		Projet NOURELEP — AELB, SMIDAP		
			2010-2011	octobre à octobre		GPMSN		
			2008	juin à octobre	SMIDAP			
			2009-2017	mai & octobre	Suivi des masses d'eau (DCE)	MNHN		
			2006	mai & octobre	Suivi des nourriceries (NURSE)	Ifremer		
			2018 & 2020	octobre				
			2010 & 2012	octobre				
			2000-2003	octobre				
			1997	octobre				
			1980-1986	octobre	Inventaire (Univ. Nantes)	PANSN (actuel GPMNSN) CSEEL		
			1994	mai à octobre				
			1981-1982	octobre à octobre				
	2021	avril & septembre	Inventaire (Bio-Littoral, IARA, Ifremer)	Projet BioTroL — AELB, Région PdL, GPMNSN				
	Macro-invertébrés benthiques	1897-2021	2020	octobre	Suivi des masses d'eau (DCE)	AELB, Ifremer	Évolution de l'assemblage d'espèces composant les communautés macrobenthiques	Biodiversité taxonomique et fonctionnelle des communautés de macro-invertébrés benthiques Production des organismes macrobenthiques
			2016	août	Suivi des nourriceries (NURSE)	Ifremer		
			2015	septembre	Inventaire (Bio-Littoral)	GIP Loire Estuaire, GPMNSN		
			2014	octobre		Projet DENOURAL — Bio-Littoral		
			2010	janvier & octobre		GIP Loire Estuaire, AELB, GPMNSN		
			2008	juillet & octobre	Suivi d'impact de centrale thermique	EDF		
			2008-2019	octobre				
			2007-2019	octobre	Suivi d'impact de dragage de chenal	GPMSN		
			1994	juillet	Inventaire (Univ. Nantes)	APEEL CSEEL OREAM		
			1981-1982	avril & septembre				
			1977	—				
			1975	octobre à décembre	Étude d'avant-projet de centrale nucléaire	EDF, CNEXO (actuel Ifremer)		
			1969-1971	—	Inventaire (Univ. Nantes)	Marchand, 1972		
1897-1899			—	Inventaire (SSNOF)	Ferronnière, 1901			
Invertébrés suprabenthiques et méiobenthiques	—	2021	avril & septembre	Inventaire (Bio-Littoral, IARA, Ifremer)	Projet BioTroL — AELB, Région PdL, GPMNSN	Description multi-compartiments des communautés bento-démersales	Structure du réseau trophique estuarien, contribution des habitats et compétition interspécifique pour la ressource alimentaire	
Contenus digestifs de poissons et mesures isotopiques								

Tableau 1. Récapitulatif des données exploitées dans la démarche de recherche du volet « Biodiversité et capacité d'accueil trophique » du projet BioTroL.

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière, MNTU : Modèle Numérique de Terrain Unifié, GIP : Groupement d'Intérêt Public, SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, IARA : Institut Agro Rennes-Angers, AELB : Agence de l'Eau Loire-Bretagne, Région PdL : Conseil régional des Pays de la Loire, GPMNSN : Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire, SMIDAP : Syndicat Mixte pour le Développement de l'Aquaculture et de la Pêche, DCE : Directive-cadre sur l'Eau, MNHN : Muséum National d'Histoire Naturelle, PANSN : Port Autonome de Nantes Saint-Nazaire, CSEEL : Comité Scientifique pour l'Environnement de l'Estuaire de la Loire, EDF : Électricité De France, APEEL : Association pour la Protection de l'Environnement de l'Estuaire de la Loire, OREAM : Organisme Régional d'Étude et d'Aménagement d'aire Métropolitaine, CNEXO : Centre National pour l'Exploitation des Océans, SSNOF : Société des Sciences Naturelles de l'Ouest de la France.

6. L'estuaire de la Loire

6.1. Principaux traits hydrologiques

La Loire est un fleuve long de plus de 1 000 km collectant les eaux d'un bassin versant couvrant un cinquième du territoire français métropolitain (environ 117 000 km²). L'estuaire de la Loire fait partie des grands estuaires d'Europe occidentale, aux côtés d'autres estuaires français comme ceux de la Seine et de la Gironde. Il se situe à une latitude médiane de la zone tempérée de l'hémisphère nord (47°25'00" N), à l'interface entre le continent européen et l'océan Atlantique, au niveau du golfe de Gascogne. La formation de cet estuaire, par engloutissement de la paléovallée fluviale de la Loire, remonte à 10 000 ans, lors de la régression glaciaire Holocène (Weckström *et al.* 2017, Durand *et al.* 2016). Sa morphologie contemporaine présente deux resserrments rocheux dont la position, au niveau de Saint-Nazaire et de Paimbœuf, a historiquement permis de définir une partition géographique au sein de l'estuaire, avec un secteur « aval » en aval de Saint-Nazaire, un secteur « intermédiaire » entre Saint Nazaire et Paimboeuf, et un secteur « amont » entre Paimboeuf et Cordemais.

La température de l'eau y oscille en moyenne entre 20,3 °C en été et 8,4 °C en hiver, et le gradient thermique présente une inversion aval-amont autour des mois d'avril et octobre. La rencontre des eaux océaniques avec les eaux fluviales de la Loire y crée une dessalure sous la forme d'un gradient de salinité, allant de 35 pss à la côte pour atteindre 0 environ 70 km en amont (GIPLÉ 2021). Il s'agit en outre d'un estuaire semi-diurne macrotidal, c'est-à-dire où le cycle tidal dure une demi-journée et présente une amplitude avoisinant les 6 mètres par vives eaux de Saint-Nazaire à Nantes. Ce marnage important engendre de grandes superficies intertidales où les sédiments fins s'accumulent et forment des vasières. Les vasières intertidales sont actuellement distribuées de manière hétérogène le long de l'estuaire. Elles se concentrent principalement dans le secteur aval de l'estuaire de la Loire, alors que le secteur intermédiaire n'en possède qu'un cordon sur la rive droite. Les vasières intertidales subsistent en quantité négligeable dans le secteur amont qui est endigué.

L'estuaire de la Loire est considéré comme hautement turbide par la présence quasi-constante d'un bouchon vaseux dans ses sections internes affichant des concentrations en matières en suspension allant jusqu'à 1 kg·m⁻³ et s'étendant sur 20 à 50 km (Gallenne 1974). La Loire charrie une grande quantité de sédiments, qui présentait un débit solide annuel moyen d'environ un million de tonnes (Figueres *et al.* 1985). Ce sédiment, principalement sableux et vaseux, transite par l'estuaire de la Loire et une fraction y sédimente. L'intensité du bouchon vaseux dépend fortement du débit fluvial, permettant sa rétention par pompage tidal durant l'étiage, et déclenchant son éjection en mer lors des crues annuelles (Jalón-Rojas *et al.* 2016, Devienne 2021). Les périodes de mortes-eaux font sédimenter les particules fines sous la forme d'une crème de vase fluide à la surface du substrat, dans laquelle les matières en suspension peuvent atteindre 20 kg·m⁻³ (Le Normant 2000). Les matières en suspension s'accompagnent d'une forte teneur en nutriments et en matière organique (Saliot *et al.* 1984, Meybeck *et al.* 1988). La dégradation de cet élément par les communautés microbiennes et détritivores permet son incorporation dans le réseau trophique (Maurice 1994, McLusky & Elliott 2004, Underwood & Kromkamp 1999).

6.2. Les aménagements

Les populations humaines se sont installées sur les rives de l'estuaire de la Loire depuis l'Antiquité. Initialement, l'estuaire se composait d'habitats peu profonds, parcourus d'une zone subtidale sinueuse et dynamique, générant de nombreuses îles de sable qui se déplaçaient au fil du temps. L'essor historique de Nantes est intimement lié au commerce maritime et son développement économique a fait naître le besoin de disposer d'une voie navigable sûre et stable pour pérenniser son activité portuaire. Le commerce de Nantes connut son apogée durant le XVIII^e siècle avec la déportation d'esclaves africains, largement orchestrée par des armateurs nantais responsables de plus de 43 % des expéditions françaises jusqu'à l'interdiction formelle de la traite négrière en 1831.

Le remodelage du lit de l'estuaire a débuté par des travaux d'ingénierie dès 1750, mais ce n'est que depuis 1850 que les activités anthropiques s'y sont intensifiées avec la création du port de Saint-Nazaire (Fattal 2002). À la fin du XIX^{ème} siècle, le port de Saint-Nazaire a été doté d'une Chambre du Commerce, officialisant sa situation en tant que sentinelle avancée du commerce nantais. Dans une volonté de développement commun, l'estuaire a été aménagé de sorte à permettre la navigation de navires marchands jusqu'à Nantes, cinquante kilomètres en amont de l'embouchure. Depuis lors, une recherche d'équilibre au sein de ce dipôle commercial a fortement aiguillé le développement du territoire de la Basse-Loire. Dès le milieu du XX^e siècle, le développement d'un paysage industrialoportuaire se dessine avec l'implantation de terminaux portuaires (méthanier, charbonnier, conteneurs, roulier, agroalimentaire), d'une raffinerie de pétrole, ainsi que d'une centrale thermique à charbon, le tout accompagné d'un important trafic de navires de fret (Coëffé & Morice 2013, Cabanne 1972).

Un total de 23 sites industriels classés par la directive européenne Seveso se distribuent sur les rives de l'estuaire, dont six en seuil haut compte tenu des quantités de matières dangereuses qu'elles accueillent (pétrole, gaz, engrais). Cette situation dévoile les risques industriels pouvant advenir dans l'estuaire de la Loire (IMPEL 2008). Ce cortège industriel a justifié le remodelage de l'estuaire par un ensemble d'aménagements tel que l'endiguement des berges, le remblai des annexes hydrauliques et des îles, mais aussi le creusement et la linéarisation du chenal de navigation sur près de 50 km (Le Dez *et al.* 2017). L'installation des sites industriels a également nécessité la revendication de vastes surfaces de zones humides et de vasières intertidales (Maquet 1974, Migniot & Le Hir 1994, Figure 2). Les aménagements ne se limitent pas à l'estuaire, mais se répartissent également sur toute la superficie du bassin versant de la Loire, venant apporter son lot de modifications sur l'hydrologie du fleuve et l'apport d'eau douce dans l'estuaire (Larue 2004, Brossard & Gallenne 1984). Toutefois, diverses considérations écologiques ont récemment vu le jour comme la mise en place de réglementations européennes, compliquant la dynamique d'aménagement de l'estuaire (Demaure 1979, Fattal 2002).

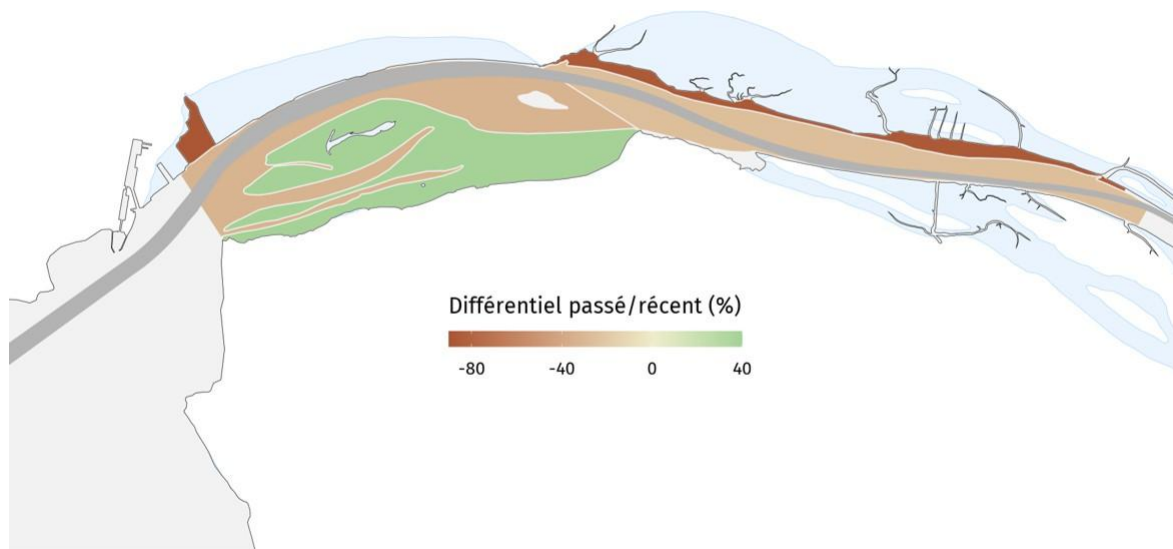


Figure 2. Variation relative des surfaces aquatiques de la partie aval de l'estuaire interne de la Loire entre la fin du XIXe siècle et le début du XXIe siècle. Une teinte rougeoyante indique une diminution de surface, là où les surfaces en vert ont gagné en superficie. L'estuaire est découpé en différentes sous-unités représentatives du secteur halin et de l'étage tidal. La morphologie de l'estuaire telle qu'elle était à la fin du XIX^{ème} siècle (environ 1880) est figurée en arrière-plan bleu clair (Lécuyer, 2024a).

Le comblement des îlots sableux et la chenalisation de l'estuaire de la Loire a réduit sa capacité d'amortissement de l'onde de marée. La revendication de divers habitats, comme les vasières intertidales, a également réduit les forces de friction qui limitent naturellement la progression de cette onde. La marée a dès lors provoqué une intrusion des masses d'eau salée, décalant l'ensemble du gradient de salinité vers l'amont de l'estuaire et provoquant une augmentation du marnage de plusieurs mètres jusqu'à Nantes (Le Douarec 1978, CSEEL 1984, Migniot & Le Hir 1994, GIPLE 2021).

6.3. Effets des changements globaux

La température des eaux de l'estuaire de la Loire augmente de manière tendancielle de +2 °C sur les 25 dernières années, en conséquence du réchauffement climatique (Lécuyer *et al.* 2024). Outre la température absolue de l'eau, la durée de la saison chaude suit une tendance à l'allongement, empiétant sur les inter-saisons du printemps et de l'automne (Costoya *et al.* 2015). La fréquence et l'intensité de phénomènes extrêmes comme les vagues de chaleur suivent une tendance à la hausse, favorisant potentiellement la mise en place d'hypoxies (Schmidt *et al.* 2019).

Les précipitations diminuent, augmentant le temps de résidence du bouchon vaseux au sein du milieu estuarien (Ciffroy *et al.* 2003, Jalón-Rojas *et al.* 2017). En parallèle, la diminution des débits fluviaux notamment lors des crues hivernales, provoque le décalage vers l'amont du gradient de salinité (Lécuyer *et al.* 2024, GIPLE 2021), en synergie avec les aménagements locaux comme la chenalisation.

7. Biodiversité et capacité d'accueil trophique

7.1. Pressions environnementales et réponses écologiques des communautés estuariennes

Un ensemble de pressions anthropiques endogènes et exogènes induisent des effets tendanciels observables sur le milieu estuarien. Dans l'estuaire de la Loire, une augmentation de la température d'environ 0,5 °C par décennie et une diminution du débit de crue de 15 % par décennie ont été estimées par rapport à la moyenne calculée sur la période 1980-2020. La fréquence annuelle des événements hypoxiques y a également augmenté d'environ 40 jours entre 2000 et 2021 avec un maximum de 80 jours en 2019. Ces changements abiotiques sont cohérents avec les tendances régionales observées et projetées : les masses d'eau de transition des estuaires européens se réchauffent de manière généralisée favorisant la mise en place de conditions hypoxiques, et les débits fluviaux dans la frange subtropicale s'amenuisent au fil des années (Sanderson *et al.* 2011, Lanoux *et al.* 2013, Schneider *et al.* 2013).

7.1.1. Intrusion de taxons marins vers l'amont de l'estuaire

Ce cortège de changements induit une cascade de conséquences sur les écosystèmes estuariens, comme la remontée du front de salinité. Ainsi, des modifications ont été identifiées dans la structure spatiale des communautés ichthyologiques de même que macrobenthiques, avec l'intrusion de taxons marins dans les parties internes de l'estuaire (Figures 3-poissons & 4-macrofaune benthique). Ce faisceau d'observations semble indiquer que l'écosystème estuarien subit un processus de marinisation, en conséquence du décalage vers l'amont du gradient de salinité. Le concept de marinisation décrit les conséquences écologiques de la remontée du front de salinité estuarien dans un contexte concomitant d'aménagements, d'élévation du niveau de la mer et de baisse des débits fluviaux (Chaalali *et al.* 2013 b, David *et al.* 2007, Chevillot *et al.* 2017).

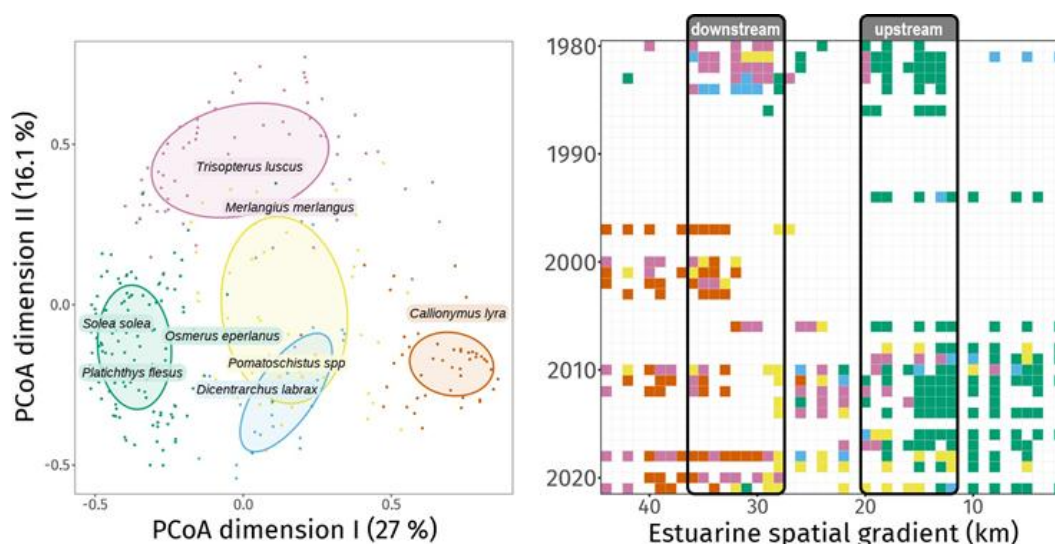


Figure 3. A gauche : Plan de l'Analyse en Coordonnées Principales (PCoA) affichant les groupes d'échantillons avec leurs ellipses de confiance associées, ainsi que le positionnement moyen pondéré des taxons indicateurs (analyses IndVal). À droite : Les groupes sont projetés sur une grille représentant l'espace (kilomètres en abscisse) et le temps (années en ordonnées). Les cadres noirs délimitent les sections en aval et en amont de l'estuaire (Lécuyer *et al.*, 2024a).

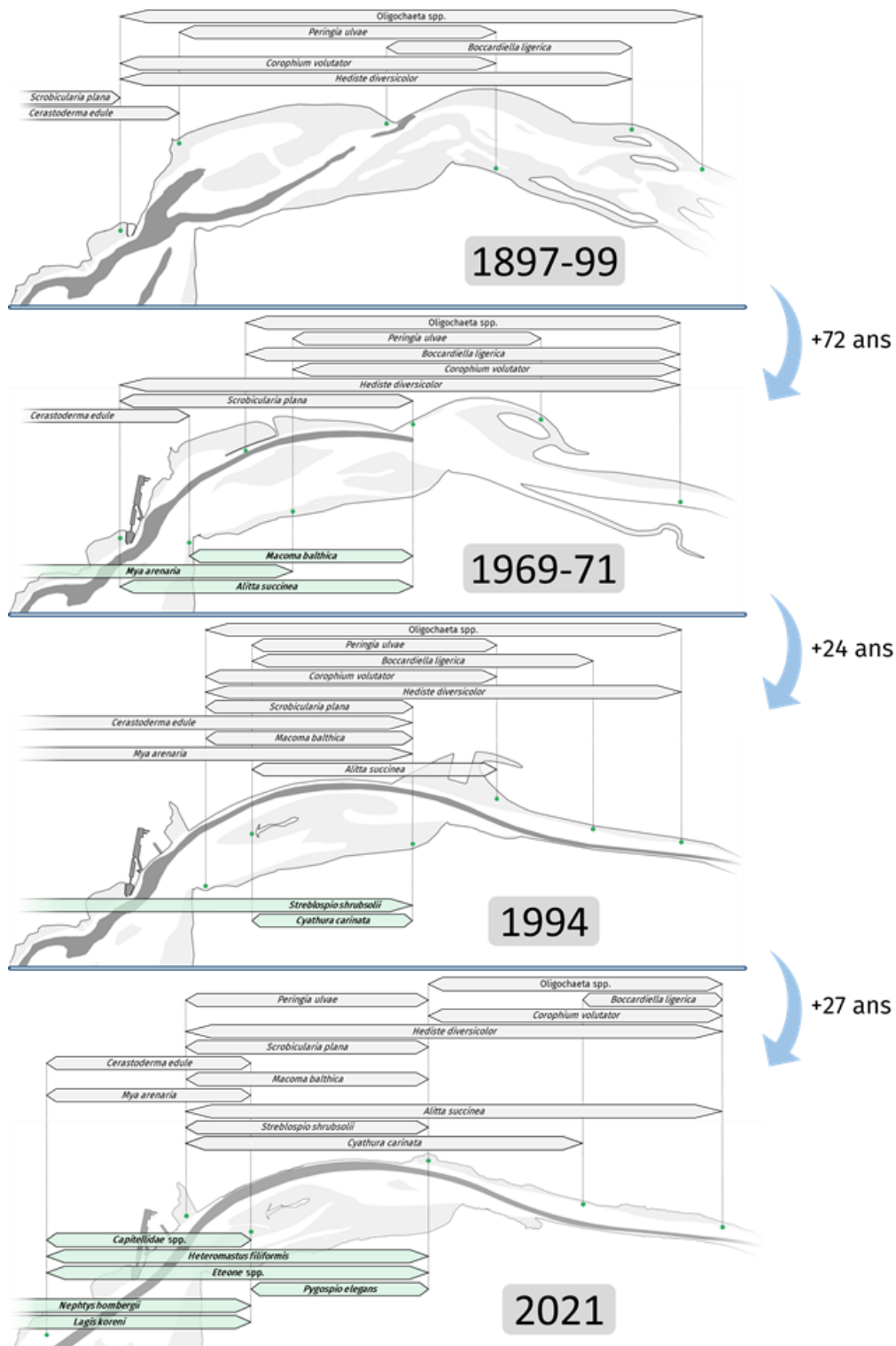


Figure 4. Aire de présence des taxons macrobenthiques de l'estuaire de la Loire sur quatre campagnes, réparties sur une période de 120 ans. Les stations échantillonnées lors des campagnes sont indiquées par des points verts. L'aire de présence d'un taxon est illustrée par une extension longitudinale allant de la station la plus aval à la station la plus amont de sa distribution. Si l'aire dépasse les limites de la cartographie, cela signifie que le taxon a également été recensé en amont ou en aval de la zone d'étude. Les taxons nouvellement détectés lors d'une campagne figurent en gras sur fond vert et sont positionnés au bas des cartographies. Les surfaces intertidales sont représentées en gris clair, tandis que les bassins portuaires et le chenal de navigation sont en gris foncé. Le fond de carte évolue au fil des aménagements de l'estuaire, selon la période de chaque inventaire faunistique (Lécuyer *et al.* sous presse).

7.1.2. Diminution des espèces boréales

En étudiant la réponse de différents taxons de poissons aux variations environnementales, un déclin de l'abondance des poissons boréaux a été observé (Figure 5). Ce résultat témoigne d'une tendance à la déboréalisation de l'estuaire, un mécanisme induit par le réchauffement des eaux et provoquant une diminution d'abondance voire une disparition locale d'espèces boréales (McLean *et al.* 2021). Ce phénomène s'inscrit dans une dynamique plus vaste de décalage vers les pôles des niches thermiques des espèces (Nicolas *et al.* 2011, Fossheim *et al.* 2015).

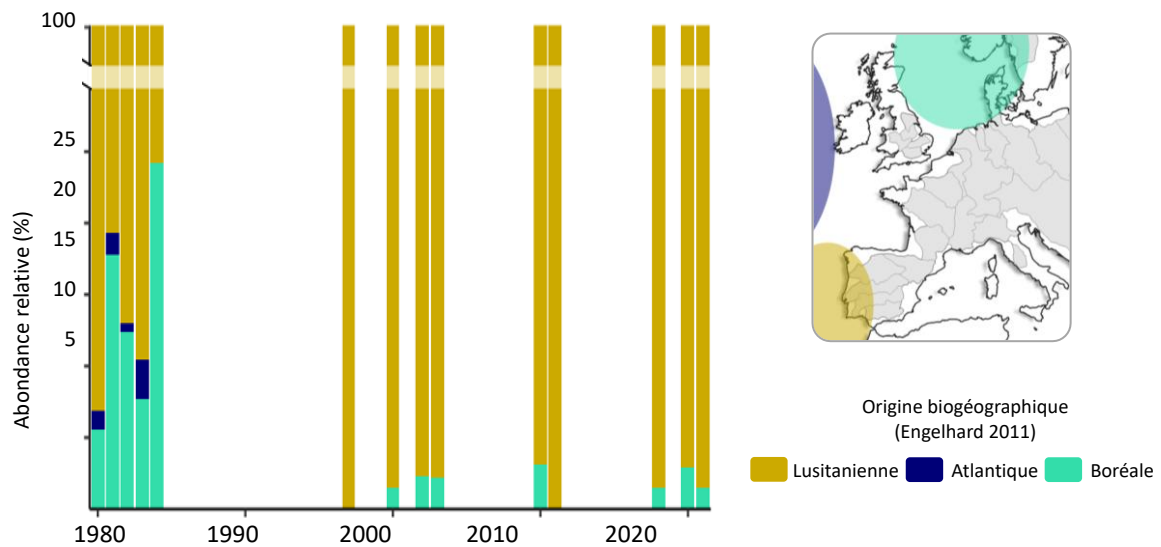


Figure 5. Evolution interannuelle de la proportion des différents taxons de poissons, regroupés par origine biogéographique (Lécuyer, 2024a).

En parallèle, les communautés ichthyologiques et macrobenthiques présentent un noyau d'espèces estuariennes typiquement ligériennes, dont la composition semble stable dans le temps. L'évaluation des communautés de poissons a révélé des niveaux de richesse taxonomique faibles mais constants, ainsi qu'une dominance stable d'espèces euryèces, capables de survivre dans des conditions environnementales fluctuantes. La dégradation des conditions d'oxygénation ne semble pas avoir induit de réponse marquée des poissons aux échelles temporelles analysées, ce qui pourrait être le résultat de la plasticité comportementale et physiologique inhérente aux espèces présentes. Il est toutefois probable que les événements hypoxiques présentent des effets sur les communautés estuariennes à des échelles temporelles très fines (heure, jour). Ces résultats tendent à mettre en évidence l'existence d'une forme de plasticité biologique vis-à-vis des changements environnementaux qui ont lieu.

Cependant, la dynamique mensuelle des communautés de poissons montre une variabilité accrue ces dernières années (Figure 6). Cette réponse plus chaotique aux modifications environnementales saisonnières pourrait signaler une diminution de la tolérance de l'ichtyofaune. Par ailleurs, l'apparition de certaines espèces non indigènes au sein des communautés benthiques met en évidence le risque d'invasions biologiques trans-océaniques, un facteur supplémentaire de pression sur la stabilité des écosystèmes estuariens.

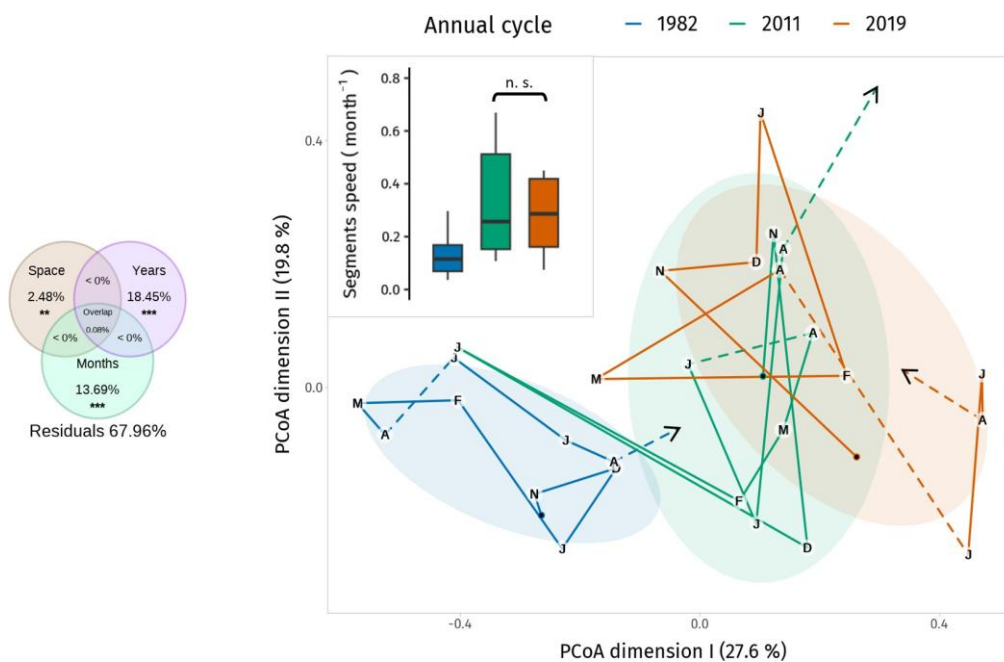


Figure 6. A gauche : Partition de la variance dans la composition de la communauté de poissons (diagramme de Venn) entre l'espace et deux échelles temporelles (mois et année). À droite : trajectoires écologiques mensuelles (d'octobre à octobre), représentant trois cycles annuels en 1982, 2011 et 2019. Ces trajectoires sont moyennées sur l'ensemble des secteurs de l'estuaire et sont délimitées par des ellipses de données. Les segments en pointillés indiquent que les deux échantillons associés sont séparés par plus d'un mois dans le temps. Le sous-graphique dans le coin supérieur gauche présente la distribution des vitesses des segments¹ par cycle annuel, montrant des vitesses significativement plus lentes en 1982 (test de Wilcoxon ; Lécuyer *et al.*, 2024a)

À retenir

- Les conditions environnementales dans l'estuaire de la Loire suivent une tendance attendue dans le contexte actuel de **changements globaux** : diminution des débits fluviaux, réchauffement, baisse d'oxygénation de l'eau.
- En réponse à ces modifications, certaines espèces marines, poissons comme invertébrés, s'introduisent plus en amont dans l'estuaire qui **se marine** en raison d'un moindre apport en eau douce.
- Certaines populations boréales, présentant une affinité pour les eaux froides, pourraient disparaître localement par **réchauffement** des eaux de l'estuaire, devenues inadéquates à leur subsistance.
- L'introduction d'**espèces non-indigènes** par diverses activités humaines vient attester du risque hautement perturbateur d'une invasion biologique qui pèse sur l'écosystème estuarien.

¹ La vitesse des segments permet d'analyser la dynamique de la communauté au fil du temps, en indiquant comment rapidement ou lentement la composition des espèces évolue entre deux points dans le temps. Plus la vitesse est élevée, plus rapides sont les changements de la composition spécifique de la communauté.

7.2 Diversité et production macrobenthiques sur les vasières : comparatif Loire / Seine

De vastes superficies d'habitats aquatiques ont été revendiquées par l'être humain, réduisant d'environ 28 % la surface historique de l'estuaire de la Loire et de 43 % celle de l'estuaire de la Seine. Les revendications ont notamment entraîné la perte de zones intertidales, directement impactées par l'aménagement des rives des estuaires (Benyoucef *et al.* 2014, Cuvilliez *et al.* 2009). Malgré ces pertes, une relative constance de la diversité taxonomique et fonctionnelle des macro-invertébrés benthiques a été relevée dans les deux estuaires. Par ailleurs, la production macrobenthique varie de manière proportionnelle avec la richesse taxonomique et fonctionnelle, soulignant l'importance de cette composante de la biodiversité dans le fonctionnement des écosystèmes estuariens.

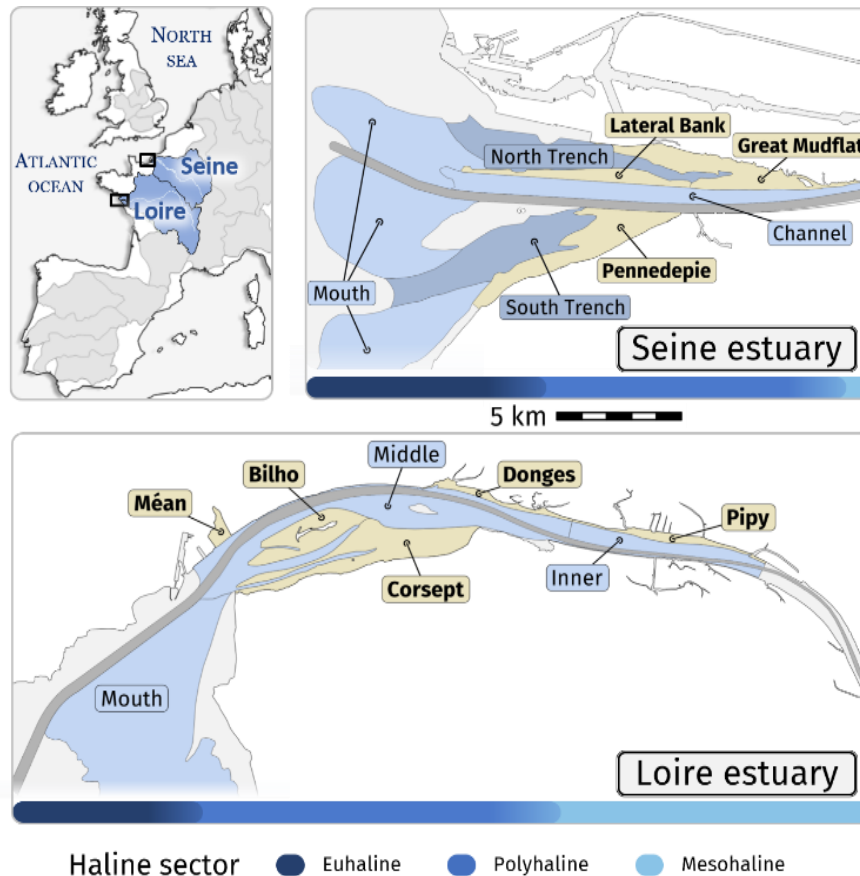


Figure 7. Zones intertidales (couleur blé) des estuaires de la Loire (huit unités spatiales) et de la Seine (en sept unités spatiales). La position historique des secteurs halins est donnée à titre indicatif sous forme de barres de dégradé bleu au bas de la figure (Lécuyer *et al.*, 2024b)

Les estuaires de la Loire et de la Seine (Figure 7) présentent des distinctions dans la composition de leurs communautés macrobenthiques respectives, rapprochant le premier des estuaires lusitaniens (França *et al.* 2009, Borja *et al.* 2004), alors que le second s'apparente davantage aux estuaires boréaux (Chambers & Milne 1975). Toutefois, une certaine convergence a été observée dans les groupes fonctionnels (Tableau 2) représentés au sein des communautés de ces deux estuaires, semblant donc transcender toute considération latitudinale. Ainsi, le fonctionnement de ces deux estuaires européens (Figure 8) pourrait présenter des similitudes, permettant d'extrapoler certaines observations discutées à une échelle régionale.

Tableau 2. Groupes fonctionnels identifiés par une analyse de classification hiérarchique de l'abondance du macrobenthos. Le nom de chaque groupe est dérivé d'une abréviation de ses modalités dominantes. (Lécuyer *et al.*, 2024a)

	Functional group	Dominant modalities	Major taxa
Organisms belonging to the...	DwelDep	...tend to be... Deposivore – burrower Dweller – shallow endobenthic	...such as... <i>Heteromastus filiformis</i> <i>Owenia fusiformis</i> <i>Lagis koreni</i>
	SenSusp	Suspensivore – burrower Sensitive [†] – endobenthic	<i>Donax vittatus</i> <i>Mya arenaria</i> <i>Spisula solidus</i>
	MarCar	Carnivore – crawler Marine – free-living – indifferent [†]	<i>Tritia reticulata</i> Phyllodocida Ophiuridae
	ShaProd	Productive – small Shallow endobenthic – tube-dweller	<i>Boccardiella ligerica</i> <i>Ampelisca brevicornis</i> Gammaridae
	BracHet	Heterogeneous regarding all traits Brackish – tolerant [†]	<i>Hediste diversicolor</i> <i>Scrobicularia plana</i> <i>Corophium volutator</i>

[†] adjectives relative to an organic matter enrichment

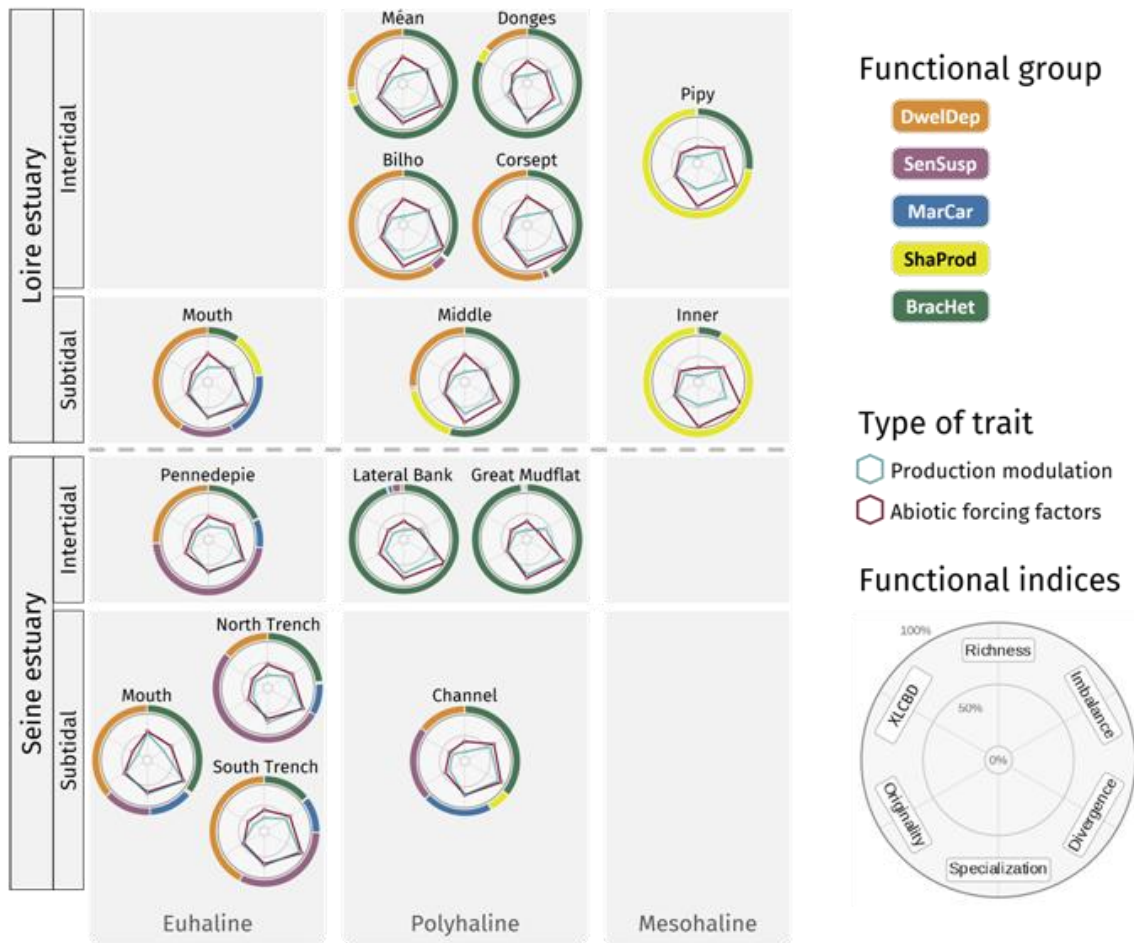


Figure 8. Graphiques radar des indices fonctionnels calculés pour les échantillons de macrobenthos (moyenne temporelle) des unités d'échantillonnage de l'estuaire de la Loire (en haut) et de l'estuaire de la Seine (en bas), présentés pour chaque type de trait. Les anneaux colorés environnants représentent la distribution relative moyenne des assemblages fonctionnels au sein de chaque unité spatiale. Les unités sont présentées de l'océan (à gauche) au fleuve (à droite) et reflètent le gradient spatial le plus court couvert dans l'estuaire de la Seine. (Lécuyer *et al.*, 2024a).

Les vasières intertidales constituent les habitats les plus productifs des sections internes des estuaires, soulignant leur rôle essentiel dans le fonctionnement écologique des estuaires (Boyes & Elliott 2006, Schelske & Odum 1962). Toutefois, la diversité fonctionnelle des communautés macrobenthiques dans les vasières les plus productives est marquée par une grande originalité, suggérant une faible redondance fonctionnelle (Figure 8). Cela implique un risque accru de perte de fonctionnalité en cas d'altération de la composition de ces communautés. Néanmoins, ces communautés démontrent généralement une forte plasticité phénotypique (Gómez *et al.* 2023), leur permettant de s'adapter à de grandes variations environnementales (euryécie). Cependant, de faibles niveaux de production ont été observés dans plusieurs zones estuariennes, pouvant être associés à la présence d'activités industrielles locales. Ces activités viendraient perturber les communautés avoisinantes, limitant leur contribution au bon fonctionnement de l'écosystème estuarien (Barletta *et al.* 2016, Ingleton & McMinn 2012). Les communautés macrobenthiques de ces zones présentent également un degré de spécialisation fonctionnelle particulièrement élevé, ce qui les rend plus vulnérables aux perturbations dans leurs conditions de vie.

À retenir

- Les aménagements réalisés sur l'estuaire de la Loire ont conduit à une **réduction des surfaces** d'habitat aquatiques et à des variations importantes dans la distribution des vasières intertidales entre les secteurs estuariens.
- Sur la dernière décennie, ultérieurement à ces aménagements, la diversité taxonomique et fonctionnelle des communautés macrobenthiques montre une certaine **constance** temporelle. Les communautés semblent s'être stabilisées dans cet estuaire aux rives artificiellement redessinées.
- Une **convergence fonctionnelle** avec les communautés de l'estuaire de la Seine est observée, témoignant de potentielles similitudes régionales dans le fonctionnement des écosystèmes estuariens nonobstant leur position latitudinale.
- Les vasières intertidales sont le lieu d'une **production macrobenthique** particulièrement élevée, soulignant l'intérêt écologique de ces habitats dans le fonctionnement global de l'écosystème.
- Outre la compression de ces habitats, des indicateurs de potentielles **vulnérabilités** fonctionnelles (faible redondance, degré de spécialisation élevé) ont été relevés au niveau de certaines vasières. Une vigilance pourrait permettre l'anticipation des conséquences que les pressions appliquées à ces habitats sont susceptibles d'induire dans un avenir plus ou moins proche.

7.3. Capacité d'accueil trophique de la nurricerie : évolutions spatiales et temporelles

La consommation alimentaire des poissons juvéniles renvoie localement des niveaux dépassant la production annuelle de leurs proies macrobenthiques (Figure 9). Ce bilan s'observe notamment au niveau du cordon de vasières mésohalines subsistant dans l'estuaire de la Loire. Ceci indique leur fort intérêt trophique pour les juvéniles de poissons et également le rôle clé de ces vasières dans la capacité d'accueil trophique globale de l'estuaire, dont la production de juvéniles de poissons est dépendante.

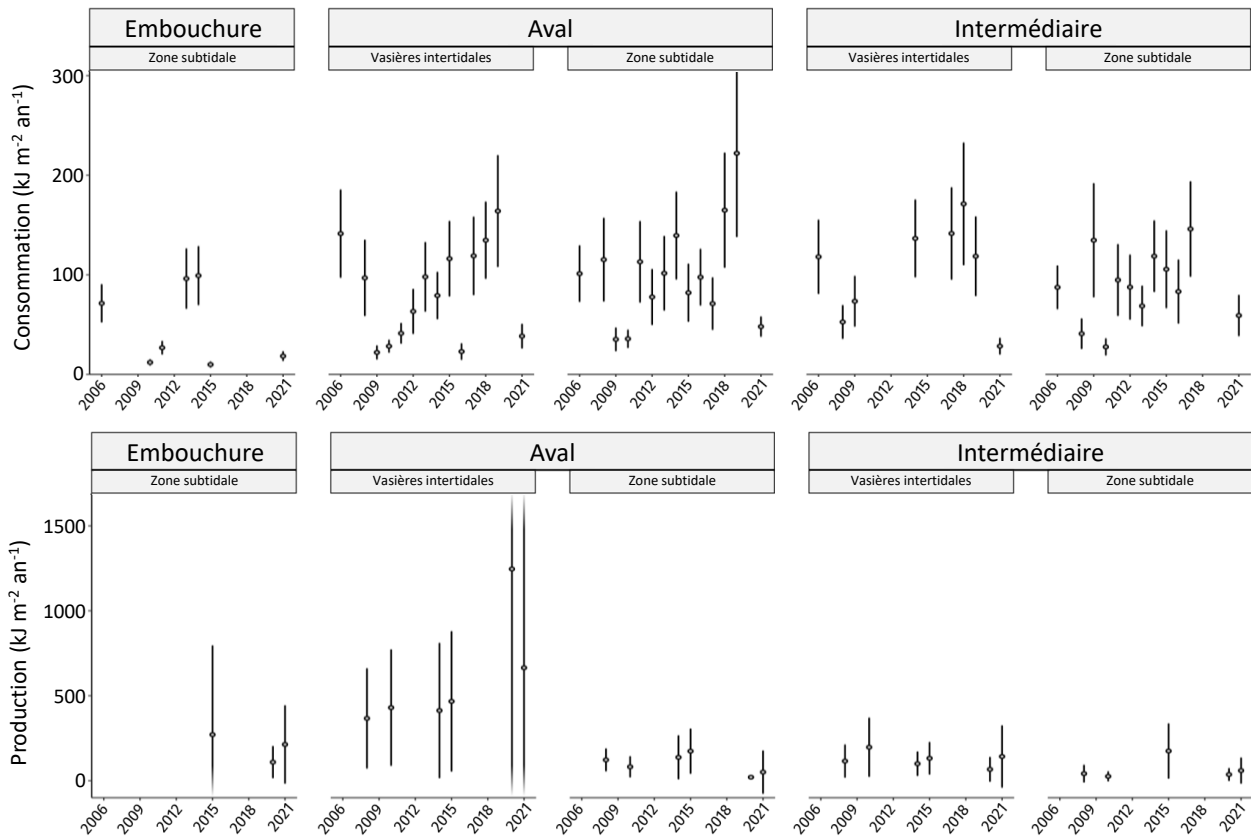


Figure 9. Consommation alimentaire (FC) des poissons juvéniles et compétiteurs et production alimentaire (FP) des proies macrobenthiques au fil du temps le long du gradient estuarien de l'embouchure au secteur intermédiaire en amont (moyenne et incertitude associée, calculées à l'aide de la méthode d'échantillonnage de Monte-Carlo (Lécuyer, 2024b))

L'analyse de la contribution alimentaire des différents secteurs le long du gradient estuarien de la Loire, réalisée à partir des compositions isotopiques de huit espèces de poissons et de crevettes (stage M2, F. March 2024), confirme une consommation significative des poissons dans les secteurs amont de l'estuaire. Ce travail met en lumière le rôle primordial de la vasière intertidale de Pipy, située dans la zone intermédiaire de l'estuaire, qui se démarque comme une source alimentaire essentielle pour la majorité des espèces étudiées. En outre, la vasière de Bilho a été identifiée comme un habitat clé, jouant un rôle déterminant dans l'alimentation des crevettes *Palaemon longirostris*, des éperlans et des gobies.

Par ailleurs, les débits de crue hivernaux présentent un effet significatif et positif sur le niveau annuel de consommation des poissons juvéniles. Ce facteur est considéré comme favorisant l'installation des communautés de proies benthiques sur la zone de nurricerie (Boynton *et al.* 2008, Marchand 1993), et pourrait ainsi être informatif quant au niveau de consommation en place sur la nurricerie estuarienne une année donnée. Il deviendrait alors envisageable d'anticiper une situation de forte compétition trophique sur la base de connaissances concernant les débits fluviaux hivernaux précédant la période de croissance des poissons juvéniles. En parallèle, un effet significatif et positif du cumul de degrés-jours durant la période estivale de nurricerie a également été observé. Ce facteur, en lien direct avec la température des eaux estuariennes, influe sur les besoins énergétiques des organismes ectothermes par l'augmentation des taux métaboliques (Neuheimer & Taggart 2007). L'augmentation des températures associée aux changements globaux représente, ici également, un risque au regard de ses effets sur la pression de consommation des poissons juvéniles qui pourrait engendrer une hausse de la compétition pour la ressource alimentaire (Pasquaud *et al.* 2012, Llopiz *et al.* 2014).

La capacité d'accueil trophique de la nurricerie estuarienne de Loire présente des niveaux similaires à ceux quantifiés récemment dans d'autres nurriceries estuariennes. Sur la dernière décennie, la capacité d'accueil trophique comme la condition corporelle des poissons juvéniles ne semblent pas présenter de signe d'une limitation trophique. Selon une analyse préliminaire basée sur les caractéristiques des années 2010, il apparaît cependant que la nurricerie de l'estuaire de la Loire semblait être historiquement capable d'accueillir près de 40 % de poissons juvéniles supplémentaires chaque année (Figure 10).

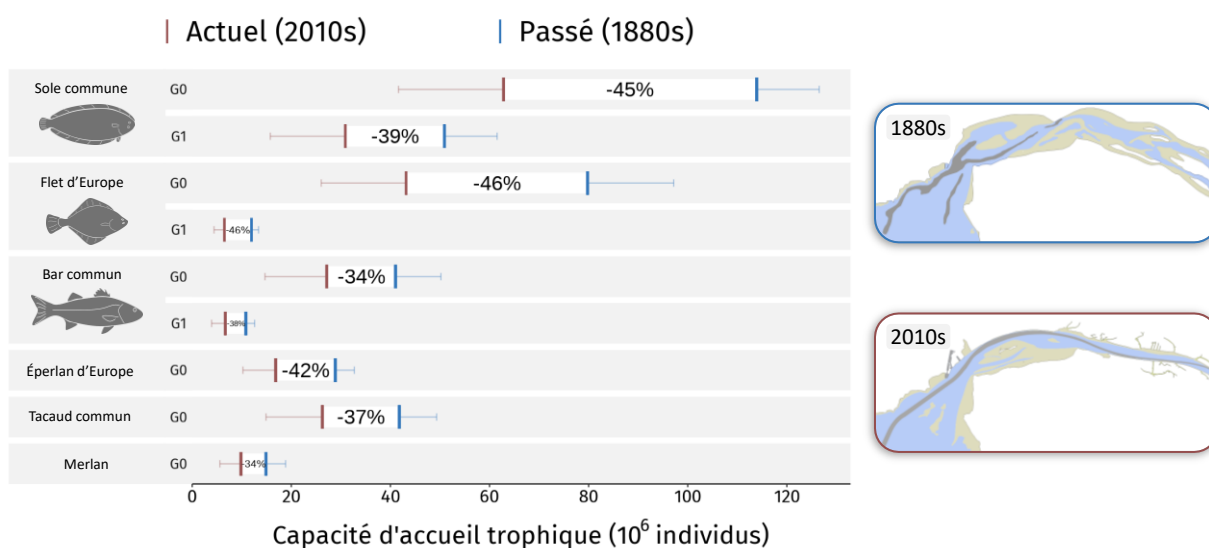


Figure 10. Évolution de la capacité d'accueil trophique de la nurricerie de l'estuaire de la Loire selon un scénario rétrospectif de perte de surfaces aquatiques. La variabilité autour des estimations (écart-type) est représentée par un segment unilatéral à gauche pour la situation actuelle, et à droite pour la situation passée (Lécuyer, 2024b).

La capacité d'accueil trophique des nurriceries estuariennes pourrait ainsi avoir diminué des suites des pertes de surfaces aquatiques qu'ont provoqués les aménagements industriels et urbains de l'être humain.

À retenir

- Les **vasières mésohalines** de l'estuaire présentent un intérêt écologique important, notamment par leur contribution à la capacité d'accueil trophique de la nurserie.
- L'**environnement** (débit fluvial, température) influence la consommation des poissons juvéniles de telle sorte que les changements climatiques pourraient conduire à une situation de plus forte compétition pour la ressource alimentaire.
- La diminution des surfaces aquatiques par aménagement de l'estuaire a pu conduire à une réduction de la capacité de la nurserie à accueillir des poissons juvéniles. Une première estimation suggère que l'estuaire était historiquement capable d'accueillir près de **40 % de poissons juvéniles** supplémentaires.

8. Vers des recommandations pour préserver la biodiversité et la fonction de nurserie de l'estuaire

Adoptant une perspective en écologie halieutique, l'essentiel du projet BioTroL avait pour objectif d'évaluer l'état de la biodiversité et la capacité d'accueil trophique de l'estuaire pour les espèces halieutiques. À partir des constats dressés, un second volet de travail mobilisant les sciences sociales a investi l'examen des conditions et des modalités qui s'avèrent nécessaires pour garantir la pérennité de la biodiversité et du rôle nourricier de l'estuaire de la Loire. Ce volet visait à formuler des recommandations pour établir une conciliation harmonieuse entre les activités anthropiques et la gestion durable de l'estuaire, tout en assurant la sauvegarde de la biodiversité et à la préservation de la fonction de nurserie des écosystèmes côtiers et estuariens.

La mise en place de ce volet s'est organisée en trois étapes. La première a consisté en une description diachronique des usages anthropiques de la Loire et des aménagements et les mesures de gestion de son estuaire. La deuxième étape a permis de recueillir les perceptions des usagers et des gestionnaires sur les enjeux liés à l'estuaire. Enfin, la troisième étape a porté sur l'identification des conditions nécessaires à une gestion durable de l'estuaire de la Loire afin d'assurer une préservation de la biodiversité et de la capacité d'accueil trophique de celui-ci.

8.1. L'estuaire de la Loire, activités socio-économiques et soutiens publics

L'analyse des usages de l'estuaire de la Loire met en évidence des transformations historiques et spatiales. Ces changements ont conduit à des formes d'appropriation et d'aménagement adaptées aux besoins des activités, des usagers et des gestionnaires.

Cette partie s'appuie sur la littérature scientifique en géographie pour documenter l'évolution des transformations des usages de l'estuaire de la Loire et en sciences politiques pour examiner la gouvernance et les mécanismes de prise de décision. L'approche adoptée est historiciste, replaçant chaque enjeu (environnemental, économique, social) dans son contexte afin d'en retracer les dynamiques et la manière dont ils ont été pris en charge par les différents acteurs.

8.1.1. La primauté aux usages économiques dans l'estuaire de la Loire, malgré la reconnaissance d'autres usages écologiques, résidentiels, touristiques et culturels

Pendant de nombreuses années, l'estuaire de la Loire a été appréhendé à partir d'un prisme économique, conduisant à des aménagements du fleuve (cf. § 6.2) qui favorisaient le transport maritime et l'implantation d'activités industrielles (Fattal 2002). Cette approche a eu des conséquences notables, notamment la diminution de la capacité d'accueil trophique (cf. § 7.3). Par la suite, les préoccupations liées à la qualité de l'eau et à la préservation de la biodiversité sont devenues des enjeux majeurs. La prise en compte de ces enjeux, en particulier en ce qui concerne la biodiversité, s'est avérée complexe et souvent en concurrence avec les activités industrialo-portuaires. Cette complexité est illustrée par les propositions de création des zones de protection du patrimoine naturel (ZPS) dans les années 1990, qui ont exclu certains sites, jugés essentiels par l'État pour l'expansion du port.

L'analyse historique montre que l'appropriation humaine de l'estuaire de la Loire a principalement été guidée par des impératifs économiques. Cette approche, qui a perduré à travers les époques, a établi l'activité industrialo-portuaire de Nantes Saint-Nazaire comme un pilier fondamental du développement régional et national. Elle a su s'imposer dans un contexte de compétition internationale intense. L'État y a joué un rôle majeur en promouvant ce modèle de développement, même si, petit à petit, d'autres acteurs se sont peu à peu impliqués dans l'action publique locale.

La prise de conscience des enjeux multiples dans l'estuaire de la Loire a également conduit à une évolution du répertoire d'action publique dominant (Muller, 2010), d'un référentiel de développement régional à un référentiel de développement territorial impliquant la diversité des acteurs locaux pour une prise en charge territoriale autour des enjeux multiples du territoire (Laidin & Berrier-Sollic, 2022).

8.1.2. Une multiplicité d'acteurs publics pour une prise en charge par thématiques de l'estuaire

Dans les années 1960-1970, la centralisation de l'État est contestée et conduit à la mise en place de la décentralisation par vagues successives (Acte I 1982-1983, Acte II 2003, Acte III 2014-2015) (Le Lidec 2007, Bezes et Le Lidec 2010). Les collectivités territoriales se sont vues octroyées successivement et de manière croissante de nouvelles compétences pour une prise en charge locale des enjeux économiques, environnementaux ou sociaux multiples. L'action publique locale s'est ainsi diversifiée en déployant de nombreux dispositifs locaux pour prendre en charge la planification des espaces, la gestion de l'eau, la prise en compte de l'environnement, etc. Les demandes de participation citoyenne à l'action publique se sont concrétisées par la mise en place d'instances de gouvernance locale associant acteurs publics et privés du monde économique et de la société civile.

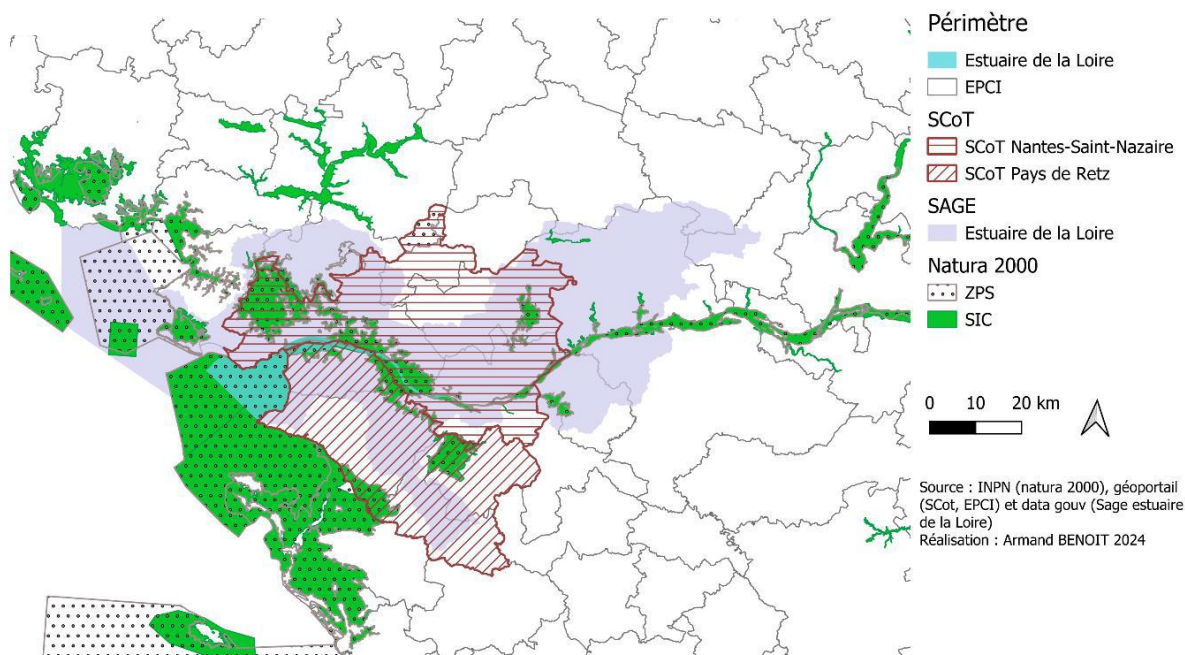


Figure 11. Les territoires de la planification urbaine (SCOT), de la planification de l'eau (SAGE), des zones Natura 2000 dans l'estuaire de la Loire (Benoit, 2024)

Au niveau local, la gouvernance de l'estuaire s'est structurée autour des dispositifs de Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE), des SCoT (schémas de cohérence territoriale) et des zones Natura 2000 (Figure 11). Ces dispositifs prennent en charge la planification spatiale de l'eau, l'aménagement de l'espace et la planification environnementale. Chaque dispositif se caractérise par une gouvernance territoriale spécifique et implique une pluralité d'acteurs, avec des élus et des représentants d'usagers (Pasquier *et al.*, 2013). À titre d'illustration, la Commission Locale de l'Eau (CLE) est une instance qui porte le SAGE à l'échelle d'un bassin versant. Elle réunit des représentants des collectivités territoriales, des services de l'État, des acteurs socio-économiques et de la société civile. Chaque dispositif engage des processus de concertation pour élaborer et mettre en œuvre ces documents de planification.

Les évolutions de ces dernières décennies sont donc marquées, d'une part, par la participation d'une pluralité d'acteurs publics et privés à l'action publique et, d'autre part, par la mise en place d'une polyarchie selon les domaines et selon les territoires pris en charge. Toutefois, l'État conserve un rôle important auprès des collectivités territoriales, car il est le seul détenteur du pouvoir législatif et du contrôle du respect des lois et il maintient une dimension verticale de l'action publique dans les territoires en déployant un gouvernement à distance (Epstein, 2015). Par exemple, si ce sont les collectivités territoriales et leur groupement qui ont la compétence d'aménagement du territoire, les documents d'urbanisme doivent recueillir la validation par l'État avant d'être mis en œuvre.

L'État soutient toujours fortement le secteur industriel et le complexe industrialo-portuaire, notamment du fait des enjeux économiques et énergétiques d'envergure nationale. Toutefois, il s'est investi dans les dernières années en faveur d'une conciliation des enjeux économiques, écologiques et sociaux de l'estuaire de la Loire en engageant des réflexions pour mettre en place des projets de gestion intégrée du territoire tels que le Plan Loire aval, le Pacte pour l'estuaire de la Loire (République

française, 2014) ou encore la réserve naturelle nationale (République française 2016, IGEE, 2023). Finalement, les projets ne se sont pas concrétisés et témoignent des difficultés rencontrées dans la conciliation des différents enjeux de l'estuaire de la Loire.

Les dynamiques institutionnelles ont ainsi convergé vers un modèle de développement territorial, privilégiant en priorité les activités économiques, tout en mettant en place une gouvernance locale multi-acteurs au sein de laquelle l'État reste fortement présent. Dans ce contexte, la préservation de la fonction de nourricerie dans les enjeux de biodiversité peine à se faire une place et sa prise en charge est souvent négligée. Cependant, les perceptions des enjeux écologiques et socio-environnementaux, ainsi que les modalités de leur prise en charge, varient considérablement selon les usagers et les gestionnaires.

À retenir

- L'estuaire de la Loire a été **aménagé pour engager un développement économique** fondé sur l'implantation du complexe industrialo-portuaire de Nantes-Saint Nazaire, pilier du développement régional et national, **au détriment des autres usages**, environnementaux, touristiques, résidentiels ou culturels de l'estuaire. Néanmoins, ces dernières années, face à l'émergence de nouvelles demandes sociétales en matière de qualité de vie et de préservation de l'environnement, **la diversité des usages** de l'estuaire de la Loire **a été pleinement reconnue**.
- Ces évolutions ont conduit à **la participation d'une pluralité d'acteurs publics et privés à l'action publique** pour prendre en charge l'ensemble des enjeux économiques, environnementaux et sociaux. Une **polyarchie** s'est mise en place pour appréhender les différents enjeux à différentes échelles territoriales.

8.2. Des enjeux perçus très éloignés de la protection de la fonction de nourricerie

La deuxième étape du volet recommandations a consisté à collecter les points de vue des usagers et des gestionnaires concernant les enjeux de l'estuaire de la Loire et leur prise en charge au regard de la fonction de nourricerie de poissons. Cette étape s'est appuyée sur une enquête visant à recueillir les perceptions actuelles des usagers et gestionnaires sur les enjeux et politiques liées à ces enjeux au niveau de l'estuaire de Loire. Le corpus d'enquête a regroupé des acteurs impliqués dans les usages productifs (industrie, agriculture, pêche), les usages résidentiels (présence d'habitants) et les usages environnementaux (richesse écologique de l'estuaire) (Figure 12).

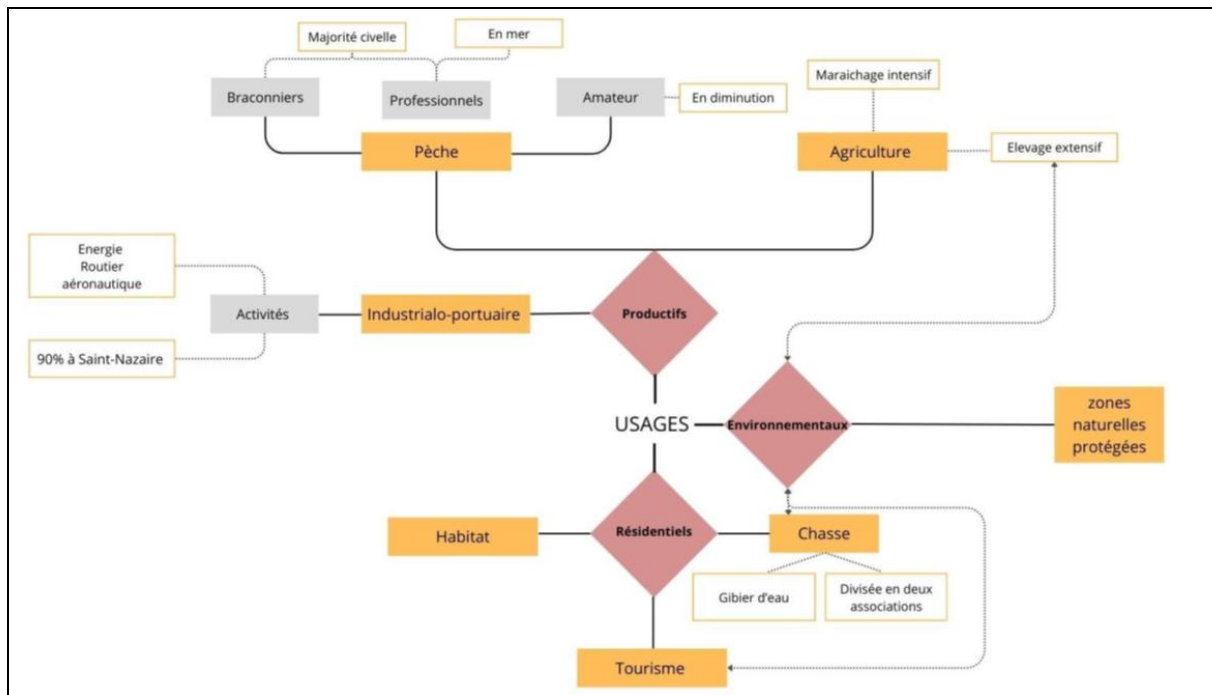


Figure 12. Les différents usages de l'estuaire de la Loire (Benoit, 2024)

Au total, 30 entretiens semi-directifs ont été menés auprès de 38 acteurs issus de différentes structures publiques (agents des services de l'État, élus et techniciens des collectivités territoriales et intercommunalités, organismes publics) ou privées (représentants ou salariés des entreprises ou des organisations professionnelles, bénévoles ou salariés des associations...). L'attention s'est portée sur les enjeux environnementaux, les enjeux liés à l'eau et les enjeux liés aux usages spatiaux.

8.2.1. Une prise de conscience des enjeux environnementaux dans l'estuaire de la Loire mais surtout pour protéger les oiseaux et les habitats terrestres

Nos résultats montrent une prise de conscience de l'importance de la biodiversité de l'estuaire et de sa fragilité croissante chez les usagers et gestionnaires depuis les années 1970. Toutefois l'attention portée essentiellement aux oiseaux, aux habitats terrestres et aux seules espèces de poissons-amphihalins laisse le sujet de la fonction de nourricerie des poissons de la Loire sans arène de discussion et avec peu de protagonistes pour la défendre.

La protection de l'environnement bénéficie de deux soutiens, l'un d'ordre scientifique, l'autre d'ordre sociétal. Le premier relève des enjeux de connaissance permettant d'identifier les enjeux écologiques et d'esquisser des actions potentielles. De nombreuses structures, notamment le GIP Loire

estuaire, sont présentes dans l'estuaire et apporte des données solides. Cependant, la fragmentation des données représente un défi pour une analyse approfondie et intégrée de ces enjeux. Le second soutien s'appuie sur des mobilisations sociales fortes qui s'opposent à des projets perçus comme dommageables pour l'environnement.

L'enjeu environnemental connaît diverses prises en charge, Natura 2000 pour protéger les habitats et les oiseaux, des expérimentations pour étudier les adaptations possibles face au changement climatique comme le projet ADAPTO², des réflexions pour protéger des zones à partir de labellisations types réserve naturelle, parc national ou parc naturel régional. Mais ces programmes ne recueillent pas l'unanimité. Par exemple, Natura 2000 suscite quelques critiques au regard de ces ambitions de protection des habitats et des espèces faunistiques. De même, les projets de mise en place de nouvelles zones protégées ont soulevé de nombreuses oppositions soit de la part d'acteurs économiques qui craignent pour la poursuite de leurs activités, soit de la part des acteurs locaux qui dénoncent des impositions par le haut et des absences de concertation locale.

8.2.2. La protection de la fonction de nourricerie invisibilisée dans les enjeux eau

Alors que la qualité et la quantité de l'eau, ainsi que l'élévation du niveau de la mer, sont au cœur des préoccupations des acteurs locaux en charge de la gestion de l'eau, la dimension écologique de l'estuaire, notamment en tant qu'habitat important pour la faune aquatique, est souvent reléguée au second plan, voire non identifiée. Ainsi, les défis associés à la gestion de la qualité et de la quantité de l'eau, qu'ils soient dus à des pressions anthropiques ou à des phénomènes naturels, dominent les débats, mais peu d'attention est accordée à l'impact de ces enjeux sur les écosystèmes aquatiques. Pourtant, une mauvaise qualité de l'eau, marquée par une faible concentration en oxygène et une salinisation de plus en plus forte, compromet directement la fonction de nourricerie, mettant en danger la biodiversité et la résilience de l'écosystème.

Les enjeux liés à l'eau sont appropriés par de nombreux acteurs. Toutefois, la division du travail entre gestionnaires en charge de la planification d'une stratégie, de la mise en œuvre opérationnelle, de la concertation, du contrôle, du financement, etc. (Barone, Mayaux 2019) ne facilite pas une vision globale et une prise en charge de la protection de la fonction de nourricerie de la Loire.

8.2.3. La protection de la fonction de nourricerie confrontée aux enjeux et usages spatiaux

Enfin, la diversité des usages dans l'estuaire implique l'intervention de nombreux acteurs selon leur domaine de compétences ou leur territoire d'exercice. La superposition des territoires, chacun avec ses propres objectifs et priorités, entraîne souvent une fragmentation des efforts de gestion et de conservation. Cela limite la capacité à mettre en place une approche cohérente et intégrée pour identifier et protéger les zones essentielles à la reproduction et au développement des espèces aquatiques. Cette fragmentation est particulièrement forte dans les documents d'urbanisme : elle fait de la Loire une frontière entre deux territoires, plutôt qu'un lien (cf Figure 11). Finalement, l'estuaire en tant qu'espace et écosystème est invisibilisé dans les documents de planification de l'utilisation de l'espace, la dimension écologique du fleuve est insuffisamment prise en charge. De surcroît, quelques acteurs dominent l'évolution de l'estuaire de la Loire avec pour conséquences les fonctions écologiques reléguées au second plan par rapport aux priorités économiques ou des aménagements du complexe industrialo-portuaire.

² « ADAPTO, un projet Life ; par le Conservatoire du Littoral ». <https://www.lifeadaptto.eu/>

Finalement, en l'absence de coordination et de concertation efficaces, les acteurs locaux rencontrent des difficultés à concilier leurs intérêts divergents, ce qui se traduit par des désaccords sur les visions stratégiques. La multiplicité des acteurs et interventions dans l'estuaire de la Loire pour accompagner les multiples usages peine à considérer pleinement les enjeux écologiques, pourtant essentiels pour assurer la protection de la fonction de nourricerie et, par extension, la pérennité de l'écosystème estuarien.

À retenir

Les enjeux de protection de la fonction de nourricerie des espèces halieutiques ne sont pas appréhendés au sein des politiques de gestion de l'estuaire de la Loire.

Bien que **les enjeux environnementaux soient de plus en plus reconnus** et pris en charge, toutefois, **l'attention** se porte essentiellement **sur la protection des oiseaux et des habitats terrestres**, laissant de côté la protection de la fonction de nourricerie des espèces halieutiques.

Cette fonction est également **négligée dans la planification spatiale de gestion des eaux**, qui se concentrent **principalement sur la qualité et la quantité d'eau disponible**, sans toutefois prendre en charge le lien essentiel avec la biodiversité aquatique.

La diversité des usages de l'estuaire de la Loire et la superposition des interventions des acteurs publics, fondées sur des compétences spécifiques conduisent à **une invisibilisation de l'usage de la fonction de nourricerie de l'estuaire de la Loire**.

8.3. Projection sur l'avenir par des usagers et des gestionnaires

La troisième étape de ce volet recommandations s'est ensuite centrée sur l'avenir de l'estuaire et la place accordée à sa fonction de nourricerie des espèces halieutiques. Cette question a été explorée auprès des usagers et des gestionnaires enquêtés. Leurs réponses ont permis de recueillir leurs points de vue sur l'avenir de l'estuaire, afin de nourrir des recommandations visant à préserver la biodiversité des espèces halieutiques et maintenir la capacité d'accueil trophique de l'estuaire. L'enquête a ainsi exploré les visions futures plausibles et souhaitées par les acteurs locaux de l'estuaire de la Loire pour comprendre si ce futur permet de concilier la protection de la nourricerie des espèces halieutiques (zone d'alimentation et de croissance des poissons) avec les autres usages du territoire.

8.3.1. Hétérogénéité des visions des futurs possibles de l'estuaire de la Loire

Notre enquête relève une hétérogénéité des visions des futurs de l'estuaire de la Loire. De nombreux acteurs interrogés envisagent un futur plausible de l'estuaire de la Loire avec une diversité d'usages industriels, agricoles, résidentiels, touristiques et environnementaux (Figure 13), mais certains voient plutôt un futur en priorisant les activités industrielles tandis que d'autres imaginent un futur concentré sur le respect de l'environnement.

Ceux qui envisagent un futur plausible industriel s'appuient sur l'importance économique de ce secteur dans le territoire, la nécessité de maintenir les emplois et les efforts nationaux pour engager la transition énergétique chez les industriels de l'énergie. Ceux qui envisagent un futur priorisant les enjeux environnementaux insistent sur les conséquences du changement climatique avec des

incidences sur l'élévation du niveau de la mer et l'inondation de zones occupées par diverses activités : il est donc aujourd'hui impératif de repenser les usages des espaces. Enfin, le futur plausible multiusages est vu comme la continuité du présent, avec une conciliation des différents enjeux, mais un risque toutefois de diluer leurs prises en charge.

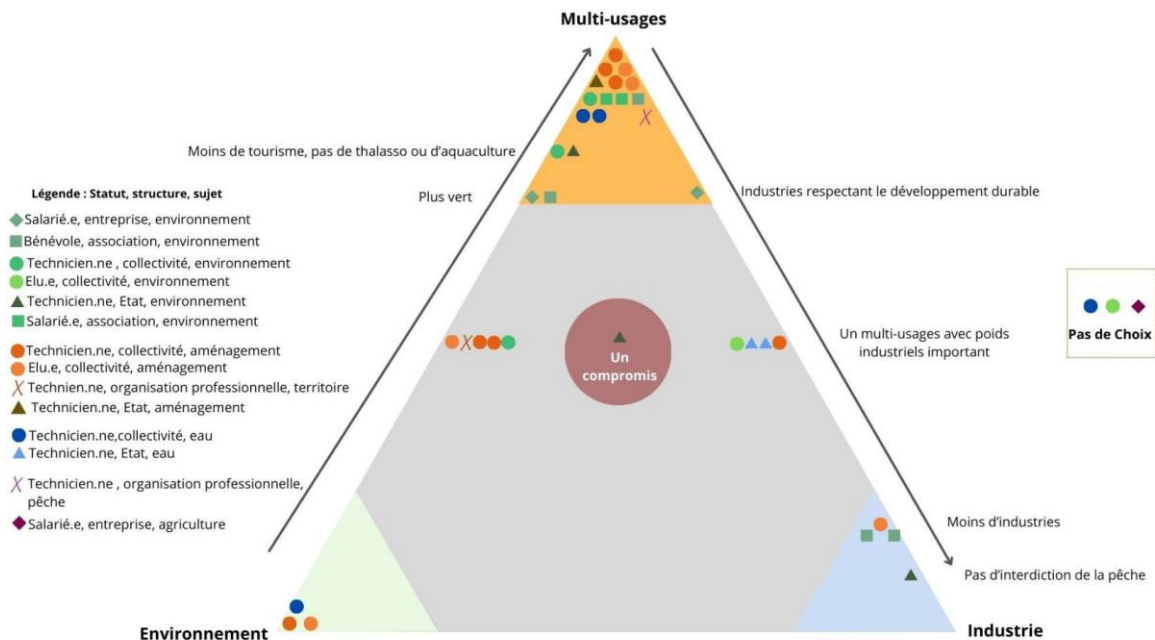


Figure 13. Avis des personnes interviewées sur le futur plausible de l'estuaire de la Loire (Enquête BioTroL, 2024 ; Benoit 2024). Le schéma représente les avis des personnes interviewées sur le futur plausible de l'estuaire de la Loire. Ils sont regroupés par leur statut, leur structure et leur sujet d'intervention. Les acteurs ayant un sujet environnemental sont dans une colorimétrie verte ceux avec un sujet d'aménagement ou de territoire sont de couleurs orangées, le sujet eau est représenté en bleu et les sujets agriculture et pêche en rose et violet. La forme losange représente les entreprises, le rond représente les collectivités territoriales, le carré regroupe les associations, le triangle regroupe des structures étatiques et les croix sont pour les organisations professionnelles.

8.3.2. Un futur souhaité, organisé autour de multiples usages avec une attention forte sur les enjeux environnementaux

Les personnes interviewées imaginent deux types de futur souhaité pour l'estuaire de la Loire (Figure 14) :

- Un futur axiologique qui correspond aux valeurs portées par les acteurs sur le respect de l'environnement de l'estuaire, de sa biodiversité, de sa fonction de nourricerie ;
- Un futur opérationnel qui prend en compte les valeurs de l'individu, mais aussi l'opérationnalisation de ce futur souhaité pour l'estuaire.

Notons que bien que les enjeux industriels soient forts sur le territoire, aucun acteur ne souhaite un futur strictement industriel à l'estuaire de la Loire.

Le futur souhaité en faveur d'une priorité donnée à l'environnement est alors porté par différents acteurs des collectivités territoriales (élus et techniciens) ou de l'État, en charge de l'eau ou l'environnement, ainsi que des bénévoles des associations environnementales. Les futurs souhaités s'organisent autour de la protection de l'eau et de la biodiversité, domaines souvent associés, car soumis aux mêmes pressions anthropiques et aux effets du changement climatique. L'expérimentation du projet ADAPTO est source d'inspiration pour ce futur souhaité qui pourrait viser une « re-estuarisation de la Loire » partielle, pour encourager une gestion naturelle des niveaux d'eau dans les marais.

Si ce futur souhaité investit avant tout la protection de l'environnement, toutefois, la combinaison de la poursuite des activités économiques sur le territoire et la protection de l'environnement est également imaginée par certains acteurs en charge de l'environnement dans des structures publiques (techniciens de l'État ou des collectivités territoriales). Ainsi, les personnes interviewées s'accordent pour exclure la destruction des activités économiques pour renaturer les espaces industriels actuels, toutefois, leur préoccupation environnementale en revanche reste centrale et prioritaire. Les activités économiques doivent donc s'adapter pour intégrer ces préoccupations dans la poursuite de leurs opérations.

Notre enquête pointe la forte unanimité des personnes interviewées pour un futur souhaité donnant une place importante à la considération des enjeux environnementaux. Nous ne sommes, en revanche, pas en mesure d'affirmer que ces avis sont représentatifs des acteurs du territoire et de demandes sociétales de plus en plus prégnantes, notamment du fait du biais de notre enquête où nous avons interrogé beaucoup d'acteurs en charge des sujets environnementaux.

Le futur souhaité autour d'un multi-usage du territoire est porté par une diversité d'acteurs, du secteur privé s'investissant dans le thème de l'environnement (salariés des entreprises, bénévoles et salariés des associations) et du secteur public en charge des sujets d'aménagement, d'environnement ou de pêche (techniciens et élus). Les acteurs de l'aménagement et de l'urbanisme sont particulièrement intéressés par des réflexions sur des planifications futures permettant à la fois de concilier l'ensemble des usages et à la fois d'engager l'action publique dans des actions plus fortes en faveur de la protection de l'environnement et de l'eau.

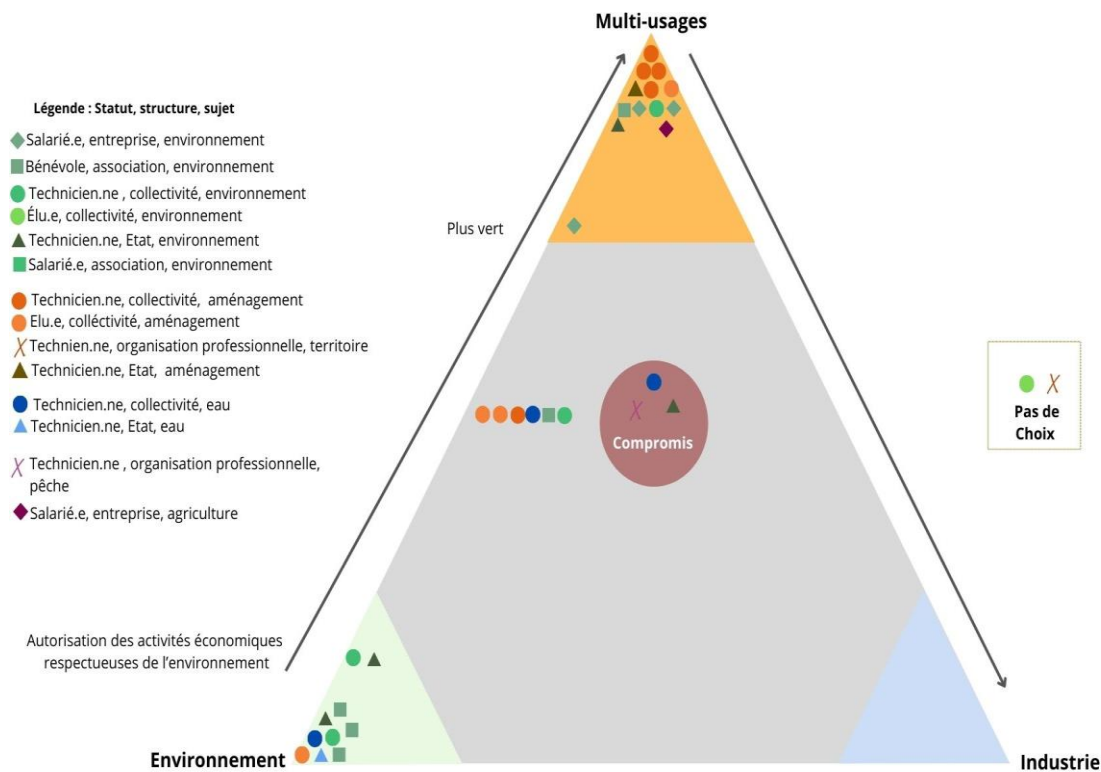


Figure 14. Avis des personnes interviewées sur le futur plausible de l'estuaire de la Loire (enquête BioTroL, Benoit 2024). Le schéma représente les avis des personnes interviewées sur le futur souhaitable de l'estuaire de la Loire. Ils sont regroupés par leur statut, leur structure et leur sujet d'intervention. Les acteurs ayant un sujet environnemental sont dans une colorimétrie verte (sauf les acteurs d'entreprise privée en noir), ceux avec un sujet d'aménagement ou de territoire sont de couleurs orangées, le sujet eau est représenté en bleu et les sujets agriculture et pêche en rose et violet. La forme losange représente les entreprises, le rond représente les collectivités territoriales, le carré regroupe les associations, le triangle regroupe des structures étatiques et les croix sont pour les organisations professionnelles.

À retenir

Les usagers et gestionnaires de l'estuaire de la Loire expriment **des visions hétérogènes quant à ses perspectives d'avenir** :

- une **diversité d'usages** industriels, agricoles, résidentiels, touristiques et environnementaux,
- une **priorisation des activités industrielles**,
- un **respect de l'environnement de plus en plus dominant**.

Cette conception des futurs possibles ne dépend pas de la nature des acteurs.

Les acteurs ayant participé à l'enquête, c'est-à-dire les usagers et gestionnaires de l'estuaire de la Loire, s'entendent sur une vision prospective de l'estuaire, articulée **autour de la pluralité des usages, tout en intégrant une préoccupation majeure pour les enjeux environnementaux**. Cette conception des futurs souhaitables se répartit en deux groupes d'acteurs :

- un groupe manifestant **une préoccupation majeure pour les enjeux environnementaux** : dans ce futur souhaité, la protection de l'environnement et de l'eau occupe une place centrale pour organiser l'ensemble des usages ;
- un groupe suggérant **un territoire organisé où les différents usages sont pris en compte** : dans ce futur souhaité, la conciliation des usages est une priorité, tout en considérant les usages environnementaux tels que ceux liés à la protection de milieux et à la qualité de l'eau.

8.4 Premières pistes de recommandations

Pour concrétiser un futur souhaité, plusieurs axes de réflexion ont émergé à partir des propositions des acteurs rencontrés, permettant ainsi de formuler des recommandations. Ces axes incluent : la temporalité, le territoire pertinent, les acteurs impliqués, la gouvernance, ainsi que les conditions préalables à la mise en œuvre.

- **Temporalité** : Agir dès que possible pour faire face aux changements globaux et à leurs conséquences incertaines.
- **Territoire pertinent** : Définir un périmètre d'action, que ce soit au niveau des bassins versants ou des territoires de planification spatiale, pour intégrer les différents enjeux.
- **Acteurs** : Réunir les acteurs locaux présents dans l'estuaire, l'État, les collectivités territoriales, les acteurs économiques et la société civile en s'assurant que la diversité des avis soit entendue et prise en compte.
- **Gouvernance** : Mettre en place une instance de gouvernance capable de coordonner les actions des divers acteurs. Les avis divergent sur la structure de gouvernance, qu'elle soit existante (l'État, le SYLOA, le Département ou les structures porteuses des SCoT) ou créée ad hoc pour définir un assureur une indépendance vis-à-vis de l'État et du monde économique.
- **Préalable à la mise en œuvre** : Combiner les connaissances scientifiques sur l'estuaire avec les savoirs d'usage des acteurs locaux, pour élaborer un projet de territoire durable. La création d'un espace commun pour centraliser ces données est essentielle afin d'intégrer les enjeux environnementaux et d'enrichir les décisions sur l'avenir de l'estuaire.

À retenir

Les propositions des acteurs rencontrés permettent d'identifier les axes de réflexion pour établir des recommandations pour préserver la biodiversité et la fonction de nourricerie notamment pour les espèces halieutiques de l'estuaire de la Loire :

- Quels acteurs et institutions doivent être impliqués pour engager la préservation de la biodiversité et la fonction de nourricerie ?
- Quelle gouvernance pertinente pour engager la préservation de la biodiversité et la fonction de nourricerie ?
- Quelles conditions préalables sont nécessaires à la mise en place de mesures de protection de la biodiversité et de la fonction de nourricerie ?
- À quelle(s) échelle(s) territoriale(s) intervenir pour engager la préservation de la biodiversité et la fonction de nourricerie ?
- À quelle(s) échéance(s) intervenir pour engager la préservation de la biodiversité et la fonction de nourricerie ?

9. Conclusions et perspectives

Les données historiques concernant les communautés biologiques de l'estuaire de la Loire sont issues de nombreux travaux attestant d'un effort d'étude important, mais se sont révélées éparées dans le temps et l'espace, d'autant que certaines autorisations pour n'ont pu être obtenues pour en disposer. Ceci a limité l'usage de certaines méthodes analytiques demandant une couverture spatio-temporelle régulière. En ce qui concerne les données environnementales, la gestion des stations de suivi par divers établissements a rendu complexe l'accès à ces données en certains points de l'estuaire. Même s'il faut se féliciter aujourd'hui du suivi de l'estuaire par le réseau de mesures en continu SYVEL (GIPLÉ 2023), les couvertures spatiales de l'aval et du secteur externe de l'estuaire ne sont pas assurées.

Le volume de données mobilisées a néanmoins permis de délivrer une vision spatiale sur des laps de temps plus ou moins longs de la biodiversité et de la capacité d'accueil trophique de cet estuaire. Les traits et patrons spatiaux sont partagés avec d'autres estuaires européens. Ce sont des écosystèmes physiquement et chimiquement très contraignants auxquels peu d'espèces sont adaptées. Les faibles variations observées dans les indices de diversité de l'ichtyofaune et du macrobenthos témoignent d'une forme de constance de la biodiversité de ces communautés face à des conditions changeantes. À travers le processus de marinisation, des espèces à affinité marine et plutôt sténohalines sont donc désormais capables de s'introduire dans les sections internes des estuaires et la question se pose sur la compétition notamment trophique avec les espèces plutôt euryèces. À travers le processus de réchauffement climatique, des modifications ont été mises en évidence dans les communautés avec la disparition d'espèces considérées comme boréales.

Les communautés macrobenthiques représentent un maillon important du réseau trophique estuarien. Le processus de production quantifié lors de l'analyse de ces communautés reflète ainsi la fonction de production secondaire de l'écosystème. Bien que fortement variables dans l'espace, les estimations de production ont révélé une certaine constance temporelle attestant d'une forme de stabilité dans la réalisation de cette fonction, et par conséquent dans les transferts énergétiques vers les consommateurs secondaires comme les poissons ou les oiseaux. En effet, la consommation des poissons juvéniles, prédateurs estuariens, renvoie également un signal ne variant pas significativement d'année en année. Cette observation concerne toutefois une période restreinte, couvrant uniquement la dernière décennie.

Les aménagements de l'estuaire ont directement comprimé la quantité de surfaces disponibles pour l'installation et le développement des communautés benthiques, particulièrement au niveau des vasières intertidales. Les flux trophiques pourraient ainsi avoir été bridés, notamment au niveau de la production microphytobenthique (autotrophe) et macrobenthique (secondaire), affectant la capacité d'accueil trophique. Une approche préliminaire a permis d'estimer des diminutions de cette capacité pouvant dépasser 40 % pour les juvéniles de plusieurs espèces de poissons témoignant d'une dégradation de la fonction de nurserie de l'estuaire. Le travail mené renvoie une interrogation sur le devenir de cette fonction dans un contexte de pressions anthropiques de plusieurs origines et de changement global.

L'estuaire de la Loire est aujourd'hui un complexe multi-acteurs avec des multi-usages, composé de plusieurs territoires institutionnels qui s'entrecroisent, entre la planification spatiale à travers les deux SCoT, Rive Nord et Sud, la planification sur l'eau avec le SAGE, les zones Natura 2000, les collectivités territoriales et les intercommunalités. Bien que les enjeux économiques aient pendant longtemps été prioritaires dans l'estuaire de la Loire, les enjeux environnementaux sont toutefois pris

en considération. La protection de la fonction de nourricerie croise les enjeux de biodiversité. Mais la faible considération de mesures de protection des poissons autres qu'amphihalins ne permet pas une véritable protection de cette fonction. De même, sur les enjeux eau, la protection de la fonction de nourricerie est invisibilisée malgré de nombreux sujets communs, la quantité, la qualité de l'eau et l'élévation du niveau de la mer. Certains acteurs environnementaux perçoivent une priorisation des enjeux économiques au profit du Grand Port Maritime avec le soutien de l'État, de la Région et de quelques élus locaux de l'estuaire de la Loire. Toutefois, même si la protection de la fonction de nourricerie n'est pas prioritaire, des initiatives telles que le projet ADAPTO ou encore les tentatives de labélisation de l'estuaire de la Loire témoignent d'une volonté de protéger la richesse écologique de l'estuaire et de s'adapter aux changements climatiques. Le travail initié dans le projet BioTroL va être poursuivi dans le projet RenoLoire qui en est une extension focalisée sur l'élaboration de recommandations pour la préservation de sa fonction de nourricerie. Ce travail s'appuiera sur les avis et propositions des acteurs locaux concernés par les usages actuels de l'estuaire de la Loire et leur gestion.

10. Rapports et valorisations du projet BioTrol

10.1. Mémoires de thèse de Doctorat et de stages de Master

Romain Lécuyer (2024). Évolution de la biodiversité et de la capacité d'accueil trophique de la nurricerie de l'estuaire de la Loire. Thèse de Doctorat de l'Institut Agro Rennes-Angers, spécialité Ecologie Marine. 197p. Accessible sur HAL : <https://theses.hal.science/tel-04921718v1>.

Claire Pollet (2022). Variabilité interannuelle de la capacité d'accueil trophique des nurriceries estuariennes de juvéniles de poissons benthodémersaux en Seine et en Loire. Mémoire de Master Sciences de la Mer Université du Littoral Côte d'Opale. 41p

Felipe March (2024). Contribution des habitats de l'estuaire de la Loire à l'alimentation des juvéniles de poissons. Mémoire de Master Sciences Biologiques Marines, Université de Bretagne Occidentale. 42p

Armand Benoit (2024). L'estuaire de la Loire et la protection de la fonction de nurricerie, face à une difficile conciliation d'acteurs et d'enjeux dans toutes ses dimensions écologique, économique et sociale, provoquant un manque de gouvernance locale. Mémoire de Master Gestion sociale de l'environnement et valorisation des ressources territoriales Institut National Universitaire Champollion. 125p

Michaël Demortier (2022). Mémoire de Master 1. Biodiversité, Écologie, Evolution. Université de Lille, 25p.

10.2. Articles dans des revues scientifiques

Publiés ou sous presse

Romain Lécuyer, Anne-Laure Barillé, Anik Brind'Amour & Hervé Le Bris (sous presse). Étude diachronique des communautés de macro-invertébrés benthiques de substrat meuble de l'estuaire de la Loire sur plus d'un siècle. Bulletin de la Société des Sciences Naturelles de l'Ouest de la France (sous presse).

Romain Lécuyer, Anne-Laure Barillé, Hervé Le Bris & Anik Brind'Amour (2024). Evolution of benthodemersal fish communities in a changing European estuary at fine and broad temporal scales. Estuarine, Coastal and Shelf Science 301: 108738. doi : 10.1016/j.ecss.2024.108738

Romain Lécuyer, Anik Brind'Amour, Anne-Laure Barillé, Bastien Chouquet & Hervé Le Bris (2024). Thriving life beneath: Biodiversity and functioning of macrobenthic communities within two human-shaped European estuaries. Journal of Sea Research 202: 102545. doi : 10.1016/j.seares.2024.102545

Gabin Droual, Romain Lécuyer & Jean-Philippe Pezy (2024). First observation of the non-indigenous mysid *Neomysis americana* (S.I. Smith, 1873) in the Loire estuary. BioInvasions Records 13 (3): 755 - 766. Doi : 10.3391/bir.2024.13.3.14

En préparation

Romain Lécuyer, Hervé Le Bris, Anne-Laure Barillé, Claire Pollet & Anik Brind'Amour (in prep.). The nursery function of a Western European estuary: Is the food supply sustaining juvenile fish under human-induced pressures? En préparation pour Fish and Fisheries.

Romain Lécuyer, Anik Brind'Amour, Anne-Laure Barillé & Hervé Le Bris (in prep.). A multi-compartment analysis of the biodiversity and food web structure in the ecosystem of a large European estuary. En préparation pour Regional Studies in Marine Science.

10.3. Communications scientifiques

Orales

Romain Lécuyer, Hervé Le Bris, Anik Brind'Amour, Anne-Laure Barillé & Marie Lesueur (2021). Biodiversité de l'ichtyofaune dans l'estuaire de la Loire – premier point sur les communautés de poissons. 11^{ème} édition de la demi-journée scientifique Rencontre autour de la Loire (9 décembre 2021). Nantes, France : Groupement d'Intérêt Public (GIP) Loire Estuaire.

Romain Lécuyer (2022). Dynamique de la faune piscicole estuarienne sous pression anthropique – cas d'étude de l'estuaire de la Loire sur quatre décennies. Séminaire DECODages (24 novembre 2022). Rennes, France : L'Institut Agro Rennes-Angers.

Anne-Laure Barillé & Romain Lécuyer (2024). L'estuaire de la Loire et les enjeux à l'heure des changements climatiques. Cours bénévole (23 février 2024). Nantes, France : Université Permanente.

Posters

Romain Lécuyer, Anik Brind'Amour, Anne-Laure Barillé & Hervé Le Bris (2022). Dynamique de l'ichtyofaune benthodémersale de l'estuaire de la Loire : influence hydrosédimentaire et thermique. 15^{ème} colloque de l'Association Française d'Halieutique (29 juin - 1er juillet 2022). Brest, France.

Romain Lécuyer, Anik Brind'Amour, Anne-Laure Barillé & Hervé Le Bris (2022). Estuarine benthodemersal fish dynamics in response to environmental pressures : the case study of the Loire estuary (France). 59^{ème} conférence de l'Estuarine & Coastal Sciences Association (5 - 8 septembre 2022). San Sebastián, Espagne.

Références citées

- Albaret J.-J. & Ecoutin J.-M. (1991). Communication mer-lagune : impact d'une réouverture sur l'ichtyofaune de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *Journal Ivoirien d'Océanologie et de Limnologie* 1 (novembre) : 99-109.
- Barletta M., Cysneiros F.J.A. & Lima A.R.A. (2016). Effects of dredging operations on the demersal fish fauna of a South American tropical–subtropical transition estuary. *Journal of Fish Biology* 89 (juillet) : 890-920.
- Barone, S., Mayaux, P.-L. (2019). *Les Politiques de l'eau*. LGDJ, Issy-les-Moulineaux, 153 p.
- Beck, M. W., Heck, K. L., Able, K. W., Childers, D. L., Eggleston, D. B., Gillanders, B. M., *et al.*, (2001). The identification, conservation, and management of estuarine and marine nurseries for fish and invertebrates: a better understanding of the habitats that serve as nurseries for marine species and the factors that create site-specific variability in nursery quality will improve conservation and management of these areas. *Bioscience*, 51(8), 633-641.
- Benoit A. (2024). L'estuaire de la Loire et la protection de la fonction de nourricerie, face à une difficile conciliation d'acteurs et d'enjeux dans toutes ses dimensions écologique, économique et sociale, provoquant un manque de gouvernance locale. Mémoire de Master Gestion sociale de l'environnement et valorisation des ressources territoriales Institut National Universitaire Champollion. 125p
- Benyoucef I., Blandin E., Lerouxel A., Jesus B., Rosa P., Méléder V., Launeau P. & Barillé L. (2014). Microphytobenthos interannual variations in a north-European estuary (Loire estuary, France) detected by visible-infrared multispectral remote sensing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 136 : 43-52.
- Bezes, P., Le Lidec, P. (2010). L'hybridation du modèle territorial français. *Revue française d'administration publique* 136, 919.
- Bio-Littoral, 2015. Nourricerie de poissons et de crevettes en estuaire de la Loire - Evolution et perspectives. Projet SMIDAP-NOURELEP. Rapport d'étude financée par la région des Pays de la Loire et l'Agence de l'Eau Loire Bretagne. 79p.
- Borja A., Aguirrezabalaga F., Martínez J., Sola J.C., García-Arberas L. & Gorostiaga J.M. (2004). Benthic communities, biogeography and resources management. Dans *Oceanography and Marine Environment of the Basque country.*, 70 : 531-47. Elsevier Oceanography Series.
- Boyes S. & Elliott M. (2006). Organic matter and nutrient inputs to the Humber Estuary, England. *Marine Pollution Bulletin* 53 (janvier) : 136-43.
- Boynton W.R., Hagy J.D., Cornwell J.C., Kemp W.M., Greene S.M., Owens M.S., Baker J.E. & Larsen R.K. (2008). Nutrient Budgets and Management Actions in the Patuxent River Estuary, Maryland. *Estuaries and Coasts* 31 (septembre) : 623-51.
- Brossard C. & Gallenne B. (1984). Aménagement et évolution de la Loire au niveau de Nantes : influence du bassin de marée en amont. Dans *L'hydraulique et la maîtrise du littoral. Problèmes côtiers posés par le mouvement des sédiments et la pollution.*, 5 : 1-7. Société Hydrotechnique de France.
- Cabanne C. (1972). Regards sur l'aménagement de l'estuaire de la Loire. *L'Espace géographique* 1 : 269-74.
- Chaalali A., Beaugrand G., Boët P. & Sautour B. (2013a). Climate-Caused Abrupt Shifts in a European Macrotidal Estuary. *Estuaries and Coasts* 36 (novembre) : 1193-1205.
- Chambers M.R. & Milne H. (1975). The production of *Macoma balthica* (L.) in the Ythan Estuary. *Estuarine and Coastal Marine Science* 3 (octobre) : 443-55.
- Chevillot X., Drouineau H., Lambert P., Carassou L., Sautour B. & Lobry J. (2017). Toward a phenological mismatch in estuarine pelagic food web? *PLoS ONE* 12 (mars) : e0173752.

- Ciffroy P., Reyss J.L. & Siclet F. (2003). Determination of the residence time of suspended particles in the turbidity maximum of the Loire estuary by ⁷Be analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 57 (juillet) : 553-68.
- Coëffé V. & Morice J.-R. (2013). Patrimoine et création dans la fabrique territoriale : l'estuaire ligérien ou la construction d'un territoire métropolitain. *Norois* 228 (septembre) : 77-88.
- Costoya X., deCastro M., Gómez-Gesteira M. & Santos F. (2015). Changes in sea surface temperature seasonality in the Bay of Biscay over the last decades (1982–2014). *Journal of Marine Systems* 150 (octobre) : 91-101.
- CSEEL, 1984. Rapport final du comité scientifique pour l'environnement de l'estuaire de la Loire. Rapports Scientifiques et Techniques, n° 55, Publications du CNEXO, Brest, France.
- Cuvilliez A., Deloffre J., Lafite R. & Bessineton C. (2009). Morphological responses of an estuarine intertidal mudflat to constructions since 1978 to 2005: The Seine estuary (France). *Geomorphology* 104 (mars) : 165-74.
- Dauvin, J. C., Bachelet, G., Barillé, A. L., Blanchet, H., De Montaudouin, X., Lavesque, N., & Ruellet, T. (2009). Benthic indicators and index approaches in the three main estuaries along the French Atlantic coast (Seine, Loire and Gironde). *Marine Ecology*, 30(2), 228-240.
- David V., Sautour B. & Chardy P. (2007). Successful colonization of the calanoid copepod *Acartia tonsa* in the oligo-mesohaline area of the Gironde estuary (SW France) – Natural or anthropogenic forcing? *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 71 (février) : 429-42.
- Demaure J.-C. (1979). Les contraintes écologiques à l'aménagement de l'estuaire de la Loire. *Penn ar Bed* 97 (juin) : 57-72.
- Devienne B. (2021). Cartographie de la dynamique spatio-temporelle du panache turbide dans l'estuaire de la Loire par télédétection (Landsat-8 et Sentinel-2) et compréhension de sa relation avec les facteurs environnementaux. Université de Nantes, 34 p.
- Duffy J.E., Cardinale B.J., France K.E., McIntyre P.B., Thébault E. & Loreau M. (2007). The functional role of biodiversity in ecosystems: incorporating trophic complexity. *Ecology Letters* 10 (juin) : 522-38.
- Durand M., Mojtahid M., Maillet G.M., Proust J.-N., Lehay D., Ehrhold A., Barré A. & Howa H. (2016). Mid- to late-Holocene environmental evolution of the Loire estuary as observed from sedimentary characteristics and benthic foraminiferal assemblages. *Journal of Sea Research* 118 (décembre) : 17-34.
- Epstein, R. (2015). La gouvernance territoriale : une affaire d'État La dimension verticale de la construction de l'action collective dans les territoires. *L'Année sociologique* 65, 457–482.
- Fattal P. (2002). L'émergence de la notion d'environnement dans l'estuaire de la Loire. *Actes des congrès nationaux des sociétés historiques et scientifiques* 124 : 275-85.
- Figueres G., Martin J.M., Meybeck M. & Seyler P. (1985). A comparative study of mercury contamination in the Tagus estuary (Portugal) and major French estuaries (Gironde, Loire, Rhône). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 20 (février) : 183-203.
- Fosshem M., Primicerio R., Johannesen E., Ingvaldsen R.B., Aschan M.M. & Dolgov A.V. (2015). Recent warming leads to a rapid borealization of fish communities in the Arctic. *Nature Climate Change* 5 (juillet) : 673-77.
- França S., Vinagre C., Pardal M.A. & Cabral H.N. (2009). Spatial and temporal patterns of benthic invertebrates in the Tagus estuary, Portugal: comparison between subtidal and an intertidal mudflat. *Scientia Marina* 73 (juin) : 307-18.
- Gallenne B. (1974). Study of fine material in suspension in the estuary of the Loire and its dynamic grading. *Estuarine and Coastal Marine Science* 2 (juillet) : 261-72.
- GIPLE (2021). Cahier 2002 Indicateurs : La salinité de l'eau. GIP Loire Estuaire, 7 p.

- GIPLE (2023). Le réseau de mesure SYVEL (SYstème de Veille dans l'Estuaire de la Loire). GIP Loire Estuaire.
- Gómez J.M., González-Megías A., Armas C., Narbona E., Navarro L. & Perfectti F. (2023). The role of phenotypic plasticity in shaping ecological networks. *Ecology Letters* 26 (septembre) : S47-61.
- IGEDD (2023). « Rapport territorial pour la protection et la valorisation des zones humides, et la création d'un parc national. Rapport n°014422-01.
- IMPEL (2008). Déversement de fioul dans un estuaire au cours d'une opération de transfert. IMPEL, Ministère du développement durable, DGPR / SRT / BARPI, DREAL Pays de la Loire, 6 p.
- Ingleton T. & McMinn A. (2012). Thermal plume effects: A multi-disciplinary approach for assessing effects of thermal pollution on estuaries using benthic diatoms and satellite imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 99 (mars) : 132-44.
- Jalón-Rojas I., Schmidt S. & Sottolichio A. (2017). Comparison of environmental forcings affecting suspended sediments variability in two macrotidal, highly-turbid estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 198 (novembre) : 529-41.
- Jalón-Rojas I., Schmidt S., Sottolichio A. & Bertier C. (2016). Tracking the turbidity maximum zone in the Loire Estuary (France) based on a long-term, high-resolution and high-frequency monitoring network. *Continental Shelf Research* 117 (avril) : 1-11.
- Laidin C., Berriet-Sollic M. (2022). Understanding rural development policies: a proposal for a typology of the seven main policy repertoires in Europe and locally, based on French case studies, *The Annals of Regional Science* Published online 24.
- Lanoux A., Etcheber H., Schmidt S., Sottolichio A., Chabaud G., Richard M. & Abril G. (2013). Factors contributing to hypoxia in a highly turbid, macrotidal estuary (the Gironde, France). *Environmental Science : Processes & Impacts* 15 : 585.
- Larue J.-P. (2004). Morphodynamique fluviale actuelle d'origine anthropique : exemples dans le bassin de la Loire (France). *Géomorphologie relief processus environnement* 10 : 127-38.
- Lazure, P., & Jégou, A. M., 1998. 3D modelling of seasonal evolution of Loire and Gironde plumes on Biscay Bay continental shelf. *Oceanologica acta*, 21(2), 165-177.
- Le Dez M., Sawtschuk J. & Bioret F. (2017). Les prairies de l'estuaire de la Loire : étude de la dynamique de la végétation de 1982 à 2014. *Mappemonde* 119 : 1-18.
- Le Douarec P. (1978). L'intrusion saline dans l'estuaire interne de la Loire. Étude du front de salinité et de ses variations saisonnières. Thèse de doctorat, 197 p.
- Le Hir et Walther, 2016. Trajectoires hydromorphologiques possibles de l'estuaire et conséquences sur son fonctionnement. In : *La Loire fluviale et estuarienne : un milieu en évolution*. Moatar, F., & Dupont, N. Coord, Ed. Quae, p 206-267.
- Le Lidec, P. (2007). Le jeu du compromis : l'Etat et les collectivités territoriales dans la décentralisation en France. *Revue française d'administration publique* n° 121-122, 111-130.
- Le Normant C. (2000). Three-dimensional modelling of cohesive sediment transport in the Loire estuary. *Hydrological Processes* 14 (septembre) : 2231-43.
- Lécuyer R. (2024a). Évolution de la biodiversité et de la capacité d'accueil trophique de la nourricerie de l'estuaire de la Loire. Thèse de doctorat de l'Institut Agro Rennes-Angers, spécialité Ecologie Marine. 197p.
- Lécuyer R. (2024 b). Évolution de la biodiversité et de la capacité d'accueil trophique de la nourricerie de l'estuaire de la Loire. Support de la soutenance de Thèse de doctorat de l'Institut Agro Rennes-Angers, spécialité Ecologie Marine. 111 diapositives.
- Lécuyer R., Barillé A.-L., Le Bris H. & Brind'Amour A. (2024a). Evolution of benthodemersal fish communities in a changing European estuary at fine and broad temporal scales. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 301 (juin) : 108738.

- Lécuyer, R., Brind'Amour, A., Barillé, A. L., Chouquet, B., & Le Bris, H. (2024b). Thriving life beneath: Biodiversity and functioning of macrobenthic communities within two human-shaped European estuaries. *Journal of Sea Research*, 202, 102545.
- Lécuyer R., Barillé A.-L., Le Bris H. & Brind'Amour A. (sous presse). Étude diachronique des communautés de macro-invertébrés benthiques de substrat meuble de l'estuaire de la Loire sur plus d'un siècle. *Bulletin de la Société des Sciences Naturelles de l'Ouest de la France* (Sous presse)
- Llopiz J.K., Cowen R.K., Hauff M.J., Ji R., Munday P.L., Muhling B.A., Peck M.A., Richardson D.E., Sogard S. & Sponaugle S. (2014). Early life history and fisheries oceanography new questions in a changing world. *Oceanography* 27 (décembre) : 26-41.
- Lunven, M., Guillaud, J. F., Youéno, A., Crassous, M. P., Berric, R., Le Gall, E., ... & Aminot, A. (2005). Nutrient and phytoplankton distribution in the Loire River plume (Bay of Biscay, France) resolved by a new Fine Scale Sampler. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 65(1-2), 94-108.
- Maquet J.-F. (1974). Aménagement de l'estuaire de la Loire. *La Houille Blanche* 60 (janvier) : 79-89.
- Marchand J. (1993). The influence of seasonal salinity and turbidity maximum variations on the nursery function of the Loire estuary (France). *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* 27 (juin) : 427-36.
- Marchand J. et Elie P., 1983a. Contribution à l'étude des peuplements benthiques de l'estuaire de la Loire. Examens particuliers de la dynamique et la production de la macrofaune benthique et de la dynamique des biomasses microphytobenthiques. *Rapport CSEEL*, 3 : 1-128.
- Marchand J. et Elie P., 1983 b. Contribution à l'étude des ressources benthodémersales de l'estuaire de la Loire : Biologie et écologie des principales espèces. *Rapport CSEEL*, 4 : 1-159.
- Maurice L. (1994). Biodégradabilité de la matière organique dans le bouchon vaseux et la crème de vase de l'estuaire de la Loire. *Oceanologica Acta* 17 (janvier) : 501-16.
- McLean M., Mouillot D., Maureaud A.A., Hattab T., MacNeil M.A., Goberville E., Lindegren M., Engelhard G., Pinsky M. & Auber A. (2021). Disentangling tropicalization and deborealization in marine ecosystems under climate change. *Current Biology* 31 (novembre) : 4817-4823.e5.
- McLean M.J., Mouillot D., Goascoz N., Schlaich I. & Auber A. (2019). Functional reorganization of marine fish nurseries under climate warming. *Global Change Biology* 25 (février) : 660-74.
- McLusky D.S. & Elliott M. (2004). *The Estuarine Ecosystem*. 3e éd. Oxford : Oxford University Press.
- Meybeck M., Cauwet G., Dessery S., Somville M., Gouleau D. & Billen G. (1988). Nutrients (organic C, P, N, Si) in the eutrophic River Loire (France) and its estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 27 (décembre) : 595-624.
- Migniot C. & Le Hir P. (1994). Rapport de synthèse : l'hydrosédimentaire. Association pour la Protection de l'Environnement de l'Estuaire de la Loire, 95 p.
- Muller P. (2010). Référentiel, *in* : L. Boussagnet, S. Jacquot, P. Ravinet (Eds.), *Dictionnaire des politiques publiques*, 3e Edition, Presses de Sciences Po, Paris : 555-562.
- Neuheimer A.B. & Taggart C.T. (2007). The growing degree-day and fish size-at-age: The overlooked metric. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 64 (février) : 375-85.
- Pasquaud S., Vasconcelos R.P., França S., Henriques S., Costa M.J. & Cabral H.N. (2015). Worldwide patterns of fish biodiversity in estuaries: Effect of global vs. local factors. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 154 (mars) : 122-28.
- Pasquier, R., Simoulin, V., Weisbein, J. (2013). *La gouvernance territoriale : pratiques, discours et théories*. L.G.D.J., Paris, France.
- République française (2014). *Loire aujourd'hui, Loire demain, un pacte pour l'estuaire*, Document de travail, Préfecture de Loire atlantique, 14 p.

- République française (2016). Dossier de demande de prise en considération du projet de réserve naturelle nationale en Basse-Loire estuarienne, Préfecture de la Région des Pays de la Loire, 154 p.
- Rochette S., Rivot E., Morin J., Mackinson S., Riou P. & Le Pape O. (2010). Effect of nursery habitat degradation on flatfish population: Application to *Solea solea* in the Eastern Channel (Western Europe). *Journal of Sea Research* 64 (juillet) : 34-44.
- Saliot A., Lorre A., Marty J.-C., Scribe P., Tronczynski J., Meybeck M., Dessery S., Marchand M., Caprais J.-C., Cauwet G., Etcheber H., Relexans J.C., Ewald M., Berger P., Belin C., Gouleau D., Billen G. & Somville M. (1984). Biogéochimie de la matière organique en milieu estuarien : stratégies d'échantillonnage et de recherche élaborées en Loire (France). *Oceanologica Acta* 7 (janvier) : 191-207.
- Sanderson M.G., Hemming D.L. & Betts R.A. (2011). Regional temperature and precipitation changes under high-end (sup. 4°C) global warming. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* 369 (janvier) : 85-98.
- Saulnier E., Le Bris H., Tableau A., Dauvin J.-C. & Brind'Amour A. (2020). Food limitation of juvenile marine fish in a coastal and estuarine nursery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 241 (août) : 106670.
- Schelske C.L. & Odum E.P. (1962). Mechanisms Maintaining High Productivity in Georgia Estuaries. Dans *Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute.*, 75-80, 75-80 p.
- Schmidt S., Diallo I.I., Derriennic H., Fallou H. & Lepage M. (2019). Exploring the susceptibility of turbid estuaries to hypoxia as a prerequisite to designing a pertinent monitoring strategy of dissolved oxygen. *Frontiers in Marine Science* 6 (juin) : 352.
- Schneider C., Laizé C.L.R., Acreman M.C. & Flörke M. (2013). How will climate change modify river flow regimes in Europe? *Hydrology and Earth System Sciences* 17 (janvier) : 325-39.
- Tableau A., Le Bris H., Saulnier E., Le Pape O. & Brind'Amour A. (2019). Novel approach for testing the food limitation hypothesis in estuarine and coastal fish nurseries. *Marine Ecology Progress Series* 629 (octobre) : 117-31.
- Tableau, A., Le Bris, H., & Brind'Amour, A., 2015. Available Benthic Energy Coefficient (ABEC): a generic tool to estimate the food profitability in coastal fish nurseries. *Marine Ecology Progress Series*, 522, 203-218.
- Trimoreau, E., Archambault, B., Brind'Amour, A., Lepage, M., Guitton, J., & Le Pape, O. (2013). A quantitative estimate of the function of soft-bottom sheltered coastal areas as essential flatfish nursery habitat. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 133, 193-205.
- Underwood G.J.C. & Kromkamp J. (1999). Primary Production by Phytoplankton and Microphytobenthos in Estuaries. Dans *Advances in Ecological Research.*, 29 : 93-153. Academic Press Inc.
- Weckström K., Saunders K.M., Gell P.A. & Skilbeck C.G. (2017). *Applications of Paleoenvironmental Techniques in Estuarine Studies*. Dordrecht : Springer Netherlands.

Réalisation, mise en page : Pôle halieutique, mer et littoral de L'Institut Agro

ISSN 2116-8709 (en ligne)

ISSN 2260-0922 (papier)

© 2024, Pôle halieutique, mer et littoral de L'Institut Agro. Tous droits de reproduction, même partielle, par quelque procédé que ce soit, sont réservés pour tous les pays

Crédit photos : L'Institut Agro Rennes-Angers

L'estuaire de la Loire, l'un des plus grands estuaires français, joue un rôle écologique majeur en tant que nourricerie pour de nombreuses espèces marines et d'eau douce. Pourtant, cet écosystème fragile est soumis à des pressions croissantes : changements climatiques, aménagements humains, pollution et diminution des débits fluviaux. Ces perturbations menacent sa biodiversité et sa capacité à accueillir les juvéniles de poissons, essentiels au renouvellement des stocks halieutiques du golfe de Gascogne.

Le projet BioTroL, mené par L'Institut Agro, l'Ifremer et le bureau d'étude Bio-Littoral, dresse un bilan de l'évolution de la biodiversité et de la fonction de nourricerie de l'estuaire sur plus de 40 ans. À travers une analyse rigoureuse des données historiques et des campagnes récentes ainsi qu'une enquête auprès des usagers et gestionnaires, ce rapport révèle les impacts des changements environnementaux et propose des pistes pour préserver cet écosystème vital.

En combinant écologie marine et sciences sociales, BioTroL éclaire les défis de la gestion durable de l'estuaire et formule des pistes de recommandations pour concilier activités humaines et protection de la biodiversité.

AUTEURS

Hervé LE BRIS, L'Institut Agro
Rennes-Angers (UMR DECOD),
Rennes

Catherine LAIDIN, L'Institut Agro
Rennes-Angers (UMR ESO),
Rennes.

Romain LÉCUYER, doctorant
(UMR DECOD), Nantes, Rennes

Anne-Laure BARILLÉ, Bio-Littoral,
Nantes

Anik BRIND'AMOUR, Ifremer
(UMR DECOD), Nantes

CONTACTS

- **L'Institut Agro**

Hervé LE BRIS : herve.lebris@agrocampus-ouest.fr
Catherine LAIDIN : catherine.laidin@agrocampus-ouest.fr

- **Ifremer**

Anik BRIND'AMOUR : anik.brindamour@ifremer.fr

- **Bio-Littoral**

Anne-Laure BARILLÉ : al.barille@bio-littoral.fr

Pôle halieutique
L'Institut Agro

65 rue de Saint Briec
CS 84215 • 35 042 Rennes Cedex

<https://halieutique.institut-agro.fr/>

ISSN 2116-8709 (en ligne)
ISSN 2260-0922 (papier)