

INGÉNIEURS, GESTIONNAIRES, TECHNICIENS, CHERCHEURS

J.-P. DUCROTOY



# Les milieux estuariens et littoraux

Une approche scientifique pour les préserver  
et les exploiter durablement



**L**avoisier  
TEC & DOC

# Les milieux estuariens et littoraux

Une approche scientifique pour les préserver  
et les exploiter

## Du même auteur

*La restauration écologique des estuaires*

J.P. Ducrottoy, 2010

## Dans la même collection

*Dictionnaire – Collectivités territoriales et développement durable*

J.-L. Pissaloux, 2017

*Biomarqueurs en écotoxicologie aquatique*

J.-C. Amiard, C. Amiard-Triquet Claude, 2e édition, 2017

*Les risques chimiques environnementaux*

J.-C. Amiard, 2016

*Naturalité des eaux et des forêts*

D. Vallauri, C. Chauvin, J.-J. Brun, M. Fuhr, N. Sardat, J. A., R. Eynard-Machet, M. Rossi et J.-P. De Palma. Avec le concours de WWF, IRSTEA et REFORA.

*Déchets et économie circulaire*

M-A Marcoux, F. Olivier, F. Théry, Association RECORD, 2016

*Écologie et aménagement des eaux marines – le potentiel des océans et des mers*

G. Barnabé, 2016

*Droit de l'environnement – Comprendre et appliquer la réglementation*

Ph. Malingrey, 2016

*Changement climatique et cycle de l'eau – Impact, adaptation, législation et avancées scientifiques*

I. La Jeunesse, Ph. Quevauvillier, 2015

JEAN-PAUL **DU**CROTOY



# Les milieux estuariens et littoraux

Une approche scientifique pour les préserver  
et les exploiter durablement

*Lavoisier*  
**TEC & DOC**

editions.lavoisier.fr

*Direction éditoriale* : Fabienne Roulleaux  
*Fabrication* : Estelle Perez  
*Couverture* : Nord Compo  
*Illustrations de couverture* : J.P. Ducrotoy  
*Composition* : Nord Compo, Villeneuve-d'Ascq

Pour plus d'informations sur nos publications :



[newsletters.lavoisier.fr/9782743023393](https://newsletters.lavoisier.fr/9782743023393)

Copyright 2018 Lavoisier  
ISBN : 978-2-7430-2339-3

## REMERCIEMENTS

---

Mes remerciements vont tout d'abord à mes collègues de l'Université de Picardie Jules Verne qui ont relu et examiné le manuscrit avec beaucoup de perspicacité et d'application :

- Dr Jean Rasneur, maître de conférences en chimie
- Dr Geoffroy Mahieux, maître de conférences en géologie
- Dr Vincent Caron, maître de conférences en géologie

Ils m'ont aussi fourni des illustrations qui m'ont servi à synthétiser certaines informations.

Monsieur Gérard Griffon, professeur de sciences naturelles, m'a beaucoup aidé en clarifiant certains aspects concernant la faune et la flore mais aussi la lisibilité des textes portant sur la législation et la gestion des milieux naturels. Quant à Madame Catherine de la Bigne, responsable pour l'enseignement supérieur et les conférences à l'Institut océanographique de Paris, sa grande expérience de l'édition scientifique s'est avérée un atout majeur pour assurer la qualité de la publication. Je les remercie vivement tous deux pour leur diligence.

Une vue d'ensemble de l'ouvrage m'a été procurée par Monsieur Axel Romaña, ancien directeur du service Environnement côtier à l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER). Il a rédigé la préface de ce livre et je lui en sais gré.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à l'équipe des Editions Lavoisier pour ses encouragements au cours de la rédaction du livre et pour leur professionnalisme au cours de sa publication.

Enfin, c'est avec joie que j'exprime ma gratitude à ma famille, non seulement pour leur soutien moral durant la rédaction de l'ouvrage, mais aussi pour leurs critiques positives des textes scientifiques.



## PRÉFACE

---

Parmi les éléments structurant le littoral, mon regard de scientifique a toujours préféré les estuaires et deltas, vite identifiés comme des milieux extraordinaires et passionnants. Passionnants pour les chercheurs qui s'intéressent à l'acquisition de connaissances d'une façon générale, mais aussi pour ceux qui, au-delà, cherchent à ce que celles-ci puissent conduire à une prise de décision publique cohérente et compétente. C'est surtout à eux que s'adressera cette réflexion succincte...

Quand en France, les habitants de Rouen, de Nantes ou de Bordeaux se promènent le long des berges de leur fleuve, ils peuvent remarquer deux phénomènes caractéristiques qui différencient un estuaire de la plupart des cours d'eau : les eaux coulent vers l'amont deux fois par jour et, à certaines périodes de l'année, les eaux deviennent extrêmement turbides au point que si l'on y plonge sa main, elle disparaît sous quelques centimètres d'eau seulement. Et ce ne sont pas les crues qui apportent ce limon puisqu'à quelques dizaines de kilomètres en amont se trouvent des eaux plus claires.

Ces deux phénomènes sont liés entre eux, et révèlent les caractéristiques fondamentales de la présence d'un estuaire macro-tidal (importante amplitude des marées), qui leur confèrent une place à part dans les différents biotopes littoraux : d'une part l'effet de la marée sur les courants, d'autre part la présence d'un maximum de turbidité appelée communément par les scientifiques « bouchon vaseux ».

En termes de sémantique, et parmi les nombreuses définitions, le Petit Robert indiquait :

*ESTUAIRE, n. m. (XV<sup>e</sup>, rare avant 1846 ; lat. oestuarium, de oestus « mouvement des flots ») Embouchure d'un cours d'eau, dessinant dans le rivage une sorte de golfe évasé et profond.*

Donald W. Pritchard, grand spécialiste des estuaires, donnait en 1967 une autre définition, plus précise, basée sur des considérations scientifiques :

*Un estuaire est constitué par une masse d'eau confinée ayant une connexion libre avec la mer ouverte et à l'intérieur duquel l'eau de mer est diluée d'une façon mesurable avec de l'eau douce issue du drainage du bassin versant.*

Dans ces deux définitions, ont été volontairement soulignés les mots qui caractérisent le mieux ce milieu particulier. Il est intéressant de remarquer que le mot « marée » n'a pas été cité, c'est pourtant elle qui est le « moteur » principal de son fonctionnement, et qui lui confère sa spécificité.

C'est aussi l'énergie introduite par la marée qui façonne l'intérieur de l'estuaire, le rendant « évasé ». En effet, dans tous les estuaires qui n'ont pas été aménagés par l'homme, la section mouillée<sup>1</sup> croît d'une façon exponentielle de l'amont vers l'aval : c'est la **loi des sections**... Elle est une caractéristique des estuaires !

C'est la distance de la pénétration de la marée dynamique qui fixe la limite amont de l'estuaire. Le terme « profond » dans la définition veut traduire ici les grandes distances concernées par la marée : entre 100 et 200 km dans les grands estuaires français, quelques dizaines de kilomètres pour les petits. Au-delà, on retrouve les

---

1. Quand on coupe perpendiculairement un estuaire par un plan, à un moment de la marée, la section mouillée correspond à la surface occupée par l'eau, exprimée en m<sup>2</sup>.



eaux « issues du drainage du bassin versant ». Ce sont ces eaux qui définiront plus tard la qualité des eaux estuariennes.

Plus aucun doute aujourd'hui qu'un estuaire doit sa richesse à sa capacité à stocker les vases dans son sein. Le cycle de vases conduit à des échanges entre les trois milieux caractéristiques que sont le « bouchon vaseux », les zones humides et les vasières intertidales et/ou subtidales. Enfin, toujours du fait de la présence de la marée, c'est un milieu réagissant **globalement** à toute modification introduite par les aménagements et/ou les apports, qu'ils soient sédimentaires ou chimiques. Bouleverser le fonctionnement d'une partie de l'estuaire conduit à bouleverser celui de la totalité.

Au-delà des définitions encyclopédiques, et selon l'angle de vue que l'on prend, il y a des nombreuses interprétations de ce milieu particulier :

- D'abord l'estuaire des **hydrologues et sédimentologues** : ce sont les premiers qui se sont penchés sur son fonctionnement physique... Il fallait éviter les problèmes posés à la circulation et à la sécurité des bateaux, confrontés aux courants de marée, mascarets, divagation des chenaux, bancs de sable et autres empêchements à la navigation.
- Ensuite l'estuaire des **oiseaux** : terrain de jeu exceptionnel pour les ornithologues, il réunit pour une grande quantité d'espèces les meilleures conditions pour séjourner, s'alimenter, se reproduire...
- Puis l'estuaire des **pêcheurs** : grands connaisseurs de leur nature, exceptionnels observateurs et vigiles de leur évolution, ce sont eux qui tirent les sonnettes d'alarme quand ils voient leurs maigres ressources fondre, conséquence des aménagements et/ou de la qualité déficiente des eaux...
- L'estuaire des **villes**, qui ont trouvé ici une position avantageuse en tant que portes d'entrée et interfaces entre le littoral et l'intérieur des terres.
- L'estuaire des ports : interconnexion entre la navigation maritime et les autres modes de transports (fluvial, routier ou ferroviaire) ils sont souvent inadaptés à la navigation maritime moderne en raison des faibles tirants d'eau et de l'étroitesse des chenaux navigables permettant la remontée vers l'amont de bateaux de plus en plus grands. De ce fait ils procèdent à des endiguements pour éviter les divagations des chenaux, et procèdent à leur entretien par des dragages incessants. De plus, leur souci principal concerne la mise à disposition de quais, de terrepleins d'arrière-port connectés avec les autres transports, de plateformes destinées aux industriels, et tout ceci sur des surfaces souvent prises sur le milieu aquatique. Ils deviennent ainsi les principaux aménageurs des estuaires...
- L'estuaire des **industriels** : qui accompagne le développement portuaire parfois avec une emprise croissante de l'industrie lourde.
- L'estuaire des **sigles** : les densités de population sur les rives, l'accroissement de l'implantation des activités humaines a conduit les États et la France en particulier, à organiser le territoire autour des estuaires ! C'est ainsi qu'on a vu s'instaurer des millefeuilles de réglementations... Dans le désordre on peut citer les DTA (Directives Territoriales d'Aménagement), les SCoT (Schémas de Cohérence Territoriale), les PLU (Plan locaux d'urbanisme)...
- L'estuaire des **paysages** : d'une grande beauté, marqués d'amont en aval par l'omniprésence de l'eau, au contact de la terre, elle a façonné des milliers d'hectares de zones humides renfermant une incroyable richesse de milieux et d'espèces végétales et animales...

- L'estuaire **des loisirs et des artistes** : où, attirés par un environnement singulier, une luminosité extraordinaire, promeneurs et artistes s'unissent pour admirer et certains essayer de retranscrire par la peinture l'éclat particulier de ces milieux magiques...
- L'estuaire des **zones protégées** : l'activité destructrice de l'homme finit malheureusement par se faire sentir. C'est alors que prolifèrent les mesures de protection des biotopes. Et dans ce domaine l'homme est aussi inventif que pour l'aménagement... Réserves Nationales, Réserves Régionales, Parcs Nationaux, Parcs Régionaux, Conservatoires Botaniques, Conservatoire du littoral, Aires Protégées, Convention RAMSAR... C'est dans les estuaires que l'on trouvera la plus importante accumulation de ces mesures de protection et de gestion des espaces naturels... Encore un millefeuille...
- L'estuaire des **Directives et des Circulaires** : au-delà des frontières et au niveau de l'Europe se conjuguent aussi les mesures de gestion et de protection de l'environnement imposées par la Commission européenne : Natura 2000, Directive Eutrophisation, Directive Cadre sur l'Eau, Directive Oiseaux, Directive Stratégie Marine... et leur circulaire d'application en France : SDAGE, SAGE...
- L'estuaire de l'**Administration** : suite à la décentralisation régionale et malgré le regroupement progressif des services déconcentrés de l'État (DRIRE, DRE, DIREN, DRAF) vers des nouveaux services plus intégrés (DREAL, DRAAF), la gestion administrative de celui-ci est fragmentée dans la gestion politique et administrative traditionnelle : il n'y a aucune structure qui soit chargée de la totalité du territoire estuarien. Ajoutons les Agences de l'Eau ainsi que la nouvelle Agence Française pour la Biodiversité !... De plus, l'administration des Régions françaises va prendre un pouvoir de plus en plus important sur les aspects environnementaux... Ajoutons donc un millefeuille d'acteurs chargés de la gestion et du contrôle des actions portant sur le milieu estuarien dans son ensemble. Ceci complique un peu plus la capacité à gérer ce milieu. L'État a néanmoins pris acte de l'importance des estuaires et du besoin de s'entourer par des connaissances scientifiques performantes et par loi a décidé la création de Conseils Scientifiques d'Estuaire, chargés justement de donner des avis à l'État sur les conséquences environnementales des actions engagées par des tiers...
- Enfin l'estuaire **des scientifiques** : physiciens, sédimentologues, géomorphologues, numériciens, chimistes, biologistes, écologues, spécialistes des zones humides, ornithologues, halieutes, trouvent aujourd'hui dans les estuaires un laboratoire formidable pour l'étude de chacune des disciplines, mais surtout pour une application spécifique et passionnante de la pluridisciplinarité et surtout de l'interdisciplinarité. Et ce recensement n'est pas exhaustif...

La pluralité des vues qui sont portées aux estuaires par les différents acteurs concernés par ce milieu, rend extrêmement intéressant la réflexion approfondie qui a été engagée par Jean-Paul Ducrotoy dans cet ouvrage...

C'est ainsi que j'ai eu pour ma part un plaisir sincère à lire ce livre où l'auteur dévoile, à travers les nombreux chapitres et encarts, sa grande culture scientifique et sa grande expérience sur le littoral, ses composantes géographiques et fonctionnelles, les pressions qui s'exercent, les notions de bon état ainsi que celles concernant les services rendus à la nature et à l'homme par ces milieux si riches et productifs... C'est l'objet de sa première section... Afin d'agrémenter son texte il fait appel à des nombreux exemples français, européens et mondiaux. Ils sont d'un excellent

niveau, synthétiques, et regroupant l'état de connaissances scientifiques et techniques actuelles. Ensuite les estuaires prennent leur place progressivement... Il fait état de leurs caractéristiques physiques et morphologiques. Il s'ensuit des chapitres très complets sur la biologie et l'écologie estuarienne, ses particularités, mais encore plus intéressant, les effets sur elles des différentes pressions exercées par l'homme.

Plus captivant encore, par une approche globale, l'auteur engage dans sa deuxième section une réflexion bien documentée sur les services écosystémiques rendus spécifiquement par les estuaires.

Sur la base de cette solide introduction, l'auteur s'investit ensuite dans une analyse fouillée sur le futur des estuaires et de leur place face aux grands changements qui se profilent à l'horizon, et en particulier celle du climat : quels effets sur les espèces et les écosystèmes, et quelle sera leur réponse. C'est l'objet de la section 3.

Puis, dans la logique de la doctrine relative à la séquence « éviter, réduire et compenser » les impacts d'origine anthropique, l'auteur engage dans la dernière section une analyse extrêmement pertinente des outils et des méthodes pour la restauration ou la gestion de ces milieux particuliers. Cette partie sera très utile pour les maîtres d'ouvrage, leurs prestataires et les services de l'État.

L'auteur a eu la délicatesse d'accompagner son ouvrage par une ample et très complète bibliographie, et surtout un glossaire qui facilite grandement la compréhension de certains termes techniques.

Nous pouvons tirer trois enseignements de cet ouvrage : il apporte une contribution significative à l'état des connaissances concernant le rôle et le fonctionnement du littoral et en particulier des estuaires... Il aide ainsi à comprendre la place et l'importante contribution qui est la leur dans le fonctionnement des autres écosystèmes terrestres et marins. Enfin, il propose d'une façon très claire et accessible les schémas de développements qui sont nécessaires pour leur protection, leur adaptation aux changements, et surtout, de plus en plus nécessaire, leur restauration en vue de préserver les services écosystémiques qui sont les siens.

Cher lecteur, je vous souhaite à travers la lecture de cet ouvrage de prendre la pleine mesure de la beauté quasi magique des estuaires dans leur extraordinaire complexité, beauté qui m'a toujours fasciné au point de guider la fin de ma carrière vers l'étude et la protection de ces milieux si originaux.

Louis-Alexandre ROMANA

Ancien responsable de l'environnement côtier à l'Ifremer

(Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer)

Président des Conseils Scientifiques des Estuaires de la Seine et de la Loire

# SOMMAIRE

---

Remerciements .....	V
Préface.....	VII
Avant-Propos .....	XVII
Introduction .....	XIX

## SECTION 1 : La place des milieux estuariens et littoraux dans la zone côtière

### CHAPITRE 1

<b>Les milieux estuariens et littoraux – des écosystèmes dynamiques.....</b>	<b>3</b>
1. Qu'est-ce que la zone côtière ? .....	4
1.1 Le continuum terre/mer/atmosphère .....	4
1.2 Les mers côtières.....	5
1.3 Vers une définition de la zone côtière .....	7
1.4 Globalité des processus biogéochimiques .....	11
2. Dynamique spatio-temporelle .....	17
2.1 La marée facteur structurant des milieux estuariens et littoraux intertidaux .....	18
2.2 Gradients, écotones et écoclines.....	20
3. Variabilité des milieux estuariens et littoraux .....	21
3.1 Une instabilité apparente .....	21
3.2 Variabilité temporelle – du cyclique au long-terme .....	22
3.3 Variabilité spatiale – spécificités régionales .....	22
3.4 Pour une approche multi-scalaire .....	23
4. La diversité des milieux estuariens et littoraux .....	24
4.1 Les communautés du plateau continental .....	25
4.2 Les milieux littoraux comme interfaces entre le continent et l'océan.....	26

### CHAPITRE 2

<b>Pressions anthropiques sur les milieux estuariens et littoraux .....</b>	<b>43</b>
1. Pollution physique .....	44
2. Cycles biogéochimiques et contamination .....	46
2.1 Les substances minérales .....	46
2.2 Les substances biodégradables .....	47
2.3 Les substances non dégradables .....	48
2.4 La pollution biologique .....	54
3. L'effet de serre et le changement climatique global .....	55
4. Les activités humaines et leurs effets sur les milieux estuariens et littoraux.....	55
4.1 Agriculture et mariculture.....	55
4.2 Exploitation forestière .....	56
4.3 Barrages et irrigation .....	56
4.4 Urbanisation et développement industriel .....	56
4.5 Poldérisation et infrastructures à la côte .....	57
4.6 Transports .....	59
4.7 Dragages et exploitation minière .....	59
4.8 Tourisme .....	60
4.9 Pêche et aquaculture .....	60

## SECTION 2 : L'environnement estuarien

### CHAPITRE 3

<b>Le biotope estuarien – hydrodynamique et sédiments</b> .....	65
1. Comprendre les conditions physiques façonnant les estuaires .....	66
2. Fonctionnement hydro-sédimentaire des estuaires .....	70
2.1 Cadre géomorphologique .....	70
2.2 Hydrologie estuarienne .....	74
2.3 Caractéristiques morpho-sédimentaires et fonctionnement sédimentaire .....	82
2.4 Relations entre les conditions hydrodynamiques et morpho-dynamiques .....	85
3. Recueils historiques : liens entre évolution morpho-sédimentaire et action anthropique .....	88

### CHAPITRE 4

<b>L'écosystème estuarien et ses potentialités écologiques</b> .....	91
1. Communautés biologiques .....	92
1.1 Producteurs primaires .....	92
1.2 Producteurs secondaires et tertiaires .....	97
2. Dynamique écologique des estuaires .....	105
2.1 Dynamique spatio-temporelle .....	105
2.2 Un réseau trophique structurellement simple .....	108
3. Connectivité estuarienne : Le continuum estuaire marin/vallée alluviale .....	116
4. La tolérance des organismes aux pressions environnementales et ses conséquences pour l'écosystème .....	119

### CHAPITRE 5

<b>Services écosystémiques rendus par les estuaires</b> .....	123
1. Biens et services rendus par les estuaires .....	124
1.1 Services d'autoproduction .....	125
1.2 Services d'infrastructure et de communication .....	127
1.3 Services de prélèvement .....	129
1.4 Services de régulation .....	133
1.5 Services culturels .....	136
2. Approche socio-économique de l'environnement estuarien .....	137
2.1 Services écosystémiques et habitats .....	138
2.2 Évaluation économique des services écosystémiques .....	138
2.3 Développement durable : une vision de l'estuaire à court et à long terme .....	139
2.4 Équité sociale : synergies et conflits autour des services écosystémiques .....	141

## SECTION 3 : La réponse complexe des milieux estuariens et littoraux aux changements climatiques

### CHAPITRE 6

<b>Changements globaux, variations climatiques et réponses biologiques</b> .....	145
1. Changements globaux .....	147
2. Changement climatique et facteurs environnementaux .....	149
2.1 Température .....	151
2.2 Radiations solaires .....	152
2.3 Niveau de la mer .....	152
2.4 Hydrologie et hydrodynamique .....	153
2.5 Diminution de la rugosité – Accroissement des vitesses – Hauts niveaux d'énergie dans les zones externes .....	155

2.6	Dynamique morpho-sédimentaire .....	156
2.7	Redistribution des sédiments .....	160
2.8	Aménagements .....	163
3.	La réponse des communautés biologiques au changement climatique .....	165
3.1	Production primaire planctonique .....	165
3.2	Algues macrophytes .....	165
3.3	Plantes phanérogames .....	166
3.4	Benthos .....	167
3.5	Poissons .....	168
3.6	Oiseaux .....	169
4.	Une gestion adaptée aux variations climatiques contemporaines .....	170
4.1	Changement climatique et variabilité naturelle .....	170
4.2	Rétablir et consolider des écosystèmes estuariens mieux adaptés .....	171
4.3	Conséquences pour la gouvernance .....	173
CHAPITRE 7		
	<b>Interprétation écologique des perturbations en cours .....</b>	<b>174</b>
1.	Température .....	176
1.1	Phénologie .....	177
1.2	Pathologies .....	178
1.3	Biogéographie .....	178
2.	Précipitations et ressources en eau .....	179
3.	Radiations solaires .....	181
3.1	Interférence des composants atmosphériques (gaz, vapeur...) et dispersion et absorption des radiations par les particules .....	182
3.2	La matière organique dissoute colorée (CDOM) .....	182
3.3	Types d'effets biologiques à rechercher .....	184
4.	Élévation du niveau de la mer .....	186
4.1	Accroissement de la hauteur des vagues .....	186
4.2	Accroissement des salinités dans l'estuaire interne .....	187
4.3	Sédimentation et dynamique du bouchon vaseux .....	188
4.4	Érosion des vasières/pente des estrans estuariens .....	188
4.5	Réduction ou progression des prés salés – Installation théorique de prés salés en amont – Devenir des prairies halophiles .....	189
5.	Accroissement du CO <sub>2</sub> .....	190
5.1	Acidification du milieu .....	190
5.2	Effet sur la photosynthèse – Fixation du carbone – Augmentation de la production primaire .....	191
5.3	Équilibre osmotique des plantes halophiles .....	191
6.	Action synergique des facteurs sur les organismes .....	192
6.1	Adaptation génétique/acclimatation .....	192
6.2	Respiration – Hypercapnie – Détoxication .....	193
6.3	Croissance et développement .....	195
6.4	Nutrition .....	195
7.	Biodiversité et synergies des facteurs écologiques face aux changements climatiques .....	197
7.1	Changements induits de la composition spécifique et de la structure des populations .....	199
7.2	Une approche multiscale de la biodiversité pour comprendre les effets des changements climatiques .....	199

## SECTION 4 : Aménagement, préservation et restauration écologique des estuaires

### CHAPITRE 8

<b>Contexte et objectifs d'une gestion écologique</b> .....	203
1. L'écologie en tant que science appliquée à la gestion des milieux naturels .....	204
1.1 Pourquoi une démarche scientifique ? .....	204
1.2 Dimension temporelle : une gestion à court terme ou à long terme ? .....	205
1.3 Dimension spatiale : Taille des habitats, forme des aires concernées et connectivité ..	207
2. De la qualité écologique à l'approche écosystémique .....	208
2.1 Un concept flou ? .....	208
2.2 Objectifs de qualité écologique .....	211
2.3 Mesure de la qualité des écosystèmes estuariens .....	212
2.4 Indicateurs de qualité du milieu .....	213
2.5 Diversité biologique et vulnérabilité .....	215
2.6 Groupes fonctionnels et guildes .....	216
2.7 Des biotopes à la notion d'habitat .....	217
2.8 Espèces invasives et biodiversité .....	221
3. Les estuaires et le besoin de les gérer et de les restaurer .....	223
4. Gestion écologique et restauration des habitats dégradés .....	226
4.1 Les bases de la gestion écologique .....	226
4.2 Restauration et autres actions de réhabilitation .....	227
4.3 Mesures compensatoires .....	229
4.4 État de référence .....	229
5. Quelles recherches en appui à la gestion intégrée du littoral ? .....	230
5.1 Place de la science dans la gouvernance .....	230
5.2 L'approche multi-scalaire : du biomarqueur à la communauté .....	231
5.3 Vulnérabilité et résilience des écosystèmes .....	232
5.4 L'approche écosystémique .....	234
5.5 Intégration du risque conduisant à la prise en compte d'une approche de précaution .....	234

### CHAPITRE 9

<b>Cadre juridique et sociologique</b> .....	237
1. Le cadre réglementaire .....	237
1.1 Définition administrative d'un estuaire .....	237
1.2 Outils juridiques applicables aux estuaires et à leur restauration .....	239
2. Gestion écologique et société .....	253
2.1 Actifs et passifs environnementaux .....	253
2.2 Processus écologiques et économie .....	254
2.3 L'économie « bleue » .....	254
2.4 Prospérité économique et bénéfices sociétaux tirés de l'environnement estuarien ...	256
2.5 L'économie face aux changements globaux et à des lignes de base fluctuantes .....	259
3. Monitoring et gestion écosystémique .....	262
3.1 Plan de monitoring .....	262
3.2 Prévention de la pollution, aménagement : la surveillance écologique dans le cadre d'une approche écosystémique .....	263

### CHAPITRE 10

<b>L'approche écologique de la reconquête</b> .....	268
1. Pourquoi une stratégie globale de gestion écologique ? .....	270
1.1 Réponses possibles aux perturbations anthropiques dans les estuaires des plaines inondables .....	270

1.2 Le besoin d'une stratégie cohérente de gestion et de restauration écologique des milieux estuariens et littoraux .....	271
2. Approche écologique de la gestion des estuaires .....	271
2.1 Approche qualitative ou quantitative ? .....	273
2.2 Protocoles d'évaluation écologique des estuaires .....	275
2.3 Objectifs de la restauration écologique des estuaires .....	279
2.4 Vers un plan de gestion/restauration .....	280
2.5 Projets expérimentaux et sites-ateliers .....	281
2.6 Indicateurs intégratifs .....	283
2.7 Comparaisons inter-sites .....	286
2.8 Approche holistique : objectifs écologiques .....	287
3. Techniques de reconnexion des milieux aquatiques .....	291
3.1 Importance de l'hydrodynamisme .....	291
3.2 Reconstitution de vasières et de prés salés .....	294
3.3 Dépoldérisation .....	295
4. La place des activités humaines dans l'écosystème estuarien .....	298
4.1 Prise en compte des usages .....	299
4.2 Vers une approche intégrée du développement durable .....	299
4.3 Éducation et diffusion des connaissances .....	303
 CHAPITRE 11	
<b>Une méthodologie au service de la gestion écologique des estuaires .....</b>	<b>305</b>
1. Travail de reconnaissance et de prospective .....	306
1.1 Identification des problèmes .....	307
1.2 Enjeux fondamentaux .....	309
1.3 Délimitation géographique et cartographie .....	309
1.4 Établissement d'un calendrier .....	311
1.5 Identifications des contraintes et prospective .....	312
1.6 Négociation des objectifs et buts à atteindre .....	312
1.7 Communication et concertation .....	313
2. Mise en œuvre .....	314
2.1 Les partenaires de la gestion écologique des estuaires .....	314
2.2 Collecte et traitement des données .....	315
2.3 Intégration .....	316
2.4 Options possibles .....	316
2.5 Démarches institutionnelles ou réglementaires .....	318
2.6 Financement et budgets .....	319
2.7 Rétroactions, suivi et évaluation .....	319
3. Techniques de reconnexion des milieux aquatiques .....	320
4. Technologie et ingénierie .....	322
4.1 Ingénierie civile côtière .....	322
4.2 Ingénierie biologique .....	324
4.3 Ingénierie écologique .....	324
 <b>Conclusions et perspectives</b>	
<b>L'apport de la science à la gestion écologique des milieux estuariens et littoraux ....</b>	<b>328</b>
1. L'apport scientifique .....	328
2. Le futur des milieux estuariens et littoraux .....	329
3. Résistance et résilience garantes des services écosystémiques .....	329
4. Vers une stratégie d'adaptation .....	330
5. Faciliter des nouveaux équilibres dynamiques .....	331



6. Faciliter mais maîtriser les changements à venir .....	331
7. Une dimension socio-économique prégnante .....	332
8. Gestion intégrée des zones côtières et approche écosystémique .....	333
9. Préservation et restauration des milieux estuariens et littoraux .....	334
10. La concertation – L'éducation .....	335
11. La complémentarité de l'écologie et de l'anthropologie .....	336
<b>Glossaire</b> .....	337
<b>Bibliographie</b> .....	383
<b>Index</b> .....	435

## AVANT-PROPOS

---

**Mots-clés :** Estuaire, gestion écologique, biens et services écosystémiques, préservation de la nature, restauration, changement climatique, submersion marine.

Les estuaires constituent des écosystèmes uniques à l'interface entre l'atmosphère et les milieux continentaux, dulçaquicoles et marins. Milieux à salinité variable, la limite de pénétration de la marée en fixe la frontière amont, le fleuve qui s'y jette diluant les eaux marines entrant par l'embouchure. Leur grand potentiel écologique a attiré les populations humaines depuis les débuts de la civilisation et aujourd'hui, les plus grandes mégalopoles mondiales s'y développent. Terrains conquis sur la mer, d'abord pour l'agriculture, ils ont été convoités par l'industrie et les ports. Depuis la révolution industrielle, le développement de certaines de ces activités a fait perdre aux plus grands estuaires certaines de leurs fonctionnalités écologiques au point où leur dynamique interne est menacée. Devant la dégradation ou la disparition des habitats qui les composent, il est devenu indispensable de proposer des plans de gestion intégrés et de restaurer les processus biologiques déficients afin de rétablir les fonctions essentielles d'écosystèmes irremplaçables. La poursuite de leur développement soutenable l'exige ainsi que le maintien de nombreuses activités économiques qui risquent de disparaître.

Cet ouvrage de référence présente les fondements et la mise en œuvre de la gestion écologique de ces écosystèmes primordiaux pour l'humanité. Après une présentation des milieux estuariens et littoraux, les estuaires sont décrits en tant qu'écosystèmes à l'origine de bénéfices essentiels pour les populations humaines qui les exploitent. L'approche écosystémique, qui s'intéresse aux relations entre les éléments structurants de l'écosystème, met en évidence l'importance des phénomènes hydro-sédimentaires et des interrelations entre les êtres vivants de l'estuaire dans l'offre de biens et services pour les humains. Une synthèse des connaissances scientifiques sur les habitats estuariens et de leurs potentialités écologiques précède un exposé des incidences du changement climatique contemporain sur leur fonctionnement. Préserver la qualité écologique des estuaires passe par une compréhension des effets des changements globaux sur les activités qui s'y déroulent. Il est alors possible de décrire les stratégies à développer pour voir aboutir tout plan de gestion s'appuyant sur une vision à moyen et à long terme, elle-même reposant sur l'établissement d'un ou plusieurs états de référence. Enfin, la prise en compte d'actions de restauration d'habitats dégradés, qui se sont déroulées tant en France qu'à l'étranger, débouche sur une perspective optimiste de la mise en valeur des ressources naturelles disponibles en Europe et à l'étranger. C'est pourquoi cet ouvrage dépasse largement le cadre des estuaires et des littoraux et pourra servir à quiconque s'investissant dans la gestion des milieux à réputation naturelle.



## INTRODUCTION

---

Dans cet ouvrage, nous tentons de présenter une synthèse des connaissances biologiques et écologiques sur les écosystèmes marins côtiers en relation avec les effets possibles du changement climatique en cours. Nous proposons une approche écologique qui couvre les connaissances scientifiques acquises et leur application à la gestion des milieux naturels plus ou moins anthropisés. Plusieurs questions structurent cette démarche :

- À quoi tient la richesse biologique de l'interface côtière ?
- En quoi le changement climatique global peut-il l'affecter ?
- Quelles connaissances avons-nous sur l'évolution possible des habitats et de leurs peuplements face au changement climatique ?
- Comment transmettre les connaissances scientifiques utiles de façon plus efficace pour se préparer aux transformations à venir ?
- Comment aboutir à une gouvernance intégrant les connaissances scientifiques qui s'accumulent d'année en année ?

Il est devenu banal de dire que les océans sont porteurs de grands espoirs pour l'humanité. Pourtant, l'exploitation des ressources marines continue de reposer sur des actions à court terme sans grands soucis d'intégrer les diverses activités humaines qui s'y réalisent. Si l'exploration des fonds abyssaux attire l'attention du public lors d'épisodes spectaculaires de l'exploration des grands fonds, les mers bordières et leurs côtes restent mal comprises du public dans leur fonctionnement écologique alors qu'elles subissent de fortes pressions anthropiques. Non seulement en France, mais dans le monde entier, de nouvelles problématiques se posent. Il ne s'agit pas simplement de prendre en compte des problèmes d'érosion ou de recul des côtes face au changement climatique, mais de prendre en compte les changements globaux contemporains qui concernent aussi bien le climat que la géopolitique et l'économie. Cela repose sur le fait que la zone côtière constitue une composante complexe de la biosphère, difficile à appréhender sans connaissances scientifiques parfois pointues. Pourtant, elle est constituée d'écosystèmes variés fournissant des ressources précieuses pour d'importantes populations humaines qui en dépendent pour leurs activités et leur survie.

Estuaires et milieux littoraux s'installent à la frontière entre le plateau continental marin et le continent lui-même, constituant de riches interfaces soumises à la fois aux influences marines et continentales. Au niveau planétaire, ces écotones, des zones de contact et d'échanges entre écosystèmes, remplissent des fonctions écologiques primordiales dans les cycles biogéochimiques globaux. Dans ce domaine, s'établissent des interactions intenses entre milieux marins, dulçaquicoles (de surface et souterrains), terrestres et l'atmosphère. Dans **la première section** du livre, l'importance écologique de la zone côtière est démontrée au travers de l'étude des processus biogéochimiques qui s'y déroulent. Le chapitre 1 jette les bases de cette réflexion en tentant de définir la zone côtière et d'en montrer le rôle unique qu'elle joue dans la dynamique écologique des océans. Celle-ci résulte en des gradients écologiques marqués tant en ce qui concerne ses caractéristiques physico-chimiques (climat, géomorphologie, hydrologie...) que biologiques. Ces processus écologiques propres à la zone côtière sont multidimensionnels :

- Le régime hydrologique des fleuves, par exemple, gouverne les flux horizontaux qui reposent sur des mécanismes typiques de transfert d'énergie et de matériaux divers (substances nutritives, polluants, sédiments).

- Les flux verticaux liant l'atmosphère à l'océan créent des conditions uniques touchant directement certaines des fonctions vitales des systèmes côtiers (up-welling côtier, par exemple) ou indirectement (cycle de l'eau et précipitations).

Conscients de l'importance de cette dynamique spatio-temporelle, nous pourrions alors nous tourner vers les écosystèmes littoraux et les communautés vivantes qu'ils abritent. Toute une gamme d'habitats est concernée, qu'il s'agisse de ceux trouvés dans les récifs coralliens, les mangroves et les marais maritimes tropicaux et tempérés, les herbues, les littoraux rocheux, les marais salés et les communautés estuariennes et aussi ceux du plateau continental.

Cette première démarche permettra de comprendre en quoi les milieux considérés sont originaux et ce qui fait à la fois leur fragilité et leur robustesse face aux pressions exercées par les activités humaines qui sont envisagées dans le chapitre 2. Une double démarche y est proposée. D'abord, il s'agira de comprendre comment des substances réputées polluantes puissent avoir des effets délétères sur les écosystèmes littoraux. Ensuite, nous verrons comment les activités humaines peuvent créer des perturbations qui devront être encadrées par des mesures afin de protéger le fonctionnement écologique des milieux estuariens et littoraux.

**La section 2** s'intéresse aux caractéristiques environnementales des milieux estuariens et littoraux, en particulier à l'équilibre dynamique qui résulte des processus terrestres et océaniques mis en jeu dans les estuaires. Ce renouvellement permanent entraîne une hétérogénéité régionale et locale dans la structure physico-chimique (Chapitre 3) et biologique (Chapitre 4) des écosystèmes dont bénéficient les sociétés humaines grâce aux services écosystémiques qu'ils fournissent (Chapitre 5). Leur fonctionnement rentre dans une dynamique qui repose sur l'ajustement à des forçages qui s'exercent à une échelle de temps géologique. Pour le scientifique, les forces mises en jeu peuvent être reconnues grâce à la mesure des divers gradients (physique, chimique, biologique, énergétique, hydrologique) qui s'y installent. Un continuum entre les bassins-versants fluviaux et les milieux littoraux structure des échanges complexes qui s'épanouissent en des communautés animales et végétales spécialisées et originales.

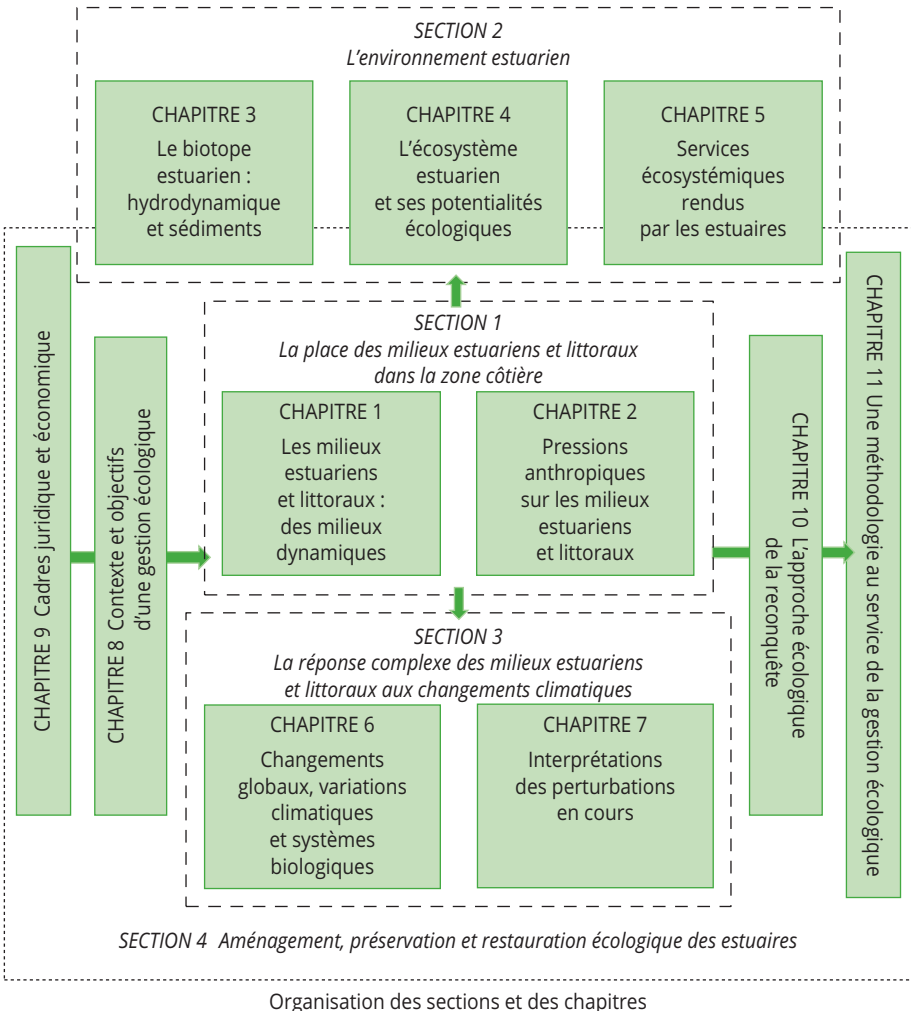
Dans les estuaires tidaux, les forces mises en jeu par la marée et le régime des courants, les processus morphosédimentaires, les flux de substances chimiques et de nutriments au travers des trois compartiments terre-atmosphère-océan font preuve d'une variabilité naturelle élevée, encore imparfaitement comprise. Depuis quelques décennies, les activités humaines qui interfèrent à ce niveau ont accéléré le taux d'évolution des écosystèmes estuariens tout en voyant augmenter leur influence sur des systèmes déjà fortement variables (Chapitre 3). Afin de mieux comprendre ces aspects dynamiques, des ensembles de données ont été rassemblés, entre autres, sur le phytoplancton, le zooplancton, le macrofaune benthique, les poissons et les oiseaux de nombreux estuaires tout autour de la planète (Chapitre 4). Quand ces diverses connaissances sont combinées et comparées, il est frappant de constater que certains changements sont soudains et non progressifs et dépendent étroitement des activités humaines qui influencent la dynamique écologique estuarienne. Le développement de ces communautés végétales et animales est à la base de la fourniture de biens et services par les écosystèmes, irremplaçables mais indispensables pour les sociétés humaines qui les exploitent et bénéficient des richesses qu'ils produisent (Chapitre 5). L'ouverture sur les sciences sociales et économiques va alors de soit afin d'aboutir à une équité sociale, aujourd'hui à la portée des démocraties.


Du point de vue scientifique, la prise en compte et la compréhension de la dynamique des écosystèmes côtiers, aux diverses échelles de variabilité et de forçage, s'est

grandement améliorée depuis la fin du  $xx^e$  siècle. La connaissance de ces processus physiques puissants et dynamiques permet, dans **la section 3**, de mieux envisager comment les écosystèmes concernés pourront réagir aux transformations en cours afin d'alimenter une réflexion sur une adaptation possible des systèmes biologiques aux mutations à venir en conséquence des changements globaux qui affectent aujourd'hui la planète. Dans le chapitre 6, les facteurs responsables d'une dérive de la variabilité naturelle des écosystèmes estuariens et littoraux sont examinés et leurs effets sur les systèmes biologiques approfondis. Les interactions locales et régionales qui participent au maintien de l'équilibre dynamique des processus typiques de ce domaine sont sous l'influence de la variabilité temporelle des phénomènes à grande échelle, comme la concentration en  $CO_2$  dans l'atmosphère et dans l'eau de mer et les variations de la température globale qui en dépendent. Depuis la révolution industrielle, les activités humaines influencent ces processus d'une façon de plus en plus accentuée. Cela a pour conséquence des changements tangibles et mesurables directement dans la partie marine du domaine côtier. Ces phénomènes planétaires influencent directement toutes les régions côtières du monde et influent indirectement sur l'atmosphère et l'océan, modifiant ainsi l'équilibre des forces qui structurent le domaine maritime (Chapitre 7). Une évolution des conditions environnementales de plus en plus rapide se fait sentir aujourd'hui au travers de boucles de rétroaction qui se développent à partir des transformations subites dans le compartiment terrestre. Ceci affecte les écosystèmes côtiers qui subissent alors des changements structurels et fonctionnels avec des conséquences mal connues sur les organismes qui y vivent au détriment de l'intégrité des systèmes naturels dont dépendent directement les sociétés humaines. Il faudra alors comprendre comment les biocénoses pourront répondre à ces évolutions parfois brutales par des réponses complexes à des contraintes agissant en synergie.

La société a grand besoin d'une meilleure valorisation des acquis dans ces différents domaines. Il ne s'agit pas de se contenter de mesurer les fluctuations du tracé du trait de côte dans le but de le fixer de façon pérenne dans le temps. La dimension humaine s'impose dans toute sa complexité. Le ressenti des populations devant leur environnement fait partie de l'équation. Afin de tenter de convertir les connaissances scientifiques en information utilisable dans le cadre de la gestion écologique des milieux estuariens et littoraux, **la section 4** fournit différents éléments indispensables à un aménagement concerté menant à la préservation des milieux naturels et à la restauration des habitats dégradés. La compréhension des mécanismes et des processus écologiques qui se déroulent dans les écosystèmes concernés se trouve à la base d'une gestion qui se doit de fixer des objectifs clairs et compris par les décideurs et les divers utilisateurs du milieu. La durabilité écologique des écosystèmes concernés doit être prise en compte mais aussi celle de ses applications conduisant à des politiques d'aménagement raisonnées et cohérentes (Chapitre 8). C'est ainsi que la science peut remplir son rôle dans la gouvernance environnementale pour en transmettre les bénéfices vers l'opérationnel. Comme ces orientations doivent s'inscrire dans un cadre juridique et réglementaire, le chapitre 9 s'attache à donner les grandes lignes de la législation européenne et ses applications nationales. Il ne s'agit pas seulement de montrer la nécessité d'une prise en compte de la recherche scientifique dans l'application des accords internationaux et des lois régissant l'environnement marin mais aussi d'envisager le lien des sciences naturelles et sociales avec l'économie. La surveillance écologique en est la cheville ouvrière, reposant sur des programmes de monitoring adéquats. Comment réaliser l'intégration de la conservation et de la restauration et des activités qui en dépendent

dans la vision globale d'un estuaire ? Comment reconquérir les milieux estuariens et littoraux dégradés ou délaissés dans l'esprit de la gestion écologique ? C'est le thème du chapitre 10 dans lequel une stratégie de reconquête est proposée. Dans de nombreux estuaires affectés par les aménagements humains, les fonctionnalités essentielles s'y déroulent encore, même si elles s'avèrent plus ou moins défailtantes. La priorité est de rétablir les liens fonctionnels fragilisés entre la plaine alluviale et l'axe du fleuve dans son lit mineur, conduisant à une amélioration des processus hydrodynamiques et biologiques. Cependant, malgré le besoin de concevoir de tels aménagements dans un esprit holistique, les exemples traités dans cet ouvrage illustrent le manque d'intégration des projets de restauration comme partie intégrante d'un plan d'aménagement global de l'estuaire, projeté sur le long terme. Une vision écologique à long terme, s'appuyant sur une bonne connaissance des évolutions passées des sites concernés, s'impose. L'éducation du public et la diffusion des connaissances en sont le tremplin. Une méthodologie appropriée peut seule mener au succès (Chapitre 11). Celle-ci comporte des étapes successives qui reposent, au final, sur des technologies adaptées promues par les établissements d'ingénierie.





D'une beauté incontestable et d'une complexité fascinante, les estuaires constituent un milieu particulier, d'une grande richesse, autorisant plusieurs interprétations selon l'angle de vue abordé : estuaires des hydrologues, des villes, des ports, des industriels, mais aussi des paysages, des loisirs et des zones protégées. La pluralité des vues qui sont portées aux estuaires par les différents acteurs concernés par ce milieu, rend extrêmement intéressante et pédagogique la réflexion approfondie engagée dans cet ouvrage.

***Les milieux estuariens et littoraux, une approche scientifique pour les préserver et les exploiter durablement*** apporte en effet une contribution significative, documentée et illustrée, à l'état des connaissances sur le rôle et le fonctionnement du littoral et en particulier des estuaires. Cet ouvrage aide ainsi à comprendre la place et l'importante contribution des estuaires dans le fonctionnement des autres écosystèmes terrestres et marins. Il propose d'une façon très claire et accessible les schémas de développements qui sont nécessaires pour leur protection, leur adaptation aux changements, et surtout, de plus en plus indispensable, leur restauration en vue de préserver les services écosystémiques qui sont les siens.

Cet ouvrage s'adresse aux étudiants et chercheurs engagés dans un cursus en écologie, hydrologie, géologie marine, océanographie, mais aussi en aménagement urbain et développement durable. Il intéressera également de près les acteurs des collectivités territoriales et toute personne intéressée par la nature.

Préface de **Louis-Alexandre Romaña**

**Jean-Paul Ducrot** est enseignant-chercheur émérite de l'Université de Hull en Grande-Bretagne. Il enseigne également à l'Université de Picardie - Jules Verne. Expert biologiste des estuaires, il évolue dans un contexte international. Il est membre de l'Institute of Estuarine and Coastal Studies (GB) et participe aux travaux de l'Environmental Management of Enclosed Coastal Seas International Center (Japon). En tant que vice-président du Comité scientifique du groupement d'intérêt public Seine-Aval, il a animé le groupe de travail sur la restauration de l'estuaire de la Seine pendant plusieurs années.