



**HAL**  
open science

## La restauration écologique des estuaires : protection des personnes et lutte contre l'érosion de la biodiversité

Mario Lepage, Mike Elliott, Cécile Capderrey, Henrique Cabral

### ► To cite this version:

Mario Lepage, Mike Elliott, Cécile Capderrey, Henrique Cabral. La restauration écologique des estuaires : protection des personnes et lutte contre l'érosion de la biodiversité. Denis Salles,; Glenn Mainguy; Charles de Godoy Leski. Métropole estuarienne : Anticipation des changements globaux, ISTE Group, pp.81-102, 2022, Ecologie - Environnement, 9781784059064. hal-04302124

**HAL Id: hal-04302124**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04302124>**

Submitted on 23 Nov 2023

**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.

## **Chapitre 6 : La restauration écologique des estuaires : un enjeu majeur pour la protection des personnes et de lutte contre l'érosion de la biodiversité.**

Mario Lepage<sup>1</sup>, Michael Elliott<sup>2,3</sup>, Cécile Capderrey<sup>4</sup>, Henrique Cabral<sup>1</sup>

1 :INRAE Nouvelle Aquitaine, UR EABX, Cestas 33612 - FRANCE

2 Department of Biological & Marine Sciences, University of Hull, Hull, HU6 7RX – United Kingdom

3 International Estuarine & Coastal Specialists Ltd, Leven, HU17 5LQ - United Kingdom.

4 BRGM Direction des Risques et de la Prévention / Risques Côtiers et Changement Climatique, Orléans 45060 - FRANCE

### Résumé

Les zones littorales font parties des milieux les plus directement concernés par les problématiques que représentent le changement climatique et les changements globaux. En effet, les milieux littoraux, et notamment estuariens sont confrontés depuis quelques décennies à une tension croissante entre l'attractivité de leurs territoires et une vulnérabilité spécifique liée à leur position d'interface entre terre et mer. Aux vues des nombreuses fonctions, biens, et services qu'offrent les estuaires, la détérioration/dégradation de ces milieux est dès lors présentée comme contrevenant aux intérêts mêmes des populations et des sociétés. La restauration de la qualité écologique de ces milieux est donc devenue un véritable enjeu de protection des personnes et de lutte contre l'érosion de la biodiversité. A partir de différents retours d'expériences de restauration écologique en estuaire, nous avons pu : i) identifier les grands types d'objectifs de restauration et habitats clés associés, ii) mettre en évidence l'existence d'actions et d'outils applicables dans les estuaires, iii) définir des critères pour identifier les secteurs potentiels où des mesures de restauration pourraient être envisagées. Ce travail ne prétend pas apporter une formule magique pour réussir l'amélioration de l'état écologique de l'estuaire ni de garantir le bien-être des riverains de l'estuaire mais il permet de soulever les questions et propose différentes solutions permettant de répondre aux problématiques écologiques et de gestion des risques.

## 1 Introduction

Les estuaires fournissent des habitats essentiels pour les espèces animales et végétales qui ont une valeur commerciale, récréative et culturelle. Une variété importante d'habitats est associée aux estuaires telle que les vasières intertidales, les plages sableuses, les côtes rocheuses, le schorre, les marais salés, les chenaux à marées. Ces différents habitats abritent une biodiversité remarquable car adaptées à ces milieux très changeants. Le mélange des eaux douces et des eaux salées, les variations de niveaux de l'eau dû à la marée, les variations de températures et de direction de l'écoulement à chaque marée, font de ces milieux des habitats d'une grande importance écologique.

Les estuaires ont toujours été des voies de communication entre la mer et l'intérieur du continent et c'est sur les estuaires que 22 des 32 plus grandes villes du monde sont situées (par exemple, Hong Kong, Bangkok, Manille, Londres, New York, etc.). Les populations humaines autour des estuaires et leurs activités ont entraîné le déclin de l'état des estuaires et des ressources aquatiques en particulier mais également de la biodiversité terrestre associée à ces milieux.

Chaque activité a potentiellement un effet sur la qualité des milieux mais c'est souvent l'interaction de nombreuses activités humaines qui produit les impacts les plus importants sur

le fonctionnement, la productivité et la biodiversité des estuaires. La période récente a montré une prise de conscience écologique de plus en plus importante de la population mais aussi dans les décisions publiques au travers d'engagement en faveur de la nature. Ces actions nationales et internationales pour favoriser la restauration écologique et la biodiversité font écho à ce que de plus en plus de spécialistes nomment « La sixième extinction », une extinction de masse de la vie sur terre fortement accélérée par les activités humaines (Ceballos et al., 2015) (Figure 1).

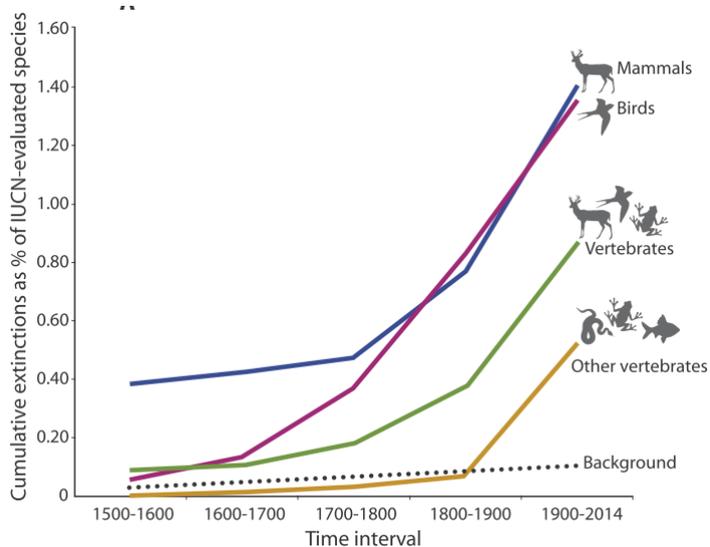


Figure 1. Cumul des espèces de vertébrés enregistrées comme éteintes ou disparues dans la nature par l'UICN (2012) in Ceballos et al 2015.

Aujourd'hui les questions de protection et de restaurations d'habitats et d'espèces sont intimement liées au bien être humain et aux services écosystémiques fournis par ces habitats et espèces au bénéfice des écosystèmes et de la société. Les estuaires, comme les zones côtières, remplissent de nombreuses fonctions importantes pour les organismes vivants et produisent des services écosystémiques, des biens et des bénéfices sociétaux cumulés en raison de leur position d'interface entre les écosystèmes aquatiques continentaux et la mer (Barbier et al., 2011).

Les services écosystémiques (SE) et les biens et bénéfices sociétaux (B&BS) sont souvent représentés par un enchaînement d'effets en cascade, dans lequel la structure et les processus biophysiques (par exemple, les habitats ou la production primaire) influencent les principales fonctions (par exemple, la régulation, l'habitat, la production, l'information), ces fonctions jouant un rôle dans la fourniture de services (par exemple, la protection contre l'érosion, la production de poisson pour la pêche), qui à leur tour fournissent des biens et des bénéfices aux humains (par exemple, la contribution au bien-être, à la santé, à la sécurité), et ont finalement une certaine valeur marchande ou non marchande. Ces B&BS peuvent alors avoir une valeur monétaire ou culturelle. La valeur estimée des biens et des avantages pour l'homme influencera les processus décisionnels et la mise en œuvre des réglementations et des mesures de gestion des écosystèmes. Cela signifie que des effets positifs peuvent se produire en cascade, mais que des effets négatifs peuvent également suivre le même mécanisme en cascade.

Parmi ces SE fournis par les estuaires, on trouve les services d'approvisionnement (par exemple, nourriture, eau douce, ressources forestières et énergie), les services de régulation et de maintenance (par exemple, régulation du climat, régulation des inondations, régulation des maladies et purification de l'eau) et les services culturels (par exemple, esthétique, spirituel, éducation et loisirs). Cependant, si le creusement de chenaux de navigation et

l'assèchement des zones humides ont produit des services environnementaux pour les hommes, ces aménagements ont également contribué à réduire les habitats aquatiques des espèces qui en dépendent. La réduction des zones humides intertidales a parfois même pu conduire à une érosion de la biodiversité locale et à une perte de services écosystémiques.

La question de la restauration des estuaires est aujourd'hui posée dans un contexte de changement climatique qui a des effets à tous les niveaux d'organisation du système estuarien. Nous passons d'une ère de l'anthropocentrisme vers une ère du bio-centrisme où la valeur des écosystèmes prend une place plus importante pour une population de plus en plus sensibilisée au lien entre qualité de vie et qualité de l'environnement qui l'entoure. Pour réussir la restauration, il est nécessaire de comprendre l'histoire et la trajectoire que l'écosystème a expérimenté au cours des siècles pour mieux cerner les objectifs de la restauration et les moyens d'y arriver en prenant en compte le fonctionnement écologique et les services rendus aux humains.

Ce chapitre présente les causes de la dégradation des estuaires et propose des pistes de restauration permettant de limiter les risques d'érosion de la biodiversité et les risques pour les riverains dans un contexte de changement climatique et d'élévation du niveau de la mer.

## 2 Les habitats, la biodiversité et les services écosystémiques

La dégradation des écosystèmes et la perte de biodiversité qui en résulte menacent le flux des SE qui sous-tendent l'économie verte, la croissance verte et le bien-être humain. La conservation des écosystèmes et la restauration assistée par l'éco-ingénierie et les solutions fondées sur la nature, permettent de lutter contre ces phénomènes. Ces approches visent à travailler avec la nature pour résoudre les défis créés par les activités humaines et leurs pressions, y compris le changement climatique. Elles sont essentielles pour protéger la structure et le fonctionnement écologiques ainsi que la fourniture de SE et les avantages sociétaux associés, comme le prévoit le "pacte vert" européen (European Green Deal). Une action coordonnée est nécessaire pour que les habitats perdus historiquement puissent être recréés avec succès et que des infrastructures vertes puissent être construites. La stratégie de l'UE en faveur de la biodiversité fixe comme objectif que d'ici 2030, les écosystèmes et leurs services soient maintenus et améliorés par la mise en place d'infrastructures vertes.

Une estimation objective des activités et des pressions sur les estuaires est essentielle pour évaluer l'impact de la dégradation des processus et des habitats sur les SE et, en fin de compte, sur les B&BS. La restauration écologique des estuaires doit commencer par une bonne compréhension des processus bio-géochimiques et géomorphologiques d'une part, et des fonctions biotiques d'autre part. Cela permet de vérifier que les processus de base sont fonctionnels avant d'entreprendre des travaux pour restaurer les espèces ou les habitats. Toutefois, afin de ne pas retarder la restauration, les actions visant à limiter, voire à éliminer les pressions exercées sur les estuaires, peuvent être entreprises sans délai. (Atkins et al., 2011) ont créé un cadre politique pour déterminer et mettre l'accent sur les options dont disposent les gestionnaires d'estuaires pour créer et maintenir les SE et les B&BS. En outre, Atkins et collaborateurs (2015) ont donné un ensemble d'indicateurs quantitatifs pour les SE et les B&BS pour les zones estuariennes et côtières, en partant du principe qu'une fois ces indicateurs définis, un suivi peut être effectué pour s'assurer que les objectifs ont été atteints.

## 3 Causes de la dégradation écologique des estuaires

En raison de leur position à l'exutoire du fleuve dans l'océan, les estuaires sont soumis à des facteurs de stress multiples en lien avec les activités humaines en amont du fleuve, tels que le prélèvement d'eau qui réduisent les débits, la perte de connectivité due à la construction de

barrages et de digues, et les flux de polluants d'origine diverses. L'urbanisation, l'artificialisation des berges, le réchauffement des eaux lié au passage de l'eau par les circuits de refroidissement des centrales de production électrique et les activités de dragage associées au trafic maritime et aux installations de plaisance s'ajoutent aux pressions issues du monde agricole. Dans les estuaires, l'eau circule dans les deux sens dû à la marée, et il arrive donc également que les pressions sur les estuaires viennent de la mer lors de pollutions accidentelles, de naufrage, ou encore de rejets urbains ou industriels d'eaux usées provenant de grandes villes ou des zones périphériques. La plupart des pressions humaines s'ajoutent aux facteurs de stress naturels qui façonnent les communautés biologiques estuariennes.

Toutes ces altérations résultant des activités humaines et des changements globaux, réduisent la capacité des estuaires à fournir des SE utiles à la nature et au bien-être humain.

## 4 Risques aggravés par la dégradation

### 4.1 Risque inondation (sécurité des personnes et des biens)

Avec l'élévation du niveau de la mer, l'augmentation de la fréquence et de la durée des inondations va mettre en danger et menacer la vie et les biens des personnes et plusieurs SE. Elle tend à restreindre les zones intertidales car de nombreux estuaires sont harnachés par des digues et des levées, ce qui provoque un resserrement des côtes. L'augmentation du niveau de l'eau accroît également l'érosion du littoral et la destruction des habitats peu profonds et tranquilles pour les stades de vie des poissons juvéniles, ainsi que des habitats côtiers adjacents. Une diminution de la végétation riveraine est attendue par ces nouvelles conditions de niveau d'eau et les communautés vivantes qui dépendent de ces habitats.

#### **Habitats intertidaux**

Pour l'ichtyofaune les vasières intertidales jouent le rôle de nourricerie des principales espèces de poissons que les larves de ceux-ci atteignent pour y effectuer une partie de leur cycle de vie. Les fonds doivent regrouper les conditions idéales comme le maintien de faciès sédimentaires et de conditions hydrologiques permettant l'accessibilité et l'utilisation de la vasière, une qualité d'eau constante et la présence d'éléments nutritifs permettant leur survie. Le développement et le maintien des habitats intertidaux (schorre, prairies halophiles) est sous la dépendance de facteurs hydrologiques qui conditionnent l'hydropériode (fréquence, durée, intensité et hauteur d'eau des immersions) et les dépôts de sédiments mais aussi la dissémination des propagules sur l'estran. La quantité et la fréquence des flux apportés jouent un rôle clé dans le développement de la végétation. Une trop forte accumulation de sédiment peut, par exemple, enterrer les graines et étouffer la production primaire alors que trop d'érosion peut, outre déstabiliser les sédiments, influencer la vitesse de relâchement des graines par les sols (Spencer et Harvey, 2012). Les relations entre la morphologie, l'hydropériode, la composition sédimentaire mais aussi la microtopographie, conditionnent l'établissement et le maintien des espèces végétales et donc la production primaire et le développement d'habitats pour les poissons et invertébrés benthiques.

#### **Habitats subtidaux**

Les algues et les herbiers sous-marins contribuent à la lutte contre l'érosion du trait de côte. En influençant l'hydrodynamique localement, les herbiers atténuent les vitesses de courant et l'énergie des vagues. Susceptibles d'être impactés par la baisse de la luminosité inhérente à la turbidité, les herbiers peuvent subir une modification de leur limite inférieure et leur modification et perte peut entraîner des phénomènes d'érosion ressentis à large échelle (Walter et al. 2020).

Les habitats subtidiaux végétalisés augmentent la rugosité du fond et contribuent à limiter la pénétration de la marée et du front de salinité dans l'estuaire. Comme la végétation intertidale, la végétation subtidale agit sur la dissipation de l'énergie pour une plus grande protection des rives contre l'érosion.

## 4.2 Effets des pressions anthropiques sur la biodiversité

Les estuaires ne sont pas particulièrement riches en espèces, principalement en raison de leur variabilité naturelle extrêmement élevée et comptent parmi les systèmes écologiques les plus touchés par les activités humaines (Lotze et al., 2006). Leurs espèces sont généralement tolérantes à une grande diversité de pressions humaines, ce qui rend difficile l'évaluation de leurs effets (cf. le paradoxe de la qualité des estuaires), (Elliott and Quintino, 2007). Néanmoins, un grand nombre d'études ont documenté les effets des pressions anthropiques sur la biodiversité et les SE des estuaires.

La perte d'habitat par l'appropriation des terres et le remblayage des marges estuariennes est une pression notable presque partout dans le monde et a un impact énorme sur la diversité des espèces, le fonctionnement des estuaires et les SE. La grande majorité des espèces estuariennes présentent une ségrégation spatiale étant plus abondante dans certains habitats que dans d'autres. Comme les habitats ne sont pas touchés de la même manière par ces pressions, les effets sur la structure des communautés estuariennes et sur le fonctionnement des écosystèmes résultent également de ces impacts anthropiques. Parmi les habitats les plus touchés figurent les zones intertidales, les marais salants, les mangroves, les herbiers marins et les récifs biogènes (Mumby et al., 2014). Ces habitats sont généralement riches en invertébrés benthiques qui sont les principales ressources alimentaires pour une grande variété de consommateurs (notamment les poissons et les oiseaux). En outre, ces changements peuvent affecter la connectivité entre les habitats, la fonction de nurserie pour les poissons ou d'hivernage pour les oiseaux et même la productivité primaire de ces systèmes. Une étude menée dans un petit système estuarien du nord du Portugal (estuaire du Lima) a estimé que 70 % de sa zone intertidale et 88 % des marais salants ont été perdus depuis les années 1930 et que les habitats les plus attractifs pour les poissons ont diminué de 48 %. Cette perte de marais salés et de zones intertidales ne peut être compensée par le gain d'habitats subtidiaux profonds, étant donné leurs rôles fonctionnels différents pour les poissons et les invertébrés (Amorim et al., 2017). Dans l'estuaire de la Seine, les estimations de la perte d'habitat approprié pour les juvéniles de poissons représentent une diminution de 42 % de la capacité de nurserie pour la sole, qui est une des principales ressources halieutiques dans cette zone géographique (Rochette et al. 2010).

La construction de barrages, le dragage, l'extraction de sédiments et d'eau ont modifié le débit des rivières et l'hydrodynamique des systèmes estuariens. L'un des impacts les mieux documentés de la régulation des cours d'eau et de la construction de barrières physiques dans les rivières est l'effet sur les poissons migrateurs amphihalins. Ces espèces de poissons dépendent des signaux environnementaux pour déclencher des mouvements migratoires, ainsi que de leur capacité à atteindre les zones de reproduction, généralement situées en amont et donc inaccessibles en raison des barrages. Les changements de débit des rivières affectent la température et les gradients estuariens salins, qui déterminent la distribution spatio-temporelle de tous les organismes estuariens (voir Barletta et al. 2005). Pour l'estuaire de la Gironde (France), les changements dans la distribution et l'abondance des espèces, à savoir les copépodes et les poissons, ont été mis en évidence et liés à l'augmentation de la salinité des eaux estuariennes (Pasquaud et al. 2012). Il existe également d'autres impacts résultant du captage d'eau, notamment pour le refroidissement des centrales de production d'énergie, pour l'industrie et pour l'agriculture, qui peuvent avoir des répercussions importantes telles que la mortalité des individus piégés dans les dispositifs de pompage d'eau. Dans la Meuse (bassin traversant la France, la Belgique et les Pays-Bas), le prélèvement d'eau pour

le refroidissement des centrales de production d'énergie est l'un des principaux facteurs de déclin de la population d'anguilles européennes dans ce bassin (Winter et al., 2006).

Le développement urbain, industriel et agricole a introduit une grande variété de polluants dans les estuaires. Un grand nombre d'études ont porté sur les impacts des polluants au niveau sous-individuel, mais ici nous avons surtout abordé les effets aux niveaux supérieurs de l'organisation biologique. La pollution peut générer des mortalités massives ou le déclin voire la perte des espèces les plus sensibles. Les eaux usées des zones urbaines à forte teneur en nutriments ont été responsables de l'appauvrissement en oxygène dans plusieurs estuaires du monde, avec des conséquences négatives pour les communautés biologiques. Dans l'estuaire du Tyne (côte Est de l'Angleterre), la proportion des petits poissons pélagiques a augmenté par rapport aux poissons benthiques, en raison de la présence de zone de désoxygénation à proximité du fond (Hall et al. 1997). Dans l'estuaire du Tage, au Portugal, la pollution a eu un effet négatif sur la fonction de nourricerie de poisson, un fort déclin ayant été signalé pour certaines espèces de poissons (Costa & Cabral 1999). Les métaux lourds ou les polluants organiques persistants ont tendance à être accumulés par les organismes (bioaccumulation), ce qui est particulièrement dangereux si l'espèce est utilisée pour la consommation humaine. Dans l'estuaire de l'Escaut (Pays-Bas - Belgique), l'analyse des tissus de poissons et d'invertébrés a montré des niveaux élevés de contaminants tels que les métaux lourds, les polychlorobiphényles (PCB), les éthers diphényles polybromés (PBDE) et les pesticides organochlorés (OCP), et a présenté des conséquences potentielles sur la santé humaine au-delà des effets sur les espèces contaminées. Les effets d'autres types de pollution, tels que le bruit sous-marin ou la lumière anthropique, ont été examinés plus récemment, leurs effets se situant principalement au niveau du comportement des organismes (Roberts et al. 2016).

L'introduction d'espèces non indigènes (ENI) dans les estuaires a commencé il y a plusieurs siècles et s'est intensifiée au cours des dernières décennies. Les ports et le trafic maritime, ainsi que l'aquaculture sont quelques-unes des activités responsables de l'introduction d'ENI. Un exemple de poisson introduit qui a perturbé l'équilibre écologique des estuaires est le silure, *Silurus glanis*, en Europe (Savini et al. 2010). Il s'agit d'un poisson prédateur important qui fait concurrence aux espèces indigènes et modifie la structure de l'habitat. Un autre exemple est le poisson rouge, *Carassius auratus*, qui est une espèce ornementale qui était considérée comme le poisson le plus répandu des ENI en Europe. Bien qu'il s'agisse à l'origine d'une espèce d'eau douce, sa distribution s'est étendue de la zone oligohaline à d'autres zones estuariennes et a modifié l'abondance et la composition des assemblages de poissons estuariens (Tweedley et al. 2017). Certaines ENI de crustacés et de bivalves ont également eu des impacts sur les communautés estuariennes et le fonctionnement des écosystèmes. Par exemple, la moule zébrée *Dreissena polymorpha*, un bivalve envahissant dans l'estuaire de l'Hudson (États-Unis), a provoqué des changements dans les populations d'autres espèces. Le crabe vert *Carcinus maenas* est souvent l'espèce de crabe la plus abondante dans les estuaires européens, mais il est un ENI dans d'autres zones géographiques (par exemple en Amérique du Nord, en Australie) où il a provoqué des changements dans les habitats d'herbiers et les assemblages de poissons. En Europe, c'est le crabe chinois *Eriocheir sinensis*, qui colonise plusieurs estuaires.

Les changements climatiques induits par l'Homme en raison des émissions de gaz à effet de serre ont également eu plusieurs impacts sur les assemblages estuariens. De multiples changements physiques et chimiques ont été enregistrés dans les estuaires, notamment la température, le pH, la salinité et la concentration d'oxygène. Ces changements affectent notamment les gradients environnementaux qui caractérisent les systèmes estuariens et qui déterminent la distribution spatiale et temporelle des différentes espèces de poissons. En Australie, les changements environnementaux ont été suivis pour un grand nombre de systèmes estuariens (plus de 150) et ont été signalés à un rythme très impressionnant : la température de l'eau estuarienne en été a augmenté en moyenne de 0,2 °C par an et le pH a

diminué d'environ 0,5 unité de pH en 12 ans (Scanes et al. 2020). Parmi les changements de biodiversité documentés, on peut citer la colonisation par des espèces marines tropicales, la réduction de la richesse des espèces, le risque accru de prolifération d'algues, entre autres (Scanes et al. 2020). Pour plusieurs estuaires européens, des changements induits par le climat ont également été signalés, notamment pour la Gironde en France, où des changements dans les communautés planctoniques et halieutiques (Chevillot et al., 2018), et également pour l'estuaire du Mondego, au Portugal, pour lequel l'analyse d'un ensemble de données sur les communautés planctoniques sur deux décennies a mis en évidence la diminution des espèces d'eau douce, l'augmentation des copépodes cosmopolites de petite taille et du zooplancton gélatineux a été signalée et liée aux changements climatiques (Marques et al. 2018).

Les SE fournis par les estuaires sont extrêmement variés et valorisés, mais peuvent être compromis en raison de la dégradation généralisée des habitats estuariens dans le monde entier. Il faut espérer que l'émergence de l'écologie de la restauration en tant que science et pratique puisse contribuer à inverser cette situation. Il serait particulièrement important de disposer d'un ensemble de bonnes pratiques environnementales bien documentées et d'exemples qui pourraient avoir un effet levier sur la conservation et la restauration des estuaires. Les connaissances sur les mesures de gestion adéquates et leurs liens avec les SE ont été consolidées (Boerema and Meire, 2017), mais leur application est urgente.

## 5 Enjeux de la restauration écologique des estuaires pour la protection de la biodiversité

La restauration des écosystèmes aquatiques dégradés nécessite une approche coordonnée et holistique impliquant l'écohydrologie et l'ingénierie écologique (éco-engineering) (Wolanski & Elliott 2016). Cette approche met l'accent sur une approche systémique (Figure 2) qui englobe le *continuum de la structure de l'écosystème* et de la *biodiversité* qui est soutenu par le *système physico-chimique* marin et côtier et qui donne ensuite naissance au *fonctionnement écologique*. Nous appellerons cet ensemble « écologie » pour plus de facilité dans le texte qui suit. En cas de succès, le système marin et côtier produit des SE qui, après l'apport d'actifs et de capitaux humains complémentaires, fournissent des B&BS. Par exemple, si les marées et les sédiments sont maintenus, l'écosystème peut conserver sa flore et sa faune, comme les poissons. Cependant, l'écologie peut être dégradée par les activités et les pressions humaines, ce qui diminue les SE et les biens et avantages de la société. Nous devons donc restaurer l'écologie par des solutions basées sur la nature et l'éco-ingénierie qui, à leur tour, amélioreront les SE et les B&BS.

La restauration passive est définie comme la capacité à supprimer les activités et leurs pressions (définies comme les mécanismes de changement) qui provoquent la dégradation et permettent ainsi à l'écologie de se rétablir d'elle-même. En revanche, la restauration active implique des interventions humaines par le biais de solutions fondées sur la nature et l'ingénierie écologique aussi appelée éco-ingénierie.

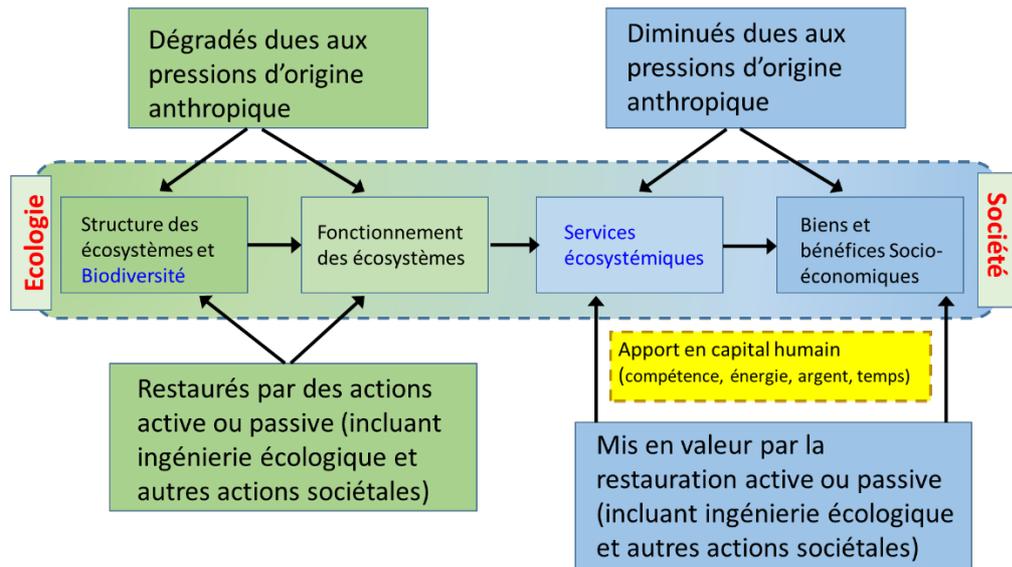


Figure 2: Le fondement systémique

L'éco-ingénierie a été divisée en deux types : le type A, qui consiste à restaurer l'habitat pour permettre à l'écologie et à ses espèces de se développer, et le type B, qui consiste à améliorer le fonctionnement écologique et les espèces par l'intermédiaire de l'homme en restaurant la flore et en reconstituant la faune. Il s'agit d'abord de modifier la forme des zones, c'est-à-dire la physiographie et la géomorphologie, et peut-être de manipuler les flux d'eau douce provenant du bassin versant ou de rétablir des connexions dans la zone de marée, afin de créer des niches écologiques. Deuxièmement, l'ingénierie écologique consiste à repeupler, replanter et créer des habitats, et à améliorer les interactions entre le biote et son environnement. En retour, ces interactions augmenteront la résistance et la résilience d'un écosystème pour respectivement s'adapter et se rétablir des effets des pressions humaines. L'éco-ingénierie est considérée ici comme une approche holistique qui utilise les connaissances ci-dessus pour modifier et atteindre des objectifs écologiques dans certaines parties ou dans l'ensemble du système côtier et marin - c'est l'essence même des solutions basées sur la nature. Cependant, la gestion de l'écosystème par l'éco-ingénierie et les solutions basées sur la nature doit être complétée par la réglementation des activités humaines sur terre et en mer.

Les zones côtières du monde entier, et en particulier en Europe, sont soumises à l'urbanisation et l'industrialisation croissantes, à une utilisation accrue de ressources telles que l'eau, l'énergie, l'espace et les denrées alimentaires, et à la diminution de la résistance et de la résilience aux stress tels que le changement climatique (Defeo & Elliott 2021). Il est irréaliste de s'attendre à ce que l'éco-ingénierie et les solutions basées sur la nature puissent recréer ou restaurer entièrement des écosystèmes estuariens, en particulier ceux qui comptent une importante population humaine comme en Europe. Toutefois, l'objectif est de créer des écosystèmes présentant les attributs des systèmes d'origine et d'améliorer le fonctionnement écologique. Ces objectifs de restauration permettent de fournir des avantages pour l'économie et pour la sécurité de la société (stratégie dite "win-win-win" ou « gagnant-gagnant-gagnant »), en plus de parvenir à un certain équilibre en corrigeant les changements historiques (comme la suppression des zones humides pour l'agriculture et le développement urbain). Elle prévoit des technologies à faible coût pour atténuer l'impact des activités humaines sur les eaux de transition, les côtes et les zones marines, pour utiliser et renforcer la capacité naturelle des masses d'eau à absorber ou à traiter les nutriments et les polluants en excès, et pour accroître la résilience face aux facteurs de stress mondiaux tels que le changement climatique (Wolanski & Elliott, 2016).

Le succès de l'utilisation de l'ingénierie écologique et des solutions basées sur la nature pour l'assainissement et la restauration des écosystèmes et des habitats repose sur notre compréhension du fonctionnement naturel dans un cadre socio-économique. Il s'agit essentiellement d'une approche holistique régie par et pour les différents acteurs de l'estuaire, utilisant les meilleures techniques et technologies disponibles et s'inscrivant dans un cadre rentable et avantageux. Ces approches reconnaissent que la restauration réussie des écosystèmes est généralement un équilibre entre la régénération naturelle et le rétablissement en utilisant des mesures de gestion appropriées, y compris les solutions fondées sur la nature, telles que les techniques d'éco-ingénierie, associées à la suppression des facteurs de stress. L'efficacité de la restauration des systèmes naturels et sociaux est mesurée en termes de SE et de B&BS, notamment ceux résultant de la création d'une structure et d'un fonctionnement écologiques durables (Turner & Schaafsma 2015). De même il apparaît nécessaire d'évaluer les B&BS à l'échelle de l'habitat avant de passer à une échelle régionale plus large. Il est donc nécessaire de savoir comment la société et les acteurs de l'estuaire au sens large apprécient et perçoivent les habitats, leur structure écologique et leur fonctionnement, ainsi que les SE et les biens et avantages sociétaux qu'ils produisent. Toutefois, il faut d'abord déterminer la perte de ces SE et de ces B&BS résultant de la dégradation de l'environnement, due à des pressions uniques et/ou multiples. Deuxièmement, par le biais d'une analyse de sensibilité, la perte et le gain de SE et des B&BS en raison de la dégradation due à des pressions multiples, puis la restauration, deviennent un outil important pour les décideurs politiques et les gestionnaires de l'environnement.

Jusqu'à présent, les pratiques de restauration ont été principalement mises en œuvre au niveau local et de manière isolée sur un site plutôt que d'être intégrées dans la gestion de l'écosystème dans son ensemble. Cela empêche de reconnaître les avantages supplémentaires de la mise en place de réseaux de mesures de restauration dans l'ensemble des zones côtières aux niveaux régional et européen.

Si elle est efficace, la restauration des écosystèmes apportera des avantages considérables à la société tout en renforçant le capital naturel. Par exemple, elle assure une plus grande résilience et une meilleure protection contre les inondations et peut réduire les coûts de protection des biens tout en créant davantage d'habitats et en protégeant les espèces. Les initiatives politiques exigent aujourd'hui l'adoption d'une approche écosystémique plus globale de la gestion des ressources naturelles, y compris des solutions fondées sur la nature. Les enseignements tirés des mesures de restauration existantes nous permettront d'identifier des critères clairs pour sélectionner les sites et les techniques les plus rentables pour les futurs programmes afin de maximiser les avantages pour la société tout en réduisant les coûts.

## 5.1 Restauration active et passive

Le modèle de la Figure 3 souligne que la restauration peut être passive, en éliminant les facteurs de stress induits par l'homme et en permettant au système naturel de se rétablir, ou active, dans laquelle des habitats sont créés ou la faune et la flore sont améliorées par le repeuplement ou la replantation. Après une dégradation, il est possible de restaurer des habitats qui améliorent l'état dégradé, mais la restauration ne permet pas nécessairement de revenir à l'état initial, alors que les écosystèmes nouvellement créés, tels que les sites de retrait des digues, peuvent fournir des SE de grande valeur. La restauration peut consister à retrouver l'état d'origine ou à s'éloigner de la trajectoire de rétablissement de la qualité des écosystèmes, en fonction de la demande sociétale de SE. S'il est très peu probable que les écosystèmes dégradés puissent être restaurés dans leur état initial, les projets de restauration et de réhabilitation devraient au moins viser à redonner aux sites leur "potentiel naturel restant". Certaines limites à la restauration sont inévitables, compte tenu des effets irréversibles possibles de la dégradation, des changements en amont du bassin versant ou

des contraintes environnementales (par exemple, les changements futurs prévus en raison du changement climatique), ainsi que des contraintes socio-économiques telles que les ressources disponibles et l'étendue du soutien de la communauté et des acteurs de l'estuaire.

Les activités de restauration active dans un habitat ou un écosystème peuvent être considérées comme ayant une empreinte directe et indirecte, ou une zone d'influence. Par exemple, la suppression d'une barrière pour remédier à des changements négatifs dans l'hydrographie d'une zone a un effet direct sur la zone où la barrière était située, mais elle affecte également l'hydrographie influencée par la barrière, même pour les mouvements à grande échelle de poissons migrateurs à travers les estuaires. De même, la création d'une zone humide pour l'alimentation, la reproduction et le repos des oiseaux ou d'une zone d'alevinage pour les poissons peut avoir un effet indirect sur leurs populations à plusieurs kilomètres de distance.

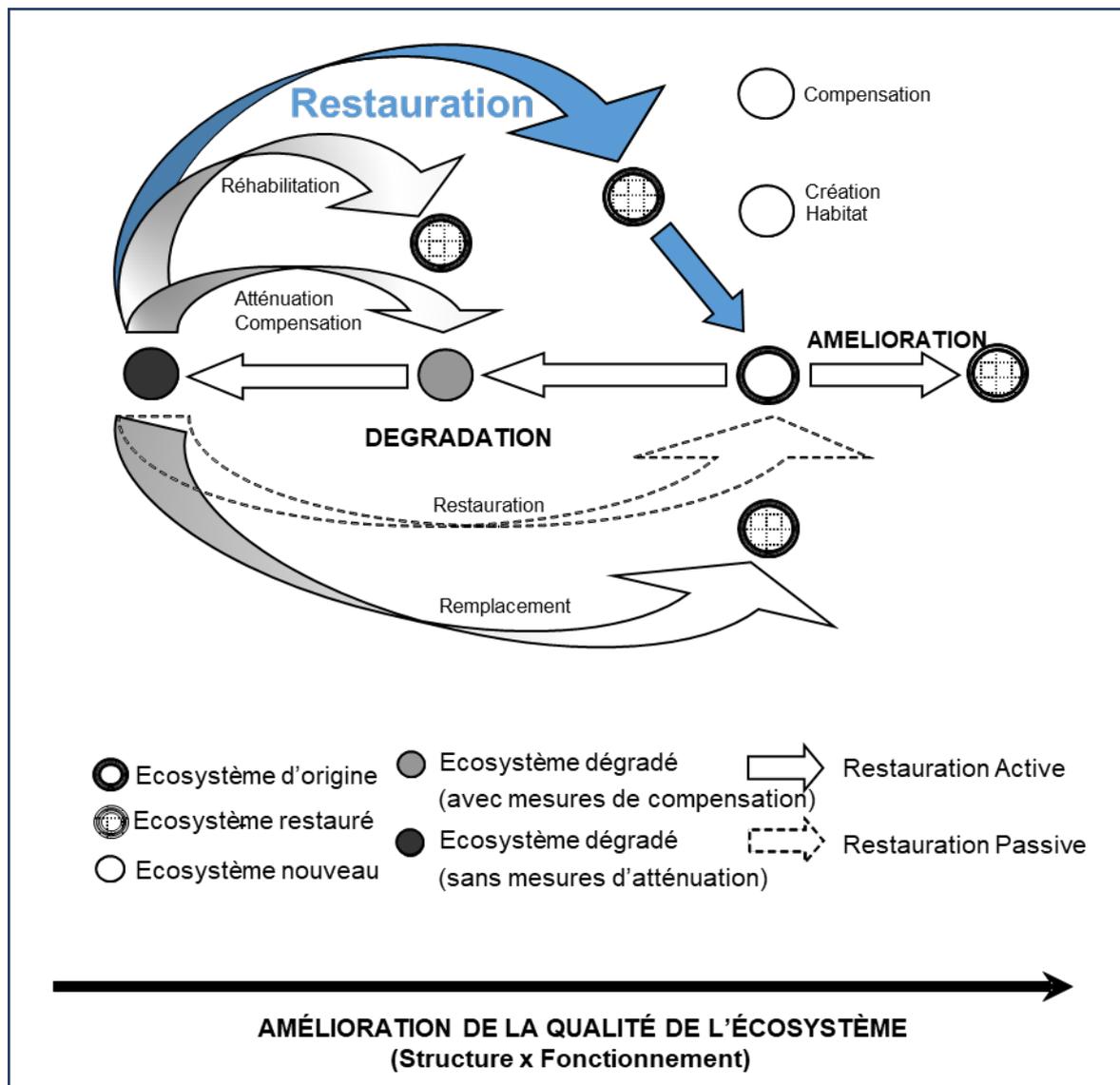


Figure 3 : Réponses actives et passives à la dégradation des écosystèmes (d'après Elliott et al., 2007)

Il est nécessaire d'avoir une approche pragmatique très appliquée plutôt que purement théorique pour la planification et le suivi de la restauration des écosystèmes. Les praticiens, y compris les planificateurs nationaux et régionaux, sont constamment confrontés aux causes et aux conséquences des changements environnementaux et doivent donc déterminer les réponses de gestion visant à relever les défis de la restauration. Cette chaîne cause-

conséquence-réponse doit également tenir compte des différentes échelles spatio-temporelles. La prise en compte de la séquence complète est la clé de la résolution de problèmes pour évaluer et traiter de manière holistique les causes, les conséquences et les réponses au changement. Par exemple, la restauration des eaux de transition initialement soumises à l'augmentation du ruissellement des nutriments provenant des terres agricoles, permettrait d'éviter les symptômes d'eutrophisation côtière qui, autrement, pourraient avoir un impact sur les activités locales de tourisme et d'aquaculture. De même; la suppression ou la limitation des effets néfastes des rejets industriels dans un estuaire permettra de supprimer des barrières anoxiques pour les espèces de poissons migrateurs qui fraient en eau douce et aura donc un rapport coût-bénéfice à la fois sur le secteur de la pêche récréative et sur celui de la pêche commerciale au-delà d'une amélioration générale de la qualité des eaux. En tant que tel, la détermination de l'efficacité par la gestion de mesures de restauration réussies nécessite des objectifs et des indicateurs entièrement quantitatifs (c'est-à-dire SMART, Spécifiques, Mesurables, Achievable (réalisables), Réalistes et limités dans le Temps) et de vérifier si l'état/intégrité "réalisable" de l'écosystème correspond à la fourniture satisfaisante de SE (Buijse, 2015).

## 6 Exemples de restauration écologique en estuaire

### 6.1 Marais de Mortagne (estuaire de la Gironde, France)

En décembre 1999, la tempête Martin (vents à plus de 200km/h) a endommagé la digue du polder de Mortagne sur Gironde en Charente maritime. Cette digue avait été créée en 1966 pour développer la culture des céréales sur un marais salé de l'estuaire de la Gironde. Très rapidement la décision de renforcer la digue arrière pour protéger les habitations et les autres terres agricoles et de ne pas réparer la brèche qui s'était constituée dans la digue à la mer a été prise. L'inondation du polder qui a suivi, a commencé par créer un chenal d'érosion régressive à l'intérieur du polder et une fine couche de sédiments frais est venue recouvrir les traces encore visibles des rangs de maïs coupés à l'automne précédent. A partir de là, une succession de restauration passive du marais a débuté. Après des mois d'inondations régulières du polder par l'unique brèche, une végétation de plantes halophytes et sub-halophytes (Decreton, 2009; Allou, 2016) typique de marais salé a peu à peu remplacé les traces de la culture du maïs. La configuration du site qui avait un chemin qui partageait le polder en deux parties faisait que la partie en amont du chemin restait en eau alors que la partie en aval se vidait presque entièrement à chaque marée. Durant cette période, de très nombreux invertébrés benthiques se sont installés (vers polychètes, crustacés, gastéropodes et bivalves) à la fois dans la partie qui restait en eau et dans la partie intertidale. Des huîtres sauvages sont même venues colonisées la partie en eau permanente mais l'érosion a eu raison du chemin qui faisait office de seuil et le marais s'est entièrement vidé à chaque marée. Aujourd'hui, 20 ans après la première submersion du polder, le marais est végétalisé avec une végétation de haut schorre et il reste peu de surface en eau par rapport aux premières années. Les parties végétalisées sont inondées lors des grandes marées d'équinoxe et restent en zone humide la majeure partie du temps. Bien qu'il s'agisse d'un retour passif à la nature d'un polder qui avait été gagné sur la mer, les habitats perdus lors de la poldérisation n'ont été que partiellement retrouvés avec ce nouvel écosystème. Les fonctions de nidifications pour plusieurs espèces de passereaux sont bien présentes mais les fonctions d'alimentation pour les oiseaux limicoles et les poissons sont réduites à la partie qui reste en eau. Même si aucune mesure n'a été réalisée pour estimer la part d'auto-épuration du marais de Mortagne, les expérimentations sur d'autres marais intertidaux (Simas and Ferreira, 2007) ont montré que ce type d'habitat permettait de réduire la charge en nutriment qui entre dans le marais.



Figure 4 : Vue du marais de Mortagne. En haut à gauche le polder avant la tempête de 1999, haut droite vue à marée basse en 2002, en bas à gauche le marais en 2006 à marée haute, en bas à droite le marais 2018

## 6.2 Estuaire du Mondego (Portugal)

L'estuaire du Mondego est un petit système mésotidal, chaud-tempéré, situé sur la côte occidentale du Portugal (40°08 N ; 8°50 W). D'une superficie de 8,6 km<sup>2</sup> et d'une longueur de 21 km, il traverse la basse vallée du Mondego, entourée de 150 km<sup>2</sup> de terres agricoles de grande valeur. À l'embouchure du fleuve, le cours d'eau se divise en deux bras, encerclant l'île de Murraceira. Le bras nord atteint des profondeurs de 5-10 m à marée haute alors que le bras sud est limité à une profondeur de 2-4 m. Ce bras sud est composé d'environ 75% de vasières intertidales alors que dans le bras nord on trouve moins de 10% de ce type de zones. L'amplitude des marées est différente dans les deux bras, étant de 2-3 m au nord et de 1-3 m au sud. Cette différence est principalement due aux zones en amont du bras sud, largement envasées, qui entraînent des différences dans le flux d'eau. L'estuaire a une grande valeur économique car il abrite de nombreuses industries, notamment des salines, des installations aquacoles, des ports de commerce et de pêche ainsi que des zones d'exploitation agricole, qui provoquent de nombreux impacts physiques et des rejets de nutriments dans la zone. Le bras nord accueille la majeure partie du trafic maritime et est souvent dragué.

L'estuaire de Mondego a subi plusieurs pressions anthropiques au fil des ans et peut être considéré comme un modèle de longue exploitation humaine. Ces pressions ont entraîné des modifications hydromorphologiques et, par conséquent, un déclin écologique. Pour tenter d'inverser cette situation, une stratégie comprenant plusieurs mesures d'atténuation a d'abord été conçue en 1997-1998, pour aboutir à une action plus intense en 2006. Pendant plusieurs

décennies, de multiples facteurs de stress anthropiques (par exemple, l'eutrophisation, le dragage et les modifications physiques) ont entraîné plusieurs changements dans l'estuaire de Mondego. Le plus grave a été l'eutrophisation qui s'est produite dans le bras sud au début des années 1990. Cela a entraîné une baisse de la qualité de l'eau, due à la fermeture de la communication en amont entre les deux bras, provoquée par plusieurs modifications physiques entreprises dans l'estuaire. L'obstruction a entraîné une augmentation du temps de résidence de l'eau et de la concentration en nutriments, ce qui a favorisé la prolifération de macroalgues (*Ulva* sp.) et la régression de la couverture d'herbiers dans cette partie de l'estuaire (*Z. noltei*; de 15 ha en 1986 à 0.02 ha en 1997).

Certaines mesures d'atténuation ont été mises en œuvre à la fin des années 1990 pour renverser cette situation. Les objectifs étaient d'améliorer la qualité de l'eau, de réduire la charge en nutriments et le temps de séjour de l'eau dans le bras sud. Deux mesures principales ont été appliquées : (i) la réduction de l'apport d'eau douce de la rivière Pranto dans le bras sud, en la détournant en amont vers le bras nord par une écluse ; et (ii) l'amélioration du flux d'eau par un rétablissement partiel (~1 m de large) de la connexion amont entre les bras sud et nord pendant des périodes limitées (1h30-2h00 avant et après le pic de marée). Après cette intervention, le système a montré des signes d'amélioration, les herbiers ont partiellement récupéré et les proliférations de macroalgues n'ont plus été détectées. En raison de ces améliorations après la mise en œuvre des premières mesures, l'Agence environnementale portugaise a adopté un deuxième plan d'intervention à plus grande échelle pour le système. Ainsi, en 2006, le rétablissement de la communication entre les deux bras a été rendu permanent afin d'augmenter le débit d'eau et de réduire le temps de résilience de l'eau dans le bras sud.

### 6.3 Estuaire de l'Escaut (Belgique)

Suite à des inondations catastrophiques ayant entraîné de nombreux décès sur l'Escaut dans les années 1950, et de nombreux autres événements d'inondation dans la zone estuarienne, les gouvernements de la Belgique et des Pays Bas ont travaillé depuis le début des années 1990 à un plan de lutte contre les inondations appelé SIGMAPLAN. L'objectif premier était de lutter contre les inondations mais au fil des années, la prise en compte écologique dans la création de zone de protection a été de plus en plus présente.



Figure 5 : Recul de digue sur l'estuaire de l'Escaut. Hedwige-Prosper polder (tiré du projet Interreg Polder2C's)



Figure 6 : Recul de la digue sur le site de Lillo sur l'estuaire de l'Escaut en Belgique

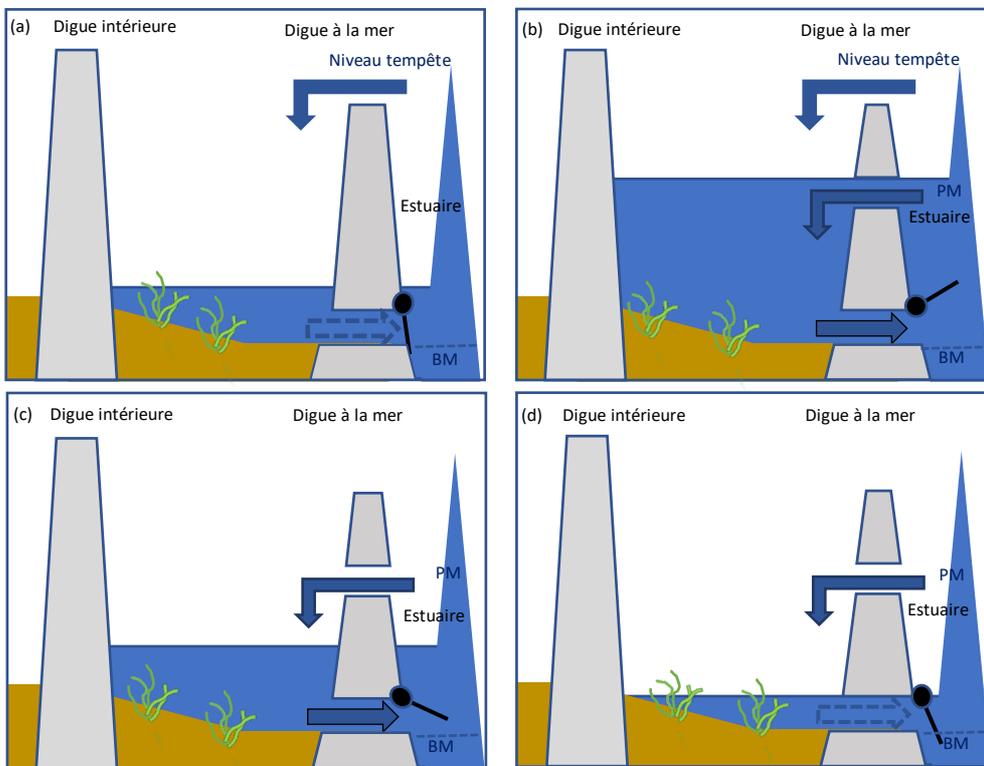


Figure 7 : Fonctionnement du dispositif CRT (Controlled Reduced Tide). (a) Fonctionnement en zone de stockage lors d'inondation, (b) fonctionnement en CRT lors de tempête, (c) fonctionnement normale par marée de vives eaux, (d) fonctionnement normal par marée de mortes eaux. (modifié d'après Esteves 2014)

## 7 Conclusion et Perspectives

La période de l'artificialisation et de la destruction progressive des estuaires n'est plus acceptable par une grande majorité des citoyens et la contestation qui se met en place à chaque fois qu'un nouveau projet de développement industriel voit le jour sur les estuaires en est la preuve. Dans la très grande majorité des cas, le point de non-retour n'est pas atteint et l'espoir d'un retour à un état plus naturel est permis. Le défi de la restauration écologique des estuaires consiste maintenant à déterminer comment, prises ensemble, les combinaisons

optimales de programmes de restauration peuvent améliorer la *biodiversité* et maximiser les avantages pour *la sécurité humaine* (par exemple, par la résistance et la résilience à l'élévation du niveau de la mer, à l'augmentation de la température, à la modification du régime des pluies, bref au changement climatique et *l'économie* (c'est-à-dire le triple bénéfice). Il est donc important de prendre en compte la capacité des habitats et des écosystèmes à résister et à se remettre des pressions défavorables qu'ils ont subies (c'est-à-dire leur résistance et leur résilience) et le rôle de la connectivité et de l'intensification entre les différents programmes de restauration dans l'obtention de bénéfices globaux à plus grande échelle.

Il y a urgence à examiner l'effet des projets de restauration aquatique sur les problèmes majeurs à grande échelle auxquels la société est confrontée, notamment la qualité de l'eau, l'état nutritionnel, la production primaire, les processus hydro-morphologiques et la perte de biodiversité. De même, il est nécessaire d'aborder l'impact de la restauration à l'échelle régionale et européenne sur : (i) le déséquilibre entre l'offre et la demande de fourniture de SE et de B&BS ; (ii) la manière dont la restauration permet de remédier avec succès à la dégradation environnementale dans le fonctionnement des estuaires, ou (iii) le continuum amont-aval.

D'un point de vue écologique, sociétal et politique, les zones côtières et estuariennes sont des systèmes complexes étant donné leurs multiples usages et utilisateurs opérant à différentes échelles. Il est donc nécessaire de créer et d'appliquer des méthodes pour évaluer le succès des efforts de restauration en ce qui concerne l'écologie, l'économie et la société.

Il y a nécessité de déterminer les trajectoires de dégradation et ensuite, avec les initiatives de restauration, de concevoir ou d'adopter des indicateurs pour déterminer le succès de la restauration ; d'où l'adage selon lequel "on ne peut gérer quelque chose sans pouvoir le mesurer", nécessité de mesurer le coût de la restauration et de déterminer si les mesures de gestion dans une zone ont atteint l'objectif requis, puis de faire passer ces coûts et ces résultats du niveau local au niveau régional.

La restauration écologique des estuaires

## 8 Bibliographie

- Cardoso, P.G., Leston, S., Grilo, T.F., Bordalo, M.D., Crespo, D., Raffaelli, D., Pardal, M.A., 2010. Implications of nutrient decline in the seagrass ecosystem success. *Mar. Pollut. Bull.* 60, 601–608.
- Castro, N., Félix, P., Neto, J.M., Cabral, H., Marques, J.C., Costa, M.J., Costa, J.L., 2016. Fish communities' response to implementation of restoring measures in a highly artificialized estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 67: 743-752.
- Dolbeth, M., Cardoso, P.G., Grilo, T.F., Bordalo, M.D., Raffaelli, D., Pardal, M.A., 2011. Long-term changes in the production by estuarine macrobenthos affected by multiple stressors. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 92, 10–18
- Marques, J.C., Neto, J.M., Patrício, J., Pinto, R., Teixeira, H., Veríssimo, H., 2007a. Monitoring the Mondego estuary. Anthropogenic changes and their impact on ecological quality. Preliminary results from the first assessment of the effects of the re-opening the communication between north and south arms on the eutrophication state of the system. Final Report, January 2007. IMAR/INAG, 87pp.
- Neto, J.M., Teixeira, H., Patrício, J., Baeta, A., Veríssimo, H., Pinto, R., Marques, J.C., 2010. The response of estuarine macrobenthic communities to natural- and human-induced changes: dynamics and Ecological quality. *Estuar. Coasts* 33, 1327–1339.

- Patrício, J., Neto, J.M., Teixeira, H., Salas, F., Marques, J.C., 2009. The robustness of ecological indicators to detect long-term changes in the macrobenthos of estuarine systems. *Mar. Environ. Res.* 68, 25–36.
- Veríssimo, H., Neto, J.M., Teixeira, H., Franco, J.N., Fath, B.D., Marques, J.C., Patrício, J., 2012. Ability of benthic indicators to assess ecological quality in estuaries following management. *Ecol. Indic.* 19, 130–143.
- Amorim, E., Bordalo, A., Ramos, S., Elliott, M., Franco, A., 2017. Habitat loss and gain: Influence on habitat attractiveness for estuarine fish communities. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 197. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.08.043>
- Atkins, J.P., Burdon, D., Elliott, M., Gregory, A.J., 2011. Management of the marine environment: Integrating ecosystem services and societal benefits with the DPSIR framework in a systems approach. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 215–226. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.12.012>
- Barbier, E.B., Sally, D.H., Chris, K., Evamaria, W.K., Adrian, C.S., Brian, R.S., 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecol. Monogr.* 81, 169–193. <https://doi.org/10.1890/10-1510.1>
- Boerema, A., Meire, P., 2017. Management for estuarine ecosystem services: A review. *Ecol. Eng.* <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.051>
- Ceballos, G., Ehrlich, P.R., Barnosky, A.D., García, A., Pringle, R.M., Palmer, T.M., 2015. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Sci. Adv.* 1, e1400253. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400253>
- Chevillat, X., Tecchio, S., Chaalali, A., Lassalle, G., Selleslagh, J., Castelnaud, G., David, V., Bachelet, G., Niquil, N., Sautour, B., Lobry, J., 2018. Global Changes Jeopardize the Trophic Carrying Capacity and Functioning of Estuarine Ecosystems. *Ecosystems.* <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0282-9>
- Elliott, M., Quintino, V., 2007. The Estuarine Quality Paradox, Environmental Homeostasis and the difficulty of detecting anthropogenic stress in naturally stressed areas. *Mar. Pollut. Bull.* 54, 640–645.
- Lotze, H.K., Lenihan, H.S., Bourque, B.J., Bradbury, R.H., Cooke, R.G., Kay, M.C., Kidwell, S.M., Kirby, M.X., Peterson, C.H., Jackson, J.B.C., 2006. Depletion, degradation, and recovery potential of estuaries and coastal seas. *Science* (80-. ). 312, 1806–1809. <https://doi.org/10.1126/science.1128035>
- Simas, T.C., Ferreira, J.G., 2007. Nutrient enrichment and the role of salt marshes in the Tagus estuary (Portugal). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 75, 393.