



Numéro [numéro 119](#) · [Articles](#) · Mise en ligne : 01/2017

Les prairies de l'estuaire de la Loire : étude de la dynamique de la végétation de 1982 à 2014

par : [Mathieu Le Dez](#), [Jérôme Sawtschuk](#) et [Frédéric Bioret](#)

Mots-clés : [analyse diachronique](#), [dynamiques](#), [estuaire](#), [matrice de transition](#), [végétation](#)

L'analyse diachronique de cartes de végétation est réalisée pour caractériser les dynamiques de la végétation de l'estuaire de la Loire à différentes échelles spatiales et temporelles. Le modèle des matrices de transition est utilisé pour décrire quantitativement les dynamiques observées. Les analyses révèlent notamment la régression des prairies, le développement des roselières et des boisements ainsi que la progression des végétations halophiles. Ces résultats sont mis en relation avec l'évolution des usages sur ce territoire et les modifications du fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire.

The prairies of the Loire estuary: a study of the dynamics of vegetation from 1982 to 2014

This article presents the diachronic analysis of vegetation maps to characterize vegetation dynamics of Loire estuary at different spatial and temporal scales. A transition matrix model was applied to quantitatively describe the dynamic processes observed. Analyses reveal the regression of meadows, the development of reed beds, woodlands, and halophytes. These results can be related to changes in land use and hydro-sedimentary modifications of the estuary.

Key words: diachronic analysis, dynamics, estuary, transition matrix, vegetation

Las praderas del estuario del Loira : estudio de la dinámica de la vegetación entre 1982 y 2014

Para caracterizar la dinámica vegetal del estuario del Loira se ha realizado un análisis diacrónico, a diferentes escalas espaciales y temporales, mediante la cartografía de la vegetación. Se han utilizado matrices estocásticas para describir cuantitativamente las dinámicas observadas. Los resultados muestran una significativa regresión de las praderas, y la progresión de carrizales, tierras arboladas y vegetación halófila. Esto se debe a la evolución y cambios de los usos del suelo, y a las alteraciones en el funcionamiento hidromorfológico del río.

Palabras clave : análisis diacrónico, dinámicas, estuario, matrices estocásticas, vegetación

Introduction

L'estuaire de la Loire est caractérisé par une large ouverture sur l'océan atlantique (Romana, 1994). Cette configuration permet une remontée importante de la marée provoquant la rencontre entre les eaux douces du fleuve et les eaux salées de l'océan, ainsi que l'inondation régulière de la plaine alluviale. Comme la grande majorité des grands estuaires français, l'estuaire de la Loire a subi d'importantes transformations au cours des derniers siècles, liées au développement des activités humaines (Verger, 2005). Dès le Moyen-Âge, les marais bordant le fleuve ont été aménagés à des fins agricoles par la mise en place d'un réseau de douves et de vannes destinées à réguler les échanges hydrauliques (GIP Loire Estuaire, 2013). Plus récemment, la révolution industrielle du XIX^e siècle a amplifié la vocation industrialo-portuaire des principaux estuaires de la



façade atlantique (Doody, 2001 ; Beaumais et Laroutis, 2007) entraînant de nombreux travaux d'aménagements (remblais, approfondissement du lit du fleuve, endiguements). Ces aménagements ont notamment eu pour conséquences le comblement progressif des bras secondaires du fleuve, le rattachement de nombreuses îles au rivage, ainsi qu'une remontée du front de salinité vers l'amont (Verger, 2005). À ces modifications anthropiques, s'ajoutent désormais les conséquences potentielles des changements climatiques qui interagissent sur le fonctionnement hydro-sédimentaire (modification du régime des inondations, progression de la salinité...), impliquant de nouvelles transformations pour l'estuaire de la Loire (Day et al., 2008 ; Le Hir, 2014).

Les végétations qui se développent dans la plaine alluviale sont le reflet de cette histoire et de cet environnement particulier. Deux grandes périodes d'aménagement de l'estuaire de la Loire permettent d'identifier deux zones aux caractéristiques écologiques et fonctionnelles distinctes. La première, dénommée « prés de Loire », est principalement constituée de grandes prairies utilisées de manière extensive pour la fauche et le pâturage, où le niveau de l'eau est maîtrisé (GIP Loire Estuaire, 2013). La seconde, dénommée « bords de Loire », est formée des anciens bras et des anciennes îles rattachées plus récemment à la plaine alluviale. Cette zone, recouverte régulièrement par les eaux de la Loire, est constituée de prairies et de roselières pâturées de manière plus ou moins extensive.

La plaine alluviale de l'estuaire de la Loire a fait l'objet de plusieurs études concernant la typologie des végétations (De Foucault, 1984 ; Dupont et al., 1983 ; Magnanon, 1991 ; Ouest aménagement, 2003 ; Biotope, 2010). Certaines d'entre elles, accompagnées de cartographies de la végétation, représentent une source précieuse d'informations pour analyser la dynamique de la végétation dans le temps et dans l'espace.

Une première analyse diachronique entre 1982 et 2011 a été réalisée sur un secteur des bords de Loire de la rive nord de l'estuaire (Sawtschuk et Bioret, 2012). Elle a permis de révéler d'importants changements durant la période étudiée (développement des végétations halophiles, progression des roselières...) qui ont pu être mis en relation avec les conséquences des aménagements de l'estuaire et l'évolution des usages sur ce secteur. Ces résultats ont également contribué à l'élaboration d'hypothèses sur les évolutions futures de la végétation par rapport aux modélisations prédictives du fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Loire (Le Hir et al., 2014).

Suite à cette première étude, il est apparu important de poursuivre ce travail, en analysant les dynamiques de la végétation sur un territoire plus vaste. Pour ce faire, la présente étude intègre les prés de Loire et un nouveau secteur plus en amont. L'objectif général étant de caractériser les différentes trajectoires dynamiques de la végétation à différentes échelles spatiales et temporelles en lien avec les changements environnementaux et les évolutions d'usages.

Matériels et méthodes

Secteurs d'étude

Cette étude concerne deux secteurs de la rive nord de l'estuaire de la Loire intégrant les zones précédemment décrites (prés de Loire/bords de Loire) (**figure 1**). Ils ont été sélectionnés en fonction des données historiques disponibles : ils correspondent à deux secteurs dont la végétation a été cartographiée en 1982 (Dupont et al., 1983), dénommés secteur aval et secteur amont pour cette étude :

- Le secteur aval (1340 ha), situé dans la section intermédiaire du lit mineur de la Loire entre les communes de Lavau-sur-Loire et de Cordemais, est localisé à une distance comprise entre 20 et 25 km de l'embouchure de la Loire (Saint-Nazaire). Ce secteur est caractérisé par un important réseau d'étiérs et la présence de vasières le long des rives de la Loire (GIP Loire Estuaire, 2014) ;



- Le secteur amont (747 ha), situé dans la section endiguée du lit mineur de la Loire entre l'étier de la Musse et Couëron, est localisé à une distance comprise entre 35 et 40 km de l'embouchure de la Loire. Ce secteur correspond à la partie la plus étroite de l'estuaire, caractérisée par la présence d'épis et d'enrochements créant des rives abruptes aux surfaces marnantes réduites (GIP Loire Estuaire, 2014).



Figure 1. Cartes de localisation des deux secteurs d'étude (a : secteur aval et b : secteur amont) et présentation de l'évolution de l'estuaire depuis 1887 (carte reproduite d'après Verger (2005) avec l'autorisation de l'éditeur).

Exploitation des cartes de végétation

Dans le cadre de ce travail, la carte de 1982 (Dupont *et al.*, 1983) est comparée à deux cartes de végétation plus récentes couvrant l'ensemble des deux secteurs d'étude : une carte du site Natura 2000, réalisée en 2002 sur l'ensemble des marais de l'estuaire (Ouest aménagement, 2003), et une carte phytosociologique, réalisée en 2014 dans le cadre de cette étude. Cette dernière carte est accompagnée de 161 relevés phytosociologiques qui ont permis de définir la typologie des végétations.

Les analyses des cartographies ont été réalisées à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG) (Logiciel QGIS, version 2.8.1-Wien). La carte de Dupont *et al.*, existant uniquement sous format papier, a été scannée puis géoréférencée à partir d'une photo aérienne datant de la même année. Lors de cette phase d'acquisition, une incohérence a été notée pour la délimitation de la ligne de rive du bord de la Loire du secteur aval. Ce décalage a pour origine l'utilisation d'une photo aérienne de 1971 par Dupont *et al.* (celle de 1982 n'étant pas disponible au moment de l'étude). Cette erreur a été identifiée et corrigée en s'appuyant sur la photo aérienne de 1982 (Sawtschuk et Bioret, 2012). Ce décalage de la ligne de rive vers le fleuve s'explique par une accrétion sédimentaire qui s'est produite entre 1971 et 1982, liée aux travaux d'aménagement de l'estuaire (Gras, 1981). La position des polygones de végétation de la couche SIG de 1982 a donc été ajustée manuellement, à partir de la photo aérienne de 1982.

Les cartes de 2002 et 2014, vectorisées à partir des ortho-photographies de l'IGN, ont pu être directement intégrées dans le logiciel SIG, ce qui a évité les problèmes de superposition.

Les cartographies utilisées ayant été réalisées avec différents objectifs, échelles spatiales et niveau de connaissance (amélioration des connaissances phytosociologiques et développement des référentiels typologiques durant la période étudiée), leur finesse de représentation, ainsi que leur typologie sont variables. Le **tableau 1** présente les principales caractéristiques des trois cartes utilisées et permet de constater que :

- La carte de 1982 utilise une typologie relativement simplifiée, fondée essentiellement sur une approche physionomique des végétations. En revanche, l'échelle utilisée (1:5 000) et la finesse de représentation (1 701 polygones, surface minimum 32 m²) indiquent un niveau de précision élevé.
- La carte de 2002, à l'inverse, présente une typologie relativement détaillée et calée sur les référentiels typologiques courants (Bougault *et al.*, 2001 ; Bissardon *et al.* 1997), mais la représentation cartographique, réalisée à l'échelle du 1:25 000, est moins précise que dans l'étude de 1982 (691 polygones, surface minimum 130 m²). De plus, quelques zones restent non cartographiées.



- La carte de 2014, réalisée dans le cadre de cette étude, a intégré un niveau de précision se rapprochant de celle de 1982 pour la finesse de la représentation (1:5 000, surface minimum 26 m²), et de celle de 2002 pour la typologie.

Tableau 1. Principales caractéristiques des cartes de végétation

Carte	Échelle	Nombre de polygones	Surface du plus petit polygone cartographié	Typologie (nombre de groupement différents)
1982 (Dupont <i>et al.</i> , 1983)	1:5000	1 701	32 m ²	Approche physionomique des végétations caractérisées par les espèces dominantes (23 groupements représentés)
2002 (Ouest aménagement, 2003)	1:25000	691	130 m ²	Utilisation des référentiels courants de classification de la végétation (39 groupements représentés)
2014	1:5000	2 491	26 m ²	Utilisation des référentiels courants de classification de la végétation (33 groupements représentés)

Compte tenu de ces différences, il s'est avéré nécessaire d'harmoniser les cartes en élaborant une typologie commune permettant d'atteindre un niveau de représentation comparable ([annexe 1](#)). Celle-ci a été réalisée par le regroupement des unités de végétation sur la base de critères physionomiques et écologiques ([tableau 2](#)), en s'inspirant de la typologie réalisée en 2011 (Sawtschuk et Bioret, 2012) et des connaissances issues des travaux sur la classification et l'écologie des végétations.



Tableau 2. Caractéristiques des groupements de la typologie commune (physionomie, écologie, espèces et usages).

Analyse des données

Dans un premier temps, les cartes de 1982, 2002 et 2014 ont été mises en forme selon la typologie commune, puis les superficies totales de chaque groupement ont été calculées, afin de quantifier leur évolution spatio-temporelle. Dans un second temps, les cartes ont été croisées entre deux dates consécutives pour évaluer la dynamique de la végétation. Ce travail a permis d'obtenir une nouvelle couche d'information géographique, composée de nouveaux polygones résultant de l'agrégation de deux cartes. Ces polygones possèdent comme information le groupement de végétation présent à la première date puis à la seconde date, ainsi que la superficie concernée. Afin de simplifier le jeu de données, les groupements en mosaïque ont été rattachés à des groupements élémentaires, en divisant leur superficie par le nombre de types de végétation les constituant. Quatre nouvelles couches de données ont ainsi été constituées, décrivant les transitions observées entre 1982 et 2002, et celles observées entre 2002 et 2014 pour le secteur aval et le secteur amont.

Ces données ont ensuite été analysées par le modèle des matrices de transition de Markov (Usher, 1992) qui permet de décrire de manière quantitative la dynamique du paysage d'un territoire. Les valeurs de la matrice indiquent les proportions d'évolution d'un groupement à un autre entre deux dates. Ce modèle est notamment utilisé en écologie pour décrire les successions végétales et pour construire des modèles prédictifs de végétation (Urban et Wallin, 2002 ; Coquillard et Hill, 1997 ; Sawtschuk, 2010 ; Baasch *et al.*, 2010 ; Gallet et Sawtschuk, 2013). Quatre matrices de transitions ont ainsi été réalisées. Les valeurs des matrices ont ensuite été rassemblées à l'intérieur d'une matrice globale, permettant une comparaison des résultats dans le temps (entre chaque période) et dans l'espace (entre chaque secteur). Les résultats ont ensuite été synthétisés sous la forme de schémas.



Le travail de cartographie de la végétation par photo-interprétation implique un degré de subjectivité dans la réalisation des cartes (délimitation des entités, interprétation des types de végétation) pouvant entraîner des différences importantes entre auteurs (Hearn *et al.*, 2011 ; Cherrill, 2014 ; Cherrill et McClean 2001). De plus, les cartes ayant été réalisées à des périodes différentes, l'évolution de la qualité des supports cartographiques (amélioration de la qualité des photographies aériennes, apparition des clichés couleur) et des techniques (représentation sur carte papier puis digitalisation à l'aide des SIG) engendre des risques de divergences supplémentaires entre auteurs (Gourmelon *et al.*, 2005 ; Vanden Borre *et al.*, 2011). Malgré la connaissance de ces aléas, il est impossible d'évaluer concrètement leurs importances et de quantifier le risque d'erreur que cela peut engendrer lors du croisement des cartes. Néanmoins, afin de limiter la présence de tels artefacts dans les résultats de cette étude, deux dispositions ont été prises :

- L'élaboration d'une typologie commune relativement simplifiée, ne retenant que 7 groupements (**tableau 2**), permettant ainsi de limiter les risques d'erreurs d'interprétation des différents types de végétation entre les auteurs.
- La conservation des principales transitions pour l'interprétation des résultats. Seules les transitions représentant une surface de plus de 5 hectares et 2% de la superficie initiale des groupements de végétation ont été considérées comme représentatives de changements réels. En-deçà de ces seuils, apparaissent des transitions jugées comme douteuses et très probablement liées à des décalages dans la délimitation des entités.

Résultats

Les cartes de végétation mises en forme avec la typologie commune (**figure 2**) permettent de distinguer les zones des prés de Loire et des bords de Loire : leurs végétations présentent une composition et une dynamique très différentes. Les prés de Loire montrent une très grande stabilité temporelle. Seules l'apparition ou la disparition de quelques roselières (petite roselière douce et roselière douce à saumâtre) peuvent être observées localement, mais toujours sur des superficies réduites. Les bords de Loire révèlent, quant à eux, une organisation et une dynamique de la végétation beaucoup plus complexe. Cette zone se caractérise par d'importantes surfaces de roselières évoluant dans leur composition et dans l'espace, par le développement de certains éléments surfaciques (eau libre, boisement) et l'apparition de nouveaux groupements végétaux (prés-salés).



Figure 2. Cartes des groupements de végétation sur les deux secteurs d'étude (1982, 2002, et 2014).

Compte tenu de ces premiers résultats, seules les zones des bords de Loire des deux secteurs ont fait l'objet d'une analyse plus détaillée, présentée dans la suite de cet article.

Dynamiques des bords de Loire

Les diagrammes représentant les superficies de chaque groupement cartographié sur les bords de Loire aux trois dates (1982, 2002 et 2014) et sur les deux secteurs (aval et amont) sont représentés sur **la figure 3**. La matrice de transition globale des bords de Loire, intégrant les valeurs de transitions (T_{ni-nj})¹ pour les deux périodes analysées (1982-2002/2002-2014) sur les deux secteurs (aval et amont) est représentée dans le **tableau 3** et schématisée dans la **figure 4**.



Figure 3. Superficie (en hectares) des groupements en 1982, 2002 et 2014 sur les bords de Loire des deux secteurs d'étude.



Figure 4. Représentation schématique des principales transitions sur les bords de Loire des deux secteurs d'étude entre 1982, 2002 et 2014. La couleur de la flèche indique l'importance de la transition (en % de la superficie initiale du groupement). (Seules les transitions des groupements d'une superficie supérieure à 10 hectares sont représentées, ainsi que les transitions représentant plus de 5 hectares et 2% de la superficie initiale).

Secteur aval : régression des prairies et progression des végétations halophiles

Sur les bords de Loire du secteur aval, la prairie est le groupement dominant aux trois dates, mais bien que possédant une stabilité importante ($T_{1982-2002}$: 73% ; $T_{2002-2014}$: 74%) sa surface régresse progressivement (436 ha en 1982, 362 ha en 2002, 333 ha en 2014). Celle-ci évolue principalement vers les roselières (en particulier la petite roselière saumâtre ($T_{1982-2002}$: 9% ; $T_{2002-2014}$: 12%) et la roselière douce à saumâtre ($T_{1982-2002}$: 9% ; $T_{2002-2014}$: 3%), ainsi que vers le pré-salé ($T_{1982-2002}$: 3% ; $T_{2002-2014}$: 5%) et l'eau libre ($T_{2002-2014}$: 4%). Les surfaces de roselières (tous types confondus) augmentent, principalement entre 1982 et 2002, puis, plus légèrement entre 2002 et 2014 (140,1 ha en 1982, 215,6 ha en 2002, 224,0 ha en 2014). Les résultats montrent également une modification de leur composition avec une très forte régression de la petite roselière douce (passant ainsi de 93,6 ha à 6 ha sur cette période). À l'inverse, la petite roselière saumâtre très peu représentée en 1982 (4,8 ha), se développe de manière très importante, principalement sur la période 1982-2002 pour atteindre 82,8 ha, puis 92,3 ha en 2014. On observe la même évolution pour la roselière douce à saumâtre dont la superficie passe de 41,6 ha en 1982 à 126,8 ha en 2002. Le développement de ces deux derniers types de roselières s'est fait principalement au détriment de la petite roselière douce (évolution de 35% vers la roselière douce à saumâtre et 28% vers la petite roselière saumâtre de 1982 à 2002), par la colonisation de surfaces de prairies ainsi que par la conquête de nouvelles surfaces sur la Loire. Ce dernier phénomène a entraîné l'apparition de 36,5 ha de nouvelles surfaces de végétation entre 1982 et 2002 (**figure 3**). La période 1982-2002 voit également l'apparition du pré-salé, avec 12,3 ha cartographiés en 2002, puis 28,8 ha en 2014. L'eau libre augmente aussi passant de 2,2 ha en 1982 à 9 ha en 2002 puis 24,3 ha en 2014.

Secteur amont : régression des prairies et développement des roselières et boisements

De même que pour le secteur aval, la prairie est le groupement dominant dans le secteur amont (**figure 3**). Sa surface régresse entre 1982 et 2002 (180,1 ha en 1982, 117,0 ha en 2002) et reste globalement stable entre 1982 et 2014 (120,5 ha en 2014). La prairie évolue principalement vers les roselières (petite roselière douce $T_{1982-2002}$: 22% ; $T_{2002-2014}$: 15%) et la roselière douce à saumâtre $T_{1982-2002}$: 16%) ainsi que vers le boisement ($T_{1982-2002}$: 6%). Les surfaces de la petite roselière douce évoluent peu aux trois dates (99 ha



en 1982, 78 ha en 2002 et 86 ha en 2014). Cette relative stabilité des surfaces cache une dynamique importante de ce groupement qui peut localement régresser vers la prairie ($T_{1982-2002}$: 24% ; $T_{2002-2014}$: 31%) ou la roselière douce à saumâtre ($T_{1982-2002}$: 25%) tout en progressant sur de nouvelles surfaces en remplacement de la prairie. En 1982, la superficie totale de la roselière douce à saumâtre est de 13 ha, essentiellement représentée en liseré le long de la Loire et des étiers. Entre 1982 et 2002, une grande partie de ces surfaces ($T_{1982-2002}$: 47%) évolue vers la Loire, tandis que ce groupement colonise de nouvelles surfaces, principalement dans la partie sud-est de la zone, au détriment de la prairie et de la petite roselière douce. Près de la moitié de la roselière douce à saumâtre se maintient entre 2002 et 2014 ($T_{2002-2014}$: 45%), tandis qu'un tiers évolue vers la petite roselière douce et 19% vers le boisement. Le boisement est essentiellement présent dans la partie sud-est du secteur d'étude. Sa superficie augmente progressivement, passant de 11,6 ha en 1982 à 43,9 ha en 2014, ce boisement s'effectue principalement sur des zones de prairies ou de roselières et présente une stabilité dans le temps ($T_{1982-2002}$: 55% ; $T_{2002-2014}$: 88%). La petite roselière saumâtre apparaît en 2014 avec 0,2 ha. En revanche, aucune des cartes n'indique la présence du pré-salé sur ce secteur.

Discussion

Analyse de la dynamique des végétations entre 1982 et 2014

Sur les zones des prés de Loire, l'analyse des cartes de végétation met en évidence la grande stabilité de la prairie sur les deux secteurs durant la période étudiée. Ce résultat révèle le maintien des usages agricoles (fauche et pâturage) qui sont les seules pratiques possibles sur ces terres inondables, limitant la fermeture des milieux par le développement des roselières et des boisements (GIP Loire Estuaire, 2014). De plus, cette agriculture extensive est aujourd'hui favorisée par des mesures agro-environnementales ayant pour objectif la préservation de ces espaces remarquables, (Chadenas *et al.*, 2009). À l'inverse, les résultats des analyses des zones des bords de Loire montrent d'importants changements en trois décennies. Les dynamiques observées peuvent être communes aux deux secteurs d'études ou uniquement présentes en aval ou en amont.

Dynamiques communes aux bords de Loire

Une évolution des usages agricoles favorisant le développement des roselières

Les surfaces de prairies des bords de Loire régressent sur les deux secteurs, principalement au profit des roselières (petite roselière douce, roselière douce à saumâtre, petite roselière saumâtre). Dans ces espaces de marais, la présence de prairies est liée aux pratiques agricoles (fauche ou pâturage), permettant le maintien d'une végétation basse dominée par les graminées. L'abandon de la gestion des prairies conduit au développement progressif des hélophytes et à l'installation de roselières. Ce phénomène d'abandon des usages agricoles sur certains secteurs des bords de Loire avait déjà été constaté en 2011 (Sawtschuk et Bioret, 2012) et est confirmé par le témoignage d'agriculteurs. Le mauvais entretien des ouvrages d'accès (chemins, passerelles...) peut être à l'origine de cette dynamique d'abandon sur certaines prairies. De plus, l'augmentation de la durée d'inondation de certains espaces par le comblement d'étiers peut également rendre de plus en plus difficile le maintien des usages, favorisant le développement des roselières (Hroudová et Zakravsky, 1999). Les résultats permettent également de mettre en évidence des transitions de roselières vers la prairie, indiquant qu'il existe en certains endroits une dynamique inverse. Ce phénomène est à mettre en relation avec la gestion agricole des bords de Loire par le pâturage. En fonction de la pression de pâturage, les animaux peuvent favoriser le développement des roselières ou de la prairie, ces deux formations se répartissant le plus souvent en mosaïque.

Le développement récent d'une pratique cynégétique aux dépens du pâturage

L'augmentation des surfaces d'eau libre correspond également à un phénomène commun aux deux secteurs d'études. Ce changement d'origine anthropique, correspondant à la création de mares de chasse sur les bords



de Loire, participe à la diminution des surfaces de prairies. Ces mares, destinées à attirer le gibier d'eau en période de migration, résultent du développement d'un nouveau type de chasse : plus d'une centaine de mares ont été creusées sur l'ensemble de l'estuaire de la Loire de 1982 jusqu'au début des années 2000 (GIP Loire Estuaire, 2006). Sur les deux secteurs étudiés, plus d'une vingtaine de mares ont été dénombrées en 2014 (**figure 2**).

Dynamiques particulières au secteur aval

Le développement des végétations halophiles

Sur le secteur aval, la très forte régression de la petite roselière d'eau douce, la progression de la petite roselière saumâtre, ainsi que l'apparition du pré-salé traduisent une augmentation de la salinité des eaux de recouvrement (Biondi *et al.*, 2004). Ce phénomène est lié aux aménagements réalisés au XX^e siècle pour le développement de la navigation dans l'estuaire de la Loire (approfondissement du chenal, endiguements, surcreusement du bassin à marée à l'amont de Nantes), favorisant la progression du front de salinité (zone avec 0,5‰ de sel) de plusieurs dizaines de kilomètres vers l'amont (Ottmann, 1987 ; Migniot et Le Hir, 1997). Ces résultats mettent en évidence les conséquences de ces changements sur la végétation, entraînant le déplacement des espèces de l'aval vers l'amont en fonction de leur tolérance au sel, confirmant les observations des études plus anciennes (Dupont *et al.*, 1983 ; Magnanon *et al.*, 1998).

La progression des roselières vers la Loire

Entre 1982 et 2014, plus de 30 hectares de végétation ont fait leur apparition sur le secteur aval. Il s'agit principalement de la petite roselière saumâtre et de la roselière douce à saumâtre qui se sont développées sur des vasières, appartenant initialement au lit mineur de la Loire. Cette progression de la végétation est le résultat d'un phénomène d'accrétion sédimentaire induisant un déplacement de la ligne de rive vers le fleuve (Gras, 1981). Ce phénomène a également pour origine les conséquences des travaux d'aménagement de l'estuaire qui ont provoqué une forte modification des apports sédimentaires (Demaure, 1979 ; Migniot et Le Hir, 1997).

Dynamiques particulières au secteur amont

Le développement du boisement

Sur le secteur amont, le développement du boisement sur la partie sud-est peut-être mis en relation avec la dynamique d'abandon des prairies précédemment évoquée. L'arrêt des usages agricoles sur les bords de Loire conduit à la fermeture du milieu par le développement des roselières, puis progressivement à l'installation spontanée des saules. Cette dynamique ancienne, initiée dès le début des années 1980, est la conséquence de l'arrêt des usages agricoles à cet endroit, en grande partie lié à un projet de construction d'une zone industrielle (Dupont *et al.*, 1983). Mais une part importante de la progression du boisement est également liée au développement de plantations de peupliers, pour la plupart déjà installées dès 1982, et dont l'extension s'est poursuivie depuis.

Une légère dynamique d'érosion des berges

Contrairement au secteur aval, les résultats des analyses sur le secteur amont montrent une légère érosion des berges de la zone des bords de Loire, ce qui se traduit par une régression des roselières de rive de Loire. Ce phénomène est vraisemblablement lié à la position du secteur amont, situé au niveau de la section endiguée de l'estuaire, caractérisé par un lit étroit et des rives relativement pentues qui favorisent probablement l'érosion des berges.



Le maintien des végétations de milieux doux à subsaumâtres

Contrairement au secteur aval, où la végétation a considérablement évolué vers des groupements plus halophiles, les résultats des analyses sur le secteur amont indiquent que la remontée du front de salinité n'a pas encore impliqué de changements significatifs sur les végétations de ce territoire. Seule l'apparition de la petite roselière saumâtre en 2014 peut être attribuée à ce phénomène, mais de manière globale, l'importante stabilité de la petite roselière douce indique le maintien de faibles niveaux de salinité des eaux alimentant ce secteur.

Hypothèses sur les dynamiques futures : impacts du changement climatique

Parmi les changements observés sur la végétation, Il est pour l'instant difficile de distinguer d'éventuelles évolutions imputables au changement climatique. Cependant, les impacts du changement climatique devraient s'amplifier dans l'avenir et provoquer des modifications dans le fonctionnement hydro-sédimentaire des estuaires, avec une variation du niveau marin et du régime des tempêtes en aval, et une évolution des apports liquides et solides en amont (Day *et al.* 2008). Dans le cadre du programme C3E2 « Conséquences du Changement Climatique sur l'Ecogéomorphologie des Estuaires », les impacts de ces prévisions ont été modélisés sur l'estuaire de la Loire (Le Hir, 2014). Les résultats de ce travail prévoient la poursuite de la remontée du front de salinité dans l'estuaire, le développement de la masse du bouchon vaseux et l'augmentation des périodes et des hauteurs de submersion de la plaine alluviale. Les dynamiques de la végétation observées dans le passé permettent d'envisager les conséquences possibles de ces changements futurs. Les végétations les plus halophiles (roselière douce à saumâtre, petite roselière saumâtre, pré-salé) seraient favorisées par l'augmentation de la salinité et devraient continuer à progresser. À l'inverse, les végétations les moins tolérantes au sel (petite roselière douce) devraient continuer à régresser. L'augmentation des submersions pourrait avoir pour effet de limiter les périodes d'accès aux prairies pour l'agriculture (fauche, pâturage). Ce phénomène entraînerait de nouvelles dynamiques d'abandon, favorisant notamment le développement des roselières. L'augmentation de la masse du bouchon vaseux pourrait avoir pour conséquence l'augmentation des dépôts de vase sur les prairies, favorisant les végétations pionnières (groupement à *Atriplex*) déjà mis en évidence en 2011 (Sawtschuk et Bioret, 2012).

Intérêts et limites de la méthode

Les résultats de ce travail mettent en avant l'intérêt de l'analyse diachronique de cartographies de végétation pour décrire la dynamique globale de la végétation du territoire ainsi que pour caractériser des dynamiques propres à chaque secteur. Une perspective de ce travail serait d'utiliser ces données dans des modèles de simulation des changements d'occupation et d'usage du sol (Pontius *et al.*, 2008 ; Maestriperi et Paegelow, 2013).

En revanche, l'utilisation de cartographies de végétation réalisées par différents auteurs, dans le cadre de travaux n'ayant pas les mêmes objectifs, nécessite, d'une part, une harmonisation des typologies passant par une simplification importante, et d'autre part, la prise en compte uniquement des principales transitions, afin d'éviter l'apparition d'erreurs liées notamment aux différences de finesse dans les représentations cartographiques. De ce fait, ce type d'approche ne permet pas d'observer des phénomènes plus fins (par exemple des dynamiques entre les différents types de prairies) ou plus localisés (changements représentant de faibles surfaces). De même, l'analyse de la dynamique de la végétation sur des pas de temps de l'ordre de la décennie, ne permet pas de mettre en évidence la présence de phénomènes plus ponctuels pouvant intervenir sur des périodes plus courtes. Par exemple, les végétations pionnières (groupement à *Atriplex*) apparues en 2011 (Sawtschuk et Bioret, 2012) à la suite de la tempête Xynthia de 2010 ne sont plus visibles avec les analyses réalisées dans cette étude. Afin de préciser les résultats de cette étude, il pourrait être intéressant de mettre en place des suivis plus fins et plus réguliers par l'utilisation d'autres outils de suivis de la végétation (méthode des points contacts, des placettes permanentes...).



Conclusion

Réalisé dans la continuité des différentes études et cartographies de la végétation de l'estuaire de la Loire menées depuis 1982, ce travail a permis de confirmer et de développer les connaissances sur la dynamique des végétations au cours des trois dernières décennies. L'analyse d'un territoire plus grand que l'étude précédente (Sawtschuk et Bioret, 2012) a permis de révéler que les dynamiques ne sont pas similaires selon les secteurs analysés. Les prés de Loire ont montré une très grande stabilité, en lien avec le maintien des pratiques agricoles. Les bords de Loire se caractérisent par une dynamique beaucoup plus importante (progression des végétations halophiles, développement des roselières...). Les changements observés ont été attribués à l'évolution des usages et aux modifications du fonctionnement hydro-sédimentaire du fleuve dont les conséquences peuvent être communes aux deux secteurs ou particulières à l'un des deux. Ces conclusions pourront être complétées par une analyse de l'évolution des usages sur ce territoire à l'image de l'étude sur la dynamique des pratiques agricoles réalisée sur la rive sud de l'estuaire de la Loire entre 1992 et 2008 (Chadenas *et al.*, 2009). Ce travail est en cours de réalisation dans le cadre du programme de recherche ICEPEL « Impacts socio-économiques des changements environnementaux des complexes prairiaux de l'estuaire de la Loire : approche prospective ». Néanmoins, ces résultats ont permis d'émettre des hypothèses sur la poursuite de certains de ces phénomènes.

Remerciements

Nous remercions pour leurs collaborations et la mise à disposition de documents et de données l'équipe du Laboratoire Dynamiques de l'Environnement Côtier de l'IFREMER de Brest, l'équipe du GIP Loire Estuaire, Jean-Yves Bernard (Parc naturel régional de Brière), ainsi que l'équipe de l'antenne Pays-de-la-Loire du Conservatoire Botanique National de Brest.

Ce travail a été financé par le Ministère de l'Écologie, du développement durable, des transports et du logement, dans le cadre du programme de recherche « Conséquence des changements climatiques sur l'écogéomorphologie des estuaires » (C3E2, 2011-2014) du Programme Gestion et Impacts du Changement Climatique et par la Fondation de France dans le cadre du programme de recherche ICEPEL « Impacts socio-économiques des changements environnementaux des complexes prairiaux de l'estuaire de la Loire : approche prospective » (ICEPEL 2015-2017), appel d'offres « Quels littoraux pour demain ? ».

Bibliographie

BAASCH A., TISCHEW S., BRUELHEIDE H. (2010). « Twelve years of succession on sandy substrates in a post-mining landscape: A Markov chain analysis ». *Ecological Applications*, vol. 20, n°4, p. 1136-1147.

BEAUMAIS O., LAROUTIS D. (2007). « In search of natural resource based economies: the Case of the Seine Estuary ». *Hydrobiologia*, vol. 558, p. 3-11.

BIONDI E., FILIGHEDDU R.S., FARRIS E. (2004). « Cartography and diachronic analysis of the vegetation of S'Ena Arrubia Lagoon (Centre-Western Sardinia) ». *Fitosociologia*, vol. 41, n°1, suppl. 1, p. 109-116.

BIOTOPE (2010). *Acquisition et analyse de données sur la flore et les habitats floristiques de l'estuaire de la Loire entre Donges et Lavau-sur-Loire*. GIP Loire Estuaire, 47 p.

BISSARDON M., GUIBAL L., sous la direction de RAMEAU J. (1997). *CORINE Biotopes. Version originale, types d'habitats français*. Nancy : ENGREF, 179 p.

BOUGAULT C., HARDEGEN M., QUÉRÉ E. (2001). *Référentiel typologique des habitats naturels et semi-naturels*



bretons, bas-normands et des pays de la Loire. Version 2. Conservatoire Botanique National de Brest. (www.cbnbrest.fr).

CHADENAS C., POURINET L., DENIAUD C. (2009). « Retour sur l'agriculture en marais estuariens : évolution d'une zone atelier en rive sud de la Loire (1992-2008) ». *Cahiers Nantais*, n°72, p. 79-87.

CHERRILL A. (2014). « The occurrence, causes and consequences of inter-observer variation in identification of vegetation types and recommendations for improvements to standard ecological survey methods ». Harper Adams University, Edgmond, UK.

CHERRILL A., McCLEAN C. (2001). « Omission and commission errors in the field mapping of linear boundary features: Implications for the interpretation of maps and organisation of surveys ». *Journal of Environmental Planning and Management*, vol. 44, n°3, p. 331-343.

COQUILLARD P., HILL D. R. C. (1997). *Modélisation et Simulation d'Ecosystèmes : des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*. Paris : Masson, coll. « Recherche en Écologie », 273 pages.

DAY J.W., CHRISTIAN R.R., BOESCH D.M., YÁÑEZ-ARANCIBIA A., MORRIS J., TWILLEY R.R., NAYLOR L., SCHAFFNER L., STEVENSON C. (2008). « Consequences of Climate Change on the Ecogeomorphology of Coastal Wetlands ». *Estuaries and Coasts*, vol. 31, n°3, p. 477-491.

DEMAURE J.C. (1979). « Les contraintes écologiques à l'aménagement de l'estuaire de la Loire ». *Penn ar bed*, vol. 12, fasc. 2, n°97, p. 57-72.

DOODY J.P. (2001). *Coastal conservation and management: an ecological perspective*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 328 p. ISBN 978-94-010-0971-3

DUPONT P., BERNARD J.Y., BIORET F. (1983). *Étude des associations végétales dans les zones humides de l'estuaire de la Loire*. Laboratoire d'Écologie et de Phytogéographie, Université de Nantes. 96 p.

FOUCAULT B. de. (1984). *Systémique, structuralisme et synsystématique des prairies hygrophiles des plaines atlantiques françaises*. Thèse, Université de Rouen, 675 p., 248 tableaux.

GALLET S., SAWTSCHUK J. (2013). « Restoration dynamics evaluation by vegetation mapping and transition matrix modelling: analysis of 20 yr of restoration and management at the megalithic site of Carnac (Brittany, France) ». *Applied Vegetation Science*, vol. 17, n°2, p. 225-235.

GIP LOIRE ESTUAIRE (2006). « La chasse au gibier d'eau ». *Cahier indicateurs*, GIP Loire Estuaire, n°1, L3A7, 8 p.

GIP LOIRE ESTUAIRE (2013). « Lettre du GIP N°15 ». GIP Loire Estuaire, 4 p.

GIP LOIRE ESTUAIRE (2014). « Les surfaces marnantes ». *Cahier indicateurs*, GIP Loire Estuaire, L1D3, 8 p.

GOURMELON F., BIORET F., SAUVE L. (2005). « Potentialité de l'imagerie satellitaire SPOT5 pour la cartographie de la végétation terrestre. Application à l'île d'Ouessant ». *Cybergeog*, revue européenne de géographie. [En ligne](#)

GRAS J. (1981). « L'estuaire de la Loire une étude générale d'environnement ». *Noréis*, n°109, janvier-mars 1981. p. 5-30.

HEARN S.M., HEALEY J.R., McDONALD M.A., TURNER A.J., Wong J.L.G., STEWART G.B. (2011). « The repeatability of vegetation classification and mapping ». *Journal of Environmental Management*, vol. 92, n°4, p. 1174-1184.

HROUDOVA Z., ZAKRAVSKY P. (1999). « Vegetation dynamics in a fishpond littoral related to human impact »,



Hydrobiologia, 415, p. 139-145.

LE HIR P. (2014). *Rapport final des résultats du programme de recherche C3E2 (Conséquences du Changement Climatique sur l'Ecogéomorphologie des Estuaires)*. Programme Gestion et Impacts du Changement Climatique (GICC), Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, partie 1 et 2, 285 p.

MAESTRIPIERI N., PAEGELOW M. (2013). « Validation spatiale de deux modèles de simulation : l'exemple des plantations industrielles au Chili ». *Cybergeo*, revue européenne de géographie, article 623, 23 p. [En ligne](#)

MAGNANON S. (1991). *Contribution à l'étude des prairies inondables du marais de Donges et l'estuaire de la Loire. Phyto-écologie, phytosociologie, valeur agronomique*. Thèse, Université de Nantes, 269 p. + annexes.

MAGNANON S., DUPONT P., BIORET F. (1998). *Angelica heterocarpa dans l'estuaire de la Loire : répartition, écologie, menaces. Propositions de mesures de gestion*. Conservatoire Botanique National de Brest, DIREN Pays de la Loire 25 p + cartes et annexes.

MIGNIOT C., LE HIR P. (1997). « Estuaire de la Loire - Rapports de synthèse de l'APEEL 1984-1994. Vol. I ». *Hydrosédimentaire*. 89 p.

OTTOMAN F. (1987). « Les modifications physiques de l'estuaire de la Loire et leurs conséquences socioéconomiques ». *Noréis*, n°133-135, p. 81-89.

OUEST AMÉNAGEMENT (2003). *Inventaire et cartographie Natura 2000 de la Loire en aval de Nantes, volume 1 : flore et végétation*. DREAL Bretagne, 80 p. + cartographies.

PONTIUS R.G., BOERSMA W., CASTELLA J.-C., CLARKE K., DE NIJS T., DIETZEL C., DUAN Z., FOTSING E., GOLDSTEIN N., KOK K., KOOMEN E., LIPPITT C., MCCONNELL W., MOHD SOOD A., PIJANOWSKI B., PITHADIA S., SWEENEY S., TRUNG T., VELDKAMP A., VERBURG P.H. (2008). « Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change ». *The Annals of Regional Science*, vol. 42, n°1, p. 11-37.

ROMANA A.L. (1994). « Les grands estuaires français ». IFREMER, revue *Equinoxe*, spécial environnement littoral n°47-48, mars-avril 1994, 6 p.

SAWTSCHUK J. (2010). *Restauration écologique des pelouses et des landes des falaises littorales atlantiques : Analyse des trajectoires successioneles en environnement contraint*. Thèse de l'Université de Bretagne occidentale, 397 p.

SAWTSCHUK J., BIORET F. (2012) « Analyse diachronique de la dynamique spatiale de la végétation de l'estuaire de la Loire ». *Photo-interprétation*, vol. 48, n°3, p. 15-28.

URBAN D.L., WALLIN D.O. (2002) « Introduction to Markov models ». In GERGEL S.E, TURNER M.G (ÉD.) *LEARNING LANDSCAPE ECOLOGY: A PRACTICAL GUIDE TO CONCEPTS AND TECHNIQUES* . NEW YORK : SPRINGER, p. 35-48. ISBN 978-0-387-21613-3

USHER M.B. (1992). « 6 Statistical models of succession ». In GLENN-LEWIN D.C., PEET R.K., VEBLEN T.T. (ÉD.). *PLANT SUCCESSION: THEORY AND PREDICTION*. P. 215-248.

VANDEN BORRE J., PAELINCKX D., MÜCHER C.A., KOOISTRA L., HAEST B., DE BLUST G., SCHMIDT A.M. (2011). « Integrating remote sensing in Natura 2000 habitat 18 monitoring: Prospects on the way forward ». *Journal for Nature Conservation*, vol. 19, n°2, p. 116-125.



VERGER F. (2005). *Marais et estuaires du littoral français*. Paris : Belin, 335 p. ISBN 2-7011-3339-4



Annexe 1. Tableau des correspondances entre les typologies des cartes utilisées pour les analyses diachroniques.

Notes

1. ↑ Tni-nj : Pourcentage de transition entre la première année (ni) et l'année suivante (nj)