



Pour :

GPMNSN

Réalisation d'un suivi de la sédimentation latérale

Rapport d'étude

Référence Document : HCR/BT/12/11/GPMNSN/SLR1

Version : 1.3

Date : Janvier 2013

Auteur : F. DESMAZES

LISTE DE DIFFUSION

Destinataire	Organisme/Service	Nombre d'exemplaire	Pour	
			Action	Consultation
D. Lehay	GPMNSN / Service Environnement et Hydraulique	1	X	

SOMMAIRE

A. Introduction	5
B. Synthèse bibliographique	5
B.I. Vasières et prairies latérales estuariennes	5
B.I.1. Généralités sur les dépôts sédimentaires estuariens	5
B.I.2. Côtes vaseuses estuariennes	6
B.I.2.1 La slikke	7
B.I.2.2 Transition entre la slikke et le shore	8
B.I.2.3 Le shore.....	8
B.I.2.4 Différents types de côtes vaseuses en climat tempéré.....	10
B.II. Les vasières estuariennes	10
B.II.1. Processus sédimentaires	11
B.II.1.1 Sédimentation.....	11
B.II.1.2 Diagenèse précoce.....	12
B.II.1.3 Érosion	13
B.II.2. Classification des vasières estuariennes.....	14
B.III. Les marais estuariens.....	15
B.III.1. Généralités	15
B.III.2. Aménagements et exploitation des marais	17
B.III.3. Schéma synthétique	19
B.IV. Cas d'estuaires à bouchon vaseux	21
B.IV.1. La Seine	21
B.IV.1.1 Vasières	21
B.IV.1.2 Marais.....	21
B.IV.2. La Gironde.....	22
B.IV.2.1 Vasières	22
B.IV.2.2 Marais.....	24
B.V. Bilan des facteurs d'évolution des vasières et des marais	24
C. Cas de l'estuaire de la Loire	27
C.I.1. Effet des cycles glaciaires sur les dépôts sédimentaires	27
C.I.2. Effet des aménagements humains	29
C.I.3. Évolution et dynamique des vasières	36
C.I.3.1 Vasières de la section aval.....	38
C.I.3.2 Vasières de la section intermédiaire.....	38
C.I.4. Marais et prairies humides de l'estuaire.....	56
C.I.4.1 Généralités.....	56
C.I.4.2 Espaces ouverts et roselières	57
C.I.4.3 Marais.....	58
C.I.4.4 Submersion des berges et sédimentation dans les marais et prairies.....	59
D. Conclusion.....	75
E. Bibliographie	77

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure B.1 : Schéma morpho-sédimentaire d'un estuaire en fonction des processus hydrodynamiques. Source : d'après Paskoff, 1998 et Davis, 1996.....	6
Figure B.2 : Marais maritime en climat tempéré. Source : Paskoff, 1998.	6
Figure B.3 : Réseaux de chenaux de marée sur la slikke. Source : Paskoff, 1998 et Verger, 2009.....	8
Figure B.4 : Image d'un shorre parcouru de chenaux dans l'estuaire de la Rance. Source : Salomon, 2008.....	9
Figure B.5 : Différents types de côtes vaseuses en climat tempéré. A) état initial b) Etat intermédiaire c) marais mature. Source : Woodroffe, 2002.	10
Figure B.6 : A) Profil vertical de concentration schématisant les phases de dépôt des sédiments fins. B) Cycle d'évolution des couches turbides de fond, depuis la vase fluide (crème de vase) à la vase consolidée.....	12
Figure B.7 : Exemples d'érosion à la surface de la vase d'embouchure de l'estuaire de Seine après une période de tempête. (A) : Galets mous (10 cm de diamètre), (B) : Plaques d'arrachement (diamètre de 1m).....	13
Figure B.8 : Classification des vasières intertidales (d'après Dyer et al., 2000). LS : pente faible ; VS : pente moyenne ; VSS : pente forte.	14
Figure B.9 : Disposition conforme et contraire des zones humides littorales. Source : Verger, 2009.....	15
Figure B.10 : Colonisation végétale et niveau des pleines mers dans l'anse de l'Aiguillon et la baie du Mont St Michel, en fonction des vitesses de sédimentation. Source : Verger, 2009.....	16
Figure B.11 : Exemple du système de gestion hydraulique des marais d'Olonne en fonction de la saison et du marnage. Source : Verger, 2009.....	18
Figure B.12 : Bloc diagramme schématisant des zones humides du littoral océanique. Source : Verger, 2009.....	20
Figure B.13 : Carte du marais Vernier, estuaire de la Seine. Source : Verger, 2009.....	22
Figure B.14 : Carte du bas estuaire girondin. Les mattes correspondent aux derniers secteurs poldérisés. Source : Verger, 2009.	23
Figure C.1 : Coupe géologique réalisée à partir d'une série de forages entre l'île de la Maréchale et l'île Pipy (pk 35). Source : BRGM.....	28
Figure C.2 : Carte des différentes sections de la Loire utilisé dans ce rapport. Source : GIP LE, Cahier d'indicateur L1D3.....	29
Figure C.3 : Travaux et aménagements de la section intermédiaire, de 1887 à 2003. Source : Marais et estuaires du littoral français, Verger, 2005.	31
Figure C.4 : Travaux et aménagements de la section aval, de 1929 à 2002. Source : Marais et estuaires du littoral français, Verger, 2005.	33
Figure C.5 : Schématisation des transformations de l'estuaire de la Loire. Source : GIP Loire Estuaire / CMB, cahier des indicateur, L1D3.	35
Figure C.6 : Évolution des estrans et du bas shorre par section entre 82-84 et 2000 (Source : Sogreah, 2006).	37
Figure C.7 : Marnage et surfaces marnantes. Source : GIP LE/CMB, cahier indicateur L1D3, 2004.....	37
Figure C.8 : Évolution des estrans de la section aval de l'estuaire entre 1977 et 2002. Coupes topographiques et représentation cartographiques. Source : CMB / GIP LE, 2004.....	39

Figure C.9.Carte I : Zone d'étude des vasières de la rive nord, position des vasières intertidale et réseau hydrographique. Source : Rivage, 1995.....	40
Figure C.9.Carte III : Zone d'étude des vasières de la rive nord, position des vasières intertidale et réseau hydrographique. Source : Rivage, 1995.....	41
Figure C.10 : Carte générale (a) et emplacement des Altus sur les vasières de Mouton (b) et de Pipy (c). Source : Géotransfert 2011	44
Figure C.11 : Variations altimétriques annuelles mesurées sur chaque station de la vasière de Mouton, en fonction des coefficients de marée, du débit de la Loire et de la turbidité mesurée à Paimboeuf, entre le 15/12/08 et le 30/04/10. M1 = Altus bas de vasière, M2= Mi-Marée, M4 = haut de vasière. Source : Géotransfert, 2011.....	45
Figure C.12 : Variations altimétriques annuelles mesurées sur chaque station de la vasière de Pipy, en fonction des coefficients de marée, du débit de la Loire et de la turbidité mesurée à Cordemais, entre le 15/12/08 et le 30/04/10. P1 = Altus bas de vasière, P2= Mi-marée, P4 = haut de vasière. Source : Géotransfert, 2011.	46
Figure C.13 : Estimation des flux d'érosion (en rouge) et de dépôt (en vert) de la crème de vase en kg/m ² /j, pour une surface d'1 m ² et un concentration de la crème de vase de 200 g/l. Les périodes de tassement sont représentées en bleu. Source : Géotransfert, 2011 ..	47
Figure C.14 : Modèle conceptuel de sédimentation sur les vasières, en relation avec le bouchon vaseux. Source : Gallenne, 1974	49
Figure C.15 : Enregistrements altimétriques et du niveau d'eau par les Altus de la vasière des Moutons en conditions de crue et de morte-eau. En bas de vasière, accrétion au flot et érosion au jusant, au centre, accrétion aux étales de pleine et de basse mer. Source : Géotransfert, 2011	49
Figure C.16 : Enregistrements altimétriques et du niveau d'eau par les Altus de la vasière des Moutons en conditions d'étiage et de vive-eau. En bas de vasière, accrétion au flot, érosion au jusant, au centre, accrétion au jusant, érosion au flot. Source : Géotransfert, 2011	50
Figure C.17 : Enregistrements altimétriques et du niveau d'eau par les Altus de la vasière de pipy en conditions d'étiage et de vive-eau. Au centre et haut de vasière, accrétion au jusant, érosion au flot. Source : Géotransfert, 2011	50
Figure C.18 : Enregistrements altimétriques et du niveau d'eau par l'Altus du bas de la vasière de Pipy en conditions d'étiage et de vive-eau. Accrétion au jusant ou étale de basse mer. Source : Géotransfert, 2011	51
Figure C.19 : Enregistrement en continu des caractéristiques des vagues (Hs, Tr et τ_w) et de la distance entre l'interface sédimentaire et le capteur altimétrique de l'Altus, sur le centre de la vasière des Moutons, entre le 25/06/09 et le 30/04/09 - Identification des périodes de tempête (cadre rouge). Source : Géotransfert, 2011	52
Figure C.20 : Enregistrement en continu de la surface libre, des caractéristiques des vents, des caractéristiques des vagues, de la turbidité et de la distance entre l'interface sédimentaire et le capteur altimétrique de l'Altus, sur le centre de la vasière de Mouton, entre le 21/11/09 et le 26/11/09. Source : Géotransfert, 2011	53
Figure C.21 : Enregistrement en continu de la surface libre, des caractéristiques des vents, des caractéristiques des vagues, de la turbidité et de la distance entre l'interface sédimentaire et le capteur altimétrique de l'Altus, sur le centre de la vasière de Mouton, entre le 25/02/10 et le 01/03/10. Source : Géotransfert, 2011	54
Figure C.22 : Schéma des marais situés sur les berges de l'estuaire de la Loire. Source : GIP Loire Estuaire, 2010	56
Figure C.23 : Photographies illustrant une zone de marais « ouverts » (a) et d'anciens marais régulés (b). Source : GIP Loire Estuaire.	57

Figure C.24 : Evolutions et mobilité des roselières entre 1952 et 2006. Source : IGN BD Ortho2004 / GIP Loire Estuaire 2007.	58
Figure C.25 : Coupe synthétique des environnements de berges rencontrées dans l'estuaire de la Loire. Source : GIP Loire estuaire, 2008.....	59
Figure C.26 : Fonctionnement des marais régulé hydrauliquement dans l'estuaire. Source : GIP Loire Estuaire, 2011.....	59
Figure C.27 : Nombre et distribution effective des débordements dans l'estuaire de la Loire sur la période 1986-2010. Source : GIP Loire Estuaire, 2011.	61
Figure C.28 : Surfaces submersibles dans la section intermédiaire de l'estuaire de la Loire. Source : GIP Loire Estuaire, 2011.....	62
Figure C.29 : Modalités d'expansion des eaux lors d'une submersion sur les berges. Source : GIP LE, 2005.....	63
Figure C.30 (a) : Cartographie et diagramme des surfaces submersibles et des surfaces en eau pour le 16 septembre 1996. Source : GIP LE, 2011.....	64
Figure C.30 (b) : Cartographie et diagramme des surfaces submersibles et des surfaces en eau pour le 16 avril 2003. Source : GIP LE, 2011.....	65
Figure C.30 (c) : Cartographie et diagramme des surfaces submersibles et des surfaces en eau pour le 18 avril 2003. Source : GIP LE, 2011.....	67
Figure C.30 (d) : Cartographie et diagramme des surfaces submersibles et des surfaces en eau pour 3 mars 2010. Source : GIP LE, 2011.	68
Figure C.31 : Cartographie des habitats Natura 2000 de deux secteurs de prairie touchés par des envasements en septembre 2010. Repérage d'un autre secteur potentiel. Source : GIP Loire Estuaire.	71

A. INTRODUCTION

Afin de mieux évaluer les impacts des dragages d'entretien du chenal de la Loire sur l'environnement, le GPMNSN doit réaliser des études de suivi de l'évolution des vasières et des phénomènes de sédimentation latérale. Dans ce cadre, ce document doit permettre de synthétiser les études existantes sur la sédimentation latérale des estuaires et de détailler le cas de la Loire. Ainsi, la première partie de cette étude a pour but de présenter les environnements de vasières et de marais estuariens grâce à une synthèse bibliographique. Les processus sédimentaires des vasières seront décrits, ainsi que les effets des aménagements de l'homme dans les marais. La seconde partie du document se concentre sur la présentation des études existantes sur la Loire. Celles-ci concernent d'abord l'évolution des berges lors des travaux d'aménagements portuaires et d'approfondissement du chenal de navigation. Puis les mesures et les observations réalisées sur les vasières de la rive nord, entre Donges et Cordemais seront analysées. Enfin, les informations disponibles sur les marais, les prairies humides et les épisodes de submersion seront présentés.

B. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

B.I. VASIERES ET PRAIRIES LATÉRALES ESTUARIENNES

B.I.1. Généralités sur les dépôts sédimentaires estuariens

Les estuaires sont des vallées ennoyées qui assurent la transition entre un cours d'eau douce et le domaine marin. L'action des marées, de la houle et du débit fluvial y crée des conditions hydrodynamiques souvent fortes et complexes. De plus, les processus sédimentaires y tiennent une importance majeure car l'eau de pluie et les fleuves sont les principaux vecteurs de l'érosion des continents et du transport sédimentaire associé.

La nature et le volume des apports dépendent essentiellement du bassin versant et des conditions climatiques. A l'échelle de l'ère quaternaire et d'un cycle glaciaire (quelques milliers d'années), les apports sédimentaires sont graveleux et sableux en condition de glaciation et de fonte des glaces, puis deviennent sableux à vaseux en condition de haut niveau marin, comme actuellement. Les apports marins sableux sont également possibles dans les estuaires.

Le trait de côte et les berges des estuaires sont donc modelés par la diversité de ces apports et des conditions hydrodynamiques. On y distingue des berges rocheuses et des falaises, des plages sableuses et des cordons graveleux, mais également des vasières, dans les secteurs de dépôts des sédiments fins. La figure suivante schématise la répartition de cette variété de dépôts dans l'estuaire en fonction de la nature des apports (fluviaux ou marins) et des forçages (débit, marée, houle). Cette étude se concentre essentiellement sur les zones de dépôts latéraux fins, représentés dans la figure suivante au niveau de la zone estuarienne centrale et en limite de zone externe.

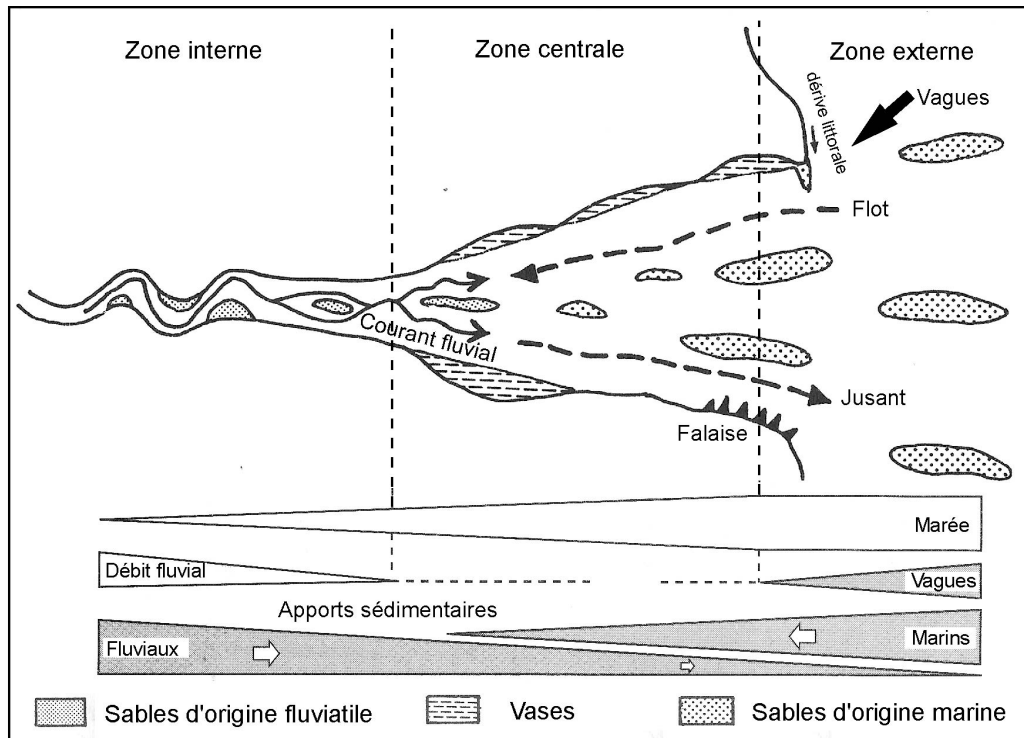


Figure B.1 : Schéma morpho-sédimentaire d'un estuaire en fonction des processus hydrodynamiques. Source : d'après Paskoff, 1998 et Davis, 1996.

B.I.2. Côtes vaseuses estuariennes

Dans les régions au climat tempéré, les côtes vaseuses estuariennes présentent une morphologie et une végétation caractéristique. Ainsi, on distingue une partie inférieure, constituée de vase nue, appelé slikke. Celle-ci est surmontée du shore, zone supérieure vaseuse et couverte de végétation herbacée. Dans certains cas, slikke et shore peuvent être séparés par une microfalaise. Dans d'autres cas, ils se raccordent l'une à l'autre par une pente douce qualifiée de haute slikke.

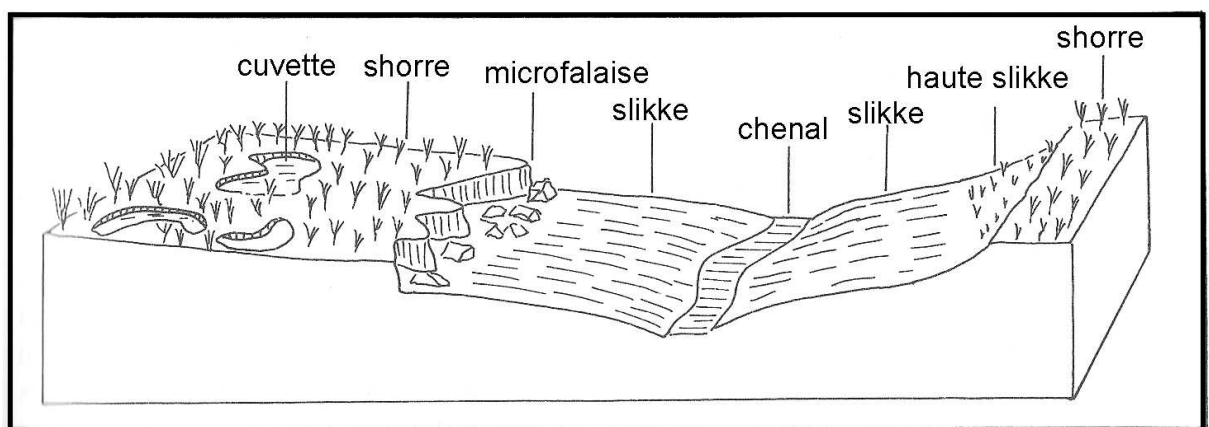


Figure B.2 : Marais maritime en climat tempéré. Source : Paskoff, 1998.

B.I.2.1 La slikke

La slikke se situe dans la zone de balancement des marées. Elle est inondée à chaque marée haute, même en période de mortes-eaux. Elle est généralement dépourvue de végétation, mais on y trouve parfois des bioconstructions (bancs d'huîtres et de moules, massifs d'hermelles) ou des algues dans sa partie inférieure. La pente est faible, de l'ordre de 0,1 à 0,3%. En surface, les sédiments vaseux sont mous et fortement imprégnés d'eau. Ils peuvent être remaniés à chaque va et vient des courants de marée.

La slikke est sillonnée par des chenaux de toutes tailles. Ces chenaux peu encaissés se déplacent au cours du temps et dessinent des réseaux ramifiés qui peuvent être très denses sur certaines vasières assez vastes. Certains chenaux sont empruntés de préférence par le flot, tandis que d'autres concentrent les eaux au moment du jusant. Les chenaux principaux sont liés aux étiers. Ils connaissent parfois de brusques déplacements et leur fond peut apparaître plus sableux et plus coquillier que sur la vasière à proprement parler.

Entre les chenaux de la slikke, l'aspect général de la vasière est relativement uniforme, même si des rides longitudinales de grande amplitude sont parfois observées. A marée basse, les traces de la faune souterraine apparaissent en abondance, sous forme de tortillons de déjections liés aux vers ou sous forme de petits entonnoirs créés par les mollusques bivalves. D'une façon générale, ce milieu est très riche en plancton. Il favorise la biodiversité et la présence de mollusques, crustacés, vers, crabes, poissons et oiseaux migrateurs.

La figure suivante présente les différents types de réseaux de chenaux observés sur une vasière bien développée. Elle introduit également la notion de submersion de la vasière en positionnant les laisses de pleine mer (secteurs atteints par la marée haute). Dans cet exemple, la vasière naturelle est interrompue par une digue délimitant un polder et une zone de marais hydraulique facilitant la gestion agricole.

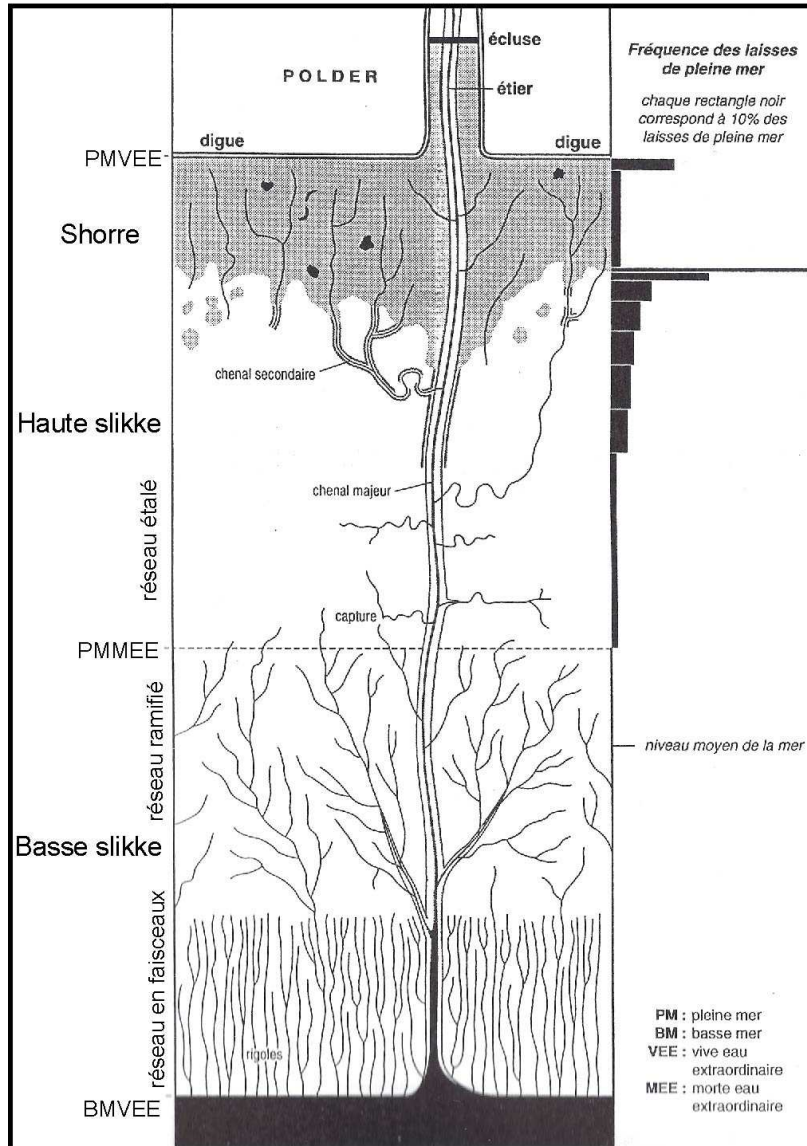


Figure B.3 : Réseaux de chenaux de marée sur la slikke. Source : Paskoff, 1998 et Verger, 2009

B.I.2.2 Transition entre la slikke et le shorre

La slikke peut être séparée du shorre par une microfalaise, de hauteur décimétrique à métrique. Les microfalaises vaseuses se rencontrent dans des parties battues par les vagues ou sapées par des chenaux de marée. Elles reculent en s'écroulant par blocs.

La haute slikke est inondée pendant les marées moyennes et de vives-eaux. C'est un secteur de sédimentation privilégiée, où les chenaux sont rares car effacés par l'accrétion progressive. La végétation fait son apparition : pieds isolés de salicornes et touffes pionnières de spartines. En mortes-eaux, des périodes prolongées d'émersion donnent naissance à des fentes de dessiccation.

B.I.2.3 Le shorre

Le shorre n'est inondé que lors des grandes marées de vives-eaux, ce qui permet d'y trouver un sol plus ferme que celui de la slikke. La pente du shorre est très faible, inférieure à 0,1%, et généralement orientée vers l'estuaire. Le shorre, nommé également « herbu », est

couvert par une végétation basse et dense dépourvue d'arbre. Les plantes que l'on rencontre dans ces herbues sont tolérantes vis-à-vis de la salure et résistantes aux mouvements de flux et de reflux de l'eau. Elles amortissent les courants, piègent les particules fines en suspension et les fixent avec leur racines. Elles participent ainsi activement à la sédimentation verticale sur le shorre.

Le shorre est parcouru par des chenaux encaissés, ramifiés vers l'amont, qui constituent un réseau hiérarchisé et qui se répartissent en deux groupes. Certains chenaux recueillent et évacuent les eaux continentales dont la salinité s'accroît vers l'aval. D'autres, qui peuvent être connectés avec les premiers, sont empruntés par les courants de marée et dessinent souvent des méandres prononcés. Si les chenaux principaux paraissent stables, les chenaux secondaires, moins larges et moins profonds, évoluent en migrant latéralement. Les berges concaves des méandres, sapées par les courants ou par l'action de la faune (crabes), reculent en s'ébouyant, tandis que les rives convexes s'engraissent par dépôt de sédiments. Les chenaux du shorre sont souvent surmontés de levées, hautes de quelques décimètres et constituées par du matériel moins fin que celui de l'herbu.



Figure B.4 : Image d'un shorre parcouru de chenaux dans l'estuaire de la Rance. Source : Salomon, 2008

Le shorre est aussi parsemé de petites dépressions métriques et de profondeur décimétrique. Ces cuvettes, isolées ou groupées, ont une forme plus ou moins régulière, ronde, ovale ou allongée. A l'occasion de la submersion du shorre, elles se remplissent d'eau pour former des marais salants, car le sel se concentre avec l'évaporation. Le fond des cuvettes peut s'assécher et reste dépourvu de végétation à cause de la sursalure.

Vers l'intérieur des terres, la partie du shorre qui n'est inondée qu'à l'occasion de tempêtes ou de marées exceptionnelles est dénommée « pré salé » ou marais. Ce domaine présente une composante plus terrestre que marine. Les sols évoluent sous l'action du lessivage des pluies, des apports très ponctuels de vase et de l'action de la végétation. En période sèche, la présence d'argile crée des fentes de dessiccation et induit un tassement des zones constituées des sédiments les plus fins. Dans certains marais des zones tempérées, un phénomène d'alternance entre des périodes de dessiccation et d'hydratation des argiles provoque la formation d'un microrelief qui atteint quelques décimètres de hauteur, sous la forme de petites buttes gazonnées. De même, certains chenaux constitués de sédiments plus grossiers subissent des inversions de relief en raison du compactage des vases au niveau des interfluves. Le secteur du marais ou du pré salé peut-être exploité pour l'élevage et la pâture des animaux.

B.I.2.4 Différents types de côtes vaseuses en climat tempéré

En fonction de l'altitude du marais, de la nature de la végétation et du niveau de remplissage (lié à la fréquence des épisodes d'inondation et à la quantité d'apports sédimentaires), différents degrés de maturité peuvent être distingués pour une côte vaseuse. La figure suivante présente trois étapes dans la formation d'un marais maritime ou estuarien en climat tempéré. Le premier type de côte vaseuse (a) correspond à l'état initial de formation du marais, constitué d'une vaste slikke ou d'un banc sablo-vaseux et d'un shore, composé de végétation pionnière. L'étape intermédiaire (b) présente un marais entaillé d'un réseau de chenaux bien développés. Le shore est vaste et séparé de la slikke par une micro-falaise. Le troisième type (c) correspond à un marais mature, formé de marais salants et de chenaux partiellement comblés. Des zones tourbeuses, constituées de végétation n'appréciant pas le contact du sel, et des prés salés se développent sur d'anciennes zones de shore halophile (tolérant la présence de sel). Ce sont les zones de marais mature qui peuvent être utilisées par l'homme pour des pratiques d'élevage extensif dans le domaine de marais naturels. Un quatrième type de marais peut également être distingué dans les secteurs endigués et poldérisés par l'homme. Les chenaux peuvent être artificiels et équipés de vannes pour réguler les apports d'eaux du marais.

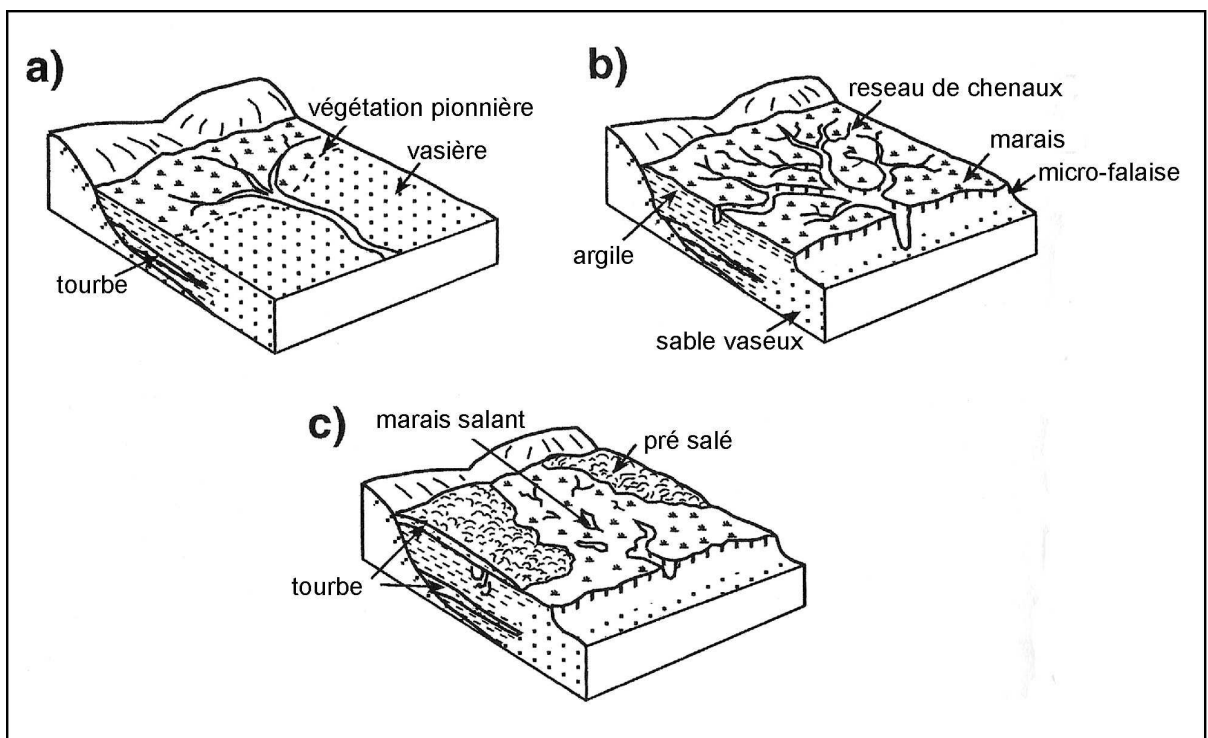


Figure B.5 : Différents types de côtes vaseuses en climat tempéré. A) état initial b) Etat intermédiaire c) marais mature. Source : Woodroffe, 2002.

B.II. LES VASIERES ESTUARIENNES

Le paragraphe précédent a permis d'appréhender les différents environnements qui composent une berge estuarienne vaseuse. Les principes de fonctionnement de la berge et son

évolution dans le temps dépendent des processus de sédimentation, d'érosion et de diagenèse précoce qui sont présentés dans cette partie. Note : paragraphe établi d'après la synthèse bibliographique exhaustive de la thèse de Deloffre, 2005.

B.II.1. Processus sédimentaires

B.II.1.1 Sédimentation

Les sédiments présents dans les estuaires sont majoritairement sablo-vaseux. Les sables se déposent dans le lit du fleuve pour former des bancs. Sur les berges ou à l'embouchure, ils forment des plages et des flèches sableuses qui ne sont pas étudiés dans ce document qui s'intéresse aux dépôts de sédiments fins.

- Processus de floculation des sédiments fins

La sédimentation des particules fines en milieu estuarien est fortement dépendante des conditions hydrodynamiques qui dirigent les phases de transport, de dépôt ou de remobilisation. Elle dépend également des mécanismes d'agrégation (floculation) et de désagrégation (défloculation) des particules fines, donnant naissance à des agrégats de particules (ou floes) plus ou moins complexes. Ce processus gouverne la taille, la densité et la forme des floes.

- Chute des particules et dépôts

La présence de floes, de ce fait, joue un rôle sur la vitesse de chute des particules. Les floes les plus grands chuteront rapidement, à l'inverse des particules argileuses libres.

Le maintien et le transport des MES est aussi fonction de la turbulence dans la colonne d'eau. Lorsque la turbulence décroît fortement, les agrégats atteignent le fond et constituent un dépôt. L'amplitude de ce dépôt est également dépendant de la quantité de MES disponible dans la masse d'eau. Dans le secteur du bouchon vaseux, zone de maximum de turbidité dans l'estuaire, les dépôts seront plus importants que dans des secteurs moins chargés en MES.

- Présence de crème de vase

Dans les estuaires turbides, il est courant de rencontrer une couche intermédiaire entre l'eau turbide et la vase consolidée. Ce mélange d'eau et de sédiment, dont la concentration en MES est généralement supérieure à 100g/l est nommée crème de vase. Son caractère fluide lui procure des caractéristiques d'évolution à très court terme. Ainsi, la crème de vase peut s'écouler sur les pentes du fonds, se diluer ou se former très vite sous l'effet de l'agitation et des courants ou au contraire se consolider rapidement lors de périodes de calme.

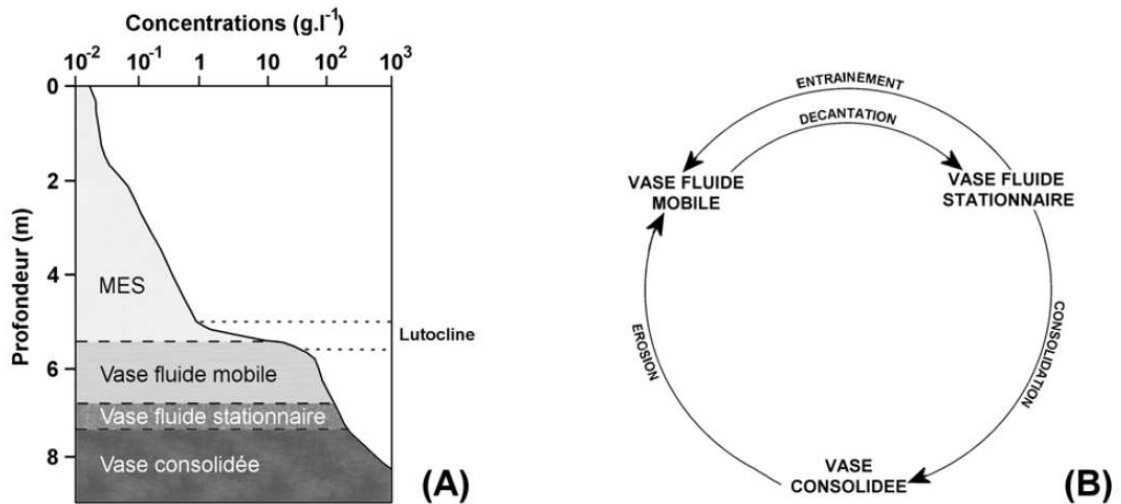


Figure B.6 : A) Profil vertical de concentration schématisant les phases de dépôt des sédiments fins. B) Cycle d'évolution des couches turbides de fond, depuis la vase fluide (crème de vase) à la vase consolidée.

B.II.1.2 Diagenèse précoce

La diagenèse est une étape intermédiaire entre le sédiment mobile et la roche consolidée. La diagenèse précoce concerne les toutes premières étapes de transformation et d'évolution des sédiments après leur dépôt.

- Tassement

Les caractéristiques plastiques, poreuses et cohésives des sédiments fins induisent un tassement des dépôts sous l'effet du poids des sédiments. Ce mécanisme provoque une augmentation de la densité du sédiment au cours du temps. La porosité du sédiment diminue par expulsion de l'eau interstitielle. Cette augmentation de densité est associée à une augmentation de sa cohésion et donc de la résistance à l'érosion. Le mécanisme de tassement est associé à la formation d'un profil de densité croissante vers le bas dans la colonne de sédiment.

- Bio-stabilisation

Certains processus biologiques permettent de stabiliser le sédiment. Le piégeage du sédiment par la végétation au niveau du schorre est significatif : la majorité du sédiment transporté au niveau du schorre est piégé ; seules les périodes d'agitation importante permettent un remaniement de ces dépôts. Sur la slikke, la sécrétion d'E.P.S (Extracellular Polymeric Substances) par les organismes (micro-algues, bactéries, microfaune), entraînent une meilleure résistance des vasières intertidales à l'érosion. Certains auteurs indiquent que la stabilisation du sédiment cohésif est en grande partie contrôlée par les organismes, entraînant une augmentation de la stabilité de la vasière estimée entre 45 et 500%.

- Bioturbation

Ce terme générique correspond au remaniement des sédiments par les organismes. En milieu intertidal, le sédiment est souvent présent sous forme de lamines, correspondant à différents types d'épisodes de mise en place ou d'évènements. La bioturbation a tendance à homogénéiser le milieu et en particulier à ré-oxygéner les zones anoxiques un peu plus profondes. Ces mécanismes ont plutôt tendance à diminuer la cohésion du sédiment en le destructurant.

- L'évaporation/drainage

L'évaporation induit une diminution de la teneur en eau du sédiment à la surface de la vasière et une augmentation de la salinité dans l'eau interstitielle. Le drainage dans le sédiment entraîne également une diminution de la teneur en eau du sédiment, qui a pour conséquence une augmentation de la résistance à l'érosion.

- La dessiccation

Lorsque l'assèchement de la surface de la vasière est important (notamment en période de morte-eau), la cohésion du sédiment augmente. Toutefois, les fentes de dessiccation sont susceptibles de favoriser par la suite une forte érosion de la vasière en initiant des surfaces de décollement.

B.II.1.3 Érosion

L'érosion sur les vasières intertidales a lieu lorsque les forces de frottement de l'écoulement sont supérieures aux forces inter-particulaires du sédiment déposé. La remise en suspension des sédiments déposés est permise par les courants et/ou l'agitation. Mais seuls les courants permettent un transport significatif des MES érodées. L'érosion est également fonction des propriétés du sédiment : une vase consolidée est plus difficilement remobilisable qu'un dépôt frais. Trois modalités d'érosion ont été décrites par Mehta (1991), en fonction de la relation entre la cohésion des vases et la contrainte critique de cisaillement au fond :

- l'entraînement : cette modalité d'érosion concerne les dépôts frais et les vases fluides. Les suspensions denses, localisées près du fond sont entraînées dans la colonne d'eau sans que la contrainte critique de cisaillement au fond soit importante.
- Le détachement d'agrégats : lorsque la contrainte critique de cisaillement est atteinte, les agrégats sont détachés du fond et réintroduits dans la colonne d'eau.
- l'arrachement de blocs de vases : l'érosion d'une vase consolidée nécessite une contrainte critique de cisaillement au fond, plus importante. Ce type d'érosion est à l'origine des galets mous (mud balls) et des plaques d'arrachement, ces dernières étant favorisées par les niveaux de sables interlités et les fentes de retrait (voir figure suivante).



Figure B.7 : Exemples d'érosion à la surface de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine après une période de tempête. (A) : Galets mous (10 cm de diamètre), (B) : Plaques d'arrachement (diamètre de 1m).

- Liquéfaction sous l'effet des vagues

Sous l'effet des vagues, la liquéfaction du sédiment peut provoquer une réduction de la cohésion du sédiment, associée à une augmentation de la pression interstitielle. Ce mécanisme induit le passage d'un état consolidé à un état de vase fluide. En diminuant la cohésion du sédiment, ce processus favorise donc sa remise en suspension.

- Biodéstabilisation

Dans une moindre mesure, la bioturbation peut induire une biodéstabilisation peut intervenir sur les vasières intertidales. Elle est à mettre en relation avec les mécanismes d'affouillement et les terriers qui ont tendance à augmenter la sensibilité du sédiment à l'érosion. La production de pelotes fécales et de pseudo faeces peuvent également être à l'origine d'une diminution de la cohésion du sédiment.

B.II.2. Classification des vasières estuariennes

La classification des vasières intertidales a été proposée par Dyer et al. (2000). Cette classification s'appuie sur les travaux de typologie des vasières intertidales (Dyer, 1998). Cette typologie est basée sur l'amplitude de la marée, l'énergie des vagues (liée au vent), la pente et le type de sédiment. Les paramètres météo-océaniques (amplitude de marée, exposition au vent), morphologiques (pente) et sédimentologiques (densité sèche) de 18 estuaires du Nord-Ouest de l'Europe ont été analysés pour établir cette classification. Ce type de typologie introduit également une hiérarchisation dans les facteurs gouvernant le fonctionnement de la vasière. Ainsi, l'influence de la marée est un paramètre prépondérant, devant l'exposition au vent et à l'agitation. La pente et la composition sédimentologique apparaissent comme des facteurs secondaires dans cette classification. Mais ce niveau de précision descriptive est important pour distinguer les vasières estuariennes de cette étude, majoritairement situées dans des milieux méso à macro tidal et relativement abrités.

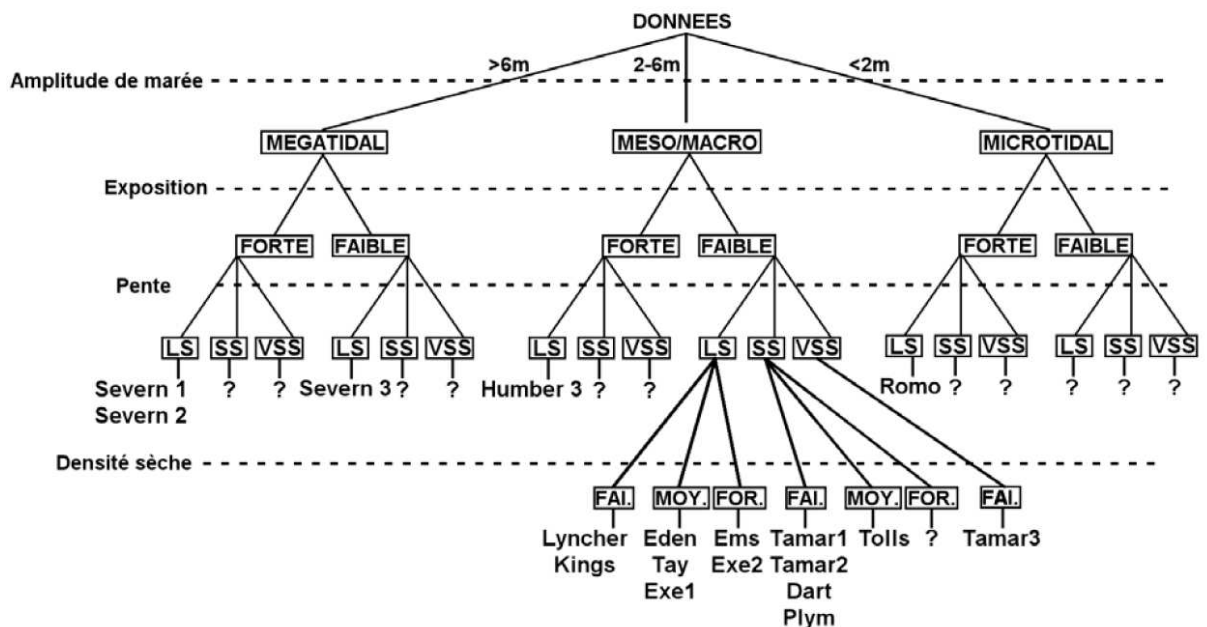


Figure B.8 : Classification des vasières intertidales (d'après Dyer et al., 2000). LS : pente faible ; VS : pente moyenne ; VSS : pente forte.

B.III. LES MARAIS ESTUARIENS

B.III.1. Généralités

Les marais salés occupent la partie supérieure de l'étendue intertidale. Ils sont couverts d'une végétation halophile, qui tolère la salinité. C'est cette végétation particulière qui marque la transition entre un paysage marin, formé par les estrans nus des vasières, et un paysage terrestre de prairies couvertes de végétation.

La topographie des marais comprend des surfaces assez uniformes où les accidents principaux sont constitués par les chenaux de marée. En fonction du marnage, ces chenaux peuvent atteindre plusieurs mètres. Ils sont généralement bordés de légères levées latérales formées par les dépôts de débordements à pleine mer. Ces levées sont souvent colonisées les premières par la végétation. Les dépôts peuvent également s'effectuer en tête des chenaux par un colmatage progressif lorsque la pleine mer y remonte. Ils peuvent aussi être plus étendus spatialement, lors de débordements sur les rives des étiers.

Deux grandes catégories de morphologies permettent de distinguer les marais maritimes ou estuariens. D'un côté, les marais conformes présentent une pente faible orientée vers la mer ou le fleuve. Ils se construisent dans un environnement calme, par le dépôt de particules fines lors des étales de pleine mer. De l'autre côté, les marais contraires sont édifiés par le dépôt de sédiments provenant d'eaux plus turbulentes. Les sédiments, souvent légèrement plus grossiers, s'accumulent alors plus facilement en bordure estuarienne du marais. L'action des tempêtes et des crues peut être constructrice en déposant des sédiments sur les levées et au-delà, vers le marais. Cette pente contraire favorise la présence d'eau à la limite externe du marais et la formation de tourbières, accumulation épaisse de végétaux aquatiques.

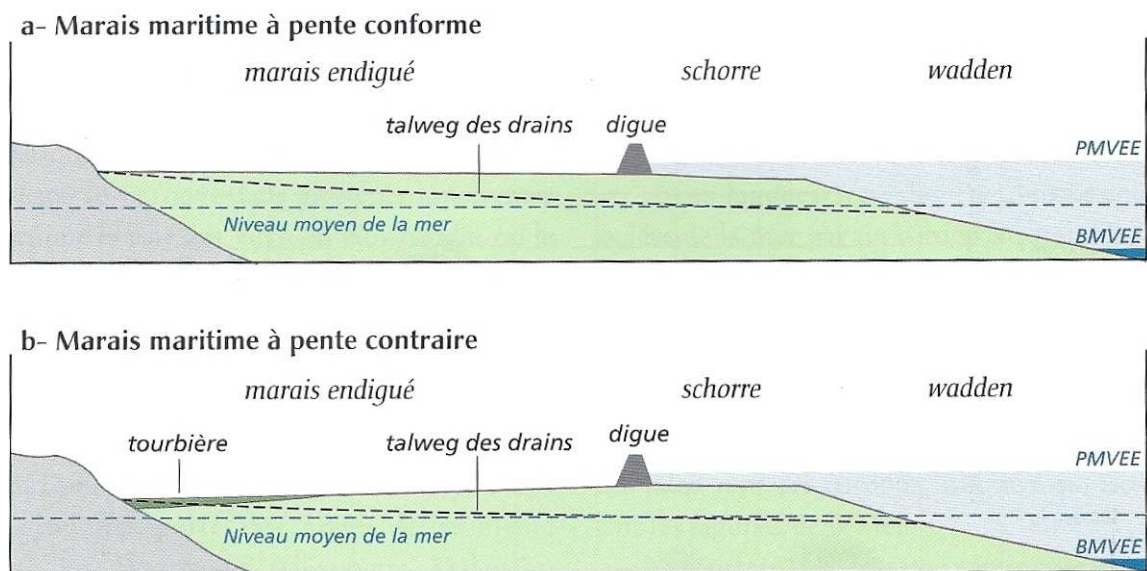


Figure B.9 : Disposition conforme et contraire des zones humides littorales. Source : Verger, 2009

Le shore est caractérisé par une succession de plantes qui se placent en fonction de leur tolérance au milieu salé. C'est sur ce secteur que les évolutions du milieu sont le plus rapidement perceptibles.

Les plantes pionnières sont les salicornes et les spartines qui s'installent dès le haut de la vasière. Viennent ensuite la pucinellie, les obiones, les asters et les soudes maritimes. Les statices peuvent couvrir de grandes étendues qui apparaissent en mauve sur les prés salés. Plus haut, on trouve la bette maritime, la fétuque rouge et le chiendent marin.

Dans les marais endigués, dans les zones humides et sur les bords des estuaires, d'autres espèces forment les roselières qui peuvent occuper d'immenses superficies. Les roselières sont des formations végétales caractéristiques des milieux humides à niveau d'eau et salinité variable. Suivant la salinité, on y trouve différentes espèces de roseaux, de scirpes, des carex, des glycéries aquatiques et des iris.

Les opinions divergent parfois pour attribuer à la sédimentation ou à la végétation le rôle moteur principal dans la progression des prés salés. L'étude de la colonisation végétale du haut des vasières montre que, lorsque la sédimentation est peu abondante, la progression des plantes halophiles atteint un niveau de marée plus bas que lorsque la sédimentation est rapide. Lorsque le colmatage est très actif, on ne trouve pas d'individu isolé ou de touffes pionnières sur le haut des slikkes. Ces observations impliquent plutôt la prédominance des effets de la sédimentation sur le développement végétal.

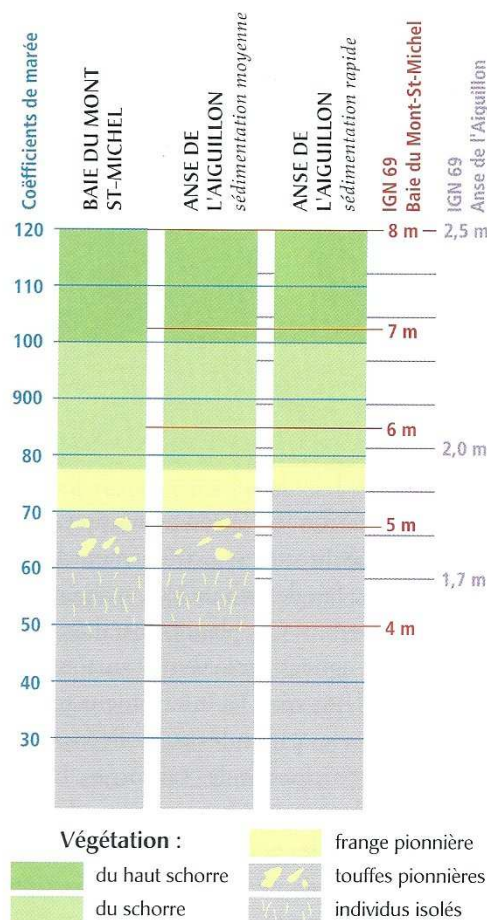


Figure B.10 : Colonisation végétale et niveau des pleines mers dans l'anse de l'Aiguillon et la baie du Mont St Michel, en fonction des vitesses de sédimentation. Source : Verger, 2009.

Néanmoins, dans le cas de prairies bien développées, il est clair que les plantes provoquent un ralentissement des courants et un piégeage des sédiments. Ainsi, le cahier indicateur du GIP Loire Estuaire (2007) indique que les milieux de roselières retiennent les fractions les plus fines des matières en suspension, provoquant une sédimentation de 20 à 30mm par an.

Mais d'après Verger (2009), le lieu de progression maximum du marais se situe surtout dans le secteur de dépôt sédimentaire préférentiel des marées hautes, généralement en haut de la vasière. La présence d'un petit talus ou d'une levée peut être le signe de ces accumulations importantes. La présence de végétation est alors un facteur favorisant la sédimentation.

B.III.2. Aménagements et exploitation des marais

Durant des siècles, les zones humides sur les berges des estuaires ont eu une réputation répulsive. Elles ont été associées aux moustiques, aux maladies et à l'insalubrité des eaux stagnantes. C'est pourquoi des efforts considérables ont été effectués par les hommes pour drainer ces zones et les soustraire aux inondations. De très vastes surfaces de marécages littoraux et de plaines inondables estuariennes ont été aménagées par l'homme pour former des marais exploitables.

En domaine littoral, la création de marais salants en est une parfaite illustration. Elle consiste à créer un circuit complexe de chenaux permettant d'apporter des eaux de mer aux lieux de récolte du sel et assurant une concentration croissante en sel. Le système hydraulique doit aussi assurer l'évacuation des eaux après la récolte.

Mais le premier intérêt de l'aménagement des zones humides est avant tout agricole. Les sols particulièrement fertiles ont été rapidement convoités par les populations. De tout temps, le shore et sa végétation halophile a été utilisé pour le pâturage des ovins, leur conférant une saveur particulière et reconnue. C'est pour éviter les submersions trop fréquentes des prés salés que de petites digues ont été édifiées en Allemagne et aux Pays-Bas pour former les premiers polders. Ces digues peuvent toutefois être submergées par les vives-eaux et les tempêtes. Des installations en terre ferme ou derrière de plus hautes digues sont alors nécessaires pour protéger le bétail.

Outre la présence de digues de protection, les travaux de drainage ont pour but de permettre la gestion de l'hydrologie des marais cultivés. Ils doivent éviter les inondations trop longues en hiver et le manque d'eau en été. Les aménagements consistent à établir un réseau hiérarchisé. Il recueille l'eau des prairies dans des fossés, puis s'écoule vers de petits canaux qui sont eux-mêmes collectés dans de plus grands canaux débouchant dans l'estuaire. En Camargue, dans les secteurs de riziculture, un système d'irrigation indépendant peut se surimposer au réseau de drainage. Les ouvrages et les systèmes comme les portes à flot, les vannes, les martelières, les batardeaux et les pompes permettent de gérer la circulation des eaux dans les marais. Pour chaque marais exploité, le fonctionnement et l'entretien de ces ouvrages est généralement sous la responsabilité d'un syndicat d'utilisateurs et de gestionnaires.

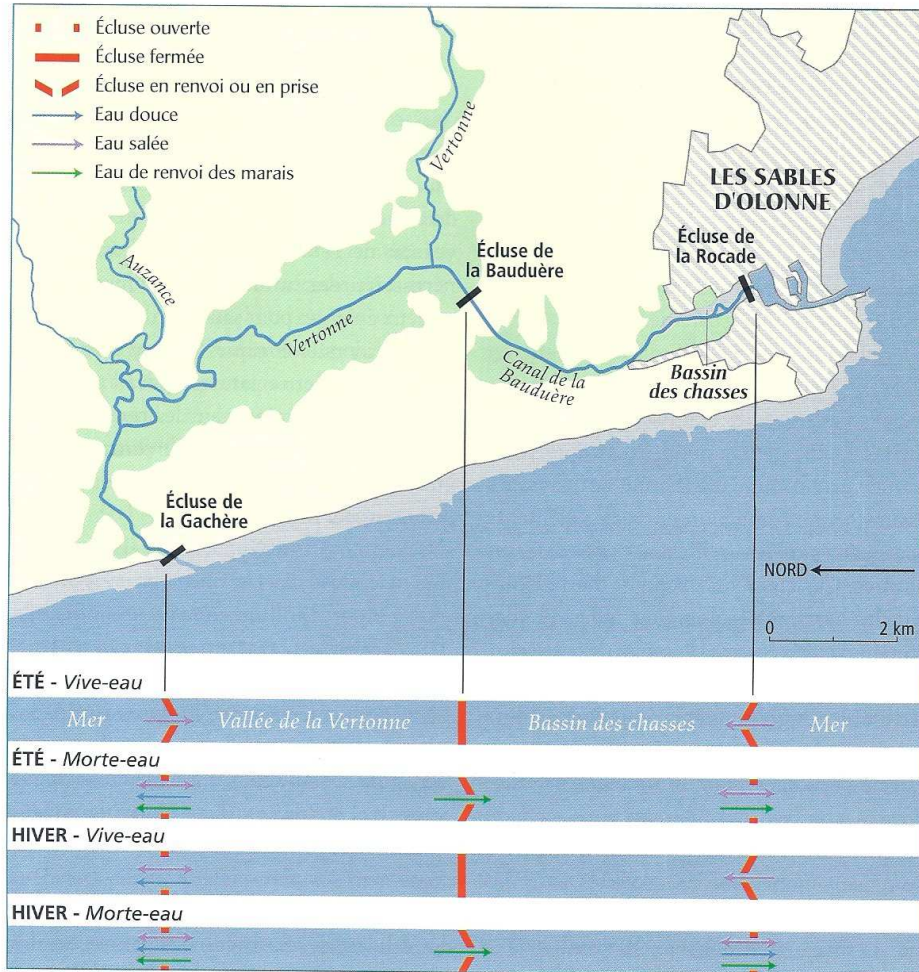


Figure B.11 : Exemple du système de gestion hydraulique des marais d’Olonne en fonction de la saison et du marnage. Source : Verger, 2009.

Dans les marais aménagés, l’endiguement sert à protéger les biens et les personnes des submersions lors des vives-eaux et des tempêtes. Mais dans les secteurs d’estuaires et les côtes basses vaseuses, c’est aussi un moyen d’accroître la surface des terres agricoles en gagnant sur le shore déjà consolidé. Dans cet objectif, les hommes ont également traditionnellement cherché à favoriser le colmatage des vasières. Ainsi, la mise en place de chaîne de colmatage, ensemble de digues submersibles en pierres sèches favorise le dépôt de vase en amont du muret. Le « jardinage de la vase » est une technique des Pays-Bas qui favorise la sédimentation dans des parcs entourés de pieux et accélère le processus de continentalisation en semant des plantes halophiles dans les parcs. Dans les secteurs portuaires, le gain d’espace sur la mer peut se traduire par des remblaiements massifs des berges et la mise en place sur d’anciens marais de secteurs non submersibles à caractère industriel.

Récemment, il faut noter une inversion des tendances dans l’aménagement et l’exploitation des marais. Le gain de terre agricole n’est plus une priorité pour accroître la production. Une volonté de préservation, de conservation et d’amélioration écologique des espaces actuels guide de plus en plus souvent les modes d’exploitation du marais et les décisions de gestion de ces milieux singuliers.

B.III.3. Schéma synthétique

La figure suivante est un bloc diagramme schématique et composites qui illustre les principales formes des zones humides des littoraux et des estuaires bordant une mer à marée non négligeable. Ce schéma permet aussi de compléter et d'illustrer certains éléments qui n'ont pas été décrits dans la synthèse bibliographique précédente, comme les marais ostréicoles ou à poissons.

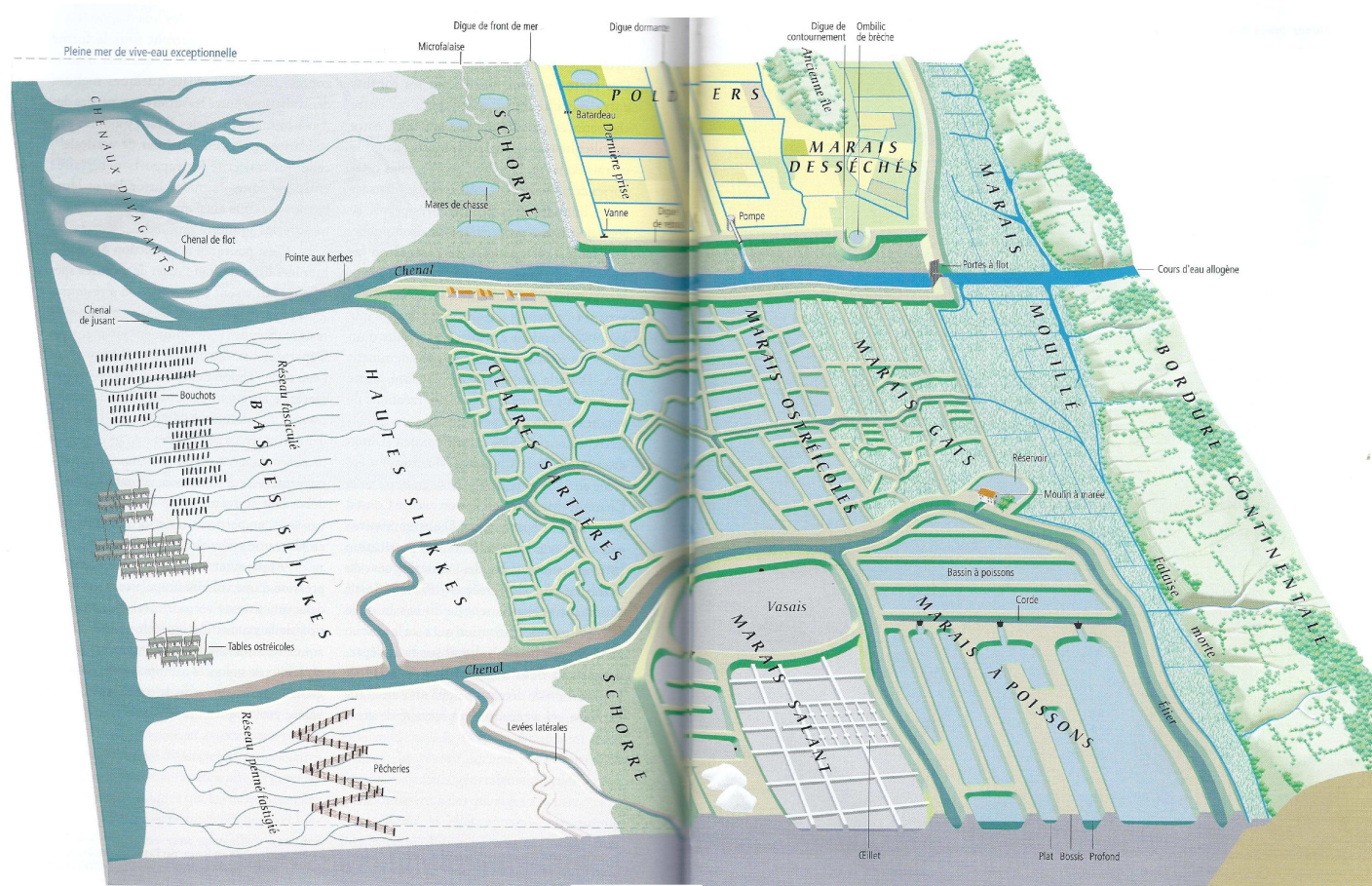




Figure B.12 : Bloc diagramme schématique des zones humides du littoral océanique. Source : Verger, 2009.

B.IV. CAS D'ESTUAIRES A BOUCHON VASEUX

B.IV.1. La Seine

B.IV.1.1 Vasières

L'estuaire de la Seine a subi de grands travaux d'aménagement de son cours depuis le XIX^{ème} siècle et se trouve actuellement totalement endiguée. Ces travaux ont provoqué un recul très important des surfaces de vasières. Celles-ci étaient estimées à 130 km² en 1834, alors qu'elles ne couvrent plus que 28km² en 2000. La Grande Vasière qui s'étend en amont du Port du Havre sur 320 ha est la seule étendue importante de slikke qui subsiste. Elle a d'ailleurs fait l'objet récemment de mesures de conservation et d'aménagement pour la préserver. Dans ce secteur aval, une vasière artificielle a même été conçue pour compenser les impacts de la construction du nouveau port du Havre. En effet, la disparition des surfaces marnantes vaseuses est extrêmement préjudiciable pour la qualité écologique du milieu, déjà fortement transformé par les aménagements portuaires de grande envergure. Les processus de sédimentation sur les vasières de la Seine ont été décrits et quantifiés par Deloffre (2005). Les effets des dragages d'entretien n'apparaissent pas primordiaux sur les conditions de sédimentation, en comparaison des travaux d'aménagements.

B.IV.1.2 Marais

Des marais occupent aussi la plaine alluviale, au-delà des digues. A l'aval, le marais du Hode se situe sur la rive nord, à proximité de la grande Vasière. Il est caractérisé par une vaste roselière, des cultures et des prairies.

Plus en amont, c'est l'endiguement de la Seine qui a provoqué le colmatage progressif des espaces par les apports turbides du bouchon vaseux. Ainsi, le marais Vernier occupe l'emplacement d'un ancien méandre (voir figure suivante). Il présente un profil de marais à pente contraire. La partie sud ou Vieux marais est basse et tourbeuse. L'évacuation des eaux du Vieux marais se fait grâce au canal de St Aubin et d'un réseau d'étangs et de mares. En période de sécheresse, le canal fonctionne en sens inverse, mais dans ces conditions, Allard et al. (2002) signalent des problèmes d'envasement du canal et de la mare principale en raison de la présence du bouchon vaseux.

Dans une fiche thématique datant de 2010, le GIP Seine Aval présente les risques d'inondation de la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine. Les facteurs déclenchant sont liés au coefficient de marée, aux conditions météorologiques et au débit du fleuve. La cartographie des plus hautes eaux observées a permis d'estimer à 13000 ha la surface soumise à un risque de submersion. Sur cette surface, le GIP considère que 450 ha répartis le long du linéaire représentent les enjeux les plus forts dus à la présence de bâtis et d'infrastructures de transport.

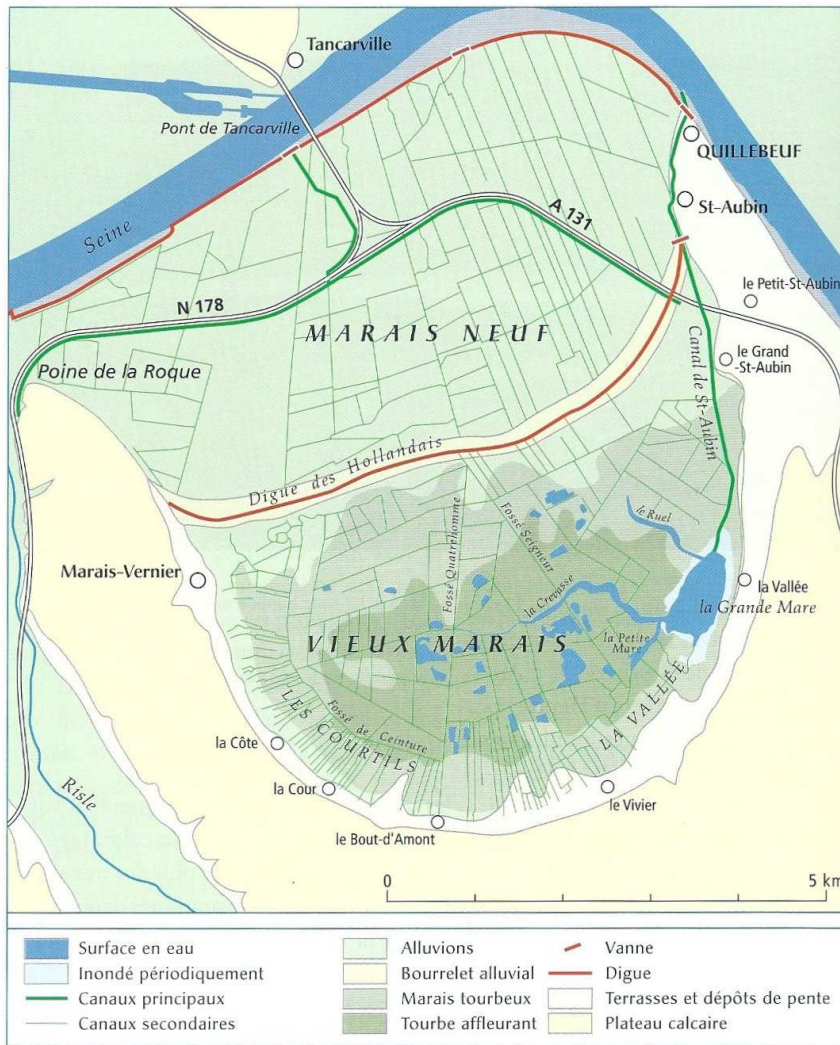


Figure B.13 : Carte du marais Vernier, estuaire de la Seine. Source : Verger, 2009.

B.IV.2. La Gironde

B.IV.2.1 Vasières

La Gironde est un estuaire caractérisé par de très fortes quantités de matières en suspension, favorables aux dépôts de vase sur les bords et dans les chenaux. Le mouvement sédimentaire est donc important dans l'estuaire et celui-ci connaît une évolution géomorphologique permanente. L'évolution naturelle est amplifiée, ou contrariée par l'action du GPM de Bordeaux qui effectue de nombreux dragages de sédiment dans le chenal de navigation (au sud) pour maintenir l'accès au port. De plus, des produits de dragage sont déposés dans le chenal de Saintonge (au nord). D'après Verger (2009), une part notable des sédiments fins dragués se dépose sur les rives de l'estuaire et de ses îles, pour y constituer des vasières et des shorres.

Malgré un marnage notable jusqu'à l'amont de Bordeaux, la zone intertidale reste assez réduite dans la partie amont de l'estuaire, car les pentes des rives vaseuses sont fortes et drainées par de nombreux petits chenaux. Sur les berges, les premières vasières d'importance se trouvent dans la partie aval de l'estuaire. En rive droite, la croissance de la berge au niveau de Mortagne est liée à l'accolement progressif d'un banc vaseux sur la rive.

Sur la rive gauche, les vasières sont surtout développées dans l'anse du Verdon. Actuellement, les slikkes sont en progression tout au long des polders du Bas-Médoc sur une largeur qui atteint parfois 3km et une longueur de plus de 12km. Des études du Port de Bordeaux ont montré que les eaux fortement turbides issues du bouchon vaseux étaient repoussées par le flot au fond de l'anse du Verdon, ce qui y favorise le dépôt de vase. Dans les siècles précédents, la présence de pêcheries a probablement accentué la tendance à l'envasement de ce secteur de l'estuaire.

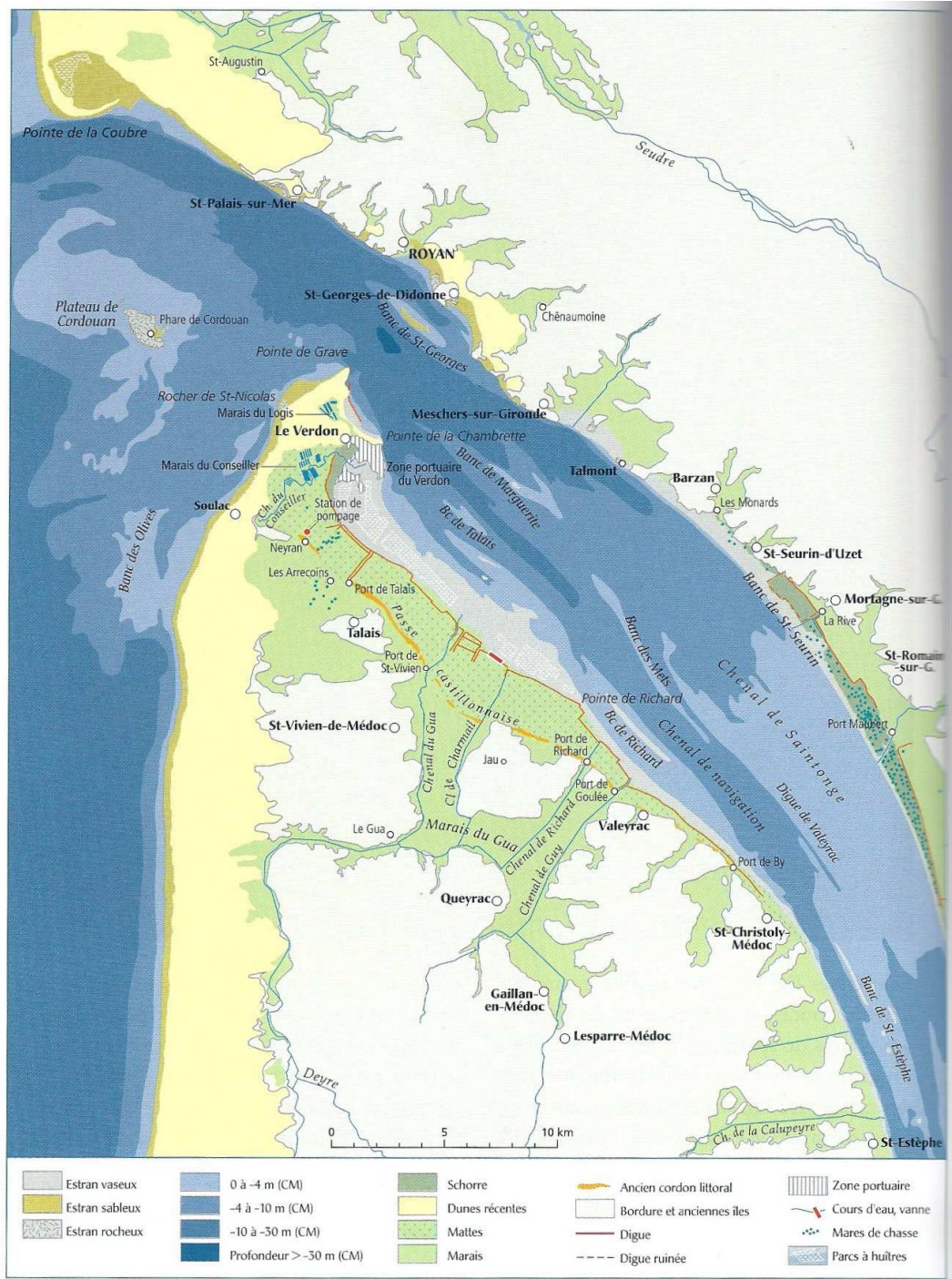


Figure B.14 : Carte du bas estuaire girondin. Les mattes correspondent aux derniers secteurs poldérisés.
Source : Verger, 2009.

B.IV.2.2 Marais

Les berges de la Gironde présentent toute une série de marais qui ont été poldérisés pour les protéger des inondations. Dans la partie amont, les cours de la Garonne et de la Dordogne sont bordés de bourrelets alluviaux dont la largeur varie de 500 à 800m environ. En arrière de ces bourrelets, s'étendent des marais tourbeux inverses. Le sommet de ces bourrelets (nommé palus dans la région) serait naturellement submersibles par les crues du fleuve, mais des remblais, des routes et des digues ont été aménagés et protègent actuellement les marais tourbeux.

Dans la partie aval, de grands polders ont été aménagés par les Hollandais et les Flamands à partir du XVIIème siècle. Sur la rive gauche, les marais desséchés du Bas-Médoc sont dévolus à la culture du blé et du maïs, mais ils conservent tout de même une faune et une flore particulièrement riches (dont une concentration relativement importante de loutres et de visons d'Europe). Cet ensemble de marais est formé par des marais internes situés dans de profondes vallées, un ancien cordon littoral de sables coquilliers et des marais externes conformes, en bordure de l'estuaire.

Sur la rive droite s'étend un vaste ensemble de marais conquis sur l'estuaire par endiguement de shorres matures. Dans ce secteur, la dernière vague de conquête a eu lieu de 1963 à 1973, mais une partie des digues construites à Saint-Romain ont du être détruites suite à la suite d'une procédure engagée par le Port Autonome de Bordeaux (Verger, 2005). De plus, la tempête de 1999 a détruit en partie la digue et la vanne du polder de Mortagne-sur-Gironde. La brèche qui a été laissée ouverte durant un temps a laissé échapper de grandes quantités de sédiments, menaçant de combler le chenal d'accès au port de Mortagne.

Au cours de ce même évènement exceptionnel, des ruptures de digue et/ou le passage de l'eau au-dessous de ces digues a provoqué des inondations de très grande ampleur, notamment au niveau de la centrale nucléaire du Blayais. Après le retrait de la submersion, Salomon (2002) décrit que près de 5500ha de zones céréalieres ont été recouverts par environ 15cm de vase salée dans le Médoc et le Blayais.

B.V. BILAN DES FACTEURS D'EVOLUTION DES VASIERES ET DES MARAIS

Le tableau suivant récapitule les principaux processus qui modèlent les rives d'un estuaire. Ces phénomènes agissent à des échelles de temps et d'espace très larges, qu'il convient d'appréhender pour comprendre les facteurs de la sédimentation latérale estuarienne.

Les études d'impacts ou les campagnes de mesures scientifiques hydro-sédimentaires étudient généralement les forçages et les évolutions à court terme, sur des périodes allant de quelques heures à quelques mois. A cette échelle, le jeu des cycles tidaux, des courants de marée, de l'agitation et du débit fluvial est prépondérant pour comprendre la dynamique d'une slikke et d'un shorre.

Pour aborder des échelles d'évolution à moyen terme, comprises entre 1 et 10 ans, d'autres techniques et des moyens complémentaires sont nécessaires. Il convient souvent d'établir des stations de mesures pérennes et de réaliser des suivis récurrents de l'environnement pendant plusieurs années. Ces approches doivent permettre d'observer

l'évolution de la végétation du shore et des marais, l'impact de certains travaux d'aménagement et de discuter de tendance ou de cycle évolutifs sur plusieurs années.

A plus long terme, les travaux d'aménagements majeurs comme l'installation de polders ou le comblement de chenaux laissent des traces et influencent de façon prépondérante l'évolution des rives de l'estuaire. A des échelles de temps encore supérieures, les modifications climatiques, le jeu des cycles glaciaires et la géologie vont conditionner l'existence de l'estuaire et son mode de fonctionnement.

Cette approche à différentes échelles de temps est un point fondamental pour aborder la complexité des processus rencontrés et pour comprendre le contexte évolutif et les conditions de sédimentation sur les bords d'un estuaire.

Dans la recherche bibliographique effectuée, il n'a pas été trouvé d'études détaillées sur les conséquences des dragages sur les problèmes de sédimentation latérale, que ce soit dans les estuaires français ou plus généralement dans la littérature européenne et internationale qui a été consultée, ceux-ci sont simplement dans certains cas évoqués. A l'échelle de plusieurs années, cet impact ne paraît donc pas prépondérant au regard des grands travaux d'aménagements et de modification des chenaux réalisés dans les estuaires. En fonction des modes de dragage et surtout des secteurs de clapages des matériaux, un impact morphologique ponctuel sur les berges peut exister (comme dans l'estuaire de la Gironde), alors qu'en Seine leur impact est peu évoqué.

Echelle de temps	Processus	Effet sur la sédimentation latérale des estuaires
Très long terme (10 000-1 000 ans)	Eustatisme, cycle glaciaire	Apports de sédiments grossiers en période glaciaire
		Apports de sédiment fin et comblement en période interglaciaire
Long terme (100-10 ans)	Oscillation / changement climatique	Modification des apports sédimentaires et des forçages
	Aménagements humains	Modification de la morphologie et des conditions hydrodynamiques
Moyen terme (10-1 an)	Régimes fluvio-climatiques pluriannuels	Évolution des apports sédimentaire et impact de cycle de crues
	Cycle fluvial annuel	Action des crues et de la présence du bouchon vaseux
	Croissance végétale	Stabilisation du marais, action favorable à la sédimentation
	Bioturbation et action biologique	Homogénéisation de la vasière, stabilisation-déstabilisation
Court terme (< 1 an)	Cycles de marée	Dépôts d'étales, de mortes-eaux, transport des sédiments par les courants
	Agitation	Liquéfaction, érosion
	Évènement exceptionnel	Submersion, impact sur la morphologie et les chenaux

Tableau B.1 : Synthèse sur les processus affectant la sédimentation latérale des estuaires, leur échelle de temps et leurs effets

C. CAS DE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE

L'objectif de ce chapitre est de synthétiser la connaissance existante sur les dépôts sédimentaires des berges de l'estuaire de la Loire pour comprendre les risques et les problèmes rencontrés actuellement.

C.I.1. Effet des cycles glaciaires sur les dépôts sédimentaires

Les cycles glaciaires sont les phénomènes qui guident la sédimentation des fleuves et des estuaires pour les très longues échelles de temps. Une étude BRGM de 2006 décrit la morphologie des formations géologique de la Loire. La coupe géologique réalisée à partir d'une série de forages entre l'île de la Maréchale et l'île Pipy (pk 35), en amont de Paimboeuf (voir figure page suivante), montre bien les différentes phases de dépôts qui se sont succédé au cours du dernier maximum glaciaire datant de 18000 ans.

Ainsi, la phase de glaciation a provoqué le creusement du lit du fleuve dans le socle et l'éloignement vers l'ouest de l'embouchure, en raison de la baisse du niveau marin. Lors de la remontée du niveau marin et la fonte des glaces, la vallée incisée s'est peu à peu comblée sur plus de 35m d'épaisseur. Tout d'abord, par des dépôts très grossiers de blocs, galets et graviers, puis par des sables graveleux et des sables moyens. Plus récemment, la sédimentation s'est caractérisée par des dépôts de sables argileux, d'argiles sableuses et de sables. Enfin, la sédimentation actuelle correspond au comblement terminal de la vallée incisée lors de la glaciation. Elle est enregistrée dans les derniers mètres des forages et apparait très majoritairement vaseuse (argile et silt). Cette coupe, située dans la partie intermédiaire de l'estuaire montre toutefois une certaine variabilité spatiale des sédiments au niveau des anciennes îles de la rive sud, avec la présence d'argile, de sable et d'argile sableuse.

A très long terme, la situation de haut niveau marin actuel explique la sédimentation vaseuse à sablo-vaseuse de l'estuaire et l'état de comblement complet de la vallée, incisée lors du bas niveau marin.

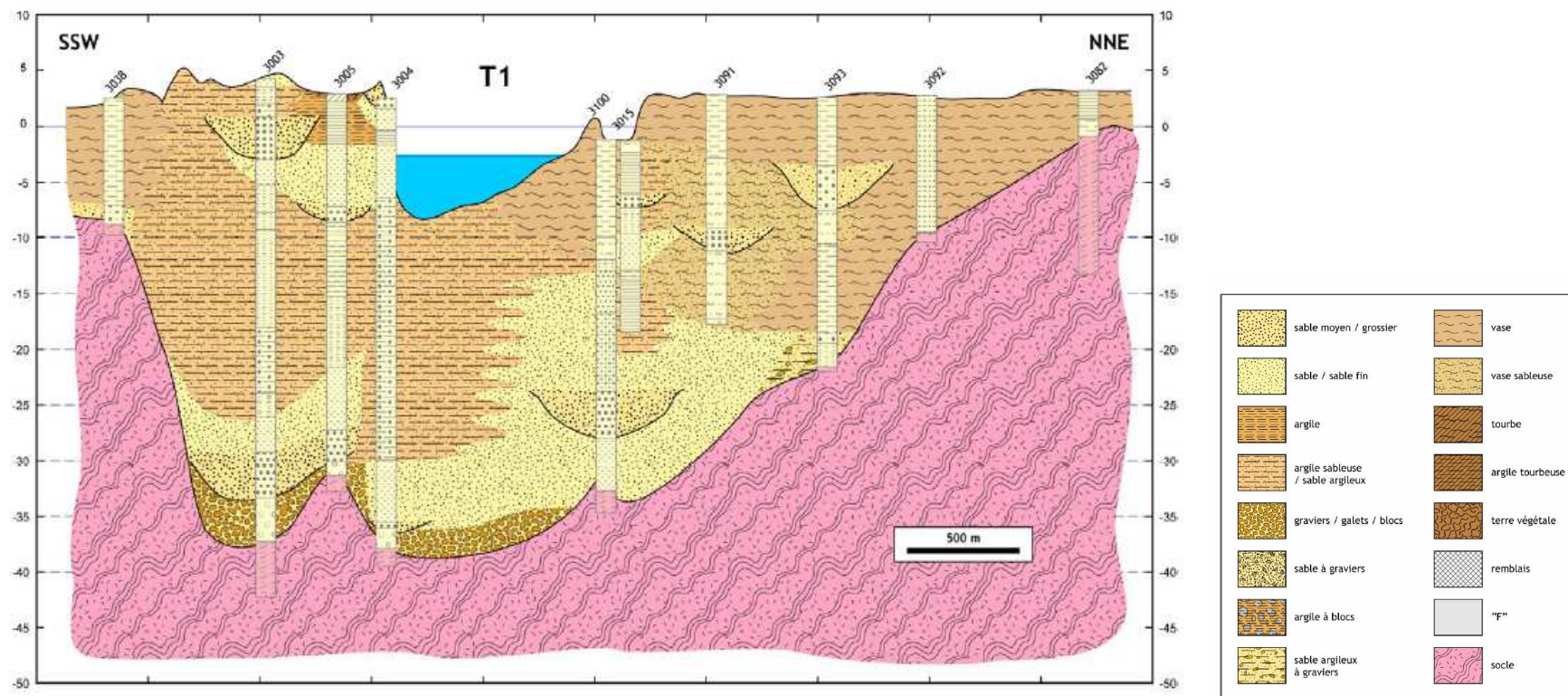


Figure C.1 : Coupe géologique réalisée à partir d'une série de forages entre l'île de la Maréchale et l'île Pipy (pk 35). Source : BRGM

C.I.2. Effet des aménagements humains

Depuis le XIX^{ème} siècle, les hommes ont mis en œuvre de très importants travaux d'aménagement de l'estuaire de la Loire pour le rendre plus accessible aux navires. La morphologie de l'estuaire et de ses berges en a été fondamentalement transformée (Sogreah, 2006 ; Verger, 2005, association Rivages, 1995). La carte suivante sépare l'estuaire en plusieurs sections (aval, intermédiaire, endiguée) qui permettront de distinguer la position et le phasage des aménagements réalisés.

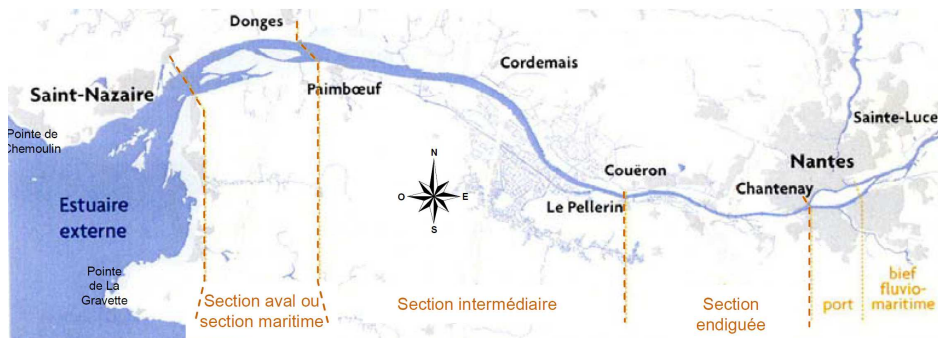


Figure C.2 : Carte des différentes sections de la Loire utilisé dans ce rapport. Soucre : GIP LE, Cahier d'indicateur L1D3.

Les illustrations de la page suivante présentent l'impact des aménagements anthropiques sur la morphologie des parties aval et intermédiaire. Les travaux avaient pour but de simplifier le passage des navires en rendant le tracé plus linéaire, en supprimant les nombreuses îles qui « encombraient » le passage et en approfondissant le chenal de navigation pour permettre aux plus gros navires de passer.

Le tableau qui suit synthétise les travaux et aménagements réalisés dans la zone d'étude, entre Nantes et St-Nazaire, depuis le 19^{ème} siècle.

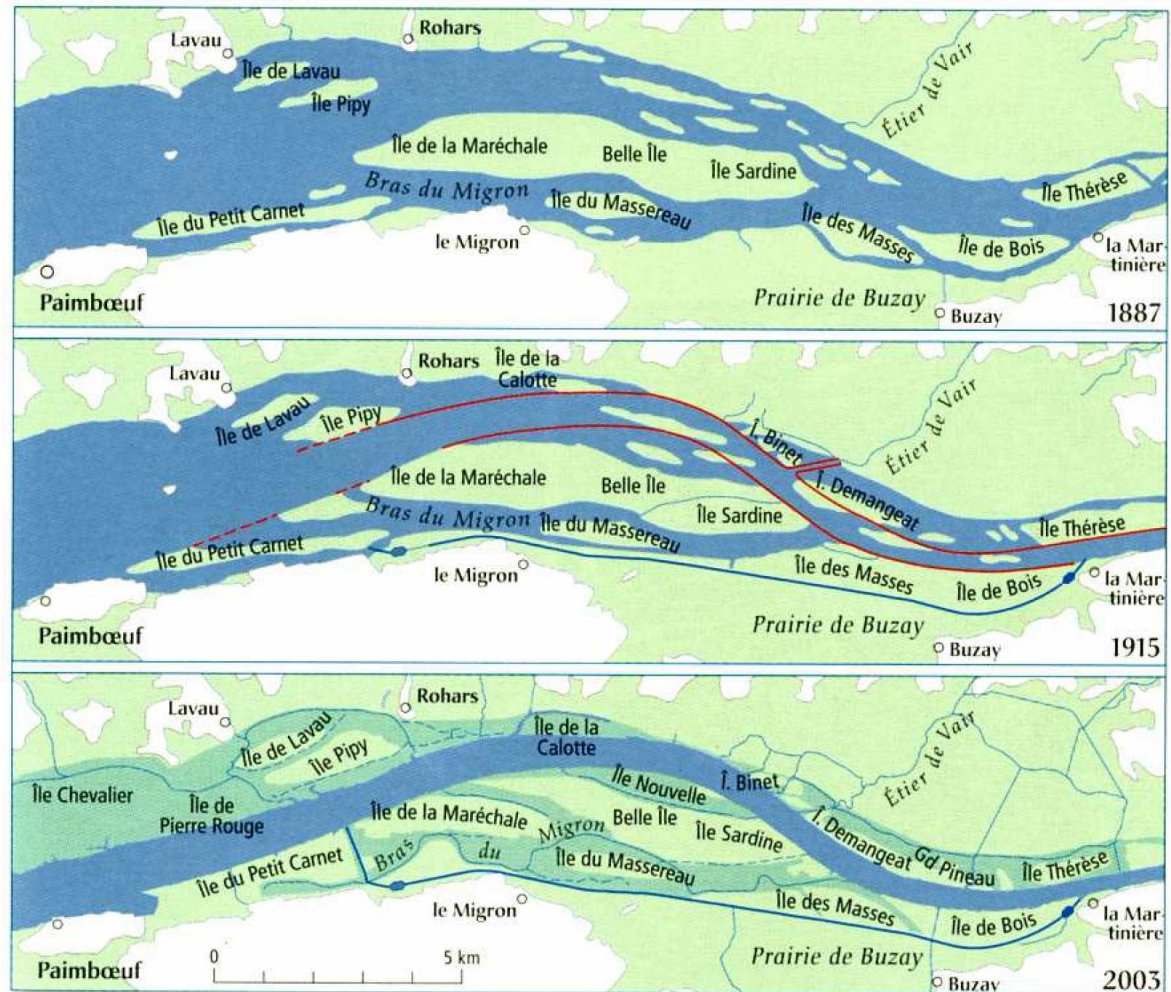


Figure C.3 : Travaux et aménagements de la section intermédiaire, de 1887 à 2003. Source : Marais et estuaires du littoral français, Verger, 2005.

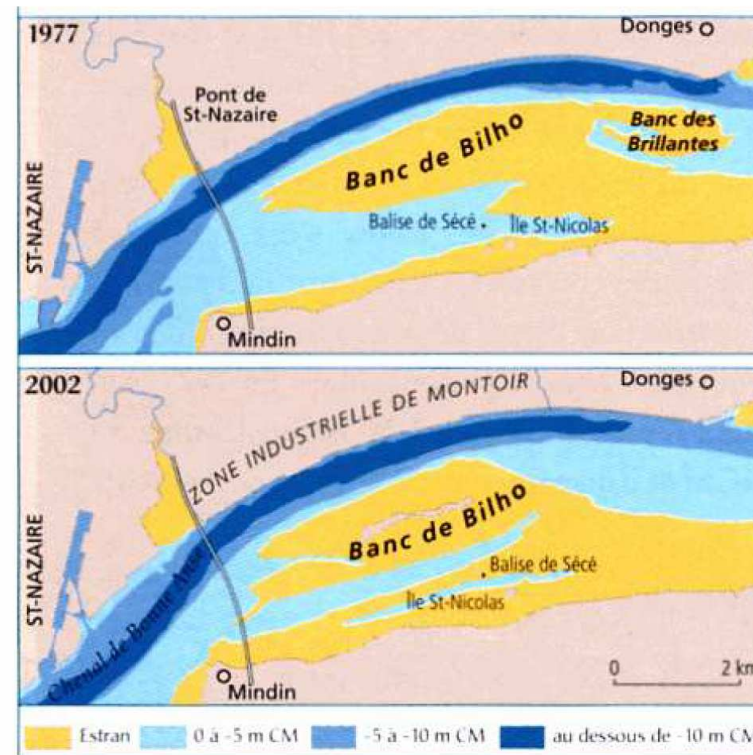
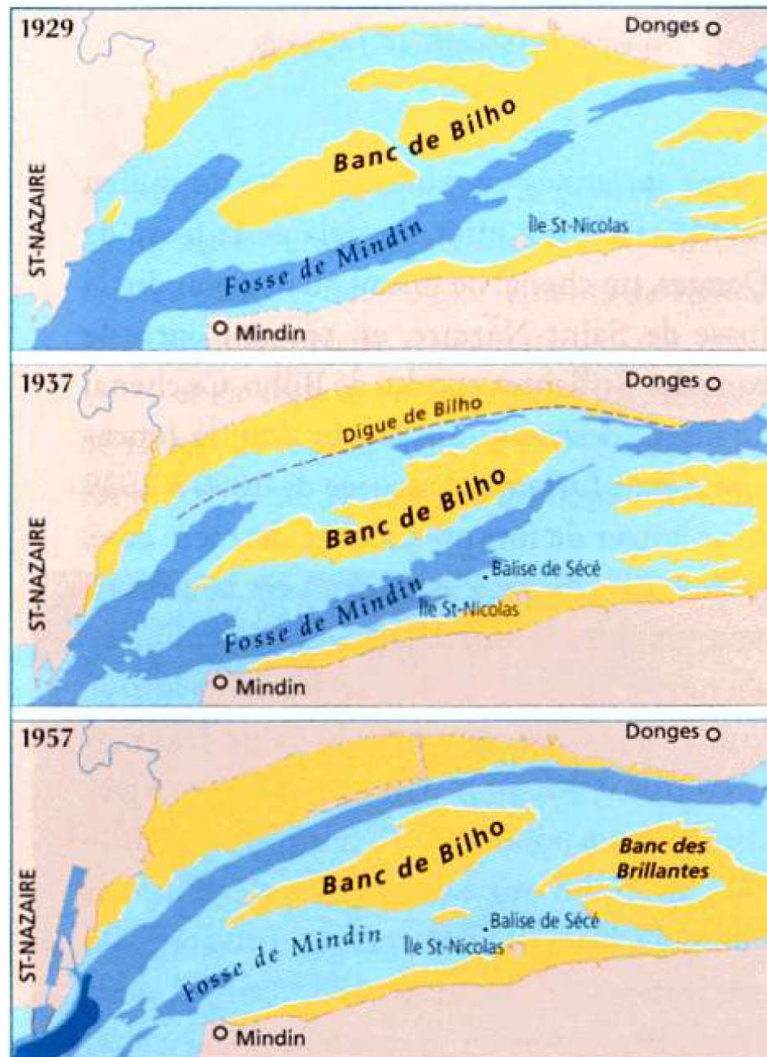


Figure C.4 : Travaux et aménagements de la section aval, de 1929 à 2002. Source : Marais et estuaires du littoral français, Verger, 2005.

Période	Lieu	Travaux	Effet sur les berges
Fin du 19ème	Section endiguée	Endiguement de Nantes au Pellerin	Comblement des zones latérales
		Creusement du chenal	
	Section aval	Ouverture d'un chenal de Donges à Paimboeuf	
1900-1930	Section intermédiaire	Endiguement Le Pellerin-Paimboeuf	Comblement des zones latérales
		Comblement des bras	Disparition des îles
		Creusement du chenal	Remblais
1937-1957	Section aval	Construction de la digue de concavité à Montoir	Comblement de la vasière de Montoir
		Creusement du chenal de Donges	Remblais sur les vasières de Donges et Montoir
			Developpement de vasières au sud, lié à la migration du chenal de Mindin
1948-1968	Section intermédiaire	Rectification du chenal au Pellerin+ Brillantes	
		Creusement du chenal	
1969-1984	Section aval	Creusement du chenal de Donges	Remblais sur le banc de Bilho
	Sections intermédiaire et endiguée	Creusement du chenal	Remblais à Donges et au Carnet

Tableau C.1 : Synthèse des travaux et aménagements réalisés dans la zone d'étude, entre Nantes et St-Nazaire, depuis le 19^{ème} siècle

Ces travaux ont eu un impact considérable sur la morphologie des berges et la sédimentation latérale. Le tableau suivant montre la diminution d'un facteur 3 de la largeur de l'estuaire en 100 ans. La distance entre les berges passant de près de 3000m de Cordemais à Donges, à moins de 1000 m entre Cordemais et Lavau en 1984. Derrière les digues construites, se sont installées de grandes vasières qui ont été progressivement remblayées et colmatées. Ces surfaces sont aujourd'hui occupées par des zones portuaires, comme à Montoir, ou par des secteurs côtiers de marais, de roselières, de shore et de slikke.

	Cordemais	Rohars	Lavau-Carnet	Paimboeuf	Donges
1881	3330	2970	3100	2900	2700
1957	625	850	1000	2850	2800
1984	625	850	950	1625	2625
Évolution en % entre 1881 et 1957	-81,2 %	-71,3 %	-67,7 %	-1,7 %	+3,7 %
Évolution en % entre 1957 et 1984	0 %	0 %	-5 %	-43 %	-6,3 %

Tableau C.2 : Largeur en mètres entre les limites des berges et évolution, dans Rivages (1995), d'après Migniot (1993)

D'un estuaire peu profond, parsemé d'îles plutôt sableuses, la Loire a été transformée par l'homme en un chenal profond, entouré de larges marais, comme l'illustre le schéma suivant. Les auteurs (Rivage, 1995, Sogreah, 2006) parlent ici d'une continentalisation de l'estuaire, faisant ainsi le lien avec une morphologie de fleuve chenalisé, entouré de sa plaine alluviale. Cette évolution « continentale » est bien réelle dans le cas des berges qui se sont colmatées et végétalisées. Mais cette notion reste paradoxale pour le chenal, qui, une fois approfondi, favorise la pénétration de la marée et des eaux salées océaniques.

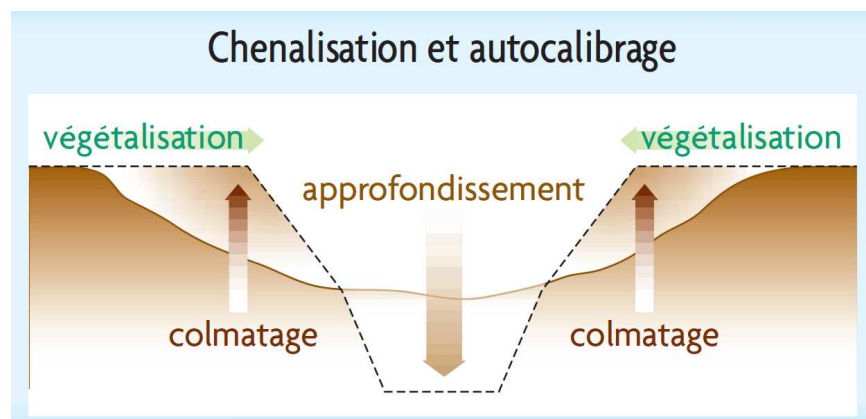


Figure C.5 : Schématisation des transformations de l'estuaire de la Loire. Source : GIP Loire Estuaire / CMB, cahier des indicateur, L1D3.

En corollaire à cette augmentation de surface des berges sous l'effet des aménagements, leur structure a évolué. L'estuaire a vu décroître très fortement la superficie de ses estrans, zones de balancement des marées. Selon les estimations, il ne resterait que 40% des surfaces marnantes existantes en 1821 (voir tableau suivant). Ce point est sensible car la qualité écologique du milieu dépend étroitement du milieu intertidal qui est particulièrement riche. Depuis 1982, la régression des vasières est stoppée et leur superficie s'établit à environ 22km².

année	1821	1881	1957	1982	2002
superficie (km ²)	55	47	30	21,5 / 26	22 / 23,5

Tableau C.3 : Estimation des superficies de surfaces marnantes depuis 1821. Source : CMB, cahier indicateur 2004 L1D3 et Rivage, 1995.

L'étude concerne la sédimentation latérale, donc les estrans et les berges, constitués de vasières, marais et prairies. La vision actuelle est celle d'un estuaire constitué d'un chenal unique. Ce n'était pourtant pas le cas au cours du XX^{ème} siècle, à l'époque où les îles étaient nombreuses. On trouvait donc de vastes surfaces d'estran, voir de prairies humides au niveau des îles. On constate donc que la surface initiale des estrans dans l'estuaire parsemé d'îles était très importante. A cette époque, en l'absence d'un chenal unique de Nantes à Saint-Nazaire, on ne pouvait donc pas utiliser la notion de sédimentation latérale sur les berges au sens stricte. Cette vaste zone fonctionnait plutôt comme un environnement estuarien globalement peu profond, modelé en fonction des apports et des phénomènes érosifs sous l'influence de la marée et de la Loire. Actuellement, depuis le colmatage des bras de la Taillée et du Migron, les estrans sont très majoritairement compris dans la section aval qui regroupe 66% de l'ensemble des surfaces marnantes de l'estuaire. Ces évolutions (illustrées dans la figure C.4) sont liées aux travaux de creusement des chenaux de Donges et des Brillantes. Les conditions de sédimentation ont été profondément modifiées depuis 1940 et ont permis la croissance d'une large vasière reliant à marée basse la rive sud de Mindin à Paimboeuf et le banc de Bilho.

Sur le long terme, les travaux d'aménagements par l'homme expliquent la morphologie actuelle de l'estuaire, l'emplacement des berges et leur extension considérable depuis le 19^{ème} siècle.

C.I.3. Évolution et dynamique des vasières

Les premières parties de cette synthèse sur les connaissances de la sédimentation latérale en Loire ont montré qu'à des échelles de temps longues et très longues, les cycles glacio-eustatiques et les aménagements anthropiques influencent les dépôts et la forme des berges de manière prépondérante. Sur les berges, les surfaces marnantes sont les secteurs de sédimentation latérale privilégiés. L'observation de leur évolution et la compréhension de leur dynamique est nécessaire pour estimer les flux et les processus de la sédimentation latérale de la Loire.

Les estimations de surfaces marnantes établies pour l'étude à long terme (voir tableau précédent) ont montré qu'après la fin des grands bouleversements liés aux travaux d'aménagement, la superficie des surfaces marnantes a continué à évoluer depuis 1982, mais à un rythme plus modéré. L'étude de Sogreah (2006) réalisée pour le compte du GIP Loire Estuaire permet de détailler cette évolution entre 1982-1984 et 2000. Le tableau et la figure suivante présente leurs résultats, issus de l'analyse des bathymétries disponibles.

section	aval	intermédiaire	Endiguée
Estran 82-84	1707	799	104
Estran 2000	1525	603	90
Bas shore 82-84	10	102	26
Bas shore 2000	16	138	16

Tableau C.4 : Surfaces d'estran en hectares et par section entre 82-84 et 2000. (Source : Sogreah, 2006)

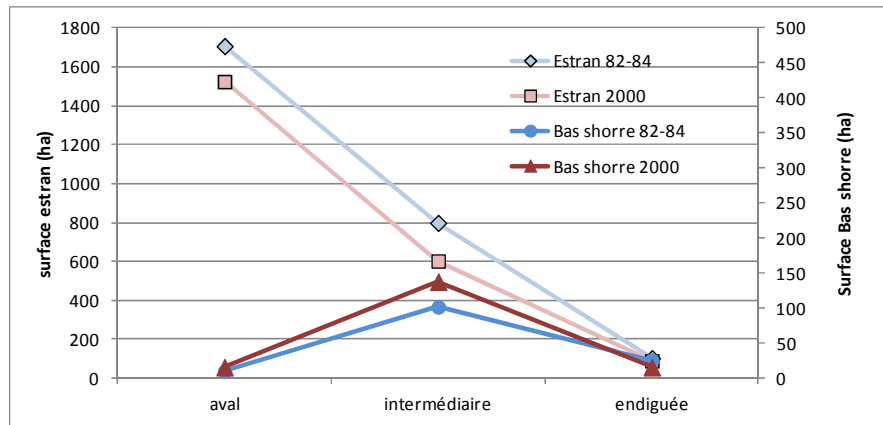


Figure C.6 : Évolution des estrans et du bas shorre par section entre 82-84 et 2000 (Source : Sogreah, 2006).

Ces travaux montrent bien la très nette décroissance des zones intertidales depuis l’aval vers l’amont. Dans le temps, l’érosion généralisée de ce milieu ne semble pas enrayé d’après ces données. La section endiguée a perdu 13% de sa superficie, la section aval, 10%, la section intermédiaire est touchée par presque 25% de perte.

L’étude de Sogreah présente également la différence de surface entre la zone de vasière et le bas shorre. Dans ce travail, la vasière est définie suivant son altitude, comprise entre 0 Cote Marine et 4,86 CM. Le bas shorre est défini entre 4.86 CM et 5,86 CM. Il correspond au secteur de submersion compris entre les pleines mers de mortes-eaux et les pleines mers de vives-eaux, comme le montre la figure synthétique du GIP Loire Estuaire convertie en échelle IGN 69 (étage +1,70-+2,70m IGN69). Sa surface et son évolution dans le temps peuvent être utilisées comme des marqueurs transitoires de la continentalisation des berges, c’est-à-dire de la transformation progressive de la vasière intertidale en marais subaérien. Néanmoins, les chiffres doivent être maniés avec précaution, car nous estimons qu’une erreur de quelques pourcents est probable sur ces données. Les résultats montrent une croissance du bas shorre pour les sections aval et intermédiaire. Cet effet de comblement des vasières est surtout perceptible pour la partie intermédiaire où l’évolution concerne près de 36 ha entre 82-84 et 2000.

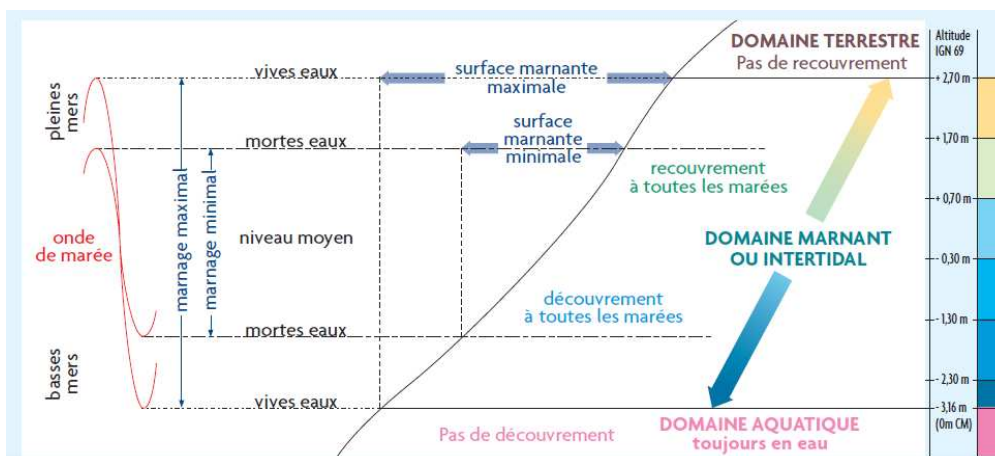


Figure C.7 : Marnage et surfaces marnantes. Source : GIP LE/CMB, cahier indicateur L1D3, 2004

C.I.3.1 Vasières de la section aval

Dans son cahier indicateur de mai 2004, le GIP Loire Estuaire présente un bilan d'évolution des zones intertidales dans la section aval de l'estuaire. Il s'attache essentiellement à décrire l'évolution du banc de Bilho. Ce banc a été remblayé et agrandi pour former une vaste zone marnante semi-naturelle, en compensation à la perte des vasières de Montoir, lors de l'aménagement portuaire du site. L'évolution à long terme de ce site a été présentée dans le chapitre précédent. L'effet des aménagements humain y est primordial.

Depuis les années 80, les grands travaux d'aménagement ont cessé, mais le site a continué à se transformer de façon importante, comme le montre la figure de la page suivante.

En 1977, l'estran du banc de Bilho et du banc des Brillantes se rejoignaient au niveau d'une vaste vasière placée à l'ouest de Paimboeuf. La fosse de Mindin, ancien chenal d'accès de l'estuaire, reste large, mais ne débouche plus devant Donges à marée basse.

En 1987, le chenal de Mindin s'est comblé en partie, mais surtout, le banc des Brillantes s'est réduit et n'est plus connecté au banc de Bilho à marée basse.

Depuis 1987, ces tendances ont perduré avec une nette réduction de la taille du chenal de Mindin et la disparition quasi-complète de l'estran du banc des Brillantes. Cette disparition explique la diminution des surfaces marnantes de la section aval depuis une vingtaine d'années, et la déconnexion entre les hauts-fonds des Brillantes et le système de berges de la Loire. D'après le cahier indicateur du GIP Loire Estuaire, cette évolution est liée à l'action d'un courant traversier entre Paimboeuf et Montoir. On en déduit donc une évolution en relation avec les travaux d'aménagement et de rectification de cette partie du chenal qui se sont succédé depuis le XIX^{ème} siècle. Mais une étude hydro-sédimentaire plus fine semble nécessaire pour mieux comprendre cette disparition relativement rapide de l'estran du banc des Brillantes.

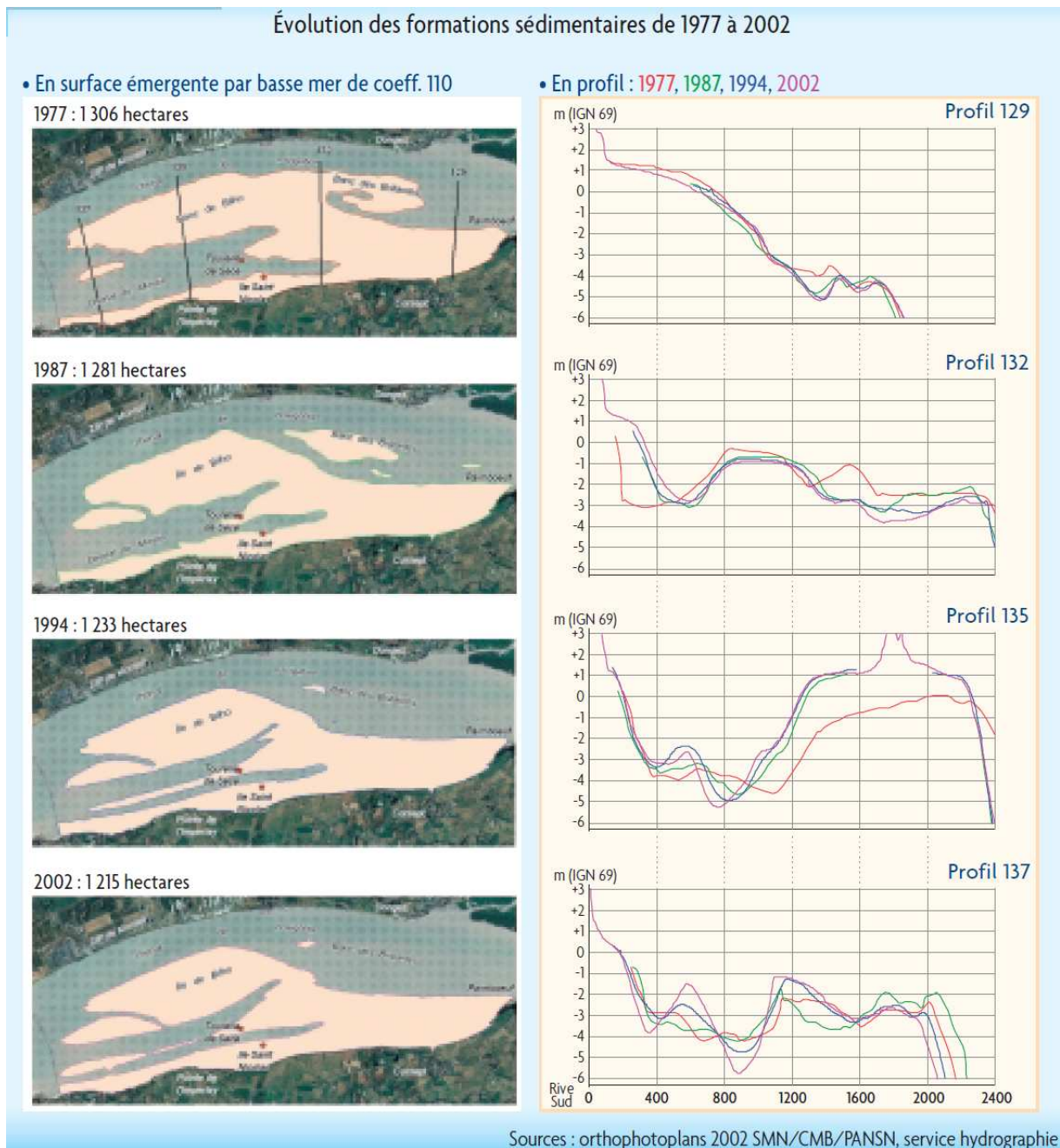
C.I.3.2 Vasières de la section intermédiaire

(a) Évolution à moyen terme

Les vasières de la section intermédiaire, entre Paimboeuf et Cordemais sont situées essentiellement sur la rive nord. Les superficies les plus importantes se retrouvent aux embouchures des étiers, entre Donges et Cordemais.

En 1995, l'association Rivage a réalisé, pour le compte du GPMNSN, une étude des vasières situées dans cette zone. C'est un domaine qui a été très fortement influencé par les aménagements de l'estuaire, puisque cet ancien secteur à îles a été endigué, remblayé, puis s'est colmaté rapidement au cours du XX^{ème} siècle.

Les figures C9 et C10 présentent la zone d'étude et la cartographie des vasières en 1994. Ce secteur de berges est marqué par la position des anciennes îles et la présence d'étiers (bras de Cordemais, étiers de Rohars et de Lavau) qui collectent le réseau hydrographique des marais entre les anciennes îles.



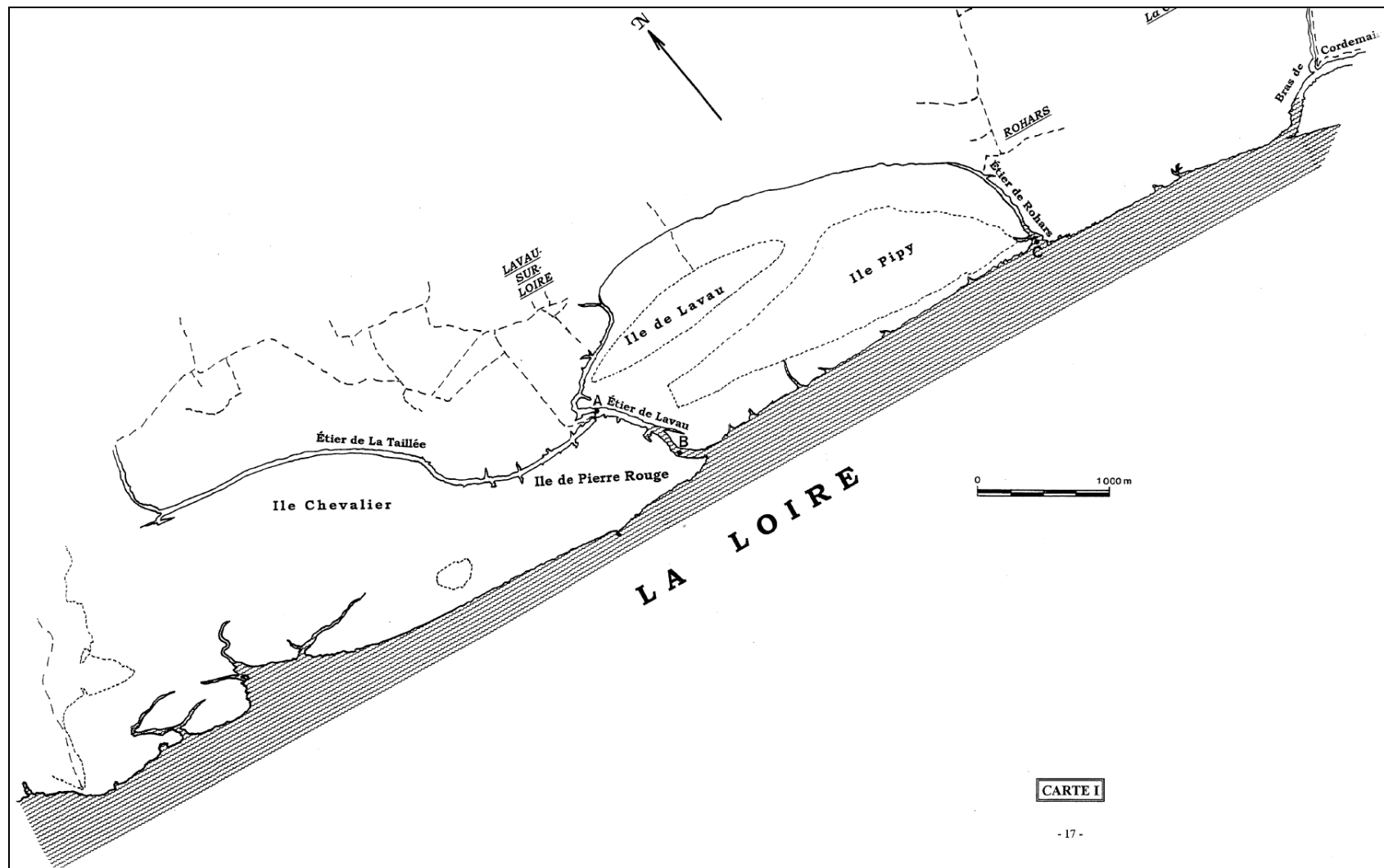


Figure C.9. Carte I : Zone d'étude des vasières de la rive nord, position des vasières intertidale et réseau hydrographique. Source : Rivage, 1995.

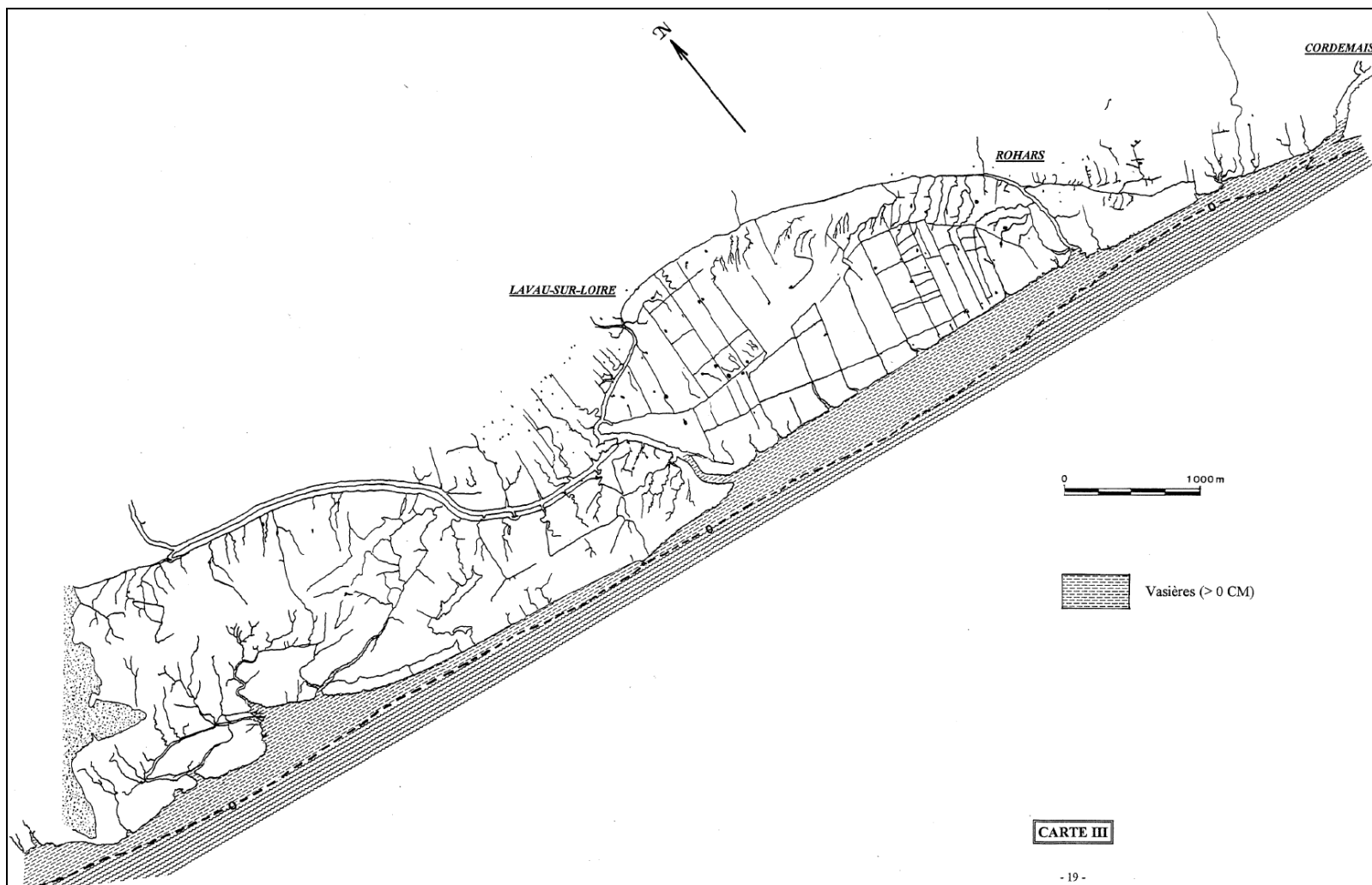


Figure C.10. Carte III : Zone d'étude des vasières de la rive nord, position des vasières intertidale et réseau hydrographique. Source : Rivage, 1995.

L'étude des plans de sondage du Port entre 1983 et 1994 indique les tendances évolutives de la zone à moyen terme. Les surfaces comprises entre les profondeurs de 0 et +3m CM ont été quantifiées.

Entre l'étier de Rohars et l'île de Pierre Rouge, la vasière a perdu plus de 40% de sa superficie (de 74 à 42,6ha). Dans un premier temps, cette perte est due à un approfondissement des fonds, qui se traduit par une migration de la limite des plus basses mers de 75m vers le nord. Les auteurs indiquent un effet de la migration du chenal de navigation vers le nord, mais ne précisent pas s'il s'agit d'un effet naturel ou du résultat d'actions de dragage à proximité. Dans un second temps, elle est liée à une extension du shore situé au dessus de l'isobathe +3m, qui a gagné 125 à 140 m vers le sud par endroits. Comparativement, l'effet de la croissance du secteur subaérien est plus important que la progression du chenal.

En aval, entre l'île de Pierre Rouge et le remblai, la vasière a perdu 12% de sa superficie (de 46,4 à 40,9 ha) entre 1983 et 1994. Les isobathes 0 et +3CM ont évolué de façon sensiblement identique en se déplaçant vers le nord sur environ 40 à 90m. Les phénomènes d'érosion de berges étaient visibles sur ce secteur, se matérialisant par de petites falaises. Ce déplacement de la vasière vers le nord est expliqué par la migration du chenal.

De plus, pour expliquer le fonctionnement du site, les auteurs ont estimé les débits solides dans les étiers de Lavau et de Rohars. L'objectif est d'établir des bilans sédimentaires, puis de faire des hypothèses sur le fonctionnement hydro-sédimentaire du système de marais et de vasières. Les résultats sont ensuite comparés à des mesures réalisées dans les années 1980.

Malgré les incertitudes sur les estimations, les conclusions indiquent de profondes modifications entre les années 1980 (Boutelier, 1979 ; Diara, 1983) et 1995. Ainsi, Boutelier a réalisé des prélèvements lors des travaux d'approfondissement du chenal de Donges, ce qui a entraîné une importante remise en suspension des sédiments dans le secteur et des concentrations en MES beaucoup plus forte dans les étiers. Il en résulte une hypothèse de colmatage rapide des vasières durant cette période de forts apports sédimentaires.

Dans les marais, la mise en place d'une vanne à la confluence de l'étier de la Taillée avec celui de Lavau a impacté le fonctionnement hydro-sédimentaire du milieu. Cette modification a logiquement entraîné une réduction des vitesses de jusant en aval de cette vanne et accéléré le colmatage de l'étier. De plus, les évaluations effectuées par Diara en 1983, avant la réalisation de la vanne, ont révélé qu'en jusant, l'étier de la Taillée fournissait les 2/3 de la masse en MES passant l'embouchure, alors qu'en flot, les 3/4 des sédiments entrant dans le système remontaient dans l'étier de la Taillée. La mise en place de la vanne a donc modifié les conditions de dépôt sur le bord des étiers et dans les zones basses de ce secteur situé entre les anciennes îles estuariennes.

Cette étude datant de 1995 est intéressante car les observations directes de ces vasières sont rares dans l'estuaire de la Loire. Plusieurs points pertinents sont à retenir. D'un côté, l'étude quantifie des évolutions à moyen terme des limites de l'estran, en émettant des hypothèses qui lient les modifications sur plusieurs années aux travaux d'aménagement et aux dragages dans ce secteur. D'un autre côté, elle estime des flux hydro-sédimentaires dans les étiers en fonction de différentes conditions de marée et de débits. L'objectif est d'y quantifier les processus de sédimentation de l'ensemble du milieu. Les auteurs associent les modifications constatées en 10 ans dans les bilans aux travaux d'aménagements du marais (installation d'un ouvrage sur l'étier).

(b) Évolution à court terme

Dans le même secteur géographique, l'évolution à court terme des vasières a été analysée récemment. Dans le cadre d'une étude du GIP Loire Estuaire, la société Hocer a installé et entretenu un ensemble de 6 systèmes de mesures Altus, placés sur deux vasières, entre décembre 2008 et avril 2010. Les Altus sont des instruments mis au point pour suivre l'évolution morphologique des estrans grâce à un altimètre et mesurer la hauteur d'eau et l'agitation grâce à un capteur de pression. Ils permettent d'observer les processus sur une vaste échelle temporelle, depuis la seconde jusqu'à l'année. Ces échelles de temps n'ont pas encore été abordées dans ce chapitre sur l'estuaire de la Loire. Les données récoltées ont été analysées en 2010 par Geotransfert, cellule de transfert de l'université de Bordeaux. L'objectif était d'observer et de comprendre les processus sédimentaires des vasières en fonction des événements hydrologiques et du déplacement du bouchon vaseux.

Les figures C10 à C12 présentent la position des instruments et la morphologie des deux vasières étudiées. Sur les deux secteurs, la rupture de pente artificielle à -3m CM liée à l'entretien du chenal de navigation est très nette.

Influence de la position sur l'estran

Les Altus situés au centre et en haut de vasières sont placés dans un secteur qui couvre et découvre à chaque marée. Les Altus de bas de vasière, en revanche, ne sont exondés que lors des coefficients de vives-eaux.

Le premier constat de l'étude des données altimétriques consiste à différencier les évolutions du bas des vasières, des modifications observées au centre et en haut de l'estran. A l'échelle de l'année de mesure, les altitudes en haut des vasières sont restées globalement stables et les variations inférieures à 10cm. En bas des vasières, en revanche, les modifications sont rapides et les évolutions peuvent être importantes. Sur la vasière des Moutons, les évolutions dépassent 30cm à l'échelle de l'année d'observation, tandis qu'elles sont de l'ordre de 20cm sur la vasière de Pipy.

Plusieurs événements ont été observés sur ces enregistrements en bas de vasière. A Pipy, une brusque érosion de 20cm intervient en août 2009, puis une accrétion rapide intervient à la fin du mois de décembre (non observé directement). Aux Moutons, la forte accrétion de fin décembre 2009 est nettement visible, puis elle est suivie d'une érosion importante.

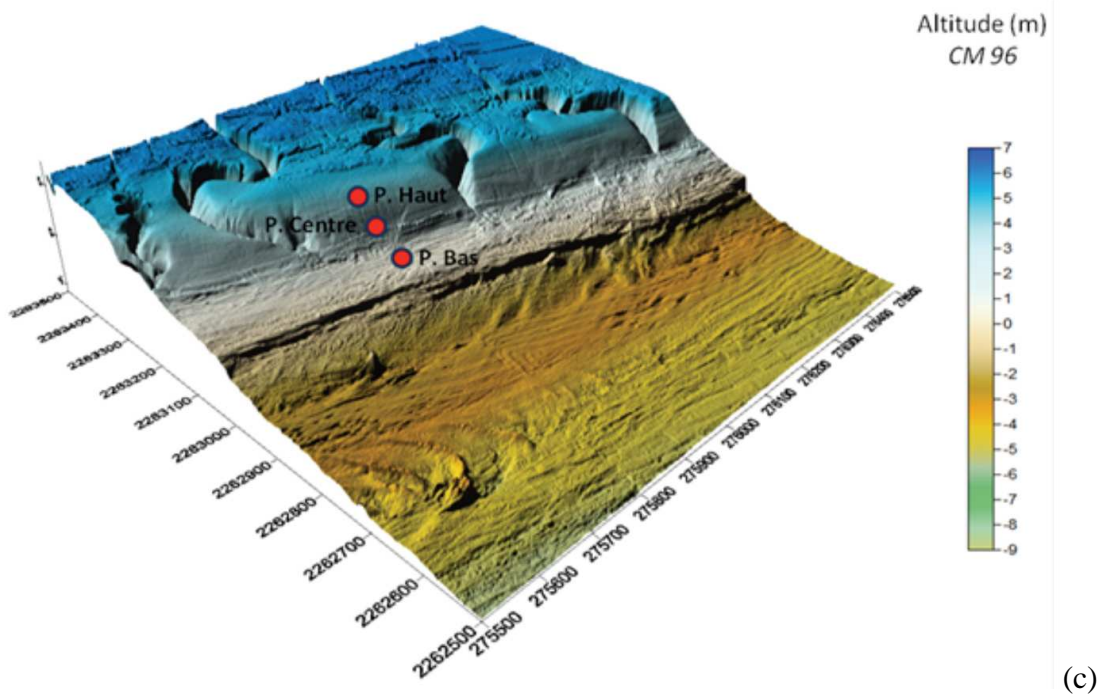
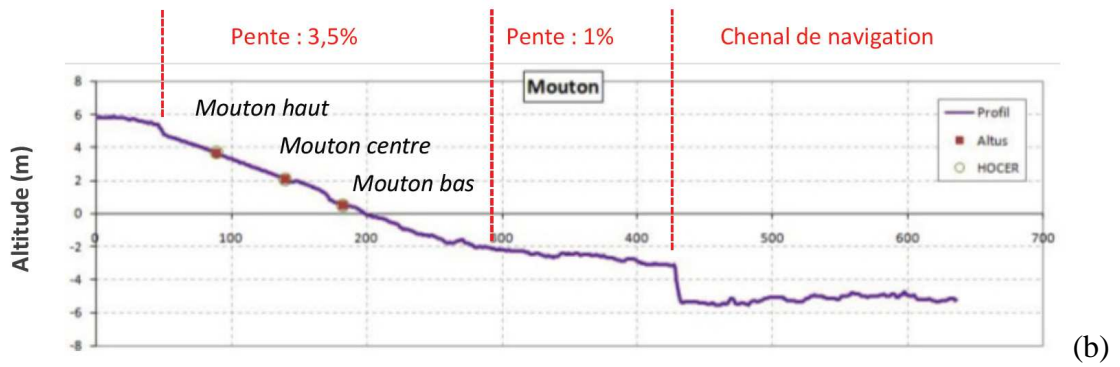


Figure C.11 : Carte générale (a) et emplacement des Altus sur les vasières de Mouton (b) et de Pipy (c).
Source : Geotransfert 2011

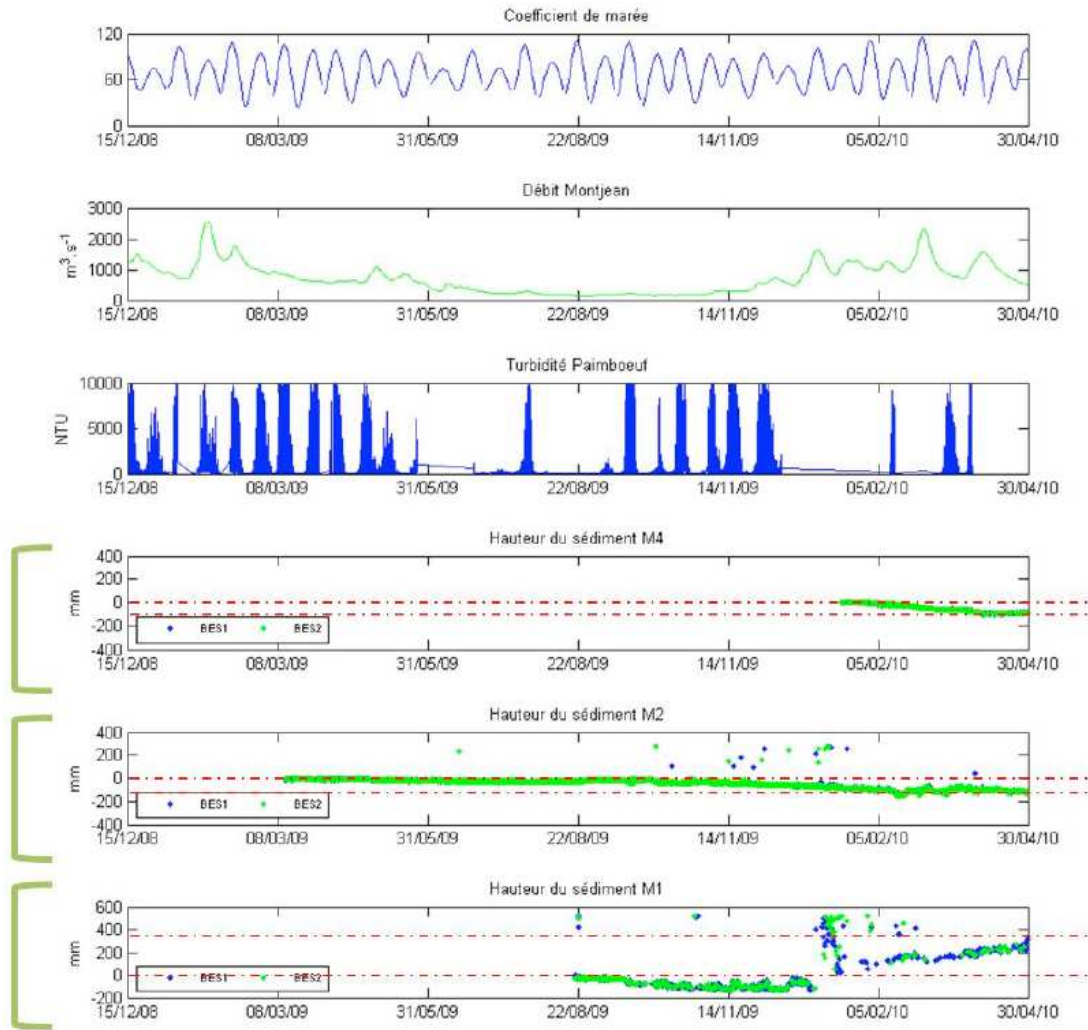


Figure C.12 : Variations altimétriques annuelles mesurées sur chaque station de la vasière de Mouton, en fonction des coefficients de marée, du débit de la Loire et de la turbidité mesurée à Paimboeuf, entre le 15/12/08 et le 30/04/10. M1 = Altus bas de vasière, M2= Mi-Marée, M4 = haut de vasière. Source : Géotransfert, 2011.

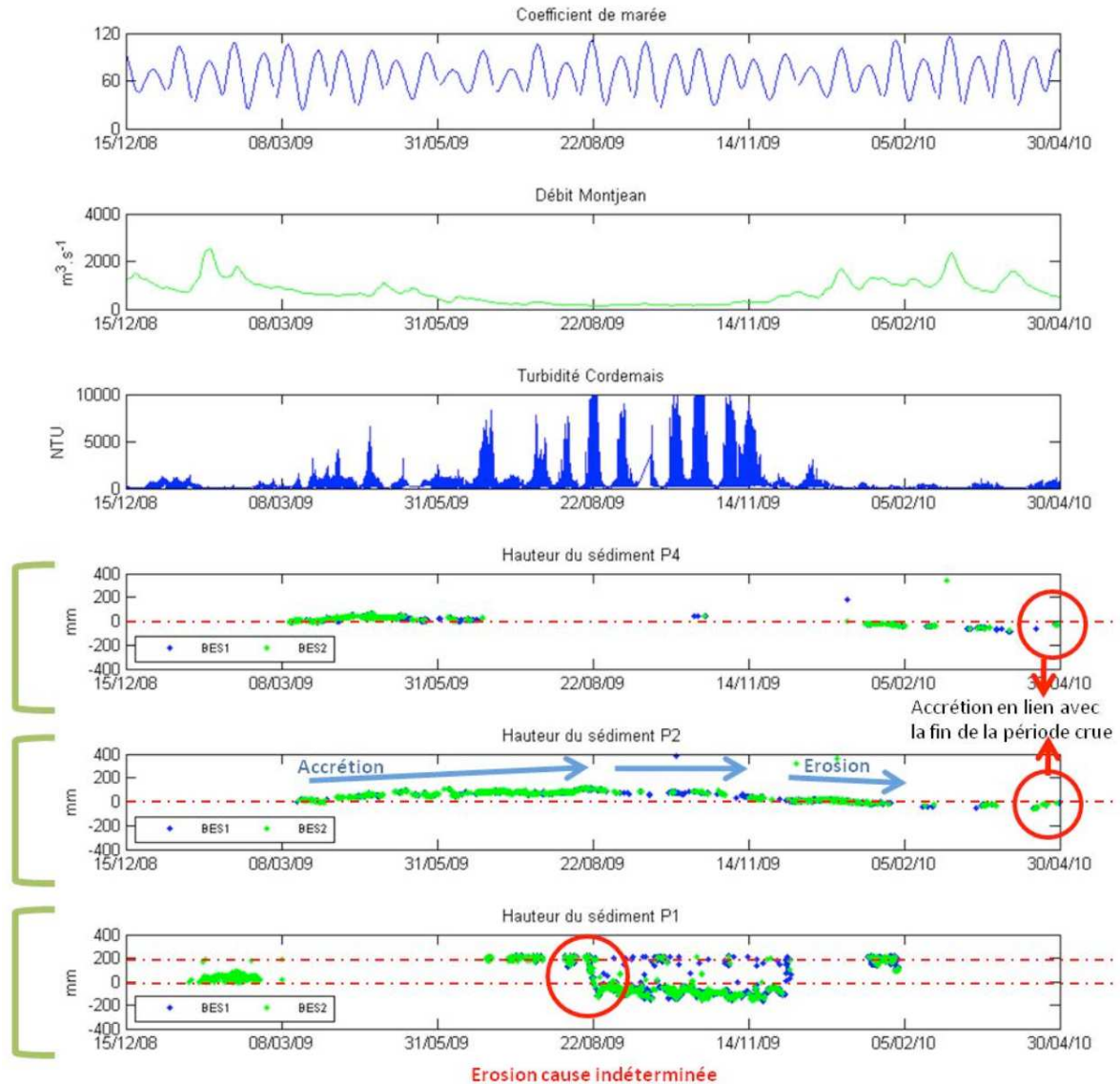


Figure C.13 : Variations altimétriques annuelles mesurées sur chaque station de la vasière de Pipy, en fonction des coefficients de marée, du débit de la Loire et de la turbidité mesurée à Cordemais, entre le 15/12/08 et le 30/04/10. P1 = Altus bas de vasière, P2= Mi-marée, P4 = haut de vasière. Source : Géotransfert, 2011.

Influence du débit fluvial

L'influence du débit fluvial est décrite à partir des figures de représentation des données à l'échelle annuelle. Selon Géotransfert, la période d'étiage de 2009 est caractérisée par une stabilité de la partie haute des vasières et une tendance érosive en bas. De plus, sur les enregistrements du bas des vasières en fin d'étiage, le signal altimétrique présente une variation cyclique assez marquée.

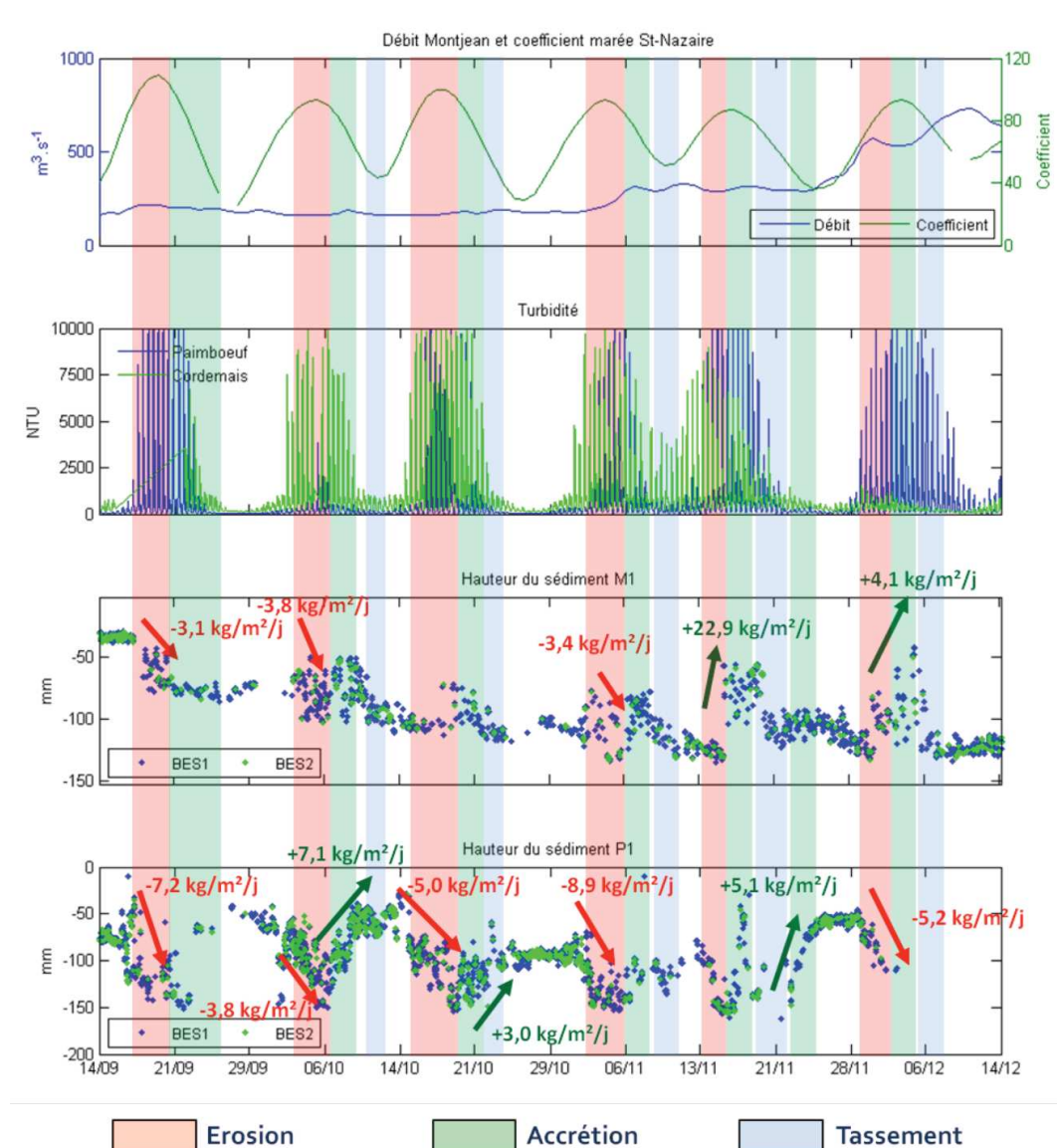
En crue, la tendance est à une érosion lente et régulière en haut de vasière, 10cm pour les Moutons, 1cm pour Pipy. Le bas des vasières montre au contraire une accrétion importante de 20 à 30cm. A Pipy, les enregistrements ne permettent pas une description précise des évolutions. En revanche, sur la vasière des Moutons, les auteurs associent l'évènement brutal d'accrétion/érosion du bas de vasière aux premières crues de décembre 2009. Ils font l'hypothèse d'une redescende rapide du bouchon vaseux, accompagné d'une importante

quantité de crème de vase. Par la suite, l’engraissement du bas de la vase reste forte et constante jusqu’en avril 2010.

Influence tidale

- Cycle morte-eau vive-eau

L’influence des cycles tidaux a été particulièrement bien observée en bas de vase et en fin d’été de l’année 2009. La figure suivante montre plusieurs phases d’évolutions morphologiques corrélées avec les coefficients de marée. En période de déchet (diminution des coefficients de marée), la vase s’engraisse rapidement entre 50 et 127mm en quelques jours. En période de revif (augmentation des coefficients de marée), les érosions sont tout aussi rapides et importantes. Entre ces deux phases, autour d’une période de mortes-eaux, une baisse plus modérée de l’altimétrie est interprétée comme une période de tassement des sédiments.



Dans cette interprétation, l'augmentation des vitesses de courant induit une action érosive sur les dépôts de vases fluides des vasières. Cette remise en suspension depuis les berges participe à l'augmentation générale de la turbidité du bouchon vaseux constatée sur les mesures du réseau Syvel en revif et en vives-eaux. La baisse des coefficients et des courants de marée associées provoque le dépôt sur les vasières et une baisse très nette de la turbidité dans l'estuaire.

- Cycle semi-diurne

L'étude de Géotransfert s'attache à déterminer des vitesses d'érosion ou d'accrétion et des flux de sédiments à l'échelle de la marée, en fonction d'un choix de différentes situations hydrologiques.

Les vitesses de variations horaires de l'altitude des vasières sont millimétriques (2 à 4mm/h) en conditions d'étiage, de mortes-eaux et de turbidité faible. Mais ces évolutions deviennent centimétriques en période de crue et de vives-eaux (de 4mm à 37mm/h). Les variations sont du même ordre de grandeur sur les parties centrales et hautes des deux vasières, mais elles apparaissent plus élevées en bas de vasière. En partie basse, les évolutions sont aussi plus fortes à Pipy que sur la vasière des Moutons.

		Bouchon vaseux	Marée	Hauteur de dépôt/érosion moyenne par heure (mm/h)					
				Mouton			Pipy		
				Bas	Centre	Haut	Bas	Centre	Haut
Etiage	Oui	VE	15	7	-	26	5	-	
	Non	ME	4	3	-	7	4	5	
		VE	4	3	-	2	-	-	
Crue	Non	VE	-	-	-	37	-	4	
	Oui	VE	-	29	-	-	-	-	
		ME	9	6	-	-	-	-	

Tableau C.5 : Hauteur de dépôt / érosion moyenne par heure (mm/h) et en fonction des conditions hydrologiques. Source : Géotransfert, 2011.

En étudiant les exemples présentés en annexe de l'étude de Géotransfert, on observe que le moment des dépôts varie.

En bas de la vasière des Moutons, les dépôts se font de façon préférentielle à marée haute, tandis que le flot et le jusant sont des périodes d'érosion. Cette observation correspond bien au modèle conceptuel proposé par Gallenne (1974) pour expliquer les relations entre la crème de vase et la sédimentation latérale.

Ainsi, au flot, une partie des sédiments qui ont pu décanter dans le bas de l'estran ou dans le chenal sont remis en suspension sous l'effet des forts courants. Les vasières latérales sont peu à peu recouvertes par une eau très turbide.

A pleine mer, la décantation des sédiments est importante et colmate la vasière.

En jusant, les eaux coulent vers le chenal en remobilisant et en érodant les sédiments instables de la vasière.

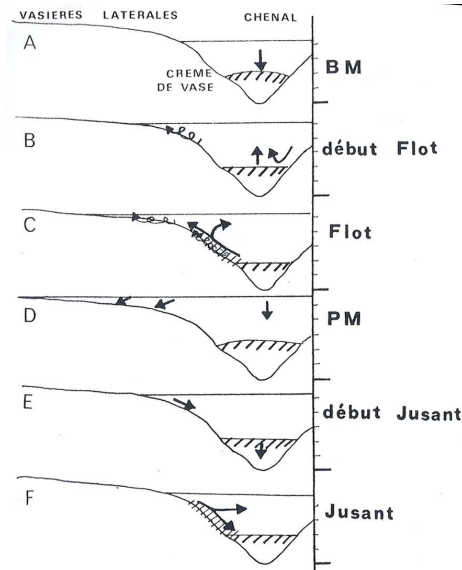


Figure C.15 : Modèle conceptuel de sédimentation sur les vasières, en relation avec le bouchon vaseux.
Source : Gallenne, 1974

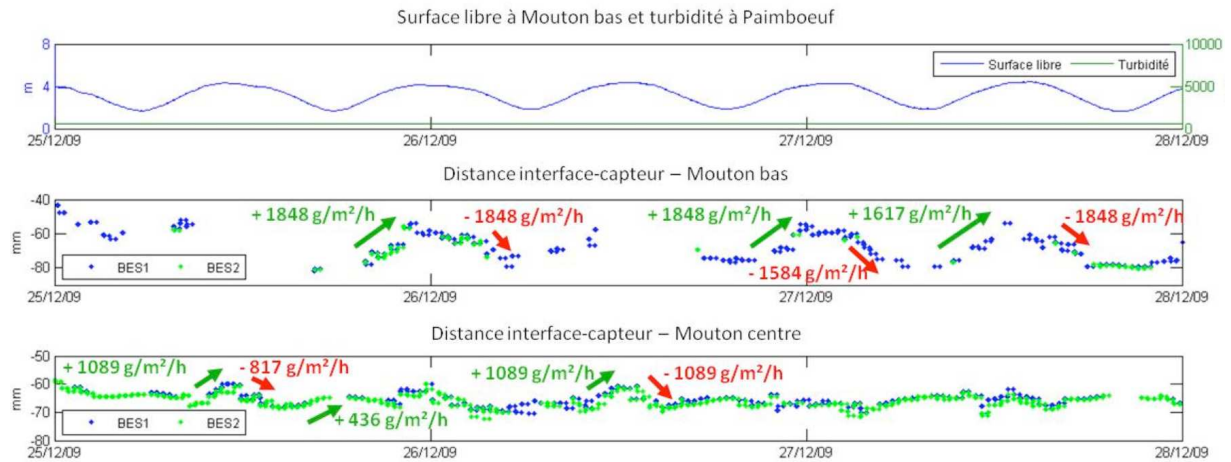


Figure C.16 : Enregistrements altimétriques et du niveau d'eau par les Altus de la vasière des Moutons en conditions de crue et de morte-eau. En bas de vasière, accrétion au flot et érosion au jusant, au centre, accrétion aux étales de pleine et de basse mer. Source : Géotransfert, 2011

Mais, pour les autres altimètres, les séquences tidales d'érosion/dépôt ne correspondent pas à ce modèle. Ainsi, à la fin du mois de décembre 2009, en conditions de crue et morte-eau les dépôts au centre de la vasière des Moutons se font aux deux étales (basse mer et pleine mer) au niveau de l'Altus au centre de la vasière. De plus, cette situation n'est pas systématique car l'enregistrement de septembre 2009, en condition d'étiage et de vive-eau montre moins nettement la phase d'accrétion à marée haute au centre de la vasière, tandis que l'engraissement semble plus prononcé lors du jusant (voir figure C16).

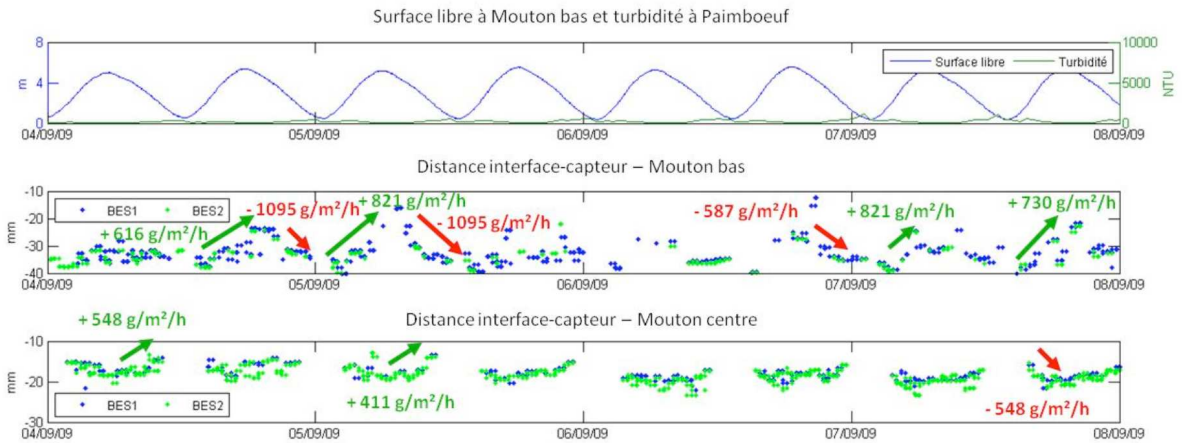


Figure C.17 : Enregistrements altimétriques et du niveau d'eau par les Altus de la vasière des Moutons en conditions d'étiage et de vive-eau. En bas de vasière, accréation au flot, érosion au jusant, au centre, accréation au jusant, érosion au flot. Source : Géotransfert, 2011

De la même façon, sur la vasière de Pipy, les dépôts semblent se produire de façon préférentielle au jusant et à l'étales de marée basse. Cette caractéristique s'observe en condition d'étiage et de vives-eaux sur l'ensemble des altimètres (voir exemples sur les figures suivantes).

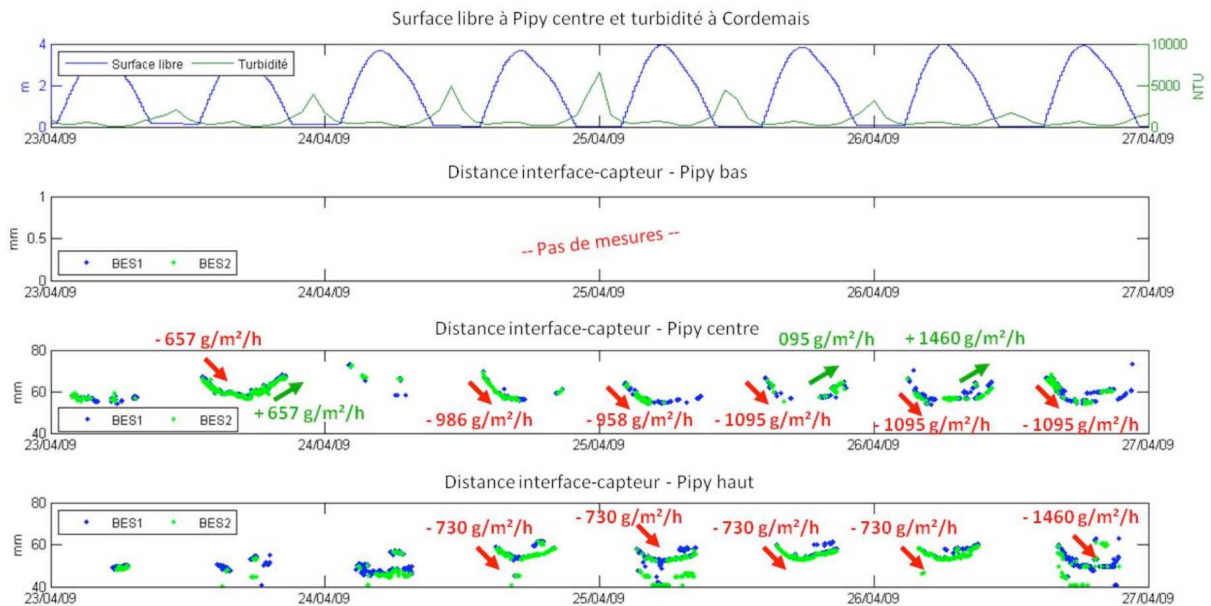


Figure C.18 : Enregistrements altimétriques et du niveau d'eau par les Altus de la vasière de pipy en conditions d'étiage et de vive-eau. Au centre et haut de vasière, accréation au jusant, érosion au flot. Source : Géotransfert, 2011

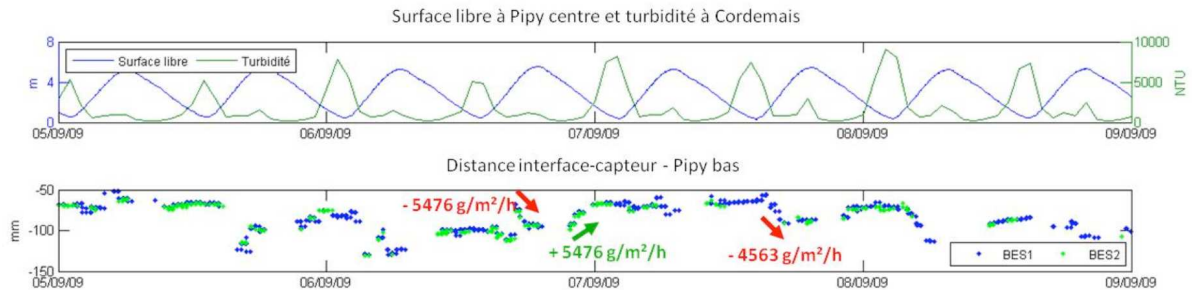


Figure C.19 : Enregistrements altimétriques et du niveau d'eau par l'Altus du bas de la vase de Pipy en conditions d'étiage et de vive-eau. Accrétion au jusant ou étale de basse mer. Source : Géotransfert, 2011

Effet de l'agitation

L'effet des vagues sur les vasières a été étudié par Geotransfert à partir des données collectées par les systèmes Altus.

Les résultats montrent que le plan d'eau au-dessus des vasières est la plupart du temps très calme. La hauteur des vagues est alors inférieure à 10 cm, ce qui peut être considéré comme représentatif d'un plan d'eau quasiment lisse. Les périodes des vagues sont également très petites.

En revanche en période de tempête, des vagues de plusieurs dizaines de centimètres de hauteur sont observées sur les deux vasières. Mais, pour un même événement, les vasières montrent des climats des vagues distincts. Ainsi les vagues sur la vase de Moutons ($20 \text{ cm} < H_s < 80 \text{ cm}$) sont généralement deux fois plus hautes que celles au niveau de la vase de Pipy ($20 \text{ cm} < H_s < 40 \text{ cm}$).

Ces différences sont liées à la position des vasières par rapport à l'embouchure de la Loire. La vase de Moutons, lors des marées hautes, est plus exposée que celle de Pipy à l'incidence des houles du large et aux clapots. Ainsi, plus l'on s'éloigne de l'embouchure, moins les estrans subissent l'influence des vagues du large, car ces dernières sont soumises à d'intenses phénomènes de réfraction et de réflexion dans l'estuaire. La propagation des vagues en sens inverse de l'écoulement naturel du fleuve et sur des fonds vaseux tend également à amortir ces vagues.

L'étude des caractéristiques des vagues sur de longues périodes ne montre pas de relation entre les grands mouvements sédimentaires visibles sur chacune des vasières et les épisodes de forte agitation. Sur les enregistrements altimétriques ponctuels, la dynamique estuarienne prédomine par rapport à l'action érosive des vagues, comme le montre l'exemple au centre de la vase de Moutons.

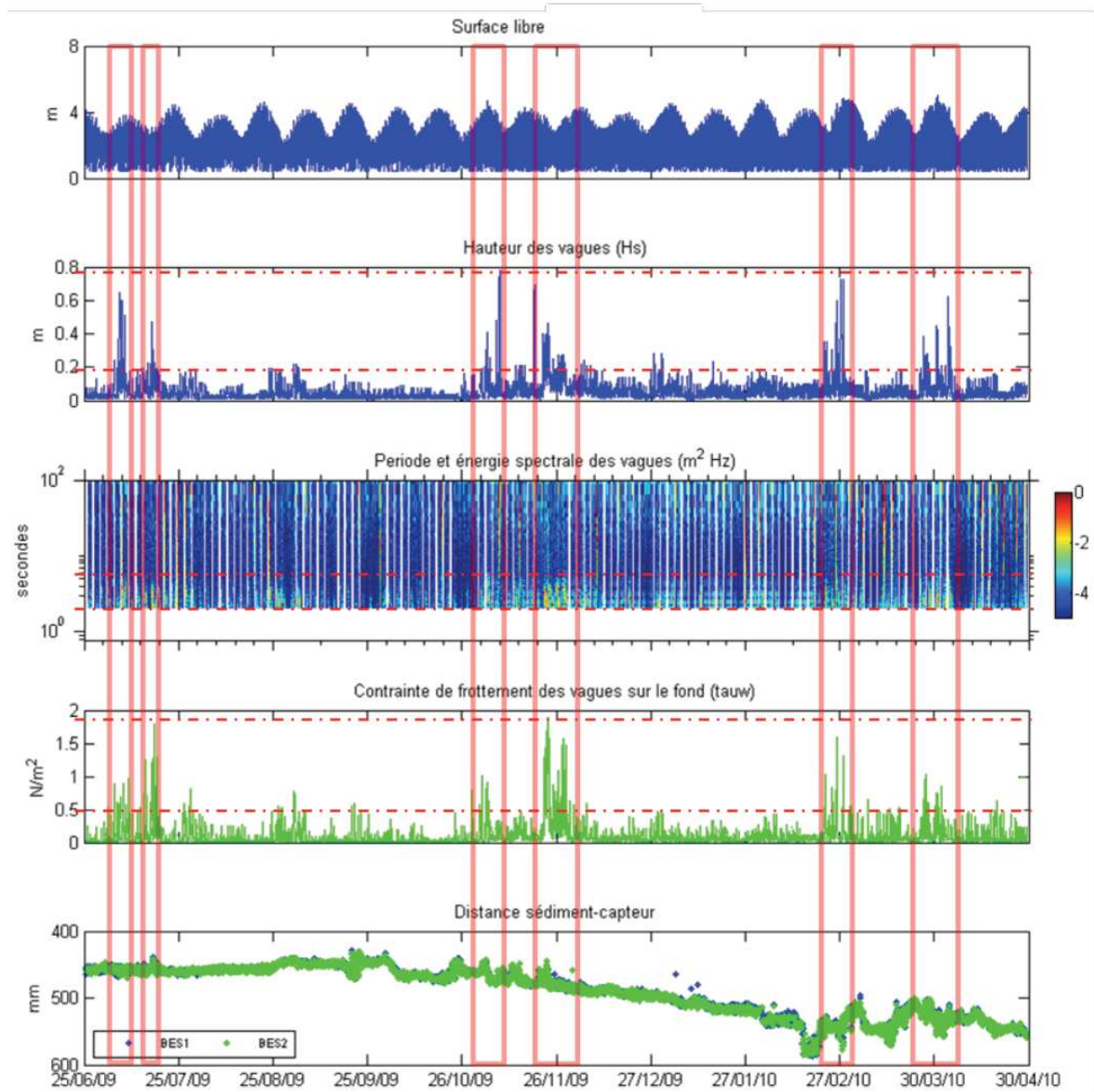


Figure C.20 : Enregistrement en continu des caractéristiques des vagues (H_s , T_r et τ_w) et de la distance entre l'interface sédimentaire et le capteur altimétrique de l'Altus, sur le centre de la vasière des Moutons, entre le 25/06/09 et le 30/04/09 - Identification des périodes de tempête (cadre rouge). Source : Géotransfert, 2011

A plus court terme, deux tempêtes ont été étudiées à la fin du mois de novembre 2009 et la tempête Xynthia au début du mois de mars 2010. Seules les données altimétriques au centre de la vasière des Moutons sont exploitables. Les autres mesures altimétriques étant trop rares ou absentes durant les épisodes de tempête.

- Tempête de novembre 2009

A la fin du mois de novembre 2009, la tendance évolutive au centre de la vasière des Moutons est à une érosion régulière. A l'échelle du cycle de marée semi-diurne, les phases de dépôts peuvent intervenir aux étales de pleine mer ou au jusant sur ce secteur. L'enregistrement au début de l'épisode de tempête le 22/11 montre bien une accrétion à

l'étale de pleine mer. Le 23 novembre en début de journée, les vagues atteignent 40cm, mais les contraintes sur le fond ne dépassent pas 2N/m^2 . Cette situation n'empêche pas une accrétion de quelques centimètres lors du jusant. En fin de journée, la contrainte de frottement sur le fond est maximale à l'étale de basse mer. Cette période semble plutôt correspondre à une phase érosive de quelques centimètres. Par la suite, l'évolution semi-diurne est quasi-inexistante, s'expliquant peut-être par l'absence de vase molle sur le point d'étude, après la tempête.

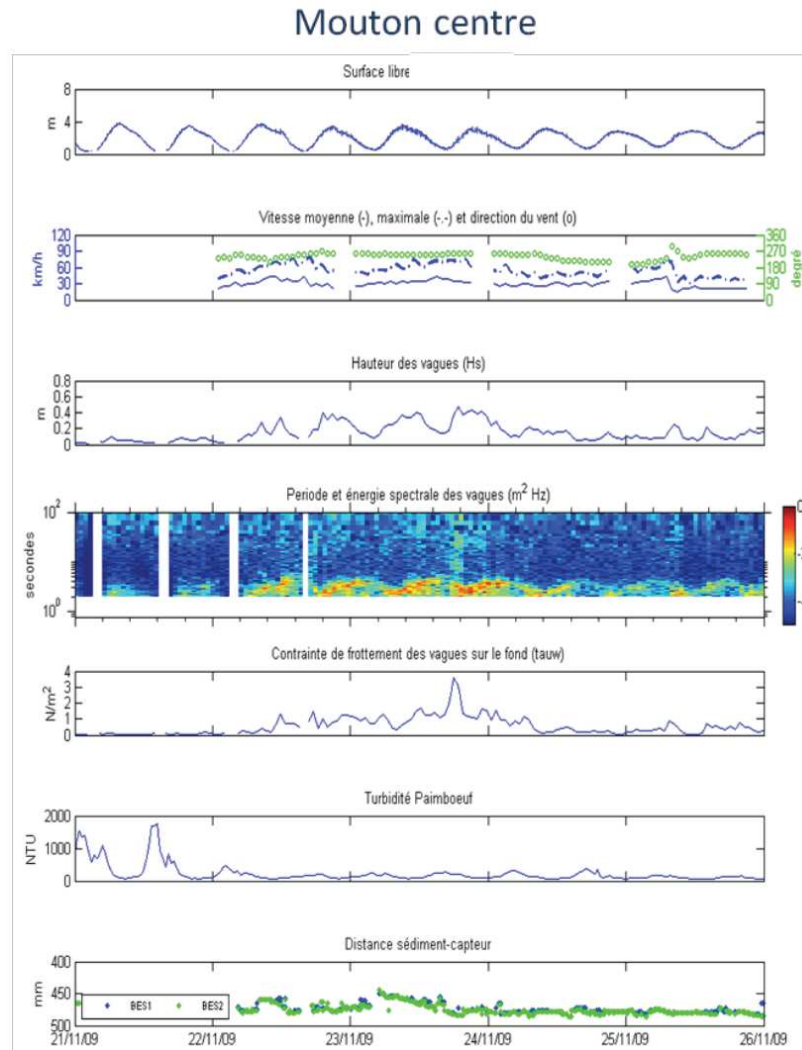


Figure C.21 : Enregistrement en continu de la surface libre, des caractéristiques des vents, des caractéristiques des vagues, de la turbidité et de la distance entre l'interface sédimentaire et le capteur altimétrique de l'Altus, sur le centre de la vasière de Mouton, entre le 21/11/09 et le 26/11/09. Source : Géotransfert, 2011

- Xynthia

A la fin du mois de février, avant la tempête Xynthia, le centre de la vasière des Moutons a subi un épisode d'érosion-accrétion relativement marqué et rapide. En revanche, au début de la tempête, le 26 février, l'évolution semi-diurne de l'altitude est très faible. Un premier épisode d'agitation intervient à marée haute, caractérisé par des vagues de 60cm. Les contraintes au fond sont fortes ($> 1\text{N/m}^2$) mais restent inférieures à 2N/m^2 et n'ont pas d'effet notable sur l'altitude qui reste stable. Le deuxième épisode d'agitation a lieu le 28 février à marée haute. Les vagues dépassent 70cm sur le site, mais le calcul des contraintes sur le fond fournit un résultat inférieur à 2N/m^2 du fait de l'importance de la tranche d'eau. En revanche,

les mesures altimétriques montrent une nette érosion de 2 à 3 cm. Le lendemain, l'accrétion a été forte à la basse mer et le signal altimétrique montre le retour d'une évolution semi-diurne avec accrétion au jusant, en raison probable de la présence d'une couche de vase molle sur la vase après la tempête. De plus, même si l'Altus mesure une évolution altimétrique ponctuelle plutôt faible après la tempête, les observations de terrain ont indiqué des changements morphologiques non négligeables à plus grande échelle spatiale.

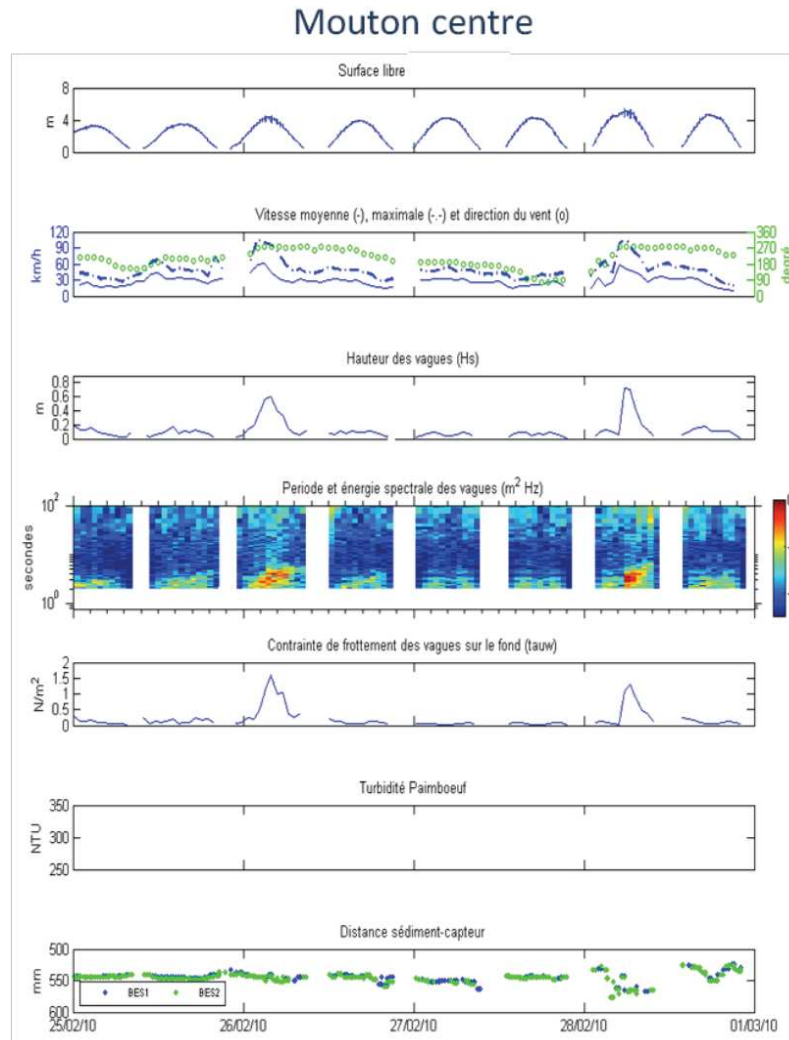


Figure C.22 : Enregistrement en continu de la surface libre, des caractéristiques des vents, des caractéristiques des vagues, de la turbidité et de la distance entre l'interface sédimentaire et le capteur altimétrique de l'Altus, sur le centre de la vase de Mouton, entre le 25/02/10 et le 01/03/10. Source : Géotransfert, 2011

Conclusion

Le projet d'étude des vasières de la rive nord de la Loire mené par le GIP Loire Estuaire a permis d'observer l'évolution du système à des échelles spatiales comprises entre l'année et la minute.

Le premier constat concerne la différence d'évolution entre le haut et le bas des vasières. Le haut est relativement stable et évolue lentement, tandis que le bas, plus souvent submergé et proche du chenal de navigation, est marqué par des modifications importantes et rapides.

A l'échelle annuelle, les évolutions en 2009-2010 peuvent atteindre 20cm et sont liées au régime fluvial et au bouchon vaseux.

Les processus tidaux sont également observés grâce aux mesures collectées par les Altus sur les vasières des Moutons et de Pipy. Ainsi, les cycles lunaires apparaissent nettement sur les enregistrements en bas de vasière après l'été 2009. Les évolutions peuvent atteindre 10cm. Les phases de déchet et de mortes-eaux favorisant la sédimentation, au contraire du revif et des vives-eaux qui sont responsables de périodes d'érosion.

A l'échelle de la journée, les cycles semi-diurnes ont également été observés, impliquant des évolutions de quelques millimètres à quelques centimètres. Les moments de sédimentation peuvent varier en fonction des conditions et de la localisation de l'Altus. Des déphasages entre le moment des dépôts et les étales de marée sont également observés.

L'effet de l'agitation et des tempêtes a été étudié. Les résultats ne sont pas très significatifs car une partie des altimètres n'ont pas bien fonctionné pour une question de réglage de seuil. Ils montrent aussi l'importance de coupler les mesures très ponctuelles des altimètres à des observations sur une plus grande échelle spatiale de l'ensemble de la vasière.

Enfin, il faut noter que cette étude établit des relations entre la sédimentation des vasières et des processus hydro-sédimentaires naturels (agitation, débit fluvial, marée), mais elle ne prend pas en compte des effets anthropiques comme les actions de dragage du chenal ou les vagues provoquées par le passage des navires.

C.I.4. Marais et prairies humides de l'estuaire

C.I.4.1 Généralités

Au-delà des vasières, soumises directement aux balancements des marées et aux apports du chenal de la Loire, se trouve le domaine des shores, des prairies humides et des marais. La ligne de rive, positionnée à 2,70m IGN69 ou 5,86m CM (Cote Marine), marque cette transition importante dans le paysage et les processus de sédimentation.

La plaine alluviale de l'estuaire de la Loire est un vaste espace de plus de 16 000 ha. A l'aval de l'estuaire et plus particulièrement dans la zone intermédiaire, entre Donges et Le Pellerin, les surfaces latérales sont très larges. Elles se présentent sous forme de marais contrastés et composites. En effet, la pente principale est orientée vers les limites continentales des berges. De plus, les marais ont une organisation en deux zones distinctes, héritées des grands aménagements de l'estuaire. Sur la bordure continentale, ils sont constitués d'une zone de marais régulés et aménagés par l'homme, tandis que vers le chenal, il s'agit d'un espace « ouvert » de plaine largement inondable.



Figure C.23 : Schéma des marais situés sur les berges de l'estuaire de la Loire. Source : GIP Loire Estuaire, 2010



Figure C.24 : Photographies illustrant une zone de marais « ouverts » (a) et d’anciens marais régulés (b).
Source : GIP Loire Estuaire.

C.I.4.2 Espaces ouverts et roselières

Les espaces « ouverts » ne sont pas protégés par des digues. Ils sont situés dans l’ancien lit mineur de la Loire, comblé par les travaux d’aménagement du chenal de navigation au siècle dernier. Ces zones sont formées d’anciennes îles et de bras de Loire colmatés. Dans les étiers connectés au lit mineur actuel, l’eau monte, descend et inonde quotidiennement les zones les plus basses, sous l’effet de la marée. Ces secteurs représentent près de 5000 ha d’estran.

Au-dessus de la ligne de rive, les milieux sont constitués de shore, de roselières et de prairies humides. L’eau atteint moins fréquemment ces secteurs. La différenciation de ces milieux est surtout déterminée par les espèces végétales qui s’y développent, en fonction de la salinité ou de l’humidité de l’environnement.

Dans l’estuaire de la Loire, les roselières ont été étudiées régulièrement car il s’agit d’espaces particulièrement favorables à la biodiversité et à la présence d’oiseaux. Au sens strict, les roselières sont des groupements végétaux composés principalement du roseau (*Phragmite*). Au sens large, elles sont constituées par l’ensemble des plantes aquatiques qui développent, en été, un appareil aérien au-dessus de l’eau. En hiver, les tiges et les feuilles sèchent, alors qu’en bordure de rives, seuls subsistent les rhizomes enfouis dans la vase. En 2007, le GIP Loire Estuaire a cartographié plus de 2800 ha de roselières dans l’estuaire.

Leur effet sur la sédimentation est loin d’être négligeable car les roseaux contribuent à la protection des rives contre l’érosion, en agissant comme un brise-lame naturel et en amortissant les forts courants de marée ou de crue. De plus, les rhizomes et les feuilles retiennent les fractions les plus fines des MES. Entre 20 et 30 mm de sédiments sont ainsi fixés chaque année, ce qui provoque un exhaussement du sol et donc une baisse de submersion. Cet effet de piège à sédiments permet également de limiter l’envasement de certaines prairies humides exploitées pour l’élevage et situées en arrière de roselières.

Dans son cahier indicateur (L2B2, 2007), le GIP Loire Estuaire a étudié l’évolution des roselières dans le temps entre Donges et le Pellerin. Entre 1952 et 2006, l’évolution a été très

rapide et les secteurs stables sont rares. Les remblaiements de Montoir et de Donges ont provoqué la disparition de grandes surfaces de roselières mais, parallèlement, de vastes espaces ont été colonisés.

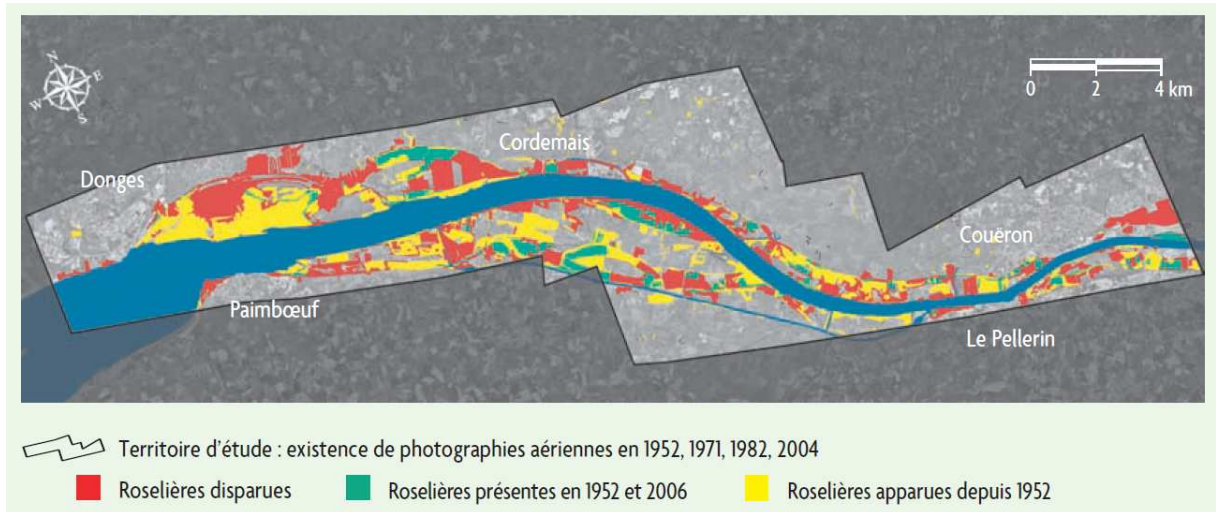


Figure C.25 : Evolutions et mobilité des roselières entre 1952 et 2006. Source : IGN BD Ortho2004 / GIP Loire Estuaire 2007.

C.I.4.3 Marais

Au-delà du bourrelet formé par l'ancienne berge de la Loire, les espaces « régulés » sont des secteurs de marais aménagés dès le XII^{ème} siècle. Ils comportent un ensemble ramifié de voies d'eau (canaux, douves, rigoles) contrôlées par plus d'une centaine d'ouvrages (vannes, écluses). Les manœuvres des ouvrages s'appuient sur une gestion collective assurée par des associations syndicales de propriétaires et de gestionnaires. Les connexions hydrauliques vont au-delà de la vallée alluviale de la Loire, limitée par les coteaux du sillon de Bretagne et de la Voussure de Retz.

Ainsi, de grands travaux d'aménagements hydrauliques ont été réalisés à partir du canal de la Martinière en 1955 pour assurer en été un approvisionnement en eau vers le sud, dans le fond agricole du marais Breton. Ce système d'approvisionnement emprunte la Tenue, une rivière qui sert à évacuer vers la Loire les eaux de pluie collectées dans le lac de Granlieu.

Au nord, la Brière est un vaste marais tourbeux de 170 km² qui est connecté à l'estuaire de la Loire par la rivière du Brivet et 3 canaux construits au XIX^{ème} siècle. Si, à l'état naturel, la Brière était envahie par les eaux de l'estuaire en grandes marées, aujourd'hui, l'utilisation de nombreuses vannes et écluses régule ces échanges et s'efforce de maintenir un niveau optimal conciliant les intérêts de la chasse, de la pêche, de l'élevage, de la coupe des roseaux, du tourisme et de la conservation du patrimoine naturel.

Les marais riverains de la Loire ne sont pas protégés par des digues, mis à part pour la rive sud au niveau des prairies de Paimboeuf, de Corsept et de Saint Brévin qui ont été aménagées à la fin des années 1980. En revanche, les anciennes berges présentent un bourrelet créé par l'accumulation des dépôts sédimentaires lors des débordements. Sur ce bourrelet se développent les prés de Loire qui ne sont inondés que quelques jours par an. Au-delà, dans le marais irrigué, les zones sont plus basses et plus humides. Le fond des marais est encore plus bas. Ils sont humides en permanence car le réseau d'assainissement artificiel draine plus difficilement le milieu.

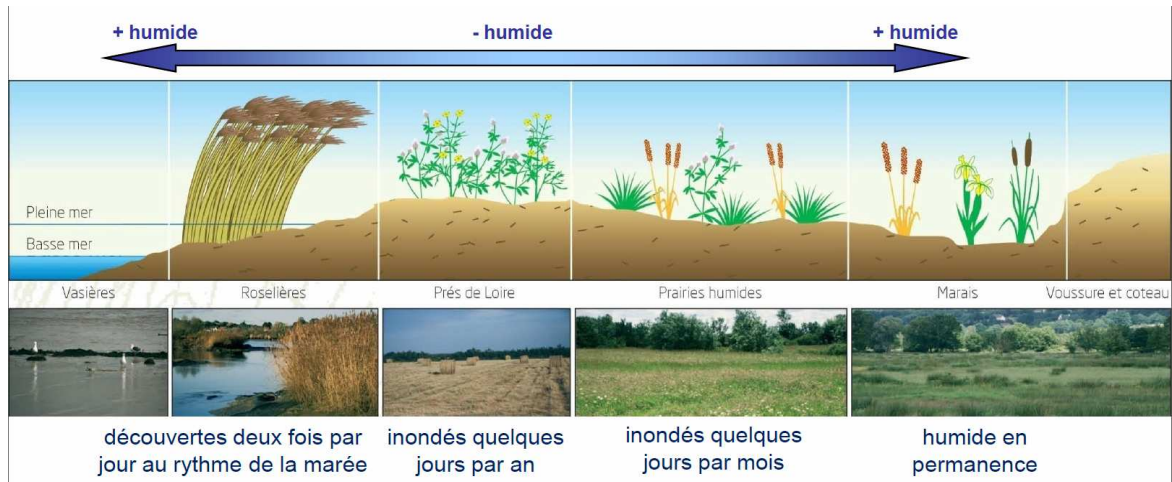


Figure C.26 : Coupe synthétique des environnements de berges rencontrés dans l'estuaire de la Loire.
 Source : GIP Loire estuaire, 2008

La figure suivante montre le fonctionnement des marais et l'effet de leur régulation hydraulique. En hiver et lors des grandes marées, le fond du marais est inondé par les eaux de pluies et le bourrelet de berge est submergé par la marée. A marée basse, les vannes du marais sont alors ouvertes pour provoquer des chasses qui vidangent le marais. En été, l'ouverture des vannes à marée montante permet une irrigation qui favorise la repousse des prairies et l'abreuvement des animaux.

Mais ce fonctionnement traditionnel et séculaire est mis en difficulté par les modifications de l'environnement. En été, les envois de marée sont souvent impossibles car l'eau est devenue trop salée et impropre pour la consommation par le bétail. De plus, l'intensité du bouchon vaseux ne permet plus un entretien naturel des ouvrages par les effets de chasse. L'importance de la sédimentation en tête des étiers et dans les canaux empêche un fonctionnement optimal des réseaux.



Figure C.27 : Fonctionnement des marais régulé hydrauliquement dans l'estuaire. Source : GIP Loire Estuaire, 2011.

C.I.4.4 Submersion des berges et sédimentation dans les marais et prairies

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent portant sur les vasières, la dynamique sédimentaire des estrans est guidée par le phénomène tidal semi-diurne. A ce

rythme immuable du balancement des marées sur l'estran s'ajoutent d'autres phénomènes qui dirigent la sédimentation, comme l'agitation, le débit fluvial de la Loire, la présence du bouchon vaseux ou d'une importante quantité de crème de vase. Mais sur le shore et dans les marais, la dynamique sédimentaire liée aux apports de la Loire est différente car les submersions ne sont pas semi-diurnes. Elles correspondent plutôt aux cycles de marées lunaires et saisonnières ou aux événements exceptionnels.

Sur le shore et les prairies humides de la Loire, les processus et la dynamique sédimentaire n'ont pas fait l'objet de campagnes de mesures et d'études récentes, comme c'est le cas sur les vasières. Il est donc difficile de décrire précisément les processus et les facteurs d'évolution. En revanche, le travail du GIP Loire Estuaire permet d'aborder la complexité des phénomènes de submersion de ce domaine.

(a) Submersion des berges

- Submersibilité des rives

La notion de submersibilité correspond à la possibilité d'être submergées par les eaux du fleuve. Cette notion est théorique et dépend du niveau défini pour la ligne de rive, de la hauteur de l'eau et de la topographie des berges. Sur les 16 000 ha de la plaine alluviale, le GIP Loire estime que 9000 ha de marais sont submersibles, car situés sous le niveau des pleines mers de grande marée, c'est-à-dire 5,86 m (Cote Marine) ou 2,70 IGN.

Les prévisions et les annuaires de marée permettent d'anticiper sur les périodes propices aux submersions. Mais la marée n'est pas le seul facteur qui régit la hauteur d'eau dans l'estuaire. La pression atmosphérique et le vent peuvent provoquer des surcotes importantes, tandis que le débit fluvial a un effet essentiellement limité à la partie amont de l'estuaire. Le tableau suivant montre la différence entre les prévisions de submersion uniquement liées à la marée et le nombre de submersions réellement observées entre 2000 et 2003. Selon les années et les conditions météorologiques, le nombre de submersions peut varier notablement. De plus, le débordement sera d'autant plus important que le coefficient de marée est élevé, le vent d'ouest fort et la pression atmosphérique basse.

		Années hydrologiques					
		2000-01		2001-02		2002-03	
		nombre théorique	distribution effective	nombre théorique	distribution effective	nombre théorique	distribution effective
débordement	- 1,00m		2		1		
	- 0,75m	1	34	3	19	2	25
	- 0,50m	22	93	24	50	30	72
	- 0,25m	87	86	52	80	70	91
	- 0,00m	108	101	138	116	127	101
	total	218	316	217	266	229	289

Tableau C.6 : Nombre de submersions liées à la marée prévue et effectif réel des débordements de la Loire par année hydrologique. Source : GIP LE 2005 / GPMNSN.

La figure suivante montre la distribution de ces débordements sur 24 années d'observation. Plusieurs catégories de submersion peuvent être différenciées. Les petits débordements, inférieurs à 50cm, sont très fréquents et s'observent en moyenne 1 jour sur 2. Les débordements moyens restent inférieurs à 1m, ils ont lieu 1 jour sur 5. Les fortes submersions, supérieures à 1m, restent exceptionnelles et observées 1 fois par an.

Nombre et distribution effective des débordements

Moy. /an

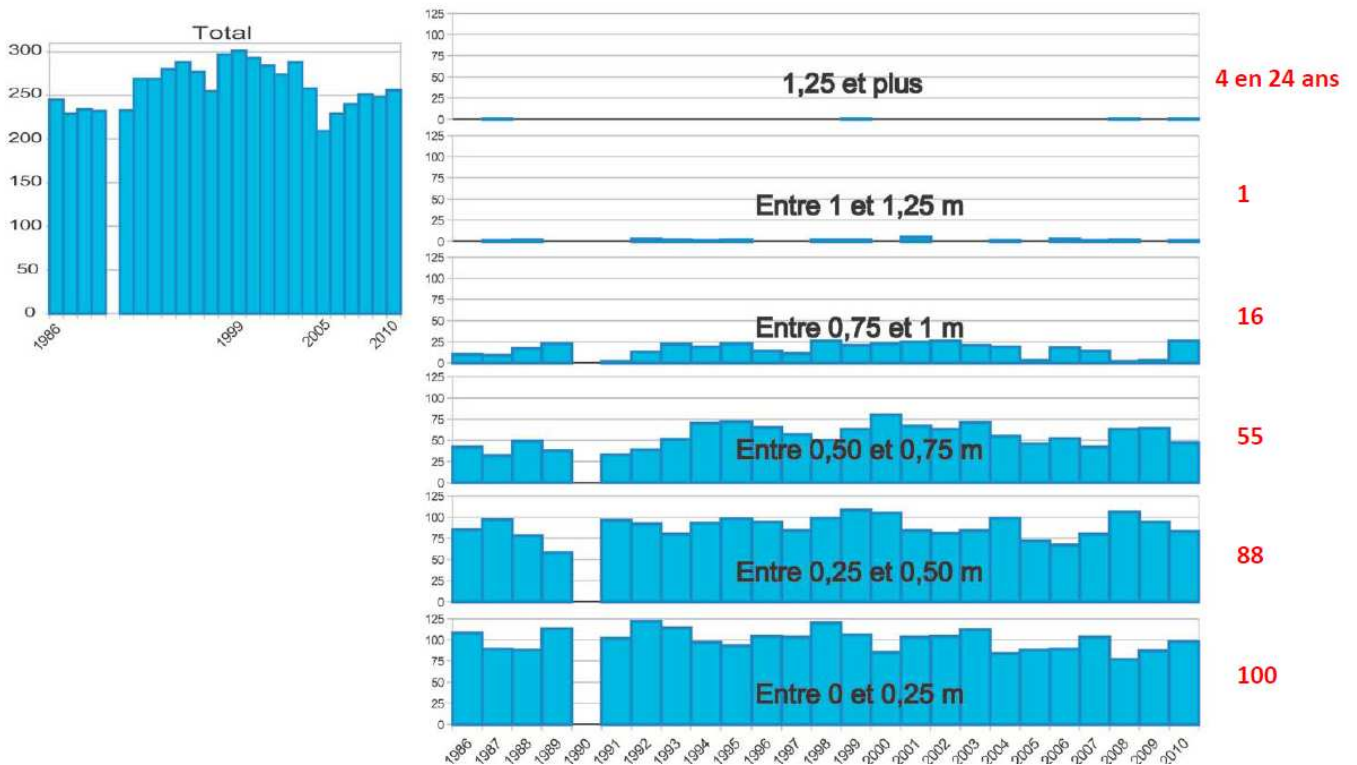


Figure C.28 : Nombre et distribution effective des débordements dans l'estuaire de la Loire sur la période 1986-2010. Source : GIP Loire Estuaire, 2011.

Comparés à la topographie de la plaine alluviale, ces niveaux de débordements moyens permettent de définir des surfaces de submersibilité des berges. La figure suivante présente une carte des ces zones submersibles dans la section intermédiaire de l'estuaire. Cette section est la plus vulnérable au risque de débordements. Le diagramme joint montre que pour de petites submersions très fréquentes (inférieures à 50cm), près de 93% du secteur étudié pourrait être inondé, soit plus de 8000 ha.

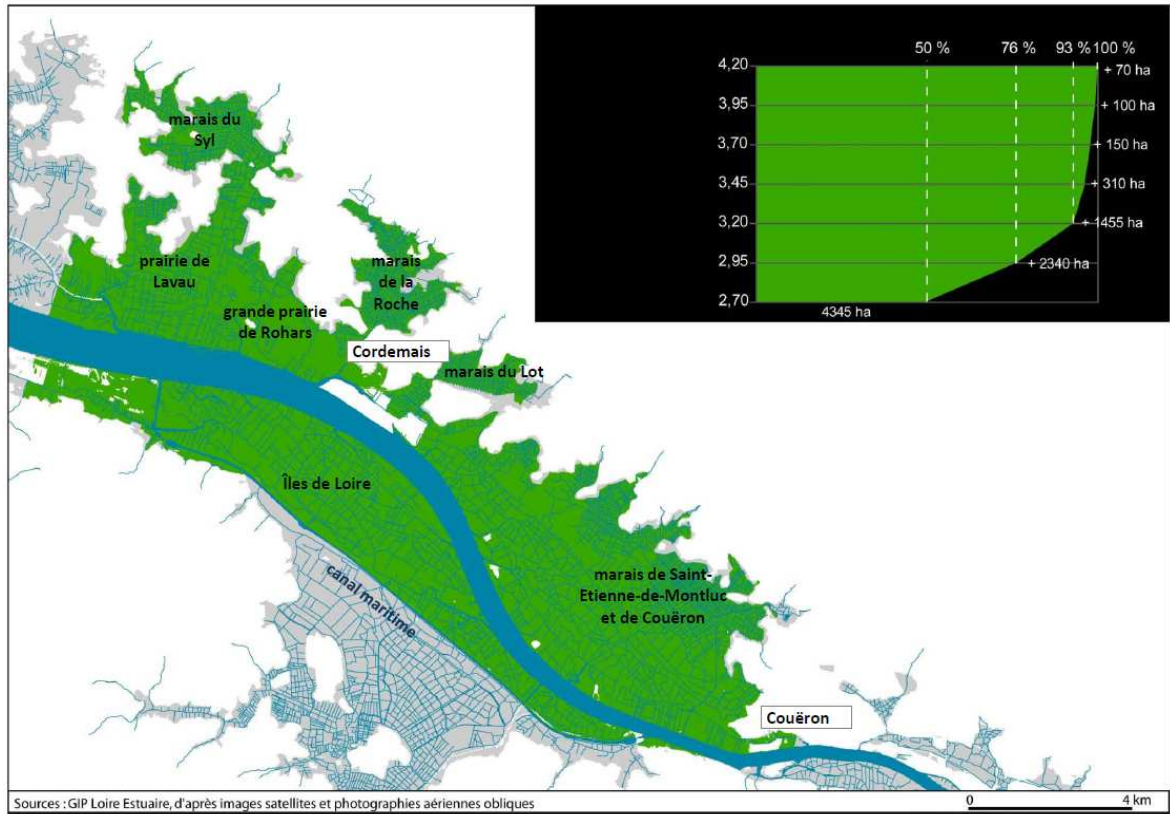


Figure C.29 : Surfaces submersibles dans la section intermédiaire de l'estuaire de la Loire. Source : GIP Loire Estuaire, 2011

- Observation de submersions des berges dans l'estuaire

Mais dans la réalité, l'expansion des eaux de débordement est conditionnée par d'autres facteurs que le niveau d'eau et la topographie générale. Ainsi, la microtopographie intervient, obligeant l'inondation à certains contournements. L'humidité du sol peut favoriser l'extension latérale des submersions en cas de sol saturé en eau, ou au contraire la ralentir si le sol est sec. La végétation joue également un rôle de frein à l'inondation, suivant qu'elle est dense ou clairsemée, haute ou basse. La figure suivante montre les modalités d'expansion des eaux sur les berges de l'estuaire de la Loire.

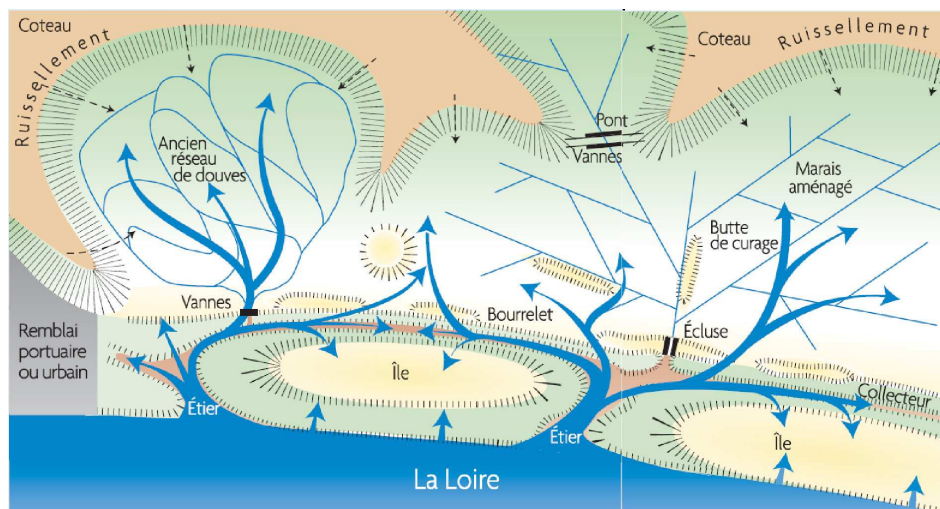


Figure C.30 : Modalités d'expansion des eaux lors d'une submersion sur les berges. Source : GIP LE, 2005.

Les figures suivantes présentent les observations issues d'images satellites ou aériennes réalisés par le GIP Loire Estuaire lors d'épisodes de submersion. Elles montrent qu'il n'y a pas de relation linéaire entre le niveau d'eau de la Loire et la superficie inondée.

- (a) Le 16/09/1996, pour une submersion de 25cm, pouvant recouvrir potentiellement 76% de la plaine alluviale, seuls 8% étaient en eau. Les zones inondées sont situées au nord, dans les secteurs récemment colmatés au niveau de Pierre Rouge, de Lavau et de la grande prairie de Rohars, et au sud au niveau de l'ancien bras du Migron, de l'île de la Maréchale et de l'île Nouvelle.
- (b) Le 16 avril 2003, une submersion de plus de 50cm recouvre 18% de la surface inondable, qui, en théorie, pourrait représenter plus de 93% de la plaine alluviale. En plus des secteurs précédemment cités, on observe l'inondation au sud de la partie amont de l'ancien bras du Migron et sur la rive nord, entre les îles Thérèse et Demangeat, devant les marais de Saint-Etienne-de-Montluc et de Couëron.
- (c) Quelques jours plus tard, le 18 avril 2003, l'inondation est particulièrement forte et atteint presque 1m. La submersibilité théorique atteint presque 100%, mais sur l'image satellite, 44% de la plaine alluviale est inondée. On constate que la submersion touche l'intégralité de l'ancien lit mineur de la Loire, avant les travaux d'aménagement du chenal. Sur la rive Nord, les marais régulés hydrauliquement de Saint-Etienne-de-Montluc et de Couëron commencent à être inondés, tandis que les autres marais anciens ne sont pas touchés. Sur la rive Sud, seules les îles anciennes restent émergées (Belle île, Massereau, îles des Masses et de Bois).
- (d) La carte du 3 mars 2010 correspond à une analyse de la situation 3 jours après la tempête Xynthia. Celle-ci a provoqué une submersion exceptionnelle de plus d'1 mètre dans l'estuaire de la Loire. Dans cette situation, l'ensemble des marais anciens au nord et des îles au sud ont été inondés. Dans le cas de l'inondation de ces marais, il faut noter que la pluviosité et les eaux de ruissellement du bassin versant peuvent également avoir un rôle non négligeable dans l'ennoyage de la zone. 92% de la plaine alluviale est sous l'eau ou très humide. En revanche, la figure montre que sur la berge sud, le canal Maritime joue un rôle de barrière hydraulique très performant. Il a protégé de l'inondation l'ensemble des marais régulés situés au sud du canal et caractérisés par une altitude moyenne inférieure à 2,70m IGN.

Ces observations montrent que pour de faibles débordements, les zones submergées restent limitées aux parties les plus facilement inondables de l'estuaire. Pour des submersions moyennes, comprises entre 50cm et 1m, l'ensemble de l'ancien lit mineur de la Loire est susceptible d'être submergé ou très humide. Enfin, pour les événements exceptionnels comme la tempête Xynthia, c'est l'intégralité de la plaine alluviale, incluant les anciennes berges et les anciens marais régulés hydrauliquement, qui peut être inondée. Pour anticiper et cartographier les zones les plus sensibles aux submersions, les études par télédétection sont des outils précieux. Les images satellites nous montrent bien qu'une cartographie de la submersibilité de l'estuaire basée uniquement sur des données topographiques n'est pas suffisante car elle néglige les freins à l'expansion des inondations. Le complément d'une étude hydro-géomorphologique apparaît intéressante pour décrire les modalités et la dynamique de progression des submersions sur les berges.

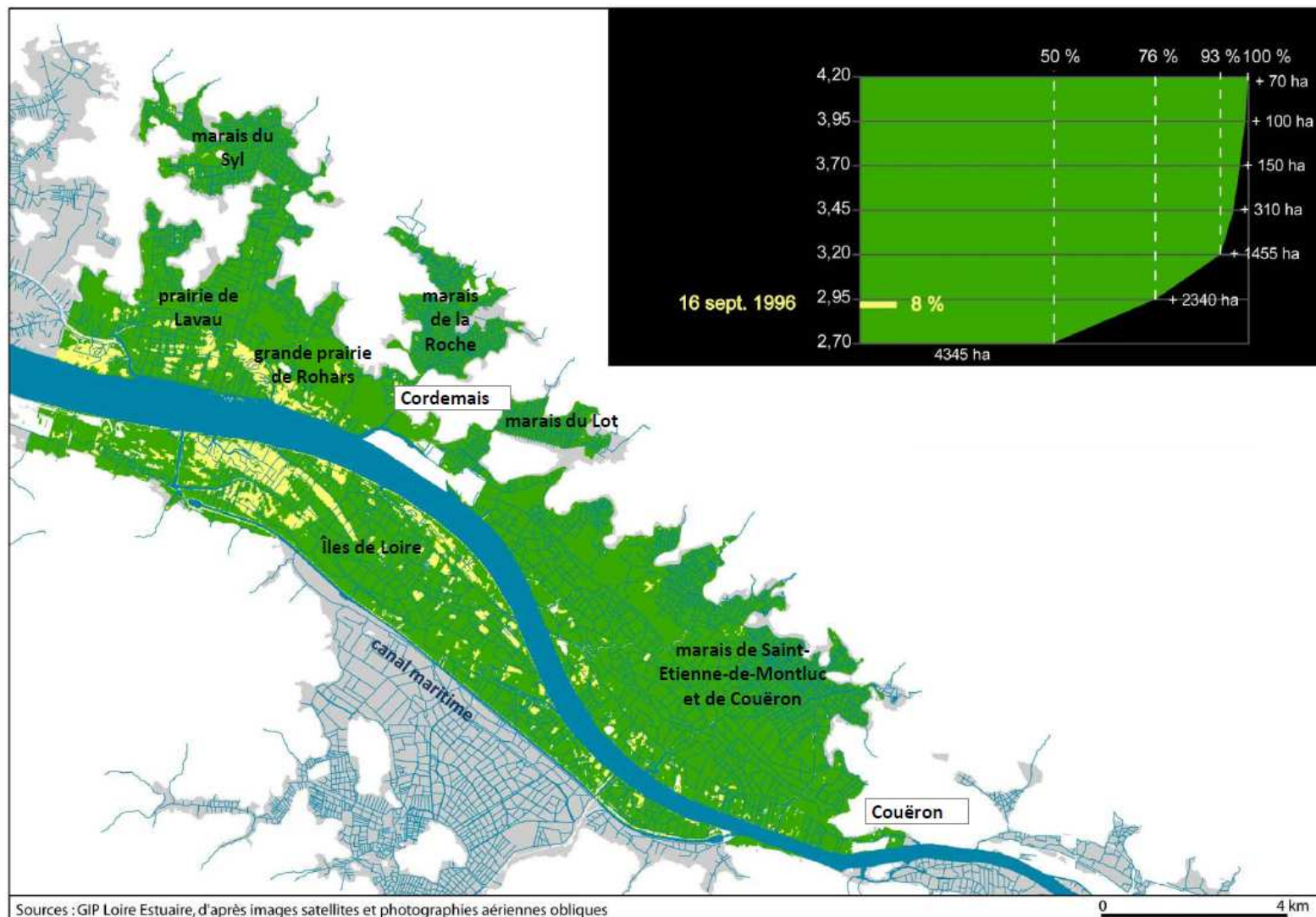


Figure C.31 (a) : Cartographie et diagramme des surfaces submersibles et des surfaces en eau pour le 16 septembre 1996. Source : GIP LE, 2011.

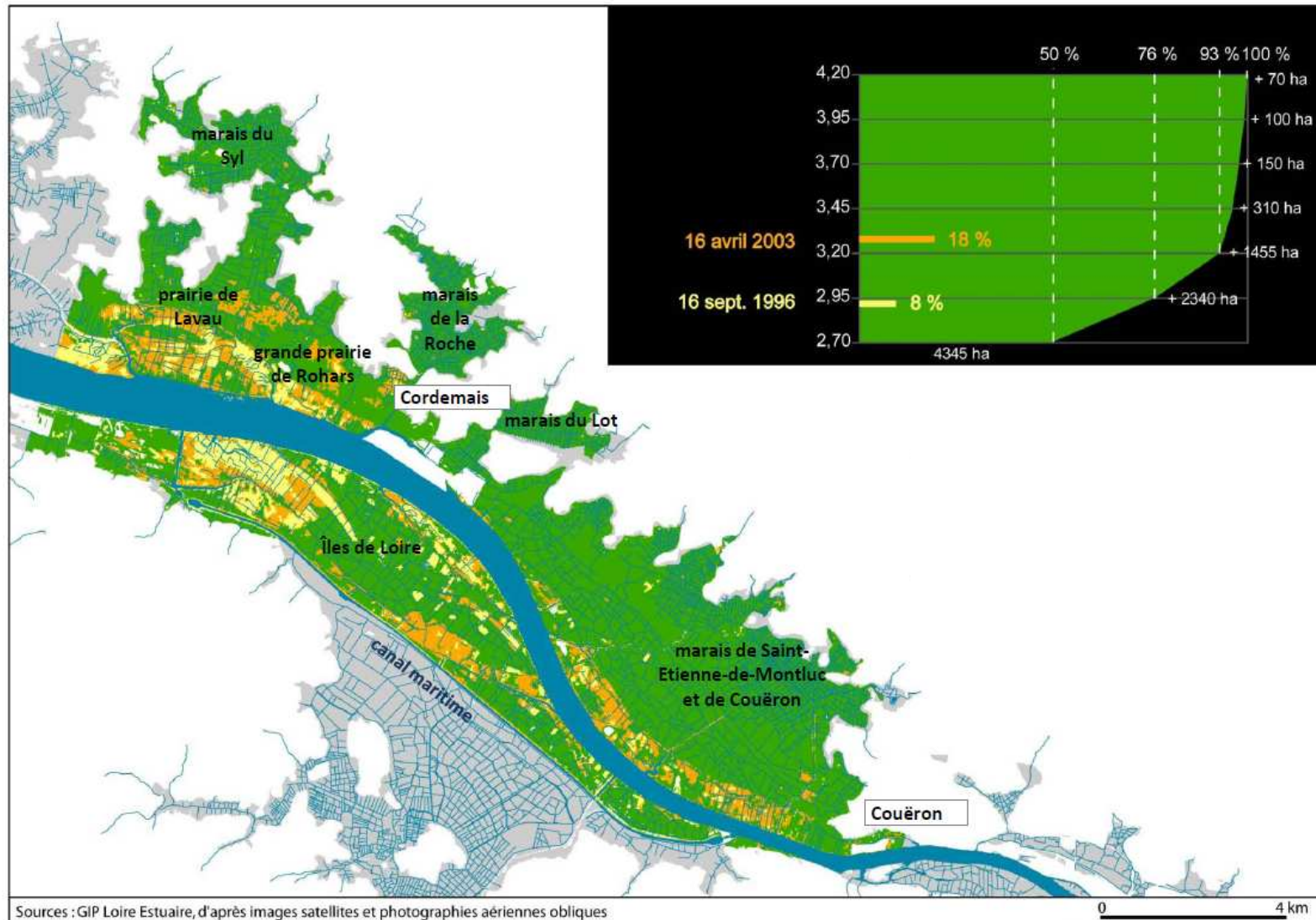


Figure C.32 (b) : Cartographie et diagramme des surfaces submersibles et des surfaces en eau pour le 16 avril 2003. Source : GIP LE, 2011.

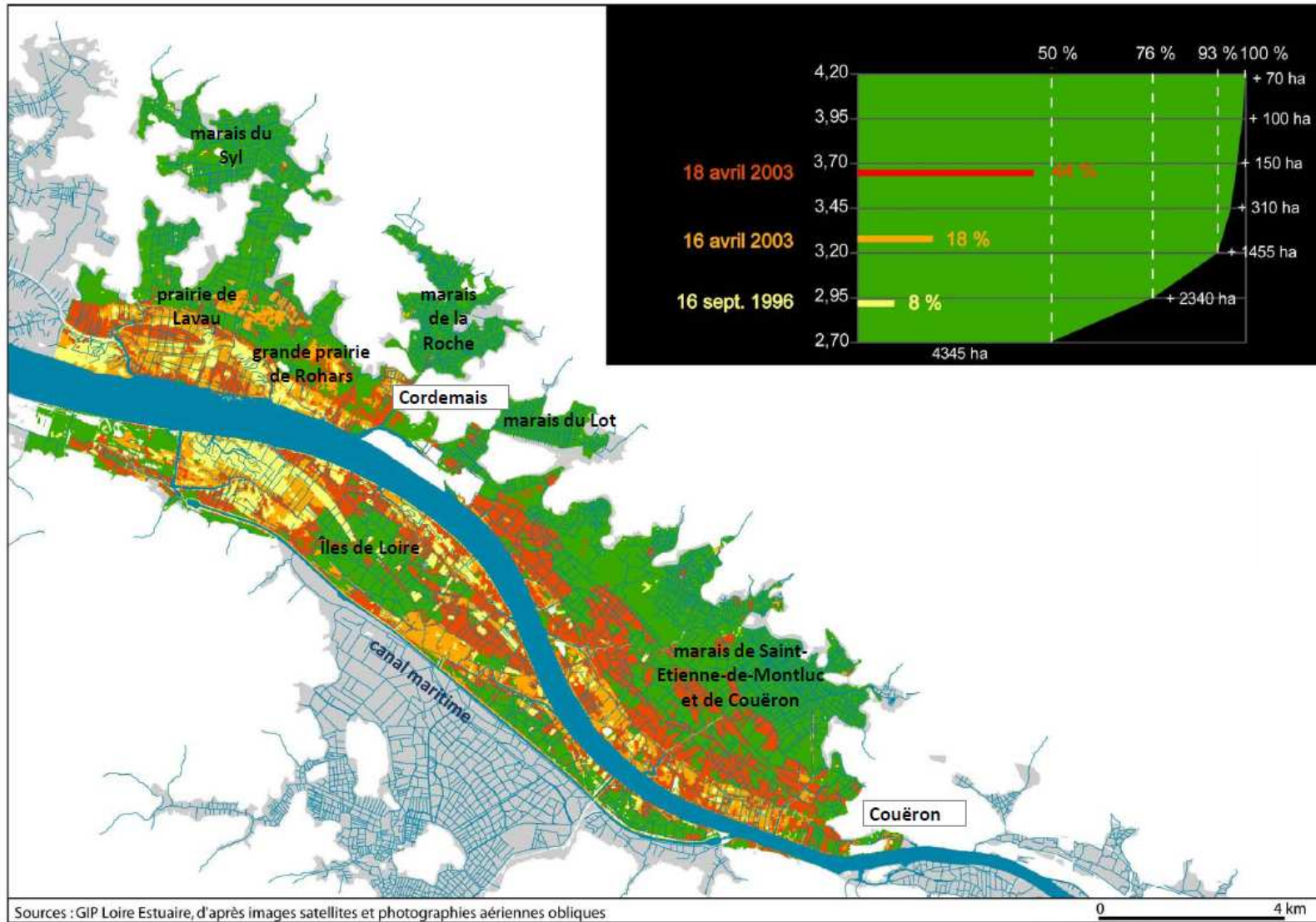


Figure C.33 (c) : Cartographie et diagramme des surfaces submersibles et des surfaces en eau pour le 18 avril 2003. Source : GIP LE, 2011.

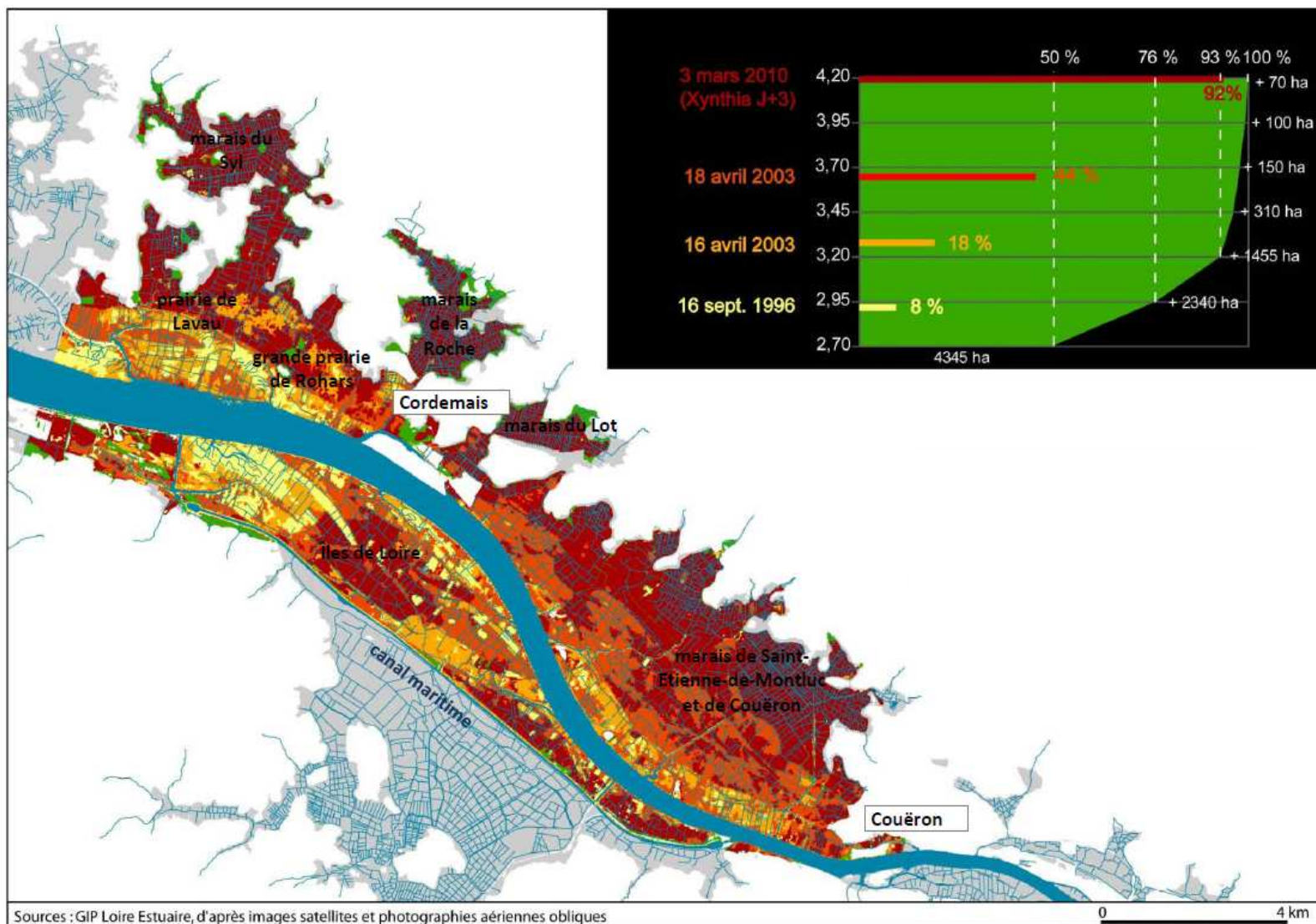


Figure C.34 (d) : Cartographie et diagramme des surfaces submersibles et des surfaces en eau pour 3 mars 2010. Source : GIP LE, 2011.

(b) Sédimentation dans les marais et les prairies humides

Questions sur les processus de sédimentation

Les phases de submersion sont les facteurs principaux de la sédimentation des berges estuariennes. Elles permettent l'apport des sédiments en suspension dans la masse d'eau sur des terrains qui sont le plus souvent exondées. Les modalités de ce transport et du dépôt actuel dans les prairies humides et les roselières restent mal connues sur les berges de la Loire. Des hypothèses et des questionnements peuvent être posés pour faire avancer la compréhension de ces problématiques.

Les petites submersions sont très fréquentes au cours de l'année. Sur les images satellites analysées par le GIP LE, elles inondent essentiellement des domaines très humides de roselières et de shorre. Ces secteurs subissent probablement une sédimentation active et relativement rapide. Mais des questions se posent sur la quantité de matière qui arrive sur le shorre ou dans la roselière, sur le taux de déposition en fonction de la végétation et sur la relation entre l'engraissement du milieu et la présence d'un bouchon vaseux plus ou moins turbide.

Pour les submersions moyennes (inférieures à 1m), les zones submergées peuvent être beaucoup plus vastes et constituées de prairies exploitées pour l'élevage. Des secteurs relativement éloignés du chenal de la Loire sont alors inondés et la question de leur envasement potentiel se pose. Des dépôts importants ont-ils été observés sur ces prairies éloignées des bords de Loire ? En cas de dépôt, les sédiments proviennent-ils directement des MES de la Loire, ou existe-t-il des phénomènes locaux de remise en suspension dans les étiers et les canaux ? Les secteurs de rives les plus inondables et les roselières jouent-ils un rôle de tampon sédimentaire par rapport aux secteurs plus éloignés ?

D'une manière générale, la dynamique des épisodes de submersion, liés à plusieurs débordements successifs et à un ressuyage plus ou moins progressif doit également être pris en compte pour comprendre les périodes de dépôt et de stabilisation des sédiments frais sur les berges de la Loire.

Enfin, il faut aussi considérer que les submersions estuariennes ne sont pas les seuls facteurs d'évolution des berges. Dans les marais anciens, ces apports sédimentaires potentiels n'interviennent qu'une à deux fois par an, alors que le ruissellement et les apports des rivières du bassin versant arrivent directement dans le marais. Dans les zones d'élevage de bétail, le piétinement des animaux peut également avoir un effet sur le tassement et la compaction des sédiments formant le sol. Dans les roselières, la création de matière organique végétale intervient également dans les taux d'accumulation.

Problèmes liés à la sédimentation dans les prairies et les marais de la Loire

A l'échelle des cycles climatiques, l'envasement et le comblement d'un estuaire en période de haut niveau marin est une évolution tout à fait naturelle. Dans la Loire, ce comblement a été considérablement accéléré par les travaux d'endiguement et de remblaiement des bras secondaires de l'estuaire, dont la répartition dans le temps est résumée dans les tableaux C1, C2 et C3 (pp. 33 à 35). Ainsi, la surface des berges continentalisées a progressé très fortement en quelques années. Parallèlement, le niveau de turbidité dans le chenal aménagé a globalement augmenté en relation avec son approfondissement, et la migration vers l'amont du bouchon vaseux a aussi pu accroître le risque de sédimentation latérale dans des zones moins impactés auparavant. Cette situation, récente à l'échelle du

fonctionnement de l'estuaire pourrait favoriser les épisodes de forte sédimentation lors des débordements, modifiant les impacts sur les pratiques agricoles de la région.

Dans les marais anciens, la régulation hydraulique est rendue beaucoup plus difficile à cause de la connexion moins directe des anciennes berges avec le lit de la Loire. Le colmatage des étiers, lié directement aux fortes turbidités rencontrées, peut être source de problèmes pour la gestion de ces marais.

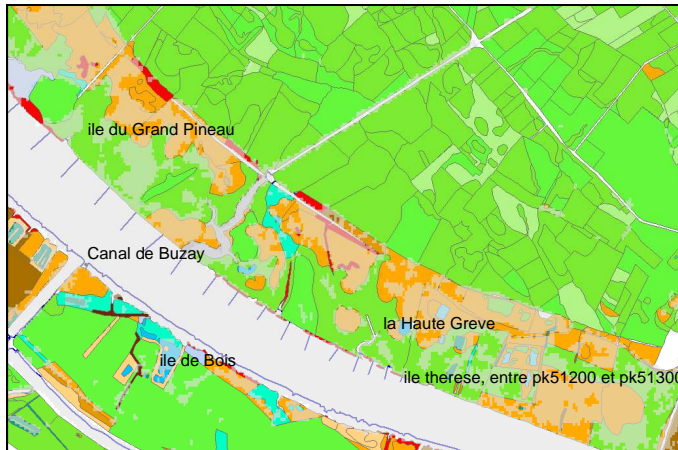
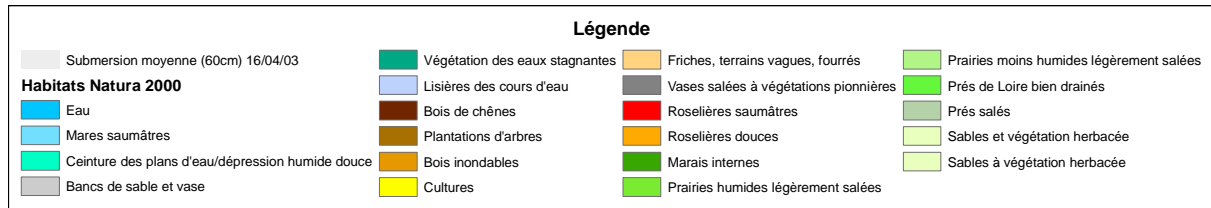
Dans les secteurs de prairies « ouvertes », les éleveurs rencontrent des difficultés dues à l'envasement des pâturages. Si les épaisseurs de vases sont trop importantes, elles empêchent la repousse de l'herbe et constituent un préjudice pour l'alimentation des animaux. Ces problèmes, qui ont été particulièrement importants en 2010, ont été rapportés par les agriculteurs au GPMNSN lors d'une réunion d'échanges tenue le 21/01/2011.

Les constats réalisés par la Chambre d'Agriculture indiquent la présence de dépôts conséquents sur les prairies lors des vives-eaux d'équinoxe en septembre-octobre 2010. L'expérience des agriculteurs montre que ce type de dépôt peut apparaître aussi en novembre-décembre. Les lieux concernés sont l'île Chevalier, la plaine de Rohars, l'île Thérèse et l'île Pipy. Les épaisseurs constatées atteignent 15 cm sur l'île Thérèse et 4 cm sur l'île Pipy.

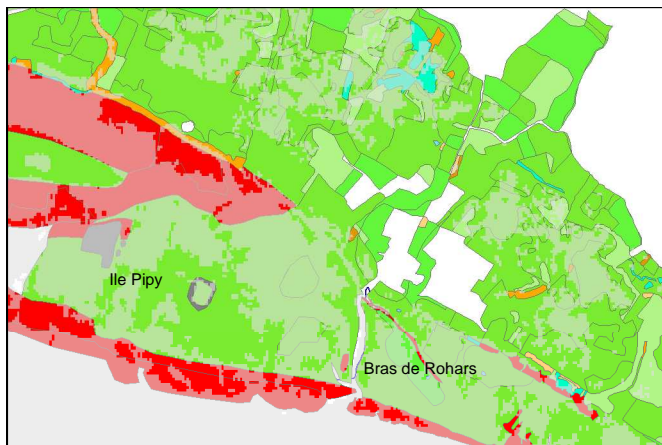
Ces observations semblent indiquer que les petites submersions ne posent pas de problème d'envasement dans les prairies. En revanche, lorsque les submersions approchent 1m, comme sur l'exemple du 18 avril 2003 étudié par le GIP LE, un certain nombre de prairies exploitées sont submergées. Les secteurs cités sont positionnés dans des zones qui ont été gagnées récemment (au cours du siècle dernier) sur l'estuaire, par le jeu des aménagements du chenal et du colmatage des vasières. Il s'agit donc de surfaces agricoles relativement récentes. La vulnérabilité de ces parcelles est d'autant plus importante qu'elles ne sont pas protégées du débordement par des digues artificielles ou par la construction, au fil du temps, d'un bourrelet sédimentaire semblable à celui qui protège les anciens marais riverains.

Le constat formulé par la chambre d'agriculture indique un très fort taux d'engraissement sur les prairies situées au niveau de l'île Thérèse. La carte des habitats Natura 2000 (voir figure suivante) montre que ces prairies se situent en bord d'estuaire et sont donc impactées directement par les eaux et la charge turbide du bouchon vaseux. Au niveau de l'île Pipy, les épaisseurs sédimentaires observées sont plus faibles. Nous remarquons que les prairies sont situées à l'arrière d'une roselière de plus de 250m de large. La relation entre la présence de roselières et/ou d'un bourrelet sédimentaire de rive et les taux de sédimentation sont des éléments qui restent à vérifier. Un autre secteur potentiellement sensible a été repéré en couplant la carte d'occupation des sols avec l'épisode de submersion moyen du 16 avril 2003. Il se situe au niveau de l'île Sardine, dans l'ancien bras du Migron, mais nous n'avons pas d'information sur des niveaux d'envasement important dans ce secteur de prairie.

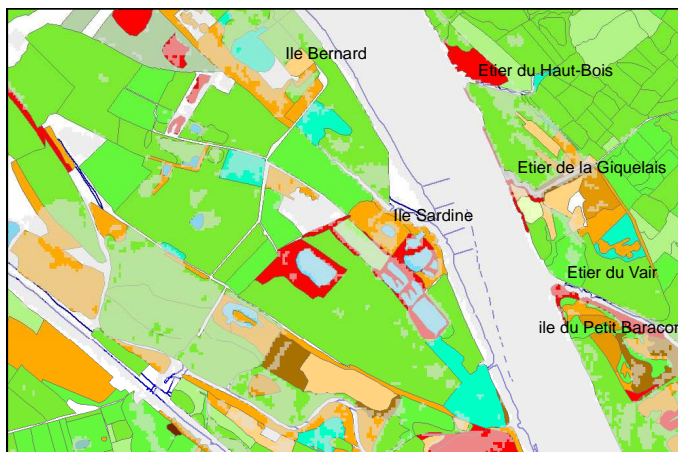
Figure C.35 : Cartographie des habitats Natura 2000 de deux secteurs de prairie touchés par des envasements en septembre 2010. Repérage d'un autre secteur potentiel. Source : Gip Loire Estuaire.



Secteur Ile Thérèse



Secteur Ile Pipy



Secteur Sardine / Mignon

D'une manière générale, les processus et les modalités de dépôts dans les prairies de Loire sont encore assez mal décrits, c'est pourquoi, la chambre d'agriculture fait l'hypothèse d'un lien direct entre les dragages d'entretien du port, leur potentiel de remise en suspension de sédiment et l'envasement chronique des prairies. Pour les événements de septembre 2010, cette hypothèse apparaît peu plausible comme le montrent les graphiques mis au point grâce à l'outil Excel développé pour le GPMNSN (Fig. C32). Ces graphiques, présentés dans un rapport complémentaire à ce document, montrent qu'au moment des grandes marées de septembre, les actions de dragages étaient réalisées bien en aval (à Montoir) ou en amont (à Nantes). En fait, plus que l'impact direct des dragages d'entretien, il apparaît probable que c'est la position du bouchon vaseux, sa charge sédimentaire et la présence conjointe de quantités importantes de crème de vase qui conditionnent fortement les taux d'envasement dans les prairies latérales.

Toutefois, pour estimer l'impact potentiel des activités de dragage d'entretien, nous avons réalisé quelques calculs estimatifs. Ainsi, dans le cadre d'une submersion significative (exemple du 18 avril 2003, figure C30), recouvrant dans une lame d'eau de 20cm, 3800 ha de marais submersibles entre Couëron et Donges, la quantité de sédiment contenue dans cette eau est de 76 000 tonnes, pour une charge sédimentaire de 10g/L. Par comparaison, ce tonnage correspond à environ 17 jours d'activité de la drague aspiratrice stationnaire, à raison d'un rendement estimé à 350m³/h durant 20h par jour à la densité 1,4 (625 G/l).

Si les ordres de grandeur des flux de sédiments sont théoriquement voisins, cette approche sous-estime plusieurs facteurs essentiels. D'une part, les opérations de dragage dans le chenal de Nantes par la drague aspiratrice stationnaire n'ont jamais cette durée et, d'autre part, l'hypothèse précédente suppose que les sédiments remis en suspension par cette drague demeurent totalement en suspension et qu'ils se concentrent dans la partie supérieure de la colonne d'eau où ils pourraient intéresser les zones latérales lors des submersions. Or, les matériaux dragués se déposent pour partie dans le chenal et ceux restant en suspension suivent les courants en Loire qui sont longitudinaux et quasiment alternatifs entre flot et jusant.

En ce qui concerne le dragage par injection d'eau également mis en œuvre dans le chenal de Nantes, des campagnes de suivi de l'impact montrent que, lors du dragage, l'incidence sur les matières en suspension dans la colonne d'eau est relativement localisée. Les variations de turbidité dans la colonne sont perceptibles sur une distance de 1 à 2 km en aval du point de dragage, mais les niveaux de turbidité induits sont proches de ceux de la turbidité naturelle du fleuve. Les campagnes réalisées dernièrement par le GPM NSN (Hocer (a) 2012) ont montré qu'il est possible de mettre en évidence, en morte-eau (période de turbidité naturelle minimale du fleuve), un nuage de particules en aval de la drague à injection d'eau mais sur une distance assez limitée (1,4 km). Des campagnes similaires pour le Grand Port Maritime de Rouen (Estuaire de la Seine à Rouen) montrent que dans un environnement naturellement moins turbide que la Loire, le nuage de particules suite à un dragage par injection d'eau peut être mis en évidence sur une distance plus grande (2 km) mais avec des variations faibles de turbidités (Hocer (b) 2012).

Ainsi, les opérations de dragage d'entretien du chenal de Nantes ne présentent pas des caractéristiques les désignant comme facteur influençant notablement les dépôts latéraux dans l'estuaire. Néanmoins, une campagne de dragage intensive pourrait avoir un effet cumulé avec la présence d'un bouchon vaseux très chargé dans la zone de où des prairies inondables sont présentes. L'estimation de cette contribution reste à déterminer.

En terme d'épaisseur de dépôt, les 76 000 tonnes estimées précédemment représentent moins de 3mm d'engraissement sur l'ensemble de la surface ennoyée, pour une densité de sédiment de 1,4. Cette épaisseur est bien loin des envasements centimétriques observés sur les prairies de l'île

Thérèse par exemple. Ce type de comparaison montre que les processus de dépôts problématiques pour l'élevage sont aussi liés à des effets localisés, des événements et des conditions environnementales particulières qui méritent d'être documentés et décrits pour comprendre les phénomènes. Au-delà des simples calculs estimatifs très synthétiques et à grande marge d'erreur, les apports de la modélisation peuvent permettre de mieux comprendre la vulnérabilité de certains secteurs.

Bilan et perspectives d'augmentation du niveau marin au cours du siècle

La présence de très vastes espaces de côtes basses, ouvertes et inondables est une particularité de l'estuaire de la Loire et de sa section intermédiaire. Ses zones humides leur confèrent une richesse écologique exceptionnelle et primordiale pour l'avifaune. Il faut noter que le développement de ces prairies humides est lié à la phase d'aménagement du chenal de navigation. Depuis, les domaines les plus continentalisés sont utilisés pour l'élevage, qui profite de la qualité de l'herbe des zones humides saumâtres. Mais l'absence de protection rend ces milieux très sensibles aux submersions et les éleveurs rencontrent régulièrement des problèmes d'envasement de leurs pâturages. Les derniers travaux d'aménagements du chenal sont en effet trop récents pour avoir permis la construction naturelle systématique d'un bourrelet de berge suffisamment protecteur. Ces structures sédimentaires, présentes en bordure des anciens marais de Loire, se construisent progressivement par le dépôt préférentiel de sédiments lors des débordements. En ce sens, le développement de nombreuses roselières, qui forment de véritables pièges à sédiment en bord de Loire, est un élément positif dans la reconstruction de levées naturelles.

Mais, à plus long terme, la question de la montée du niveau marin pose des questions et impose une réflexion sur l'évolution du milieu. En effet, cette montée programmée pourrait provoquer une augmentation sensible des débordements et des zones régulièrement inondées. En parallèle, la fréquence des envasements sur les prairies pourrait augmenter et devenir critique pour les éleveurs. Mais, d'un autre côté, la présence de grandes quantités de sédiments et les forts taux de sédimentation possibles sur les berges peuvent favoriser un exhaussement rapide des sols et des berges, en réponse directe à la montée générale du niveau d'eau. L'exhaussement des berges « ouvertes » par des apports sédimentaires estuariens lors de submersion peut-il compenser, en partie, la montée rapide du niveau marin prévue pour les décennies à venir ? Ces évolutions plausibles sont-elles compatibles avec le maintien pérenne d'activités agricoles sur ces zones ?

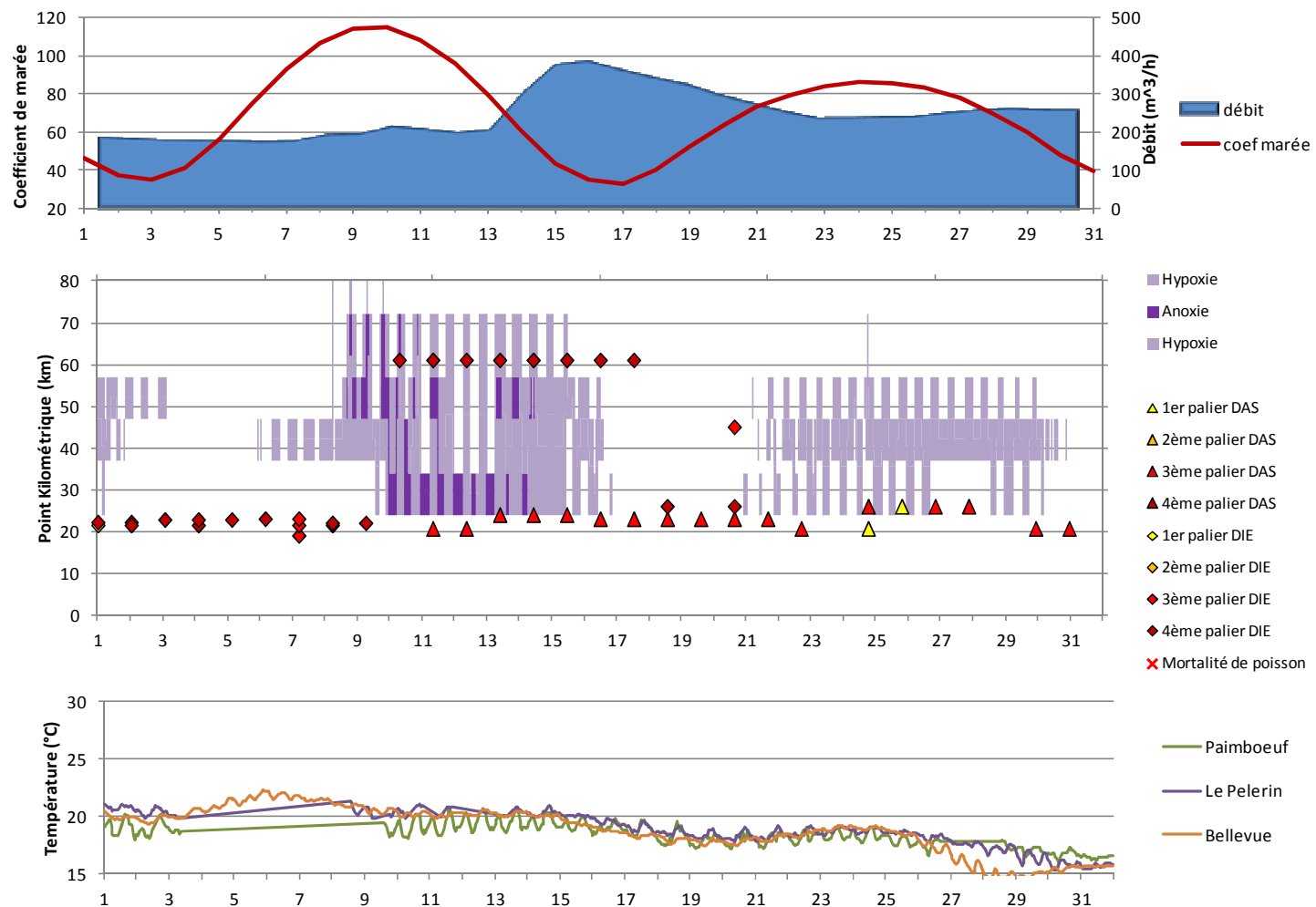


Figure C.32 : Graphiques obtenues à l'aide de l'outil Excel développé pour le GPMNSN, pour le mois de Septembre 2010

D. CONCLUSION

Ce rapport d'étude a permis de présenter les caractéristiques générales des formations sédimentaires qui structurent les berges d'un estuaire à bouchon vaseux. Les milieux de vasières et les marais ont été décrits. Sur les vasières, les processus de transport et de dépôt des sédiments sont complexes et nombreux. Ils ont été identifiés et présentés. Dans les marais, un point particulier a été réalisé sur l'action de l'homme qui modèle ces espaces depuis des siècles.

Dans l'estuaire de la Loire, la bibliographie disponible a été mise à profit pour présenter le contexte général d'évolution des berges à l'échelle du cycle climatique et du remplissage progressif de la vallée, incisée lors de la période glaciaire. Actuellement, en période de haut niveau marin, la vallée est en fin de colmatage et la sédimentation fine prédomine sur les bords, tandis que les dépôts sablo-vaseux sont localisés autour des îles et les chenaux.

Dans un second temps, les travaux d'aménagements portuaires et leur impact sur les berges ont été décrits. L'impact de ces chantiers immenses est tout à fait prédominant dans la configuration actuelle des berges de l'estuaire de la Loire. Dans la partie aval, la zone entre Donges et St Nazaire a été remblayée, tandis que le basculement du chenal de navigation au nord a permis la mise en place d'une grande vasière entre Bilho et la rive Sud. Dans la partie intermédiaire, les bras secondaires ont été endigués et se sont colmatés, tandis qu'un chenal unique et profond était creusé. Ces nouvelles berges basses sont constituées de vasières, de shore, de roselières et de prairies humides utilisées pour l'élevage. Ces vastes zones humides ouvertes constituent une originalité parmi les grands estuaires français qui sont plus largement endigués. Elles sont d'une richesse écologique exceptionnelle et favorisent l'avifaune, mais constituent aussi des secteurs vulnérables au regard des submersions et de l'évolution du milieu. De plus, ces prairies ouvertes jouxtent des marais plus anciens qui sont protégés de la plupart des submersions par un bourrelet sédimentaire délimitant l'ancienne rive. La situation actuelle des berges de l'estuaire est le résultat de l'évolution du milieu après ces travaux d'aménagement.

Pour comprendre les évolutions récentes de la sédimentation latérale dans l'estuaire de la Loire, les études préexistantes ont été exploitées. Le premier niveau de travail concerne l'observation des évolutions de l'environnement à moyen terme, sur la base d'un travail de cartographie, de comparaison d'images aériennes ou satellites, de bathymétries et de topographies. Ainsi, l'étude de Sogreah (2006) montre une perte de surface des vasières depuis 1984. Celle-ci est liée soit, à une érosion en faveur du chenal, soit aux effets du colmatage et à la transformation d'un milieu de vasières vers un domaine de prairies humides. Dans la section aval, les études du GIP Loire Estuaire nous indiquent que, depuis la fin des grands travaux d'aménagement de la Loire, cette vasière a diminué en superficie en raison de la disparition complète de l'estran autour du banc des Brillantes.

Le second niveau d'analyse concerne l'étude des processus à court terme, qui agissent et font évoluer les milieux au quotidien. Au niveau des vasières situées sur la rive nord de la section intermédiaire, une campagne de mesures altimétriques d'un an a montré la complexité des phénomènes de sédimentation. En fonction de la vasière étudiée et de la position des instruments sur la zone intertidale, les évolutions altimétriques varient. L'impact du cycle tidal semi-diurne et du cycle lunaire a été observée, mais les évolutions les plus importantes

semblent liées au cycle hydrologique du fleuve qui conditionne la position, la charge du bouchon vaseux et la présence dans le chenal d'une quantité plus ou moins grande de crème de vase. Les phases d'érosion peuvent être rapides et ne s'expliquent pas vraiment par l'action des tempêtes lors de l'année de mesures.

Dans les secteurs de prairies humides et de marais, les épisodes de submersion guident les dépôts sédimentaires. Potentiellement, une grande majorité de la plaine alluviale est inondable très régulièrement. Dans les faits, la progression des débordements ne répond pas à une relation linéaire avec la topographie. La cartographie de ces secteurs n'est donc pas aisée. Dans les anciens marais de l'estuaire, les apports de sédiments estuariens par submersion sont exceptionnels. Au contraire, dans les zones les plus facilement inondables, au niveau des roselières et des shorres, nous faisons l'hypothèse que les taux de sédimentation sont beaucoup plus forts. Enfin, dans les secteurs intermédiaires, inondés par des débordements inférieurs à 1 m, les submersions et les envasements associés peuvent avoir des impacts sur les activités d'élevage. Les modalités des processus sédimentaires de ces zones sont mal connues, mais nous faisons l'hypothèse que les secteurs agricoles les plus impactés par la sédimentation sont aussi les plus directement reliés avec le fleuve, le bouchon vaseux et la crème de vase. La relation entre le bouchon vaseux et les épisodes d'envasement des prairies n'est pas encore bien connue, mais les zones les plus à risque de sédimentation devraient être celles où les concentrations augmentent en fin de marée montante, donc, a priori, située plutôt dans la partie amont de la zone de bouchon vaseux.

E. BIBLIOGRAPHIE

Allard, D., 2002. Zones humides de la basse vallée de la Seine, Programme scientifique Seine Aval.

Boutellier, P., 1979. Le rôle des roselières dans l'estuaire de la Loire, Université de Nantes, 127 p pp.

Davis, R.A., 1996. Coasts, "Présent à la BLP" - BLP: B 220-DAV-C. Prentice Hall, 274 p. pp.

Deloffre, J., 2005. La sédimentation fine sur les vasières intertidales en estaires macrotidaux, Université de Rouen, 236 p pp.

Diara, M., 1983. Echange hydrologiques et sédimentologiques entre l'estuaire de la Loire et ses zones marginales (vasières-étiers-marais), Université de Nantes, 210 p pp.

Dyer, K.R., 1998. The typology of intertidal mudflats, *Geomorphology and Sedimentology of estuaries. Developments in Sedimentology*, pp. 423-449.

Dyer, K.R., Christie, M.C. and Wright, E.W., 2000. The classification of intertidal mudflats. *Continental Shelf Research*, 20: 1039-1069.

Gallenne, B., 1974. Les accumulations turbides de l'estuaire de la Loire. Etude de la crème de vase, Université de Nantes, 323 p pp.

Géotransfert, 2011. Analyse des mesures enregistrées par 6 altimètres implantés sur des vasières de la Loire, GIP Loire Estuaire.

Hocer (a), 2012. Réalisation d'un suivi environnemental de dragages par injection d'eau pour le Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire. pp 164.

Hocer (b), 2012. Réalisation d'un suivi courantologique et sédimentologique de dragages par injection d'eau, dans le port de Rouen, pp43.

GIP-Loire-Estuaire, 2004. Cahier Indicateur L1D3, les surfaces marnantes.

GIP-Loire-Estuaire, 2005. Cahier Indicateur L1D1, Submersibilité latérale dans l'estuaire.

GIP-Loire-Estuaire, 2007. Cahier Indicateur L2B2, Les roselières.

GIP-Loire-Estuaire, 2008. 7 ans pour agir en faveur des marais estuariens. Lettre du GIP Loire Estuaire, 9.

GIP-Loire-Estuaire, 2011. Les submersions, exemple de la tempête Xynthia, Rencontre autour des niveaux d'eau extrêmes Nantes. GIP Loire Estuaire, Nantes.

GIP-Loire-Estuaire, 2012. Cahier Indicateur L1D1, Submersibilité latérale dans l'estuaire (mise à jour novembre 2012)

GIP Seine Aval, 2010. Contextes climatique, morphologique & hydro-sédimentaire : Inondations par débordement dans l'estuaire de la Seine.

Mehta, A.J., 1991. Understanding fluid mud in a dynamic environment. *Geo-Marine letters*, 11: 113-118.

Migniot, C., 1993. Bilan de l'hydrologie et de l'hydrosédimentaire de l'estuaire de la Loire, APEEL / PANSN.

Paskoff, R., 1998. Les littoraux, Impact des aménagements sur leur évolution. Collection U, serie Géographie. Armand Colin, Paris, 260 p. pp.

Rivages, 1995. Etude de la vasière de la rive droite de la Loire entre Donges et Cordemais, Port de Nantes Saint Nazaire.

Salomon, J.N., 2002. L'inondation dans la basse vallée de la Garonne et l'estuaire de la Gironde lors de la "tempête du siècle" (27-28 décembre 1999). Géomorphologie : relief, processus, environnement, 2: 127-134.

Salomon, J.N., 2008. Géomorphologie sous-marine et littorale. Collection Scieteren. Presse universitaire de Bordeaux, 387 p. pp.

Sogreah, 2006. Expertise et connaissance du milieu estuarien. Analyse historique., GIP Loire Estuaire.

Verger, F., 2005. Marais et estuaires du littoral français. Belin, 335 p pp.

Verger, F., 2009. Zones humides du littoral français, 448 p pp.

Woodroffe, C.D., 2002. Coasts, form, process and evolution. Cambridge University Press, 623 p pp.