
**DIRECTION REGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT,
DE L'AMENAGEMENT ET DU LOGEMENT DES
PAYS DE LA LOIRE**



**ÉTUDE RELATIVE A LA GESTION DURABLE DU TRAIT DE
COTE DE LA REGION DES PAYS DE LA LOIRE**

**FASCICULE A
CONDITIONS GENERALES**

**MARS 2012
N° 1711836R1**



DIRECTION REGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'AMENAGEMENT ET DU LOGEMENT DES PAYS DE LA LOIRE
ETUDE RELATIVE A LA GESTION DURABLE DU TRAIT DE COTE DE LA REGION DES PAYS DE LA LOIRE
FASCICULE A : CONDITIONS GENERALES

 AGENCE DE BORDEAUX IMMEUBLE LE RUBIS 10 rue Gutenberg - B.P. 30281 33697 MERIGNAC CEDEX Tél. : 05 56 13 85 82 Fax : 05 56 13 85 62	N° Affaire	1711836			Établi par	Véifié par	Date du contrôle
	Date	Mars 2012			Valérie PALLUT Sébastien LEDOUX	Vincent MAZEIRAUD	Mars 2012
	Indice	A	B	C	Vincent MAZEIRAUD		

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	A
CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	H
1. DESCRIPTION GENERALE DU LITTORAL DE LOIRE-ATLANTIQUE.....	1
1.1. LOCALISATION GEOGRAPHIQUE.....	1
1.2. PLANIMETRIE ET ALTIMETRIE	1
1.3. MORPHOLOGIE COTIERE.....	2
1.4. BATHYMETRIE	3
1.5. COUVERTURE SEDIMENTAIRE DES FONDS MARINS.....	3
1.6. GEOLOGIE	4
1.7. ZONES REGLEMENTEES ET PROTEGEES	5
1.7.1. ZPS ET SIC NATURA 2000.....	5
1.7.2. SITES INSCRITS ET SITES CLASSES.....	7
1.7.3. ZNIEFF.....	8
1.7.4. PARCS NATURELS.....	8
1.8. USAGES ET OCCUPATION DES SOLS	8
2. L'ESTUAIRE EXTERNE DE LA LOIRE	10
2.1. PREAMBULE	10
2.2. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES GENERALES.....	10
2.3. CARACTERISTIQUES HYDRAULIQUES GENERALES.....	11
2.4. EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE L'ESTUAIRE ET DES CHENAU DE NAVIGATION.....	11
2.5. OPERATIONS DE DRAGAGE RECENTES.....	12
3. CONDITIONS OCEANO-METEOROLOGIQUES GENERALES.....	14
3.1. NIVEAUX DE LA MER.....	14
3.1.1. MAREE THEORIQUE.....	14
3.1.2. NIVEAUX EXTREMES DE PLEINE MER.....	15
3.1.3. SURCOTES ET DECOTES.....	15
3.2. COURANTS GENERAUX	17
3.3. VENTS.....	17
3.4. ETATS DE MER AU LARGE	18
3.4.1. DONNEES DISPONIBLES.....	18
3.4.2. REGIME MOYEN DES ETATS DE MER DU LARGE	18
3.4.3. REGIME EXTREME DES ETATS DE MER DU LARGE	19
3.5. ETATS DE MER EN ZONE COTIERE	19
3.5.1. DONNEES DISPONIBLES.....	19

3.5.2. REGIME MOYEN DES ETATS DE MER EN ZONE COTIERE.....	20
3.5.3. REGIME EXTREME DES ETATS DE MER EN ZONE COTIERE.....	20
3.6. CONNAISSANCE DES ETATS DE MER EN BORDURE LITTORALE	21
3.6.1. PREAMBULE	21
3.6.2. MODELE DE TRANSFERT DES ETATS DE MER DU LARGE A LA BORDURE LITTORALE	21
3.7. GENERATION DES CLAPOTS PAR LES VENTS.....	23
3.8. POINT SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE	28
3.8.1. ELEVATION DU NIVEAU MOYEN DES MERS	28
3.8.2. AUGMENTATION DE LA FREQUENCE ET DE L'INTENSITE DES TEMPETES (ETATS DE MER)	29
4. DESCRIPTION GENERALE DES UNITES SEDIMENTAIRES LITTORALES.....	30
4.1. INTRODUCTION.....	30
4.2. USI – DE LA BAIE DE PONT MAHE A LA POINTE DU CASTELLI.....	31
4.2.1. DESCRIPTION GENERALE	31
4.2.2. DECOUPAGE EN SOUS-SECTEURS HOMOGENES.....	31
4.3. USII – DE LA POINTE DU CASTELLI A LA POINTE DE CHEMOULIN ...	31
4.3.1. DESCRIPTION GENERALE	31
4.3.2. DECOUPAGE EN SOUS-SECTEURS HOMOGENES.....	32
4.4. USIII – DE LA POINTE DE CHEMOULIN AU PORT DE SAINT-NAZAIRE	32
4.4.1. DESCRIPTION GENERALE	32
4.4.2. DECOUPAGE EN SOUS-SECTEURS HOMOGENES.....	33
4.5. USIV – DE SAINT-BREVIN-LES-PINS A LA POINTE SAINT-GILDAS	33
4.5.1. DESCRIPTION GENERALE	33
4.5.2. DECOUPAGE EN SOUS-SECTEURS HOMOGENES.....	33
4.6. USV – DE LA POINTE SAINT-GILDAS A NOIRMOUTIER-EN-L'ÎLE	34
4.6.1. DESCRIPTION GENERALE	34
4.6.2. DECOUPAGE EN SOUS-SECTEURS HOMOGENES.....	34
5. METHODOLOGIE POUR LA CONNAISSANCE DES PHENOMENES EROSION ET SUBMERSION MARINE.....	35
5.1. DEFINITIONS GENERALES DE L'EROSION ET DE LA SUBMERSION MARINE.....	35
5.1.1. EROSION MARINE.....	35
5.1.2. SUBMERSION MARINE.....	35
5.2. RECOMMANDATIONS DU GUIDE METHODOLOGIQUE DES PLANS DE PREVENTION DES RISQUES LITTORAUX (PPRL)	36
5.2.1. PREAMBULE	36
5.2.2. EROSION DU TRAIT DE COTE	36
5.2.3. SUBMERSION MARINE.....	38
5.3. METHODOLOGIE POUR LA CONNAISSANCE DES PHENOMENES D'EROSION MARINE	38
5.3.1. PLAGES.....	38
5.3.2. FALAISES VIVES	44
5.4. METHODOLOGIE POUR LA CONNAISSANCE DES PHENOMENES DE SUBMERSION MARINE	46

5.4.1. NIVEAUX D'EAU DE REFERENCE	46
5.4.2. ALTIMETRIE DES TERRAINS LITTORAUX	47
5.4.3. QUALIFICATION DU NIVEAU DE SUBMERSION	47
REFERENCES.....	48
FIGURES.....	50

oOo

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Correspondance entre le zéro hydrographique et le zéro IGN69 le long du littoral de la Loire-Atlantique (source SHOM)

Tableau 1.2 : ZICO, ZPS et SIC sur le littoral de la Loire-Atlantique (source : DREAL)

Tableau 1.3 : Sites inscrits et sites classés présents sur la zone d'étude (source : DREAL)

Tableau 2.1 : Débits caractéristiques de la Loire

Tableau 2.2 : Historique des aménagements réalisés au niveau de l'estuaire externe de la Loire

Tableau 2.3 : Sections draguées dans l'estuaire externe

Tableau 3.1 : Niveaux caractéristiques de la marée le long du littoral de Loire-Atlantique (en m CM)

Tableau 3.2 : Niveaux caractéristiques de la marée le long du littoral de Loire-Atlantique (en m IGN69)

Tableau 3.3 : Régime extrême des houles du large (hauteurs et intervalles de confiance à 90%)

Tableau 3.4 : Régime extrême des houles en zone côtière (hauteurs et intervalles de confiance à 90%)

Tableau 3.5 : Caractéristiques des épures de réfraction réalisées

Tableau 3.6 : Matrice de transfert linéaire du point ANEMOC COAST_3521

Tableau 3.7 : Matrice de transfert linéaire du point ANEMOC COAST_2581

Tableau 3.8 : Matrice de transfert linéaire du point ANEMOC COAST_2601

Tableau 3.9 : Matrice de transfert linéaire du point ANEMOC COAST_2627

oOo

LISTE DES FIGURES

Figure 0.1 : Unités sédimentaires du littoral Pays de la Loire

Figure 1.1 : Communes littorales de la zone d'étude

Figure 1.2 : Typologie du trait de côte

Figure 1.3 : Bathymétrie générale

Figure 1.4 : Sédimentologie des fonds

Figure 1.5 : Localisation des ZPS et ZICO

Figure 1.6 : Localisation des Sites d'Importance Communautaire (SIC)

Figure 1.7 : Localisation des sites inscrits et classés

Figure 1.8 : Localisation des inventaires naturels : ZNIEFF de type I

Figure 1.9 : Localisation des inventaires naturels : ZNIEFF de type II

Figure 1.10 : Usages des sols (extrait de l'IPLI de 1985)

Figure 1.11 : Occupation des sols (extrait du Plan d'Occupation des Sols)

Figure 2.1 : Bathymétrie de l'estuaire externe de la Loire

Figure 2.2 : Vitesses maximales des courants de marée observés pour une petite crue

Figure 2.3 : Localisation des zones de dragage

Figure 3.1 : Niveaux extrêmes de pleine-mer pour une période de retour de 100 ans

Figure 3.2 : Dynamique des surcotes à la pointe St-Gildas

Figure 3.3 : Courants de marée d'après PREVIMER

Figure 3.4 : Courants de marée d'après B. TESSIER

Figure 3.5 : Rose des vents au Talut

Figure 3.6 : Localisation des points de houle ANEMOC

Figure 3.7 : Distribution des hauteurs des états de mer au large

Figure 3.8 : Roses des houles du large

Figure 3.9 : Distribution des périodes des états de mer du large

Figure 3.10 : Graphiques des extrêmes des états de mer du large

Figure 3.11 : Distribution des hauteurs des états de mer en zone côtière

Figure 3.12 : Roses des houles en zone côtière

Figure 3.13 : Distribution des périodes des états de mer en zone côtière

Figure 3.14 : Graphiques des extrêmes des états de mer en zone côtière

Figure 3.15 : Emprise et maillage du modèle TOMAWAC

Figure 3.16 : Épures de réfraction pour des houles de direction N180 et N225

Figure 3.17 : Épures de réfraction pour des houles de direction N270 et N315

Figure 3.18 : Diagramme quantité-qualité en hauteur avant calibration

Figure 3.19 : Diagramme quantité-qualité en période avant calibration

Figure 3.20 : Diagramme quantité-qualité en hauteur après calibration

Figure 3.21 : Diagramme quantité-qualité en période après calibration

Figure 3.22 : Estimations de l'élévation du niveau de la mer et évolution récente des taux de gaz à effet de serre

Figure 4.1 : Unités sédimentaires du littoral des Pays de la Loire

Figure 4.2 : Unités sédimentaires 1 à 5 de la Loire Atlantique

Figure 4.3 : Découpage en sous-secteurs de l'unité sédimentaire 1

Figure 4.4 : Découpage en sous-secteurs de l'unité sédimentaire 2

Figure 4.5 : Découpage en sous-secteurs de l'unité sédimentaire 3

Figure 4.6 : Découpage en sous-secteurs de l'unité sédimentaire 4

Figure 4.7 : Découpage en sous-secteurs de l'unité sédimentaire 5

oOo

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Présentation du logiciel TOMAWAC

Annexe 2 : Présentation du logiciel MOPLA

Annexe 3 : Présentation du logiciel SMC

Annexe 4 : Présentation du logiciel GENESIS

Annexe 5 : Présentation du logiciel SBEACH

Annexe 6 : Questionnaire aux communes littorales

oOo

CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

La convention triennale signée le 23 avril 2008 entre l'État, le Conseil Régional des Pays de la Loire et les Conseils Généraux de la Loire-Atlantique et de la Vendée, sur la gestion durable du trait de côte a permis de préciser la nécessité d'une étude destinée à :

- expliquer le fonctionnement hydrosédimentaire du littoral régional, caractériser les cellules sédimentaires, identifier pour chacune les aléas et les enjeux en prenant en compte des scénarios d'évolution climatique, et identifier les stocks de sédiments mobilisables pour des opérations de rechargement,
- réaliser un diagnostic des ouvrages existants en précisant leur état structurel présent, leur efficacité face aux houles actuelles et en prévision du climat de houles futur, et l'évaluation du coût annuel de leur entretien,
- développer un argumentaire susceptible d'orienter les maîtres d'ouvrages des interventions sur le trait de côte vers les techniques de protection les plus appropriées au regard des risques encourus.

Le littoral concerné comprend 11 cellules hydrosédimentaires élémentaires (cf. figure 0.1), mais une partie du littoral – la zone vendéenne – a déjà fait l'objet d'une étude spécifique (étude de DHI, 2007).

Les objectifs de la présente étude tels que définis dans le cahier des charges sont les suivants :

Phase « A » - Production de l'atlas « hydrosédimentologie et érosion marine » et de l'approche cartographique « aléa submersion marine » de la Loire-Atlantique

Il s'agira de:

- connaître l'évolution du trait de côte et les principaux processus qui la régissent,
- connaître les stocks sédimentaires mobilisables et leur évolution,
- déterminer, par secteur, les aléas d'érosion et de submersion, les enjeux et les solutions envisageables pour protéger les secteurs identifiés comme prioritaires dans le cadre de la présente étude.

Phase « B » – Étude détaillée des cellules n°1 à 5, 9, 10 et 11

Il s'agira de:

- analyser l'état des ouvrages existants de protection du littoral,
- analyser de manière détaillée les phénomènes d'érosion et de submersion identifiés en phase A pour les cellules n°1 à 5, 9, 10 et 11 (pour la partie de l'Anse du Maupas à la Baie de l'Aiguillon - Pertuis Breton) (cf. figure 0.1).

Les résultats de l'étude sont répartis en différents fascicules :

- **Fascicule A** : « Conditions générales » présentant une description générale du littoral et la méthodologie employée pour l'étude,
- **Fascicule B** : « Fiches d'inspection » dédié aux fiches d'observations terrain des plages, des falaises et des ouvrages littoraux,
- **Fascicule C** : « Synthèse de l'évènement Xynthia du 27 et 28 février 2010 en Loire-Atlantique » rapportant les éléments de connaissance de l'évènement,
- **Fascicules des unités sédimentaires I à V** : Rapports spécifiques à chaque unité sédimentaire détaillant le fonctionnement et l'évolution des côtes,
- **Fascicule D** : « Synthèse des réflexions de phase A » proposant une synthèse des fascicules A, B, C et I à V,
- **Fascicule E** : « Schéma directeur » définissant les solutions envisageables pour protéger le littoral des phénomènes d'érosion et de submersion marine.

Le présent rapport correspond au **fascicule A « Conditions générales »**.

oOo

1. DESCRIPTION GENERALE DU LITTORAL DE LOIRE-ATLANTIQUE

1.1. LOCALISATION GEOGRAPHIQUE

Le littoral de Loire-Atlantique s'étend sur la façade maritime Ouest de la France, sur un linéaire d'environ 210 km depuis la pointe du Bile au Nord jusqu'au port du Collet au Sud. Il est bordé au Nord par le littoral morbihannais et au Sud par le littoral vendéen.

20 communes composent cette frange littorale et sont réparties comme suit du Nord au Sud (figure 1.1) : Assérac (1), Saint-Molf (2), Mesquer (3), Piriac-sur-Mer (4), La Turballe (5), Guérande (6), Le Croisic (7), Batz-sur-Mer (8), Le Pouliguen (9), La Baule Escoublac (10), Pornichet (11), Saint-Nazaire (12), Saint-Brévin-les-Pins (13), Saint-Michel-Chef-Chef (14), La Plaine-sur-Mer (15), Préfailles (16), Pornic (17), La Bernerie-en-Retz (18), Les Moutiers-en-Retz (19), Bourgneuf-en-Retz (20).

Par ailleurs, en raison de la continuité des processus sédimentaires, il est également inclus au littoral de Loire-Atlantique une partie du littoral nord vendéen comprenant le sud de la baie de Bourgneuf et la façade Est de l'île de Noirmoutier. Les communes littorales concernées sont les suivantes : Bouin (21), Beauvoir-sur-Mer (22), La Barre-de-Monts (23), Barbâtre (24), la Guérinière (25), L'Épine (26), Noirmoutier-en-l'Île (27).

1.2. PLANIMETRIE ET ALTIMETRIE

Les coordonnées planimétriques qui seront utilisées dans le cadre de cette étude seront rattachées à la projection plane Lambert II cartographique.

Les cotes altimétriques seront généralement exprimées en cotes terrestres rattachées au système IGN69 en raison d'une plus grande facilité d'interprétation au niveau des rendus cartographiques, en particulier lorsqu'il s'agira d'étudier le phénomène de submersion marine. La source de données altimétrique sera à la fois la BDTOP0 de l'IGN et la donnée LIDAR (laser aéroporté) d'une précision plus importante.

De manière ponctuelle (en particulier lors de la présentation des cartes bathymétriques), il pourra être fait référence aux cotes marines rattachées au zéro hydrographique (0 m CM). La correspondance entre le zéro hydrographique et le zéro IGN69 le long du littoral est indiquée dans le tableau suivant.

TABLEAU 1.1 : CORRESPONDANCE ENTRE LE ZERO HYDROGRAPHIQUE ET LE ZERO IGN69 LE LONG DU LITTORAL DE LA LOIRE-ATLANTIQUE (SOURCE SHOM 2010)

Nom du site	Cote du 0 m CM en m IGN69
Le Croisic	-2,860
Le Pouliguen	-2,917
Pornichet	-2,927
Saint-Nazaire	-3,159
Saint-Gildas	-3,078
Pornic	-3,199
Noirmoutier	-3,101
Fromentine	-2,813

1.3. MORPHOLOGIE COTIERE

Le littoral de Loire-Atlantique peut être caractérisé par différents types de morphologie côtière :

- les plages (constituées de sables et/ou vases),
- les côtes de falaises vives¹,
- les traicts (ou marais) de Pen-Bé et du Croisic,
- les zones artificialisées au Sud du port du Collet avec le réseau de digues littorales à la mer (département de la Vendée).

La campagne d'observation du littoral réalisée au cours de cette étude a permis de mettre en évidence ces différentes caractéristiques morphologiques sur l'ensemble du littoral (figure 1.2). La répartition en linéaire couvert sur le département de la Loire-Atlantique donne les informations suivantes :

- les plages représentent 44% du littoral (environ 75 km),
- les côtes de falaises vives sont réparties sur 37% du rivage (soit un linéaire de 63 km),
- la façade maritime est ponctuée par des traicts, constituant des lagunes littorales en connexion avec la mer, représentant 16% de la côte,
- le littoral restant correspond aux zones portuaires (inférieur à 5 km de côte soit moins de 3,0%).

¹ Les côtes à falaises vives correspondent aux zones où la falaise littorale est proche de la mer et régulièrement battue par les flots (littoral de la Plaine-sur-Mer par exemple). Les zones littorales où les falaises d'arrière plage ne sont que très rarement atteintes par la mer seront considérées comme des zones de plage et la falaise caractérisée de falaise morte (plages de Mesquer par exemple).

1.4. BATHYMETRIE

La bathymétrie générale des fonds de la zone d'étude est présentée sur la figure 1.3. Les cotes bathymétriques sont exprimées en cotes marines et sont extraites des données du SHOM ainsi que de levés de détail de l'estuaire externe de la Loire fournis par le Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire.

Les fonds de la zone d'étude comprise au sens large entre la presqu'île de Quiberon et l'île de Noirmoutier sont généralement peu profonds (la majeure partie des fonds sont situés au-dessus de la cote -10m CM) et particulièrement irréguliers en présentant de nombreux points singuliers tels que les îles (Belle-Île en Mer, île d'Houat, île du Hoëdic, île Dunet, île de Noirmoutier) et les hauts-fonds (plateau du Four, plateaux de la Blanche et de la Lambarde, les écueils entre la pointe de Penchâteau et le Grand Charpentier qui ferment la baie de La Baule, la Chaussée des Bœufs) ou les chenaux de navigation de l'estuaire de la Loire.

Les zones de profondeurs les plus faibles se retrouvent au niveau du débouché de l'estuaire de la Loire et dans la baie de Bourgneuf.

Plus au large, l'isobathe -50m CM se situe selon une ligne orientée Nord-Ouest/Sud-Est comprise entre Belle-Île-en-Mer et l'Île d'Yeu.

1.5. COUVERTURE SEDIMENTAIRE DES FONDS MARINS

La zone d'étude est caractérisée par une assez grande diversité de faciès sédimentaires marins. Sur la base des cartographies sédimentaires générales établies par Vanney (1968), par Lesueur et Klingebiel (1986) et par le LCHF (1987), la localisation des principales formations sédimentaires est la suivante (figure 1.4) :

- les fonds rocheux couvrant environ la moitié de la zone d'étude sont observables sur :
 - le vaste plateau des Boeufs, à l'ouest de Noirmoutier,
 - le plateau (ou banc) de Guérande, plus au Nord,
 - une prolongation méridionale de ce dernier, au-delà de la dépression du Grand Trou, jusqu'à l'intérieur de la partie distale du chenal de navigation,
 - les hauts-fonds de la Banche et de la Lambarde, et ceux « fermant » la baie du Pouliguen (les Evens, Pierre Percée),
 - les prolongements sous-marins des pointes de Croisic, de Saint-Gildas, et de quelques portions littorales (Pornichet...),
 - quelques zones très peu profondes à l'intérieur de la baie de Bourgneuf.
- les deux principaux dépôts de sédiments caillouteux et graveleux (médiane granulométrique > 2mm) se trouvent :
 - l'un en bordure septentrionale des roches du banc de Guérande,
 - l'autre au Sud de Noirmoutier.

Deux autres petites zones de dépôts de sédiments caillouteux et graveleux existent : l'une dans la partie Sud-Ouest de la Grande Rade de la Loire au contact des fonds rocheux du Sud du Grand Trou, l'autre dans le goulet de la Fromentine.

- les sables grossiers à caillouteux (médiane granulométrique < 2 mm, mais fraction dominante > 0,5 mm) sont localisés dans :
 - le chenal du Nord et les environs du plateau de la Banche,
 - l'embouchure de la Loire, en une bande joignant la pointe de Chémoulin et la pointe de Saint-Gildas,
 - le Sud de la Grande rade de la Loire et l'entrée de la baie de Bourgneuf.
- les sables fins (moins de 15 % d'éléments de taille > 2mm ; médiane <2 mm, et fraction dominante comprise entre 0,05 et 0,5 mm) occupent :
 - quelques espaces littoraux (Traict du Croisic, baie du Pouliguen, abords de Fromentine) et/ou estuariens (littoral estuarien du pays du Retz, bancs de l'embouchure de la Loire),
 - l'entrée du Chenal du Nord jusqu'au niveau du Chatelier, et les environs du plateau de la Lambarde avec extension vers le Sud-Ouest jusqu'aux roches du banc de Guérande,
 - un assez grand secteur situé en bordure Nord-Est du plateau des Boeufs, dans la région distale du chenal de navigation,
 - deux petites zones, très localisées, dans l'entrée de la baie de Bourgneuf.
- les sédiments vaseux forment des dépôts relativement importants :
 - au Nord-Ouest du Croisic, sur le secteur « Mor Bras »
 - aux abords et au-delà de la pointe du Croisic,
 - à l'embouchure de la Loire, dans le chenal de Mindin,
 - dans la baie de Bourgneuf et principalement dans les chenaux du centre et dans le fond de la baie,
 - dans un long « couloir » s'étendant du Nord-Est vers le Sud-Ouest (zone des « Bouquets »), entre la zone septentrionale de la Grande Rade de la Loire (entre la Lambarde et la pointe de Saint-Gildas) et la fosse du Grand Trou.

1.6. GEOLOGIE

On peut distinguer sur le littoral trois entités géologiques principales (source : cartes géologiques de BRGM et site web <http://infoterre.brgm.fr/>) :

- le substratum du socle armoricain, composé pour l'essentiel de gneiss, schistes et granites. Ils affleurent sur les côtes rocheuses modelées en falaises et prolongées de platiers irréguliers hérissés d'écueils (Piriac-sur-Mer, du Croisic au Pouliguen, Saint-Nazaire, de Préfaïlles à la Bernerie-en-Retz)
- de cordons littoraux récents correspondant aux plages et systèmes dunaires recouvrant le socle armoricain (baies de Pont-Mahé, la Turballe, la Baule, de Saint-Brévin-les-Pins à Tharon-Plage et à Moutiers-en-Retz).
- les traicts, baies et marais, installés sur des zones effondrées : traict de Pen-Bé, du Croisic, baie de Bourgneuf.

1.7. ZONES REGLEMENTEES ET PROTEGEES

Le littoral de Loire-Atlantique, considéré dans son sens le plus large en incluant la frange terrestre, bénéficie d'un dense réseau de zones réglementées et protégées vis-à-vis de l'environnement.

1.7.1. ZPS ET SIC NATURA 2000

La Directive Européenne Habitats, adoptée le 21 mai 1992, a pour objectif de « contribuer à assurer la biodiversité par la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvage sur le territoire européen ».

Pour ce faire, un réseau écologique européen cohérent dénommé Natura 2000 a été constitué. Il est composé de Zones de Protection Spéciale (ZPS) et de Zones Spéciales de Conservation (ZSC) :

- les ZPS ont été définies sur la base de l'inventaire des Zones d'Importance Communautaire des Oiseaux (ZICO) réalisées par le Muséum d'Histoire Naturelle et la Ligue de Protection des Oiseaux (LPO), dans le cadre de l'application de la Directive Européenne du 6 avril 1979 concernant la conservation des oiseaux sauvages.
- les ZSC ont fait l'objet de propositions à la Commission Européenne sous la désignation de pSIC (proposition de Sites d'Intérêt Communautaire).

La plupart font aujourd'hui l'objet d'un processus de concertation avec les acteurs locaux et institutionnels pour définir les principes de gestion de ces espaces et milieux et rédiger pour chacun un document d'objectif (DOCOB).

Les ZPS, ZICO et SIC présentes sur la zone d'étude sont localisées sur les figures 1.5 et 1.6 et récapitulés dans le tableau 1.2.

Trois propositions de sites NATURA2000 en mer au titre de la directive habitats sont actuellement en cours :

- le site FR5212014, au titre de la directive « Oiseaux », recouvre les deux pSIC des parties Nord et Sud de l'estuaire de la Loire ainsi que la baie de Bourgneuf et intègre l'espace estuarien les séparant :
 - pSIC FR5202011, qui couvre une partie de l'estuaire externe de la Loire, au nord du chenal de navigation d'accès au port de Nantes-Saint-Nazaire,
 - pSIC FR5202012, qui s'étend principalement au large de l'estuaire externe de la Loire, au sud du chenal de navigation d'accès au port de Nantes-Saint-Nazaire et en continuité de la zone d'estran de la baie de Bourgneuf,
- la pSIC FR5202010, sur le Plateau du Four,
- le site FR5210013 Mor Braz de la baie de la Vilaine au Croisic englobant l'île Dumet, le Plateau du Four et l'estran de la pointe du Croisic au Pouliguen.

DIRECTION REGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'AMENAGEMENT ET DU LOGEMENT DES PAYS DE LA LOIRE
 ETUDE RELATIVE A LA GESTION DURABLE DU TRAIT DE COTE DE LA REGION DES PAYS DE LA LOIRE
FASCICULE A : CONDITIONS GENERALES

TABLEAU 1.2 : ZICO, ZPS ET SIC SUR LE LITTORAL DE LOIRE-ATLANTIQUE (SOURCE DREAL)

Type	Code	Nom	Superficie	DOCOB
ZPS	FR5210049	Iles de la baie de la Baule	38,7 km ²	op.
ZPS	FR5212009	Marais Breton, baie de Bourgneuf, île de Noirmoutier et forêt de Monts	569,5 km ²	non-op mais validation pour octobre 2009
SIC	FR5200653	Marais Breton, baie de Bourgneuf, île de Noirmoutier et forêt de Monts	523 km ²	op.
ZICO	PL05	Baie de Bourgneuf et marais bretons	455,4 km ²	
ZICO	PL07	Marais salants de Noirmoutier	16,7 km ²	
SIC	FR5200621	Estuaire de la Loire	217 km ²	non-op.
ZPS	FR5210103	Estuaire de la Loire	201,4 km ²	non-op.
ZICO	PL03	Estuaire de la Loire	207,6 km ²	
ZPS	FR5212014	Estuaire de la Loire, baie de Bourgneuf	802 km ²	
ZPS	FR5210090	Marais salants de Guérande, traicts du Croisic, dunes et bois de Pen Bron, baies de St Goustan, du Castouillet, bois de Villeneuve	45,3 km ²	op.
SIC	FR5200627	Marais salants de Guérande, traicts du Croisic et dunes de Pen-Bron	37 km ²	op.
ZPS	5212007	Marais du Més, baies et dunes de Pont Mahé, étang du pont de Fer	66,1 km ²	op.
SIC	FR5200626	Marais du Més, baies et dunes de Pont Mahé, étang du pont de Fer	20,8 km ²	op.
ZICO	PL01	Traicts et marais salants - Guérande	46,7 km ²	
ZPS	FR5210013	Mor Bras	403 km ²	
SIC	FR5202011	Estuaire Loire Nord	189 km ²	encore à l'étude non proposés
SIC	FR5202011	Estuaire Loire Sud	2500 km ²	
SIC	FR5202010	Plateau du Four	41 km ²	lancé

1.7.2. SITES INSCRITS ET SITES CLASSES

Les autres mesures de protections sont liées à des réglementations nationales de protection du patrimoine naturel, historique ou paysager.

La loi du 2 mai 1930 sur la protection des sites institue deux niveaux de protection dont l'utilisation est placée sous la responsabilité de la Direction de l'Architecture et de l'Urbanisme (DAU) au Ministère de l'Equipement agissant également en ce qui concerne les sites naturels pour le compte du Ministère de l'Environnement :

Le Site Classé est une protection très forte qui donne lieu à enquête publique, à avis de la Commission Départementale et Supérieure des Sites et à décret en Conseil d'Etat. Tous les travaux susceptibles de modifier ou de détruire l'état ou l'aspect des lieux sont interdits sauf autorisation expresse du Ministre de l'Equipement ou du Ministre de l'Environnement. Les dossiers de demande de travaux sont préalablement soumis aux Commissions Départementales et Supérieures des Sites afin de préparer la décision du Ministre concerné.

Le Site Inscrit est une protection instituée par arrêté du Ministre compétent, eu égard à la nature du site, après avis de la Commission Départementale des Sites. La DAU assure la régularité de la procédure d'inscription du site. En Site Inscrit, les propriétaires sont tenus de déclarer à l'avance les projets de travaux à l'Architecte des Bâtiments de France qui dispose de 4 mois pour faire connaître son avis.

Les sites classés et inscrits sur le littoral de Loire-Atlantique sont présentés sur la figure 1.7 et récapitulés dans le tableau suivant.

TABLEAU 1.3 : SITES INSCRITS ET SITES CLASSES PRESENTS SUR LA ZONE D'ETUDE (SOURCE DREAL)

Sites inscrits et classés	Noms
4403	La grande côte de la presqu'île du Croisic
4436	Le site côtier de Pornichet à Saint-Marc
4450	La pointe Sud de la presqu'île de Penbron
4452	Les marais salants de Guérande
4453	L'estuaire de la Loire
8502	Le bois de la Chaize
8520	Le quartier de Banzeau et les marais salants qui l'entourent
8527	Le site de l'ancienne abbaye de la Blanche
8521	Le bois des Eloux et de la Mougendrie
8513	Le port du bec
8525	La plage de Luzeron de et les dunes
8512	Le passage de Gois

1.7.3. ZNIEFF

Les figures 1.8 et 1.9 présentent la cartographie des Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF). Ces zones correspondent à des secteurs présentant de fortes richesses biologiques et un bon état de conservation. On distingue 2 types de ZNIEFF :

- les ZNIEFF de type I : secteurs de grand intérêt biologique ou écologique, et
- les ZNIEFF de type II : grands ensembles naturels riches et peu modifiés, offrant des potentialités biologiques importantes.

Si ces inventaires sont des éléments majeurs de la politique de protection de la nature, ils ne représentent en aucun cas une contrainte réglementaire.

1.7.4. PARCS NATURELS

On citera pour mémoire, la présence à proximité de la zone d'étude, du Parc Naturel Régional de Brière (à proximité des marais de Guérande) qui abrite un écosystème typique des zones humides et des espèces faunistiques et floristiques associées. Ce site est d'une grande valeur patrimoniale tant du point de vue des habitats que des espèces.

1.8. USAGES ET OCCUPATION DES SOLS

Les territoires situés en bordure du littoral de Loire-Atlantique sont caractérisés :

- par une forte densité d'occupation humaine,
- par un fort potentiel économique (activités portuaires, touristiques...),
- par des espaces naturels vastes et riches reconnus au niveau européen (cf. paragraphe 1.7).

Les cartes 1.10 et 1.11 présentent respectivement l'usage des sols extrait de l'IPLI de 1985 (Inventaire Permanent du Littoral) et l'occupation des sols extrait du Plan d'Occupation des Sols.

Cette cartographie met en évidence les points suivants :

- un tissu urbain important sur le littoral présentant une dissymétrie Nord/Sud avec une urbanisation très dense au Nord, notamment sur les communes de la Baule, de Pornichet et de Saint-Nazaire,
- en dehors des zones urbaines, un territoire occupé par de vastes espaces naturels qui sont utilisés essentiellement pour l'agriculture, ou correspondant à des zones humides (marais de Pen-Bé, du Croisic et de Bourgneuf).

À noter qu'une récente étude réalisée par l'INSEE Pays de Loire (2007) met en évidence les points suivants au niveau de l'évolution de l'urbanisation côtière sur les 20 dernières années ainsi que sur les évolutions attendues :

- entre 1990 et 1999 a eu lieu un développement important des communes de la côte Nord et de quelques communes de la côte Sud (Pornic et Saint-Brévin-les-Pins notamment),
- sur la période récente (après 2000), on a pu observer une croissance forte des communes situées sur le littoral Sud et dans l'estuaire avec une stabilisation des communes du littoral Nord,
- à l'horizon 2030, il est attendu un développement beaucoup plus important du littoral Sud avec un effet de rattrapage du Nord.

oOo

2. L'ESTUAIRE EXTERNE DE LA LOIRE

2.1. PREAMBULE

Une des caractéristiques majeures du littoral de Loire-Atlantique reste la présence du débouché de la Loire situé entre les communes de Saint-Nazaire au Nord et de Saint-Brévin-les-Pins au Sud. Les limites d'influence de l'estuaire de la Loire sur le littoral de Loire-Atlantique sont difficiles à établir et il n'existe pas d'études spécifiques à ce sujet. Nous pouvons cependant dire avec certitude que ces limites sont variables tant spatialement que temporellement et dépendent des paramètres étudiés. Des prises de vues satellitaires montrent par exemple des extensions du panache turbide de l'estuaire de la Loire allant jusqu'à la baie de Bourgneuf au Sud (Tessier, 2006). L'influence des courants de marée sur la propagation de la houle et sur la mise en mouvement des sédiments est quant à elle bien plus limitée...

2.2. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES GENERALES

Entre le littoral de Saint-Nazaire et de Saint-Brévin-les-Pins, la vallée de la Loire s'élargit en une baie triangulaire occupée par un delta sous-marin, encombrée de bancs de sables émergents (les Morées, Mindin et le Pointeau) ou de roches (les Jardinets et le Chatelier), et creusée de dépressions dont la plus profonde est artificiellement ouverte le long de la rive Nord de l'estuaire et utilisée par la navigation.

Plus au large, les fonds sont occupés par plusieurs plateaux rocheux : plateaux du Four, de Guérande, de la Banche, de la Lambarde et de la chaussée des Bœufs (localisés en figure 2.1). Ils sont entaillés par des dépressions correspondant à d'anciens talwegs plus ou moins remblayés (fosse du Croisic).

Vers le Sud-Ouest se creuse une large dépression dépassant -30m CM (les Bouquets), limitée au Nord et au Sud par deux replats dont le plus important constitue le chenal Sud (réseau Sud de la paléo-Loire). Les deux chenaux se rejoignent vers le large en un chenal unique avant d'entailler la pente du talus continental.

2.3. CARACTERISTIQUES HYDRAULIQUES GENERALES

Les débits caractéristiques de la Loire sont donnés dans le tableau 2.1. Le régime hydraulique est caractérisé par des crues hivernales (principalement vers le mois de février) et une période d'étiage entre août et septembre. Cependant, il présente une variabilité interannuelle relativement importante.

TABLEAU 2.1 : DEBITS CARACTERISTIQUES DE LA LOIRE EN M³/S (SOURCE : GIP LOIRE ESTUAIRE)

Étiage	Module	Crue moyenne	Forte crue
100	825	3 500	6 000

L'analyse des courants de marée (vitesses maximales données en figure 2.2) a été reprise des résultats du modèle hydrodynamique développé par Sogreah dans le cadre de la « Mission d'étude, d'approfondissement et d'évaluation de scénarios visant à améliorer le fonctionnement hydrosédimentaire de l'estuaire de la Loire », pilotée par le Groupement d'Intérêt Public Loire Estuaire (GIP Loire Estuaire). Il utilise le système TELEMAC-3D (développé par EDF-DRD) entièrement couplé en hydrodynamique, salinité et sédiment vaseux. Ce modèle déjà existant a été calé en hydrodynamique et salinité sur plusieurs études dont une sur la partie externe de l'estuaire pour le SHOM et une sur la totalité de l'estuaire interne pour le GIP Loire Estuaire.

Selon une autre étude relative au bilan sédimentaire de la Loire (Sogreah, 2007), les apports solides en suspension (particules fines) ont été estimés à 2,3 millions de tonnes/an en moyenne (donnée à Montjean en amont – PK 112). A ce jour, il n'existe pas de mesures permettant d'évaluer les apports sableux par charriage et saltation. Ces derniers ont été quantifiés indirectement sur la base des volumes sableux dragués par le PANSN. Ainsi, à Nantes, les dragages ont atteint près de 600 000 m³/an dans la première partie du 20^{ème} siècle, ont baissé entre 1984 et 1993 suite aux extractions massives effectuées entre Nantes et Ancenis, puis ont remonté à 130 000 m³/an entre 1994 et 2003. Les apports sableux représenteraient une masse inférieure à 0,2 millions de tonnes/an sur le secteur de Nantes.

2.4. EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE L'ESTUAIRE ET DES CHENAU DE NAVIGATION

La morphologie de l'estuaire varie en fonction des facteurs naturels (niveaux, courants, agitation) et des dragages d'entretien du chenal de navigation. Selon l'étude de Sogreah (2007), l'estuaire externe est en érosion lente sur de grandes surfaces ce qui mobilise des volumes très importants de sédiments. Cette érosion n'avait pas été observée sur la période précédente 1957-1984. Une hypothèse proposée serait que l'hydrologie de la période 1958-1984 a été supérieure à la moyenne, entraînant en crue des apports massifs de sédiments vers l'estuaire externe. La période suivante a connu une hydrologie moyenne au cours de laquelle les apports précédents ont pu être repris.

Par le passé, de nombreux travaux ont conduit à modifier la morphologie de l'estuaire. En aval de Nantes, pour que les courants de flot et les courants de jusant empruntent le même chemin, assurant ainsi l'autocurage du chenal de navigation, d'importants travaux de dragages, déroctages et d'endiguements furent réalisés à partir de 1903. Les différents aménagements qui ont conduit à la morphologie actuelle et la profondeur actuelle du chenal de navigation sont rappelées ci-après (Sogreah, 2006).

TABEAU 2.2 : HISTORIQUE DES AMENAGEMENTS REALISES AU NIVEAU DE L'ESTUAIRE EXTERNE DE LA LOIRE

Dates	Aménagements de l'estuaire externe
1890/1893	Dragages à -5,5m
1896	Recalibrage à -6,0m
1907/1910	Apronfondissement à -7,0m
1934	Nouvel accès à -8,0m à travers la barre des Charpentiers
1939/1942	Déroctage de la plature de Saint-Nazaire, dragages du chenal des Charpentiers à -8,5m sur 200m de large
1969	Creusement du chenal des Charpentiers à -10,0m
1978/1980	Dragages du chenal à -13,25m
1985/1986	Chenal porté à -14,10m sur 7km

Le chenal de navigation actuel s'étend sur près de 69km, de la zone d'attente des Charpentiers à Nantes. Ces différentes opérations empêchent la divagation naturelle des chenaux.

2.5. OPERATIONS DE DRAGAGE RECENTES

Du point de vue des dragages, l'ensemble du chenal de navigation a été découpé en 12 sections (figure 2.3). Leurs caractéristiques sont données dans le tableau page suivante.

Les sédiments dragués sur ces zones sont clapés en mer sur la zone d'immersion de La Lambarde (site de dépôt en mer). Cette zone est située dans l'estuaire externe de la Loire à l'Ouest du chenal des Charpentiers, au Nord de la zone d'attente des Charpentiers. Elle est à 22 km du port de Saint-Nazaire par le chenal. Sa surface est de 5 900 ha. Elle est caractérisée par des profondeurs comprises entre -10 et -24m CM. Les volumes immergés entre 1993 à 2006 étaient en moyenne de 5,4 millions de m³ par an.

TABLEAU 2.3 : SECTIONS DRAGUEES DANS L'ESTUAIRE EXTERNE

Section	Limites de la section	PK	Longueur (en km)
1	Bouées du Chatelier – Pont de l'Eve	-14 750 à -6 000	8,750
2	Pont de l'Eve – Tourelle des Morées	-6 000 à 2 375	3,625
3	Tourelle des Morées – Tourelle des Vignettes	2 375 à 0	2,375
4	Tourelle des Vignettes – Pont de Saint-Nazaire	0 à 2 875	2,875

oOo

3. CONDITIONS OCEANO-METEOROLOGIQUES GENERALES

3.1. NIVEAUX DE LA MER

Les niveaux marins dépendent à la fois de la marée astronomique et des phénomènes météorologiques (vents, variation de la pression atmosphérique) qui peuvent entraîner des surcotes ou décotes du plan d'eau.

Les fluctuations du niveau marin au cours des cycles de marée peuvent avoir des conséquences importantes d'un point de vue sédimentaire avec en particulier des réponses morphodynamiques spécifiques des plages en fonction du marnage.

3.1.1. MAREE THEORIQUE

Sur le littoral Atlantique, la marée est de type semi-diurne (période 12 h 25). L'onde de marée se propage du Sud vers le Nord sur toute la façade Atlantique et possède des caractéristiques différentes le long des côtes en raison de son interaction avec les fonds lors de sa propagation.

L'annuaire des marées du SHOM² permet de connaître les hauteurs caractéristiques en plusieurs sites côtiers du littoral de Loire-Atlantique.

TABLEAU 3.1 : NIVEAUX CARACTERISTIQUES DE LA MAREE LE LONG DU LITTORAL DE LOIRE-ATLANTIQUE EN METRE COTE MARINE (SOURCE : SHOM 2010)

	PHMA ³ (120)	PMVE (95)	PMME (45)	NM	BMME (45)	BMVE (95)	PBMA (120)
Le Croisic	6,13	5,40	4,25	3,30	2,00	0,70	-0,03
Le Pouliguen	6,15	5,45	4,30	3,31	2,05	0,80	0,04
Pornichet	6,22	5,50	4,40	3,41	2,10	0,85	-0,01
Saint-Nazaire	6,59	5,85	4,65	3,57	2,20	0,85	-0,02
Saint-Gildas	6,32	5,55	4,40	3,43	2,00	0,75	0,05
Pornic	6,54	5,80	4,65	3,57	2,20	0,80	-0,02
Fromentine	6,01	5,25	4,20	3,20	1,95	1,00	0,44
L'Herbaudière	6,21	5,50	4,40	3,36	2,10	0,80	-0,02

² Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

³ PHMA : plus haute mer astronomique ; PMVE : pleine mer moyenne de vives-eaux ; PMME : pleine mer moyenne de mortes-eaux ; NM : niveau moyen ; BMME : basse mer moyennes de mortes-eaux ; BMVE : basse mer moyenne de vives-eaux ; PBMA : plus basse mer astronomique.

**TABLEAU 3.2 : NIVEAUX CARACTERISTIQUES DE LA MAREE LE LONG DU LITTORAL DE LOIRE-ATLANTIQUE EN METRE
 IGN69 (SOURCE : SHOM 2009)**

	PHMA (120)	PMVE (95)	PMME (45)	Niveau moyen	BMME (45)	BMVE (95)	PBMA (120)
Le Croisic	3,27	2,54	1,39	0,44	-0,86	-2,16	-2,89
Le Pouliguen	3,233	2,533	1,383	0,393	-0,867	-2,117	-2,877
Pornichet	3,293	2,573	1,473	0,483	-0,827	-2,077	-2,937
Saint-Nazaire	3,431	2,691	1,491	0,411	-0,959	-2,309	-3,179
Saint-Gildas	3,242	2,472	1,322	0,352	-1,078	-2,328	-3,028
Pornic	3,341	2,601	1,451	0,371	-0,999	-2,399	-3,219
Fromentine	3,197	2,437	1,387	0,387	-0,863	-1,813	-2,373
L'Herbaudière	3,109	2,399	1,299	0,259	-1,001	-2,301	-3,121

3.1.2. NIVEAUX EXTREMES DE PLEINE MER

L'étude SHOM/CETMEF (2008) propose une analyse exhaustive des niveaux extrêmes de pleine mer le long des côtes de la Manche et de l'Atlantique et donne une cartographie de ces niveaux extrêmes pour différentes périodes de retour. Ces niveaux correspondent à la sommation du niveau déterministe dû à la marée astronomique et du niveau aléatoire dû aux surcotes dépressionnaires.

La carte localisée sur le littoral de Loire-Atlantique est donnée sur la figure 3.1. Il en ressort qu'il existe une variabilité spatiale le long des côtes de Loire-Atlantique des niveaux de pleine mer extrême. Pour une période de retour centennale, les valeurs sont approximativement comprises entre +3,70 et +4,10m IGN69 avec des niveaux plus importants vers Saint-Nazaire et sur le littoral de Saint-Brévin-les-Pins.

De manière pratique, on peut observer que les valeurs sont d'autant plus importantes que l'on se trouve dans des zones littorales en forme de goulets favorisant l'accumulation de l'eau au contraire de zones plus ouvertes. Par ailleurs, on peut généralement aussi observer des valeurs plus importantes au Sud qu'au Nord.

3.1.3. SURCOTES ET DECOTES

Le niveau de l'eau peut subir en raison des phénomènes atmosphériques spécifiques (variation de la pression barométrique, présence de vents) des surcotes et des décotes assez brusques et d'amplitudes pouvant être de quelques dizaines de centimètres à la côte.

De manière pratique, les variations de pression atmosphérique peuvent faire varier le niveau de la mer par effet de « baromètre inverse » à savoir que les dépressions font augmenter le niveau statique de la mer et inversement lors de la présence de régimes anticycloniques. Les modifications du niveau moyen de la mer sont de l'ordre de 1cm par hPa de différence avec la pression atmosphérique de référence de 1013 hPa.

Les vents, suivant qu'ils soufflent de terre ou de mer, engendrent des décotes ou surcotes qui peuvent être de l'ordre de quelques dizaines de centimètres aussi. Lors des tempêtes, les deux effets générateurs de surcotes (dépression, vent de mer) sont généralement combinés, ce qui entraîne des valeurs importantes.

L'étude SHOM/CETMEF de 2008 sur les niveaux extrêmes de pleines mers donne des valeurs des surcotes littorales sur le littoral de Loire-Atlantique. Même si la lecture des données depuis le graphique présenté en figure 3.2 n'est pas immédiate, nous pouvons observer les relations suivantes au niveau de la pointe Saint-Gildas :

- surcote de période de retour annuelle (1 an) : entre 0,60m et 0,70m,
- surcote de période de retour décennale (10 ans) : de l'ordre de 0,90m,
- surcote de période de retour centennale (100 ans) : entre 1,10m et 1,20m.

Par ailleurs, le projet Discobole⁴ a permis de déterminer par reconstitution numérique que la surcote maximale observée entre le 01/01/1979 et le 31/12/2003 a été de 1,35m.

À la côte, la houle déferlante génère une surélévation du niveau moyen de l'eau communément appelée effet de « set-up ». Les valeurs de cette surélévation dynamique dépendent essentiellement des caractéristiques des états de mer mais aussi de la morphologie des plages (plages réfléchives ou dissipatives). Finalement, le battement des vagues sur la ligne de rivage (appelé jet de rive ou « swash » selon la terminologie anglo-saxonne) vient se rajouter à l'ensemble des contributions précédemment évoquées. La somme du « set-up » et du « swash » est communément appelée « run-up ».

Stockdon et al. (2006) ont proposé une approche générale pour calculer les effets de run-up sur les plages naturelles en faisant la distinction entre les contributions dues au set-up et au swash. La formulation est la suivante :

$$R_2 = 1.1(0.35\beta_f(H_0L_0)^{1/2} + \frac{[H_0L_0(0.563\beta_f^2 + 0.004)]^{1/2}}{2})$$

Avec β_f pente moyenne au niveau de la ligne de rivage, H_0 hauteur significative au large, L_0 longueur d'onde au large.

⁴ Le projet Discobole (Données pour le dimensionnement des Structures Côtières et des Ouvrages de BOrd de mer à Longue Echéance) vise à estimer l'évolution à long terme (100 ans) de certaines conséquences du changement climatique sur le climat maritime et côtier, afin d'améliorer le dimensionnement et la gestion à long terme des ouvrages d'eau (digues, brise-lames, etc.). Le projet a été mené à bien entre 2004 et 2006 par les départements LNHE et SPE d'EDF R&D, associés au CETMEF, à l'Université de Bretagne Occidentale, et au Laboratoire de Géographie Physique (CNRS).

3.2. COURANTS GENERAUX

Sur la frange côtière, les courants généraux de marée sont alternatifs et orientés vers l'Est au flot et vers l'Ouest au jusant. La circulation résiduelle de la marée apparaît très complexe sur le secteur d'étude contrainte par les îles, l'estuaire et les plateaux rocheux. Les courants sont relativement faibles et la circulation peut être de ce fait dominée par les effets du vent.

Malgré tout, les courants de marée peuvent localement être plus importants en raison de la présence d'embouchures (estuaire de la Loire) ou de phénomènes de remplissage/vidange des baies (baie de Bourgneuf, baie de Pont Mahé). La carte présentée en figure 3.3 montre la répartition des courants de marée en surface et au fond au maximum de flot pour un coefficient de 100 (le 18 mai 2007 à 3h00) et par temps calme (carte extraite de PREVIMER⁵). Elle met en évidence que les vitesses les plus élevées sur le secteur côtier sont liées au remplissage de la baie de Bourgneuf au moment du pic de flot, ainsi qu'au débit de la Loire. Des vitesses élevées sont également observées dans la baie de Pont-Mahé au Nord du secteur d'étude.

Tessier (2006) a confirmé que les vitesses de courant liées à la marée sont généralement faibles sur le secteur (figure 3.4) permettant une stratification thermique estivale et des circulations liées au vent et aux gradients de densité, générés principalement par la Loire et la Vilaine.

3.3. VENTS

Le rôle du vent est multiple : il engendre des courants de surface et de l'agitation, génère des surcotes et des décotes marégraphiques, et est à l'origine du transport éolien des sédiments sur l'estran et dans les dunes.

Sur toute la côte Atlantique, les vents du secteur Ouest sont les plus fréquents et les plus forts.

Une vue générale est brièvement présentée à partir des données chiffrées des stations météorologiques du sémaphore du Talut (Belle-Île) représentatif du régime de vents au large. Les mesures ont été effectuées sur la période 1985-2004. Il s'agit de vents horaires à 10 m moyennés sur 10 minutes.

Le rose des vents (figure 3.5) indique la dominance des vents de secteur Sud-Ouest à Nord-Ouest (vents de mer) avec une direction complémentaire dominante d'Est à Nord-Est (vents de terre). Les vents les plus forts sont du secteur Sud-Ouest à Ouest en hiver et Ouest à Nord-Ouest au printemps et en Automne.

⁵ www.previmer.org : Système pré-opérationnel permettant d'obtenir des prévisions à court terme (48h) de l'environnement côtier (état de la mer, les courants, les niveaux de marée, la température) sur les trois façades métropolitaines Manche, Atlantique et Méditerranée. Projet coordonné par Ifremer en partenariat avec le Service Hydrographique de la Marine, Météo France, L'Institut de Recherche pour le Développement, l'Institut Universitaire Européen de la Mer et le Technopôle Brest Iroise.

3.4. ETATS DE MER AU LARGE

3.4.1. DONNEES DISPONIBLES

Les états de mer au large ont été étudiés à partir des résultats de la base de données ANEMOC⁶ (Atlas Numérique d'Etats de Mer Océaniques et Côtiers) développée conjointement par EDF R&D LNHE et le CETMEF.

Il s'agit de résultats de simulations numériques rétrospectives sur une période de 23 ans et 8 mois allant du 01/01/1979 au 31/08/2002. Les simulations ont été effectuées à l'aide du logiciel de modélisation des états de mer TOMAWAC développé par EDF-LNHE avec le soutien du CETMEF. TOMAWAC est un logiciel dit de « troisième génération » qui modélise l'évolution en espace et en temps du spectre directionnel de variance de la surface de la mer. Le forçage du modèle est les champs de vent de la ré-analyse ERA-40 (ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Le niveau d'eau a été pris constant (niveau moyen de la marée) et sans courants de marée (approche stationnaire)

En ce qui concerne les données des états de mer du large, deux séries de données ont été étudiées aux points COAST_0345 et COAST_0152 localisés sur la figure 3.6.

3.4.2. REGIME MOYEN DES ETATS DE MER DU LARGE

L'étude du régime moyen permet d'établir les paramètres statistiques des conditions moyennes annuelles observables sur un site donné (houle dépassée 50% du temps en moyenne par exemple etc...).

La distribution statistique des hauteurs et période des états de mer du large issue de l'analyse des deux séries temporelles est présentée en figures 3.7, 3.8 et 3.9. Il s'agit d'indiquer les fréquences d'apparition par secteur de provenance des hauteurs de vagues et des périodes (en pourcentages). Ces figures montrent que :

- le secteur dominant de provenance des états de mer est le secteur Ouest qui correspond aussi au secteur ayant des hauteurs les plus fortes,
- les hauteurs des vagues sont inférieures à 2,0m pendant plus de la moitié du temps (56 à 60%). Les états de mer supérieurs à 4,0m représentent environ 10 % du temps,
- les états de mer ont une période de pic généralement comprise entre 7 et 15s.

⁶ <http://anemoc.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/> : base de données des conditions d'états de mer obtenues le long des côtes françaises Atlantique - Manche - Mer du Nord par simulation numérique rétrospective sur la période allant du 1er janvier 1979 au 31 août 2002, soit près de 24 ans. Les simulations ont été effectuées avec le logiciel de modélisation des états de mer TOMAWAC, développé par EDF R&D - LNHE avec le soutien du CETMEF.

3.4.3. REGIME EXTREME DES ETATS DE MER DU LARGE

L'analyse des états de mer extrêmes (dynamique des tempêtes) aux points COAST_345 et COAST_152 est basée sur l'utilisation de la méthode du renouvellement. Cette méthode consiste à identifier dans l'échantillon de travail un certain nombre de tempêtes au-dessus d'un seuil défini, de ne garder que le maximum de chacune de ces tempêtes puis d'ajuster une loi statistique à l'échantillon ainsi formé. La connaissance des paramètres de la loi statistique permet ensuite d'extrapoler à des valeurs ayant des périodes de retour importantes (ou des fréquences d'apparition très faibles).

Les résultats obtenus pour les deux points ANEMOC du large sont présentés sur les graphiques de la figure 3.10 et rappelés dans le tableau ci-après (ajustement à une loi théorique de Weibull à 3 paramètres) :

TABLEAU 3.3 : REGIME EXTREME DES HOULES AU LARGE (HAUTEURS ET INTERVALLES DE CONFIANCE A 90%)

Période de retour	Hauteur significative (en m) au point COAST 345	Hauteur significative (en m) au point COAST 152
1 an	9,5 [9,0 – 9,9]	10,0 [9,5 – 10,5]
5 ans	11,5 [10,7 – 12,3]	12,3 [11,4 – 13,1]
10 ans	12,3 [11,4 – 13,3]	13,2 [12,2 – 14,2]
20 ans	13,1 [12,0 – 14,2]	14,1 [13,0 – 15,3]
50 ans	14,2 [12,9 – 15,5]	15,3 [13,9 – 16,7]
100 ans	15,0 [13,5 – 16,5]	16,2 [14,7 – 17,8]

3.5. ETATS DE MER EN ZONE COTIERE

3.5.1. DONNEES DISPONIBLES

Les états de mer en zone côtière (dans des profondeurs comprises entre -20,0m CM et -30,0m CM où les processus de réfraction ont modifié les propriétés de la houle du large) peuvent être étudiés à l'aide de quatre points extraits de la base de données ANEMOC : COAST_3521, COAST_2581, COAST_2601 et COAST_2627 (figure 3.6).

En chacun de ces différents points, il sera donné en suivant les caractéristiques des régimes moyens et extrêmes.

3.5.2. REGIME MOYEN DES ETATS DE MER EN ZONE COTIERE

Les statistiques des états de mer en zone côtière sont données pour les quatre points ANEMOC en figures 3.11 à 3.13.

Ces figures font ressortir :

- aux points COAST_3521 et COAST_2581 (bénéficiant de la protection de Belle-Île) :
 - une dominance des houles en provenance du Sud-Ouest,
 - près de 89% des états de mer sont inférieurs à 2,0m,
 - les houles dépassent rarement 3,0m et proviennent des secteurs N225 et N247,5 respectivement pour les points COAST_3521 et COAST_2581.
- aux points COAST_2601 et COAST_2627 (plus ouverts sur les houles du large) :
 - les états de mer proviennent de l'Ouest,
 - les houles sont plus intenses : celles inférieures à 2,0m ne représentent plus que 74% du temps et elles peuvent dépasser 4,0 m.

3.5.3. REGIME EXTREME DES ETATS DE MER EN ZONE COTIERE

Les houles extrêmes pouvant être observées en zone côtière aux quatre points ANEMOC sont données en figure 3.14 et rappelées dans le tableau suivant :

TABLEAU 3.4 : REGIME EXTREME DES HOULES EN ZONE COTIERE (HAUTEURS ET INTERVALLE DE CONFIANCE A 90%)

Période de retour	Hauteur significative en m au point COAST_3521	Hauteur significative en m au point COAST_2581	Hauteur significative en m au point COAST_2601	Hauteur significative en m au point COAST_2627
1	4,4 [4,2 – 4,6]	5,3 [5,1 – 5,6]	8,2 [7,8 – 8,6]	8,0 [7,6 – 8,4]
5	5,3 [4,9 – 5,6]	6,4 [6,0 – 6,9]	10,2 [9,4 – 11,0]	9,9 [9,1 – 10,7]
10	5,7 [5,2 – 6,1]	6,9 [6,4 – 7,4]	11,0 [10,1 – 12,0]	10,7 [9,7 – 11,7]
20	6,0 [5,5 – 6,6]	7,3 [6,7 – 7,9]	11,9 [10,7 – 13,0]	11,5 [10,3 – 12,6]
50	6,5 [5,9 – 7,1]	7,9 [7,2 – 8,6]	12,9 [11,6 – 14,3]	12,5 [11,1 – 13,8]
100	6,9 [6,2 – 7,6]	8,3 [7,5 – 9,2]	13,7 [12,2 – 15,3]	13,2 [11,7 – 14,7]

3.6. CONNAISSANCE DES ETATS DE MER EN BORDURE LITTORALE

3.6.1. PREAMBULE

Entre la zone des points ANEMOC côtiers décrits au paragraphe précédent et la côte, les processus de réfraction, de diffraction et de déferlement peuvent modifier de manière importante les propriétés intrinsèques des états de mer (hauteur significative, direction de propagation, étalement directionnel...).

À ce titre, il est nécessaire de mettre en œuvre un modèle de propagation des états de mer capable de prendre en compte ces modifications. De manière à assurer une bonne représentativité d'ensemble et avoir en particulier des conditions homogènes sur les frontières de génération, l'emprise du modèle sera suffisamment grande pour être forcé par les données de houle du large. Les résultats seront utilisés sur une zone que l'on qualifiera de bordure littorale située entre les points ANEMOC côtiers et la côte à des profondeurs comprises entre -10,0m CM à -15,0m CM.

3.6.2. MODELE DE TRANSFERT DES ETATS DE MER DU LARGE A LA BORDURE LITTORALE

Le transfert des états de mer du large à la bordure littorale a été fait à l'aide du logiciel TOMAWAC (issu de la chaîne de calcul TELEMAR et présenté en annexe 1). Comme décrit brièvement plus haut, ce modèle dit de « troisième génération » permet de générer et propager les états de mer. Il prend en compte les phénomènes suivants :

- génération des vagues par apport à l'énergie du vent,
- dissipation d'énergie par moutonnement,
- dissipation d'énergie par frottement sur le fond,
- déferlement bathymétrique en faible profondeur,
- transferts d'énergie non-linéaires au sein du spectre.

Le modèle mis en œuvre dans le cadre de cette étude comprend l'ensemble de la façade de la Loire-Atlantique s'étendant au Nord jusqu'à la presqu'île de Quiberon et au Sud jusqu'à Saint-Gilles-Croix-de-Vie pour s'affranchir des effets de limite et donc s'assurer d'une bonne représentativité des épures de réfraction sur l'ensemble de la zone d'étude (figure 3.15). Au large, il s'étend jusqu'à l'isobathe -100m CM où se situent les points ANEMOC pour les données d'entrée de houle au large.

Le maillage est composé de 38 000 nœuds et 75 000 éléments (mailles). La taille des éléments varie de 10 000 m au large à 100 m à la côte. Cet affinement permet une bonne précision des résultats en zone côtière.

Le modèle a été utilisé en mode stationnaire (niveau constant pris au niveau moyen de la marée à Saint-Nazaire, pas de courants de marée). Un certain nombre d'épures de réfraction en houle unitaire ont été réalisés afin de mettre en place des matrices de transfert entre les points au large et des points d'intérêt à la côte au droit de chacune des zones à étudier. Le transfert entre les données du large aux points côtiers est linéaire.

Au total, afin de bien couvrir l'ensemble des possibilités d'exposition du littoral aux états de mer, nous avons réalisé un total de 88 simulations réparties comme suit :

TABEAU 3.5 : CARACTERISTIQUES DES EPURES DE REFRACTION REALISEES

Hauteur	houle unitaire (Hmo = 1,0m)
Période pic	Tp = 5 à 23 s toutes les 2 secondes
Direction moyenne de propagation	du N180 au N337,5 tous les 22,5°
Niveau moyen de la mer	+3,57m CM
Spectre fréquentiel	JONSWAP $\gamma = 3,3$
Spectre directionnel	Distribution type Mitsuyasu variable en fonction de la période pic

Des épures de réfraction types sont fournies en figures 3.16 et 3.17. De manière générale, on peut observer les tendances suivantes :

- le littoral au Nord du Croisic et la baie de Bourgneuf sont relativement protégés des houles,
- le littoral entre Pont-Mahé et la pointe du Croisic bénéficient de la protection des îles de Houat et Hoëdic, ainsi que de Belle île, sauf pour les houles provenant du Sud et du Sud-Ouest,
- la baie de Bourgneuf et en particulier le littoral entre le port du Collet et la Fromentine sont protégés des houles par l'île de Noirmoutier. Les houles du secteur Ouest sont les plus défavorables et atteignent la côte allant de Préfailles à la Bernerie-en-Retz,
- sur le reste du littoral les houles se propagent plus facilement jusqu'à la côte, notamment lorsqu'elles proviennent du Sud-Ouest et de l'Ouest. Pour des fortes périodes (13-19 s), on observe une concentration de l'énergie sur les plateaux rocheux situés au large (plateau du Four, chaussée des Bœufs, la Banche),
- le littoral soumis aux états de mer les plus intenses se situe entre la pointe du Croisic et la pointe de Penchâteau.

Compte tenu de la présence des points COAST_3521, COAST_2581, COAST_2601 et COAST_2627 à l'intérieur du domaine de calcul, il est possible de comparer les données fournies à ces points d'une part par la base de données ANEMOC et, d'autre part, par le modèle mis en œuvre dans le cadre de cette étude. L'obtention des informations de la série temporelle des états de mer fournies par le modèle au niveau des points ANEMOC côtiers se fait par transfert linéaire depuis les données du large. Les matrices de réfraction linéaire en hauteur et en direction au niveau des différents points ANEMOC côtiers sont données dans les tableaux 3.6 à 3.9.

La comparaison des régimes moyens des deux sources de données montrent des différences assez importantes tant au niveau des hauteurs que des périodes (figures 3.18 et 3.19). Une étape de calibration a donc été mise en œuvre afin d'assurer une bonne correspondance entre les régimes moyens donnés aux points ANEMOC côtiers et ceux donnés suite au transfert linéaire depuis les données du large. Cette étape a consisté à appliquer des coefficients de pondération aux données du large afin de retrouver les mêmes régimes moyens au niveau des points ANEMOC côtiers. Cette méthodologie a été décrite en détail dans une note émise par Sogreah le 07 Avril 2009 à l'attention de la DREAL et validée par un retour courrier du CETMEF en date du 23 Avril 2009. Les résultats de la phase de calibration sont présentés sur les figures 3.20 et 3.21.

Une fois calibré, il est alors possible d'utiliser le modèle pour étudier les caractéristiques des états de mer au droit des plages à l'étude. Ces résultats sont fournis dans chacun des fascicules relatifs aux différentes unités sédimentaires.

3.7. GENERATION DES CLAPOTS PAR LES VENTS

A l'intérieur des traicts (traict de Pen-Bé et traict du Croisic) ainsi qu'au niveau de la baie de Bourgneuf (pour la partie Sud et la façade Est de l'île de Noirmoutier), les clapots levés par les vents locaux peuvent devenir prépondérants vis-à-vis des houles océaniques.

Lorsque nécessaire, l'estimation des valeurs caractéristiques des clapots sera donnée à l'aide de la formulation proposée par trois scientifiques Sverdrup, Munk et Bretschneider en 1973 (communément appelée formulation SMB73). Cette formulation permet de calculer les paramètres de hauteur significative et de période des clapots pour des conditions de vent données (intensité du vent, durée d'action, longueur de fetch, profondeur moyenne).

TABLEAU 3.6 : MATRICE DE TRANSFERT LINEAIRE AU POINT ANEMOC COAST_3521

Transfert linéaire en hauteur									
		<i>Directions (N)</i>							
		180	202,5	225	247,5	270	292,5	315	337,5
<i>Périodes (s)</i>	5	0,752	0,855	0,925	0,823	0,597	0,428	0,203	0,051
	7	0,623	0,697	0,927	0,790	0,437	0,333	0,183	0,054
	9	0,457	0,599	0,876	0,717	0,394	0,305	0,221	0,096
	11	0,382	0,599	0,857	0,660	0,365	0,313	0,240	0,134
	13	0,413	0,677	0,831	0,631	0,352	0,312	0,46	0,096
	15	0,487	0,746	0,821	0,629	0,363	0,316	0,252	0,134
	17	0,563	0,812	0,835	0,645	0,377	0,323	0,261	0,156
	19	0,633	0,867	0,857	0,667	0,400	0,333	0,72	0,153
	21	0,692	0,914	0,880	0,692	0,420	0,342	0,270	0,144
	23	0,739	0,954	0,903	0,714	0,439	0,350	0,275	0,140
Transfert linéaire en direction									
		<i>Directions (N)</i>							
		180	202,5	225	247,5	270	292,5	315	337,5
<i>Périodes (s)</i>	5	191,3	205,7	224,4	238,3	260,3	277,2	279,6	278,3
	7	192,1	206,2	226,9	241,4	262,9	275,8	272,5	268,8
	9	197,4	209,2	226,5	239,0	255,0	267,6	267,3	264,5
	11	201,1	213,1	225,6	237,7	252,5	263,5	264,1	255,7
	13	207,2	216,3	225,0	236,0	250,4	262,0	263,1	251,9
	15	212,4	218,3	224,8	235,1	248,2	260,5	261,7	252,3
	17	215,3	219,2	224,4	234,9	246,4	258,8	260,6	253,1
	19	217,0	219,7	224,2	234,4	244,5	256,9	258,6	254,1
	21	218,0	220,0	224,1	234,1	243,3	255,5	258,5	254,7
	23	218,5	220,1	223,9	233,9	242,3	254,3	257,8	255,0

TABLEAU 3.7 : MATRICE DE TRANSFERT LINEAIRE AU POINT ANEMOC COAST_2581

Transfert linéaire en hauteur									
		<i>Directions (N)</i>							
		180	202,5	225	247,5	270	292,5	315	337,5
<i>Périodes (s)</i>	5	0,846	0,919	0,972	0,940	0,741	0,464	0,251	0,091
	7	0,716	0,866	0,890	0,978	0,730	0,358	0,204	0,072
	9	0,639	0,697	0,782	0,888	0,631	0,354	0,206	0,099
	11	0,485	0,530	0,718	0,772	0,491	0,315	0,220	0,163
	13	0,432	0,516	0,708	0,679	0,425	0,279	0,205	0,170
	15	0,428	0,542	0,721	0,635	0,406	0,262	0,193	0,142
	17	0,454	0,596	0,741	0,610	0,404	0,264	0,195	0,122
	19	0,474	0,643	0,760	0,605	0,409	0,271	0,211	0,112
	21	0,496	0,695	0,778	0,609	0,421	0,280	0,201	0,108
	23	0,523	0,736	0,788	0,611	0,433	0,291	0,206	0,106
Transfert linéaire en direction									
		<i>Directions (N)</i>							
		180	202,5	225	247,5	270	292,5	315	337,5
<i>Périodes (s)</i>	5	186,3	205,1	225,6	244,6	259,6	278,0	291,4	293,8
	7	181,4	205,8	226,4	247,6	264,4	284,6	288,0	285,3
	9	188,5	199,1	227,5	246,4	261,5	274,5	279,0	275,6
	11	186,2	198,0	232,0	245,7	258,8	269,2	270,9	264,6
	13	468,9	201,0	234,3	244,9	255,4	266,5	268,4	260,6
	15	472,6	210,7	234,8	243,5	252,3	264,0	266,6	259,8
	17	191,9	219,5	235,5	242,8	249,6	260,8	264,8	259,7
	19	199,7	224,7	236,0	242,6	248,5	258,4	262,8	260,1
	21	206,5	228,0	236,2	242,9	248,2	257,1	262,1	260,5
	23	213,0	230,3	236,5	243,2	247,9	255,7	261,0	260,4

DIRECTION REGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'AMENAGEMENT ET DU LOGEMENT DES PAYS DE LA LOIRE
 ETUDE RELATIVE A LA GESTION DURABLE DU TRAIT DE COTE DE LA REGION DES PAYS DE LA LOIRE
FASCICULE A : CONDITIONS GENERALES

TABLEAU 3.8 : MATRICE DE TRANSFERT LINEAIRE AU POINT ANEMOC COAST_2601

Transfert linéaire en hauteur									
		<i>Directions (N)</i>							
		180	202,5	225	247,5	270	292,5	315	337,5
Périodes (s)	5	0,967	0,997	0,998	0,998	0,973	0,845	0,632	0,381
	7	0,986	0,994	0,992	0,993	0,991	0,842	0,555	0,283
	9	0,940	0,960	0,952	0,950	0,949	0,762	0,469	0,282
	11	0,895	0,942	0,906	0,903	0,911	0,697	0,399	0,285
	13	0,854	0,962	0,887	0,884	0,891	0,698	0,387	0,258
	15	0,838	1,004	0,900	0,894	0,888	0,738	0,429	0,249
	17	0,836	1,078	0,929	0,928	0,901	0,793	0,486	0,253
	19	0,861	1,144	0,73	0,967	0,925	0,839	0,550	0,270
	21	0,894	1,206	1,013	1,007	0,953	0,877	0,603	0,290
	23	0,926	1,258	1,050	1,042	0,78	0,906	0,647	0,310
Transfert linéaire en direction									
		<i>Directions (N)</i>							
		180	202,5	225	247,5	270	292,5	315	337,5
Périodes (s)	5	181,9	202,6	225,0	247,5	268,4	286,4	305,3	317,0
	7	180,3	202,5	225,1	247,8	270,5	289,6	311,4	319,0
	9	182,3	203,9	226,1	248,5	270,6	288,5	307,9	311,9
	11	185,8	207,4	228,1	249,4	270,3	287,6	307,5	306,7
	13	190,2	211,3	230,2	250,1	269,5	285,6	304,9	307,0
	15	194,8	214,4	231,7	250,5	268,4	283,1	299,0	307,0
	17	198,8	216,5	233,1	250,7	267,6	281,4	294,6	305,4
	19	202,5	217,9	233,9	250,8	266,9	279,9	290,6	302,5
	21	205,2	218,8	234,4	251,0	266,4	278,8	288,6	299,6
	23	207,2	219,5	234,9	251,1	266,0	278,0	287,0	297,3

TABEAU 3.9 : MATRICE DE TRANSFERT LINEAIRE AU POINT ANEMOC COAST_2627

Transfert linéaire en hauteur									
		<i>Directions (N)</i>							
		180	202,5	225	247,5	270	292,5	315	337,5
<i>Périodes (s)</i>	5	0,872	0,981	0,998	0,998	0,870	0,615	0,615	0,305
	7	0,826	0,969	0,987	0,994	0,879	0,505	0,505	0,192
	9	0,693	0,842	0,901	0,952	0,802	0,417	0,417	0,211
	11	0,603	0,714	0,787	0,900	0,758	0,350	0,350	0,212
	13	0,568	0,634	0,711	0,872	0,764	0,374	0,374	0,192
	15	0,564	0,598	0,678	0,874	0,798	0,457	0,457	0,208
	17	0,571	0,590	0,674	0,897	0,845	0,541	0,541	0,241
	19	0,578	0,598	0,686	0,932	0,894	0,624	0,624	0,287
	21	0,584	0,609	0,701	0,968	0,937	0,675	0,675	0,329
	23	0,589	0,622	0,715	1,000	0,975	0,720	0,720	0,365
Transfert linéaire en direction									
		<i>Directions (N)</i>							
		180	202,5	225	247,5	270	292,5	315	337,5
<i>Périodes (s)</i>	5	185,5	203,7	225,0	247,5	268,9	286,6	301,1	310,5
	7	185,4	203,1	224,9	247,5	270,4	289,5	305,7	312,3
	9	191,2	205,6	224,3	246,0	267,7	285,8	300,0	304,1
	11	196,6	207,8	223,2	243,1	262,8	281,5	296,0	299,1
	13	200,7	209,6	222,5	240,4	258,4	276,4	289,2	296,8
	15	203,3	211,1	222,6	238,8	255,1	271,4	282,2	291,0
	17	204,8	212,1	222,6	237,1	252,9	268,0	277,7	284,8
	19	205,9	212,9	222,8	236,3	251,5	265,1	274,2	279,9
	21	206,7	213,4	222,9	235,7	250,4	263,1	272,3	276,7
	23	207,2	213,7	223,0	235,4	249,6	261,6	270,7	274,6

3.8. POINT SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

3.8.1. ELEVATION DU NIVEAU MOYEN DES MERS

Le rapport émis en 2007 par le Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (rapport GIEC 2007) établit clairement que le niveau moyen de la mer est affecté par une remontée lente qui peut être principalement imputée au réchauffement climatique.

Les prédictions sur l'évolution du niveau moyen de la mer sont basées sur six scénarii d'évolution des concentrations en gaz à effet de serre et en aérosols dans l'atmosphère qui sont rattachés à des projets d'évolutions de notre société :

- scénario A1 : monde soumis à des changements économiques très rapides avec une diminution significative des différences de revenus de part le monde. Ce scénario est divisé en trois sous-scénarii dépendant des comportements vis-à-vis des ressources fossiles :
 - scénario A1T : pas d'utilisation des énergies fossiles,
 - scénario A1B : utilisation équilibrée entre les énergies fossiles et les autres sources d'énergie,
 - scénario A1F : utilisation intensive des énergies fossiles.
- scénario A2 : monde très hétérogène avec préservation des identités locales à l'échelle mondiale,
- scénario B1 : monde soumis à des changements économiques très rapides mais avec la mise en place d'une économie de services et d'information introduisant des technologies propres
- scénario B2 : monde où les solutions économiques, sociales et environnementales sont trouvées à l'échelle locale.

Selon ces scénarii, des prévisions sur l'augmentation du niveau moyen de la mer à horizon 2100 ont été calculées et sont données en figure 3.22. Elles montrent que le niveau moyen de la mer pourrait augmenter de +0,18 à +0,59m d'ici 2100. Par ailleurs, cette augmentation ne serait pas uniforme sur l'ensemble des régions et serait plus marquée dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud.

De manière pratique, le rapport GIEC 2007 tablait sur le scénario A1B comme étant le scénario le plus vraisemblable qui prévoit une élévation du niveau de la mer comprise entre +0,20 et +0,50m (figure 3.24). Cependant, les mesures récentes des taux d'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère montrent des taux supérieurs à ceux envisagés dans le scénario le plus pessimiste retenu en 2007 (scénario A1F). Ainsi, le taux d'augmentation des émissions de CO₂ n'a pas cessé de croître depuis 2000 passant de moins de +2,0% à +3,3% (figure 3.22).

En l'état actuel des connaissances et de la documentation officielle reconnue par un panel d'experts internationaux, il convient de rester sur les valeurs annoncées dans le rapport GIEC 2007 en attente d'un nouveau rapport actualisé.

Ces données ont récemment été confirmées par l'ONERC⁷ qui a produit un document de synthèse en février 2010. Ce document propose de retenir en France les valeurs suivantes (à partir de niveau moyen de la mer mesurée en 2000 comme référence) :

- Hypothèse optimiste : +40cm
- Hypothèse pessimiste : +60cm
- Hypothèse extrême : +100cm

Dans le cadre de la présente étude, **nous garderons la valeur de +0,60m à l'horizon 2100** correspondant à la fois à la limite haute du scénario le plus défavorable du rapport du GIEC de 2007 (scénario A1F) et à l'hypothèse pessimiste du rapport de synthèse de l'ONERC de 2010.

3.8.2. AUGMENTATION DE LA FREQUENCE ET DE L'INTENSITE DES TEMPETES (ETATS DE MER)

Outre l'élévation du niveau de la mer, les changements climatiques pourraient également engendrer des modifications sur la circulation atmosphérique ce qui pourraient être à l'origine d'un nombre plus important de tempêtes et de plus forte intensité.

Pour l'Atlantique Nord-Est, deux études (Carter et Draper, 1988 et Grevemeyer et al. 2000) montrent qu'il y aurait une augmentation de la fréquence et de l'intensité des fortes tempêtes dans l'Atlantique Nord. Plus récemment, une nouvelle étude conclut que le nombre de fortes tempêtes dans l'Atlantique Nord a augmenté au cours des dernières 50 années aux hautes latitudes et diminué aux latitudes moyennes (Wang, Swail et Zwiers, 2006). Finalement, une étude récente menée dans le cadre du projet européen MICORE⁸ a pu établir une tendance à l'augmentation des hauteurs significatives des états de mer de +0,008m/an entre 1970 et 2001 au point de coordonnées géographiques 45°N/5°W.

De manière pratique, il semblerait qu'il se dégage une tendance à l'augmentation des tempêtes mais il est encore difficile de statuer avec précision d'autant qu'il reste beaucoup d'interrogations sur les possibles modifications atmosphériques au niveau de l'oscillation Nord-Atlantique (index NAO).

Il n'existe donc pas à l'heure actuelle de paramètres facilement intégrables dans les études d'ingénierie côtière pour prendre en compte les possibles phénomènes d'augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes.

oOo

⁷ ONERC : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique. <http://onerc.org/>

⁸ MICORE: Morphological Impacts and COastal Risks induced by Extreme storm events. <https://www.micore.eu/>

4. DESCRIPTION GENERALE DES UNITES SEDIMENTAIRES LITTORALES

4.1. INTRODUCTION

Le littoral des Pays de la Loire est divisé en 11 cellules hydrosédimentaires élémentaires homogènes (ou unité sédimentaire US) depuis la baie de Pont Mahé au Nord à celle de l'Aiguillon au Sud (figure 4.1).

La Loire-Atlantique possède 5 unités sédimentaires numérotées de 1 à 5. Du Nord au Sud, les unités sont les suivantes (figure 4.2) :

- unité sédimentaire n°1 (USI) : de la baie de Pont -Mahé à la pointe du Castelli,
- unité sédimentaire n°2 (USII) : de la pointe du C astelli à la pointe de Chémoulin,
- unité sédimentaire n°3 (USIII) : de la pointe de Chémoulin au port de Saint-Nazaire,
- unité sédimentaire n°4 (USIV) : de Saint-Brévin-Les-Pins à la pointe Saint-Gildas,
- unité sédimentaire n°5 (USV) : de la pointe Saint -Gildas à Noirmoutier-en-l'Île.

Pour chacune des unités sédimentaires, il a été nécessaire de réaliser un découpage en sous-secteurs homogènes déterminés en fonction des spécificités morphologiques du littoral : présence d'un cap, présence de digues portuaires, orientation du trait de côte, littoral à falaise ou à dominance de plage, marais.... Ce sous-découpage a pour objectif de réduire le périmètre d'étude en zones pouvant être considérées et étudiées quasiment indépendamment les unes des autres.

Chacun de ces sous-secteurs a fait l'objet d'une étude hydrosédimentaire de détail visant à définir le schéma de fonctionnement des littoraux et établir la cartographie des phénomènes d'érosion et de submersion marine.

Les résultats de ces réflexions sont présentés dans des fascicules propres à chaque unité sédimentaire (5 fascicules au total).

4.2. USI – DE LA BAIE DE PONT MAHE A LA POINTE DU CASTELLI

4.2.1. DESCRIPTION GENERALE

L'unité sédimentaire I (appelée USI) s'étend sur un linéaire de près de 18km depuis la pointe du Bile à la pointe du Castelli. Il s'agit de l'unité sédimentaire située la plus au Nord du littoral de Loire-Atlantique.

Cette unité sédimentaire couvre les communes du Pénestin, d'Assérac, de Saint-Molf, de Mesquer et de Piriac-sur-mer.

La morphologie du littoral est quasiment également répartie entre les zones à dominante de plages (environ 56% en linéaire soit 9,6km) et les zones à dominante de falaises vives (environ 44% en linéaire soit 8,4km). Le littoral est interrompu par un marais maritime : le traict de Pen-Bé de 270ha de superficie.

La majeure partie du littoral s'ouvre au secteur Nord-Ouest (depuis l'embouchure du traict de Pen-Bé à la pointe du Castelli), à l'exception de la baie de Pont-Mahé faisant face au secteur Sud-Ouest. Au large, se trouvent Belle-Ile en mer, l'île d'Houat et l'île du Hoëdic qui offrent une protection naturelle de la zone face aux houles du large.

4.2.2. DECOPAGE EN SOUS-SECTEURS HOMOGENES

Cette unité sédimentaire a été découpée en quatre sous-secteurs homogènes (figure 4.3) :

- USI-A : la baie de Pont-Mahé. Il s'agit d'une zone délimitée par la pointe du Bile et la pointe de Pen-Bé,
- USI-B : le traict de Pen-Bé,
- USI-C : le littoral de Mesquer caractérisé par la succession de plusieurs plages poches sableuses délimitées par des éperons rocheux naturels ou artificiels,
- USI-D : les falaises vives de Piriac-sur-Mer.

4.3. USII – DE LA POINTE DU CASTELLI A LA POINTE DE CHEMOULIN

4.3.1. DESCRIPTION GENERALE

L'unité sédimentaire II (appelée USII) s'étend sur un linéaire de près de 53km entre la pointe du Castelli et la pointe de Chémoulin.

Les communes concernées sont Piriac-sur-mer, la Turballe, le Croisic, Batz-sur-Mer, le Pouliguen, la Baule-Escoublac, Pornichet et Guérande.

La morphologie du littoral est quasiment également répartie entre les zones à dominante de plages (environ 59% en linéaire soit 29,8km) et les zones à dominante de falaises vives (environ 41% en linéaire soit 20,9km). Le littoral est interrompu par les marais salants de Guérande qui communiquent avec la mer depuis le traict du Croisic et l'étier du Pouliguen (qui débouche dans la baie de la Baule).

Entre la pointe du Castelli et la presqu'île du Croisic, le littoral présente une forme convexe et ouverte sur le secteur Ouest. Les îles de Belle-Ile en mer, l'île d'Houat et l'île du Hoëdic offrent une protection naturelle de la zone face aux houles du large. Entre la presqu'île du Croisic et la pointe de Chémoulin, le littoral s'ouvre globalement sur un secteur Sud-Est et est découpé par la baie de la Baule située légèrement en retrait.

4.3.2. DECOUPAGE EN SOUS-SECTEURS HOMOGENES

Cette unité sédimentaire a été découpée en six sous-secteurs homogènes (figure 4.4) :

- USII-A : de la pointe du Castelli au port de la Turballe. Il s'agit d'une zone à dominante de plages en présence de falaises d'arrière plage. Le port de la Turballe offre une segmentation artificielle nette du littoral,
- USII-B : les plages de Pen-Bron. Il s'agit de plages naturelles situées au Sud du port de la Turballe. La délimitation au Sud est naturelle avec l'entrée du traict du Croisic,
- USII-C : le traict du Croisic,
- USII-D : les falaises du Croisic, de Batz-sur-Mer et du Pouliguen (la côte sauvage),
- USII-E : la baie de la Baule-Escoublac délimitée à l'Ouest par la pointe de Penchâteau et à l'Est par le port de Pornichet,
- USII-F : les plages de Pornichet jusqu'à la pointe de Chémoulin.

4.4. USIII – DE LA POINTE DE CHEMOULIN AU PORT DE SAINT-NAZAIRE

4.4.1. DESCRIPTION GENERALE

L'unité sédimentaire III (appelée USIII) s'étend sur un linéaire de près de 11km allant de la pointe de Chémoulin au port de Saint-Nazaire. Cette unité est entièrement située sur la commune de Saint-Nazaire. Il s'agit de la plus petite unité du littoral de Loire-Atlantique.

La morphologie du littoral est préférentiellement représentée par les falaises vives (environ 66% en linéaire soit 6,4km) puis par les plages (environ 44% en linéaire soit 5,1km).

Ce littoral orienté Sud-Ouest/Nord-Est borde l'embouchure Nord de l'embouchure de l'estuaire de la Loire.

4.4.2. DECOUPAGE EN SOUS-SECTEURS HOMOGENES

Cette unité sédimentaire a été découpée en trois sous-secteurs homogènes (figure 4.5) :

- USIII-A : de la pointe de Chémoulin à la pointe de l'Eve. Il s'agit d'une zone à dominante de plages avec une orientation faisant face au Sud,
- USIII-B : les falaises de Petit Gavy et de Bellefontaine,
- USIII-C : les plages de Saint-Nazaire jusqu'au port.

4.5. USIV – DE SAINT-BREVIN-LES-PINS A LA POINTE SAINT-GILDAS

4.5.1. DESCRIPTION GENERALE

L'unité sédimentaire IV (appelée USIV) s'étend sur un linéaire de près de 24km depuis Saint-Brévin-les-Pins à la pointe Saint-Gildas.

Cette unité sédimentaire couvre les communes de Saint-Brévin-les-Pins, Saint-Michel-Chef-Chef, la Plaine-sur-Mer et Préfailles.

La morphologie du littoral est largement dominée par les plages (environ 81% en linéaire soit 19,2km) avec quelques zones à dominante de falaises vives (environ 17% en linéaire soit 4,4km).

Cette zone se situe au Sud de l'embouchure de l'estuaire de la Loire et est globalement ouvert sur l'Ouest.

4.5.2. DECOUPAGE EN SOUS-SECTEURS HOMOGENES

Cette unité sédimentaire a été découpée en quatre sous-secteurs homogènes (figure 4.6) :

- USIV-A : du pont de Saint-Nazaire à la pointe du Pointeau. Il s'agit d'un littoral de plages de sable,
- USIV-B : de la pointe du Pointeau à Tharon-Plage. Il s'agit d'une zone de plages proposant différentes sections successives ; Du Nord vers le Sud, on peut observer : le littoral de la pointe du Pointeau à l'Ermitage, de l'Ermitage à la Roussellerie, de la Roussellerie à Tharon-Plage,
- USIV-C : de l'extrémité Sud de Tharon-Plage au port de la Gravette. Il s'agit d'une zone à dominante de falaises,
- USIV-D : du port de la Gravette à la pointe Saint-Gildas. Il s'agit d'une zone délimitée au Nord par le port et au Sud par la pointe Saint-Gildas.

4.6. USV – DE LA POINTE SAINT-GILDAS A NOIRMOUTIER-EN-L'ÎLE

4.6.1. DESCRIPTION GENERALE

L'unité sédimentaire V (appelée USV) s'étend d'une part entre la pointe Saint-Gildas et Fromentine (au niveau de l'estacade) et comprend, d'autre part, la face orientale de l'île de Noirmoutier jusqu'à Noirmoutier-en-l'Île. Il s'agit de l'unité sédimentaire la plus importante en linéaire.

Cette unité sédimentaire couvre les communes de Préfailles, de Pornic, de la Bernerie-en-Retz, des Moutiers-en-Retz en Loire-Atlantique et de Bouin, de Beauvoir-sur-Mer, de la Barre-des-Monts, de Barbâtre, de la Guérinière, de l'Epine et de Noirmoutier-en-l'Île en Vendée.

La morphologie du littoral est répartie comme suit :

- des falaises vives (environ 24% en linéaire soit 24km),
- des plages (environ 24% en linéaire soit 24km),
- des marais protégés par des digues de protection contre la submersion marine (environ 52% en linéaire soit près de 51km).

Sur la partie continentale, le littoral possède deux orientations dominantes :

- au Nord du port du Collet, soit sur le littoral de Loire-Atlantique, l'orientation est Nord-Ouest/Sud-Est,
- au Sud du port du Collet, soit sur le littoral de Vendée, l'orientation est Nord-Est/Sud-Ouest,
- la façade orientale de l'île de Noirmoutier fait face à l'Est au niveau de la commune de Barbâtre et au Nord-Est plus au Nord jusqu'à Noirmoutier-en-l'Île.

4.6.2. DECOUPAGE EN SOUS-SECTEURS HOMOGENES

Cette unité sédimentaire a été découpée en quatre sous-secteurs homogènes (figure 4.7) :

- USV-A : de la pointe Saint-Gildas à la plage de la Boutinardièrre (non incluse). Il s'agit d'une zone à dominante de falaises vives entrecoupées de petites plages poches possédant une orientation homogène du trait de côte,
- USV-B : de la plage de la Boutinardièrre au port du Collet,
- USV-C : du port du Collet à Fromentine (jusqu'à l'estacade). Il s'agit d'une zone de digues littorales de protection contre la submersion,
- USV-D : la façade intérieure (littoral Est) de l'île de Noirmoutier jusqu'à Noirmoutier-en-l'Île.

oOo

5. METHODOLOGIE POUR LA CONNAISSANCE DES PHENOMENES EROSION ET SUBMERSION MARINE

5.1. DEFINITIONS GENERALES DE L'EROSION ET DE LA SUBMERSION MARINE

5.1.1. EROSION MARINE

L'érosion marine se traduit par un recul du trait de côte en direction de l'intérieur des terres. Elle peut affecter différents types de littoraux : les côtes sableuses (constituées de sédiments meubles en présence parfois d'un cordon dunaire) ou les falaises (de nature géologique diverse et donc de dureté variable). Le recul du trait de côte se traduit par une perte des terrains continentaux et des dommages aux biens (maisons, routes, champs cultivés,...). Il n'affecte qu'exceptionnellement les personnes.

L'évolution des plages est directement liée à l'action des agents marins (courants de déferlement de la houle, courants de marée) qui vont avoir un effet plus ou moins important en fonction de l'orientation du trait de côte, de la nature des sédiments et des actions anthropiques (ouvrages côtiers, surfréquentation des plages,...). Les érosions peuvent se traduire par des abaissements du niveau de la plage, une largeur plus faible, un recul ou une rupture du cordon dunaire.

Sur les côtes à falaise, l'action des agents marins précédemment évoqués peut être complétée par des influences continentales (ruissellement et infiltration des eaux pluviales, fracturation par le gel-dégel de l'eau située dans les fissures). L'évolution de ces zones va être dépendante de la géologie des terrains (nature et structure) et donc de la résistance plus ou moins grande des matériaux en place. Les érosions se traduisent généralement par des éboulements ou glissements de terrains.

5.1.2. SUBMERSION MARINE

Les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques (fortes dépressions et vent de mer) et marégraphiques sévères provoquant des ondes de tempête. Elles envahissent en général des terrains situés en dessous du niveau des plus hautes mers, mais aussi parfois au-dessus si des projections d'eaux marines franchissent des ouvrages de protection.

Les submersions peuvent être dues :

- à la rupture ou la destruction d'un cordon dunaire à la suite d'une érosion intensive,
- au débordement ou à la rupture de digues ou d'ouvrages de protection, ou encore à leur franchissement exceptionnel par des « paquets de mer ».

Les submersions sont en principe de courte durée (de quelques heures à quelques dizaines d'heures, exceptionnellement quelques jours), en raison de leur origine physique (franchissement lié à la marée ou à une tempête). Elles se traduisent par l'invasion de biens bâtis ou non bâtis par des eaux salées particulièrement agressives.

Lorsqu'elles sont dues à une rupture de cordon littoral, les eaux marines peuvent véhiculer d'importantes quantités de sédiments, créant des « épandages de tempêtes » qui rendent parfois les terres agricoles temporairement peu exploitables.

En cas de franchissement d'ouvrages de protection, elles peuvent entraîner des projections de sable et de galets aux effets dommageables sur les fronts de mer urbanisés.

5.2. RECOMMANDATIONS DU GUIDE METHODOLOGIQUE DES PLANS DE PREVENTION DES RISQUES LITTORAUX (PPRL)

5.2.1. PREAMBULE

Les Ministères de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques) et de l'Équipement, des Transports et du Logement (Direction de l'Aménagement Foncier et de l'Urbanisme) ont établi en 1997 un guide méthodologique pour la réalisation des plans de prévention des risques littoraux (PPRL). Ce guide définit des recommandations à suivre pour la définition des aléas érosion et submersion marine et la mise au point des différentes cartographies.

Les recommandations de ce guide sont reprises dans les deux paragraphes suivants. L'approche retenue dans le cadre de cette étude sur la base des recommandations est explicitée au chapitre 5.3. A noter que le guide est en cours de réactualisation (en mars 2012).

5.2.2. EROSION DU TRAIT DE COTE

5.2.2.1. COTES MEUBLES (PLAGES)

La zone d'aléa correspond à la bande de terrain potentiellement érodable à l'échéance de 100 ans. La zone d'aléa est délimitée par le trait de côte actuel (à date t) et sa position estimée à t+100 ans. Elle traduit la somme des actions érosives des tempêtes successives sur une période de 100 ans.

La délimitation de la zone d'aléa s'appuie sur la connaissance du taux annuel d'érosion déduit de l'observation passée du trait de côte. Son évolution est extrapolée pour le long terme sur la base de conditions hydrodynamiques considérées comme invariante dans le temps⁹.

La largeur de la zone de risque d'érosion (Lr) est égale au recul correspondant au taux d'évolution moyen annuel observé sur une période pluridécennale (Tx) multiplié par 100.

⁹ Les éventuels effets du changement climatique sur l'évolution des littoraux (par l'élévation du niveau de la mer ou le changement dans la dynamique des tempêtes) ne sont donc pas pris en compte dans l'approche méthodologique fournie par le guide.

En présence d'ouvrages de protection, l'aléa sera délimité de deux manières distinctes à l'exception des centres urbains où il sera défini au cas par cas :

- pour les ouvrages et aménagements qui ne fixent pas le trait de côte (épis, brise-lames, rechargements en sédiments, protection dunaire), la zone d'aléa est établie sur la base d'une extrapolation à 100 ans de l'évolution passée de la zone ainsi protégée. L'effet des ouvrages est donc pris en considération dans l'évolution future du trait de côte. Cela revient donc à intégrer l'efficacité passée des ouvrages et à parier sur leur pérennité. Si les ouvrages sont trop récents, une extrapolation par défaut du taux d'évolution passée du trait de côte sera préférée, en attendant de pouvoir apprécier l'impact réel des ouvrages,
- pour les ouvrages longitudinaux qui fixent la position du trait de côte (digues, enrochements), l'aléa résulte principalement de ruptures en principe limitées et rapidement réparées. Il est rare d'enregistrer un réel recul du trait de côte, sauf si les ouvrages ne sont pas dimensionnés pour les conditions hydrodynamiques du site. Dans ce cas, la zone d'aléa sera fixée en extrapolant à 100 ans l'évolution annuelle des zones voisines non protégées en s'assurant qu'elle ne présente pas une grande variabilité.

La bande littorale identifiée comme pouvant reculer est considérée comme une zone où l'aléa est fort.

5.2.2.2. COTES A FALAISES

Les falaises évoluent selon des modes complexes qui dépendent de leurs caractéristiques physique (nature, résistance des roches, pendage, fracturation, superposition de couches dures et tendres...) et de leur état (falaise vive, protégée ou non en pied par des éboulis, falaise morte...).

L'analyse de l'aléa, qui vise à évaluer la bande de terrain potentiellement érodable à l'échéance de 100 ans, repose sur deux approches complémentaires :

- l'exploitation des évènements passés ou déclarés, à partir de leur type, de leur date et de leur importance, en fonction des facteurs de prédisposition observés,
- l'exploitation du recul historique en pied et en partie haute de falaise.

À partir de ces informations, la largeur de la zone d'aléa L_r pour un tronçon de côte homogène est égale au recul correspondant au taux d'évolution moyen annuel constaté (T_x) extrapolé pour 100 ans, auquel il convient d'ajouter une marge de sécurité correspondant à la valeur du recul du trait de côte (I_{max}) consécutif à un évènement brutal, par exemple le plus intense répertorié sur ce tronçon ou la largeur du surplomb identifié ou encore le phénomène exceptionnel prévisible d'ordre centennal selon les informations disponibles.

La philosophie concernant les ouvrages de protection des falaises est identique à celle décrites pour les côtes meubles sableuses.

La bande littorale identifiée comme pouvant reculer est considérée comme une zone où l'aléa est fort.

5.2.3. SUBMERSION MARINE

L'évaluation de l'aléa consiste à étudier la zone submergée par la mer pour le niveau atteint pour une occurrence centennale (ou pour l'évènement historique extrême si celui-ci est supérieur au niveau centennal). Elle inclut les phénomènes de surcotes météorologiques et est calculée à pleine mer sur les littoraux à marée.

Dans la majorité des cas, l'expérience montre que les hauteurs d'eau sont faibles et généralement inférieures à un mètre. Par contre, la vitesse des courants peut varier, ce qui peut conduire à distinguer deux niveaux d'aléa, qualifiés de fort lorsque la vitesse est rapide et de faible à moyen lorsque la vitesse est lente.

En concertation avec le comité technique de l'étude, la prise en compte des ouvrages littoraux de protection contre les submersions marines (cordon dunaire, digues à la mer) s'est fait comme suit :

- pour les ouvrages naturels de type cordon dunaire, il sera défini si ce dernier peut être sujet à ouverture de brèches et ainsi laisser propager l'onde de marée,
- pour les ouvrages artificiels (dignes à la mer), il sera considéré que ces derniers n'offrent pas de garantie quant à la protection vis-à-vis de la submersion.

5.3. METHODOLOGIE POUR LA CONNAISSANCE DES PHENOMENES D'EROSION MARINE

Les plages littorales et les côtes à falaises vives possèdent des mécanismes d'évolution différents, en raison notamment des différences de dureté des sols (sédiments meubles et mobiles pour les plages, roches dures pour les falaises). L'établissement de l'aléa érosion marine nécessite donc la mise en œuvre d'une méthodologie spécifique à chaque type de littoral.

5.3.1. PLAGES

Comme décrit dans le guide méthodologique des plans de prévention des risques littoraux, la zone touchée par l'érosion marine correspond à la bande de terrain potentiellement érodable à une certaine échéance de temps Δt . Elle est donc délimitée par le trait de côte actuel (à date t) et sa position estimée à $t+\Delta t$ ans. Elle traduit la somme des actions érosives des tempêtes successives sur la période considérée.

La houle déferlante sur les plages est à l'origine de courants longitudinaux (parallèles à la côte) et de courants transversaux (perpendiculaires à la côte) qui participent au transport des sédiments et donc à l'érosion (ou l'engraissement) des littoraux.

Les courants longitudinaux sont essentiellement liés à l'obliquité des vagues par rapport au rivage (le gradient longitudinal de hauteur de houle est aussi un facteur de génération de courants longitudinaux). Ces courants peuvent mettre en mouvement les matériaux sableux. Le déplacement longitudinal des sables sous l'effet des courants de déferlement est appelé transit littoral.

Concrètement, ce transport sableux longitudinal s'effectue principalement selon deux processus :

- par l'effet des vagues sur l'estran (jet de rive) : la vague fait remonter le matériau suivant la direction de la houle, en se retirant, le matériau redescend suivant la ligne de plus grande pente ; il en résulte un déplacement en dents de scie qui a une composante parallèle à la côte dans le même sens que la propagation de la houle, c'est le transport par « jet de rive »,
- par le déferlement et le courant littoral : le matériau est remis en suspension par la houle et transporté par le courant littoral parallèle au rivage et dont le sens est celui de la composante longitudinale de la célérité des vagues.

Les courants transversaux sont générés par les vagues arrivant face au rivage et vont engendrer des mouvements sédimentaires perpendiculaires au rivage (dans le profil). Le schéma classique généralement admis conduit à :

- en période de forte houle, un abaissement de la plage et un transport de sédiments vers les petits fonds marins,
- en période de faible houle, des mouvements dans le sens contraire, c'est-à-dire reconstitution de la plage sèche depuis les sédiments des petits fonds.

Il est généralement admis que les évolutions à moyen terme (quelques années) des plages ouvertes sont essentiellement dues aux mouvements longitudinaux. Les mouvements dans le profil peuvent être importants lors de tempêtes et sont généralement associés à une réponse court terme d'une plage à un évènement particulier.

La connaissance des phénomènes d'érosion marine nécessite d'apprécier les mécanismes évolutifs des plages qui sont donc liés pour majorité aux courants de déferlement de la houle en zone côtière. Plusieurs approches sont envisageables et décrites en suivant :

- l'approche modélisation numérique visant à apprécier la transformation des vagues entre le large et la côte sous l'effet des fonds, puis à pouvoir calculer précisément les courants de déferlement et les évolutions littorales associées. Cette approche numérique sera réalisée grâce à l'emboîtement de modèles successifs permettant d'augmenter au fur et à mesure le niveau de détail jusqu'à la côte,
- l'approche historique visant à analyser l'évolution passée du trait de côte à partir des photographies aériennes disponibles,
- l'observation du littoral visant à se donner une vision de l'état actuel des plages.

La combinaison de l'ensemble de ces approches doit au final permettre de définir zone par zone et avec le plus de précision possible les taux d'érosion de référence. Par ailleurs, selon les situations rencontrées sur le littoral, certaines approches seront privilégiées par rapport à d'autres.

5.3.1.1. APPROCHE NUMERIQUE

Les données de base de la mise en place de l'approche numérique sont les séries temporelles des états de mer transférées en bordure littorale tel que décrit au paragraphe 3.6. A partir de ces données, il est possible de réaliser les tâches suivantes :

- calcul des transits littoraux et de leur variabilité inter-annuelle,
- calcul de la profondeur de fermeture locale,
- calcul de la répartition des courants de déferlement (intensité et direction) sur des conditions type représentatives,
- modélisation de l'évolution du trait de côte sur les zones de plage ouvertes,
- modélisation de l'évolution du profil de plage sur des tempêtes de référence.

Calculs des transits littoraux

Le calcul des transits littoraux se fait à l'aide de la formule proposée par le CERC (Coastal Engineering Research Center) qui s'écrit :

$$Q = \frac{K_1}{42} (H_s^2 C_g)_b \sin(2\alpha_{bs})_b t$$

Avec :

- Q : transit littoral en m³ de sable en place,
- H_s : hauteur de la houle significative en m au déferlement,
- C_g : vitesse de groupe de la houle lors de son déferlement,
- α_{bs} : angle d'incidence de la houle au déferlement (angle entre la crête des vagues et le rivage),
- t : temps d'action de la houle,
- K₁ : coefficient empirique (sans dimension).

Le coefficient K₁ permet d'ajuster l'intensité du transport littoral pour bien reproduire la réalité du terrain. Sa valeur peut être définie soit :

- à l'aide d'observations en nature (blocage total ou partiel du transit littoral contre un ouvrage de protection de plage ou portuaire),
- à l'aide de références bibliographiques ayant pu établir la valeur moyenne du transit littoral,

Dans le cas où il n'existe pas d'informations a priori sur l'intensité du transport littoral, le CERC a proposé une relation entre le coefficient K₁ et le diamètre médian des sables de la plage comme suit :

$$K_1 = \frac{0,1}{D_{50}} \quad \text{avec } D_{50} \text{ en mm}$$

Dans le cas de plages ouvertes, le transit littoral peut être calculé pour chaque état de mer de la série temporelle de 1979 à 2002. Par conséquent, il est aussi possible d'avoir accès à la variabilité inter-annuelle du transport littoral (variations à la fois de l'intensité et de la direction du transit littoral d'année en année).

Calcul de la profondeur de fermeture

Le transit littoral et les mouvements dans le profil ne vont s'observer que dans une zone limitée située entre la côte et la profondeur limite d'action des houles, appelée également profondeur de fermeture (d_l). Cette profondeur peut être déterminée selon l'expression proposée par Hallermeier (1980) :

$$d_l = 2,28Hs_{(12h)} - 68,5 \left(\frac{Hs_{(12h)}^2}{gTs^2} \right)$$

avec :

- $Hs_{(12h)}$: hauteur significative dépassée 12 h par an,
- Ts : la période significative associée.

Analyse de l'agitation par petits fonds et des patrons de courants de déferlement

Le logiciel MOPLA (présenté en annexe 2) permet d'étudier deux types d'informations :

- la propagation des états de mer jusqu'à la plage,
- les courants de déferlement des houles qui sont le moteur principal des évolutions des plages.

Le modèle numérique MOPLA calcule ces deux composantes, entre la bordure côtière (états de mer à -15m CM issus du modèle TOMAWAC) et la plage, en résolvant la version parabolique de l'équation de la pente douce (Berkhoff, 1972).

La maille de calcul a été adaptée à chaque fois en fonction de l'emprise des modèles, de la complexité des fonds et de la présence d'ouvrages diffractant.

De manière à obtenir une bonne visualisation des phénomènes à l'origine de l'évolution des plages, les événements testés correspondent aux houles dominantes en termes de hauteur, période et direction.

Les résultats sont donnés sous forme de carte de propagation (hauteurs et direction) et de courants (vitesse et direction).

Équilibre en plan des plages

Les plages poches, abritées par un cap ou une structure artificielle, possèdent généralement des formes en plan dont l'équilibre est en relation avec la position de ces caps ou ouvrage et la direction du flux moyen d'énergie de la houle approchant la plage.

Connaissant le régime des houles, le modèle SMC (présenté en annexe 3), permet de déterminer les possibles formes d'équilibre en plan des plages.

Évolution en plan des plages ouvertes (moyen terme)

Les évolutions prévisibles du trait de côte pour les plages (ou cellules sédimentaires) en équilibre dynamique peuvent être étudiés à l'aide du code mathématique spécifique GENESIS (présenté en annexe 4) qui prend à la fois en compte l'information de houle, l'information de courant et les caractéristiques propres des plages (pente, granulométrie, présence d'ouvrages...). Ce code de calcul, une fois calé et validé, donne accès aux évolutions futures du trait de côte sur une zone spécifique.

La phase primordiale du bon fonctionnement de ce code reste la phase de calibration qui doit se faire par la méthode dite « historique » qui consiste à reproduire les évolutions passées du trait de côte. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser les résultats d'une analyse préliminaire de l'évolution du trait de côte issus de campagnes de photographies aériennes et vérifier si les tendances observées par le passé (zones d'érosion/engraissement, surfaces perdues/gagnées) sont correctement reproduites par le modèle.

Évolution dans le profil (court terme)

Lors des tempêtes, une quantité importante de sables peut être mobilisée depuis le haut de plage vers les petits fonds, ce qui engendre des abaissements importants de la plage. De manière générale, ces phénomènes de transferts nets de sables depuis le haut de plage vers les petits fonds sont compensés par des transports inverses lors des périodes de calmes ou de faibles houles. Cependant, si des installations sont présentes en arrière plage, l'effet même de la tempête peut engendrer des dégâts très importants.

L'évolution du trait de côte en période de tempête peut être estimée à l'aide du code de calcul SBEACH (présenté en annexe 5) qui donne le profil de plage après le passage de la tempête. Ce code est centré sur les échanges dans le profil et en particulier sur les phénomènes de transport par jet de rive et courant de retour depuis le haut de plage.

5.3.1.2. ANALYSE HISTORIQUE DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE A PARTIR DES JEUX DE PHOTOGRAPHIES AERIENNES

Les photographies aériennes de la zone d'étude permettent de localiser au cours du temps la position du trait de côte et ainsi appréhender les évolutions des plages. Pour la Loire-Atlantique, nous disposons des jeux de photographies aériennes de 1977, 1999, 2000 et l'orthophotoplan de 2004.

Le trait de côte correspond à la limite entre le domaine marin et le domaine continental (limite proche des plus hautes eaux exceptionnelles). De manière pratique et particulièrement dans les zones macrotidales, il est difficile de localiser avec précision le trait de côte sur les littoraux de plages. Dans le cadre de cette étude, il a été choisi de définir le trait de côte des littoraux de plages comme :

- la limite plage-dune marquée par la végétation sur les plages « naturelles ». Cette définition reste cohérente avec celle prise dans le cadre de l'étude du littoral vendéen,
- la laisse des plus hautes eaux sur les plages « artificialisées » c'est-à-dire celles présentant des ouvrages longitudinaux d'arrière plage (murs, perrés...). Cette limite reste malgré tout difficile à localiser et s'obtient sur des différences de couleur de sables identifiables sur les photographies aériennes. Il s'agit cependant de la limite la plus cohérente pour une analyse évolutive de la position du trait de côte,
- le pied de falaise sur les littoraux de falaises vives.

La précision lors du processus de localisation du trait de côte est donc dépendante des conditions météo-océanographiques lors des différentes prises de vue (niveau de marée, surcotes, houle), de la présence claire et établie de végétation de pied de dune ou pas, d'éventuels décalages lors du géoréférencement des clichés... Cette précision est communément estimée de l'ordre de +/-5m.

L'analyse de l'évolution du trait de côte s'est faite en mesurant les distances des différents traits de côte aux différentes années à partir d'une ligne de base fixe et arbitraire placée en retrait du littoral. Les graphiques associés aux évolutions du trait de côte au cours du temps sont donnés dans chacun des fascicules des unités sédimentaires.

5.3.1.3. OBSERVATIONS DE TERRAINS ET QUESTIONNAIRE AUX COMMUNES LITTORALES

La campagne de terrain réalisée en Février 2009 a permis d'observer l'ensemble des plages du littoral de Loire-Atlantique. L'ensemble de ces observations a été consigné au travers de fiches (cf. fascicule B – fiches d'inspection du littoral et de ouvrages) où il a particulièrement été fait état des éventuelles zones d'érosion ou d'engraissement.

De plus, il a été envoyé à chacune des communes littorales (17 communes au total), à deux associations syndicales (Association Syndicale des Marais Salants de Guérande et Association Syndicale de Pen-Bron), à l'Office National des Forêts (ONF) et finalement au Conservatoire du Littoral et des Espaces Lacustres, un questionnaire spécifiquement établi pour collecter des informations sur les thématiques d'érosion du trait de côte et de submersion marine. Le questionnaire type est fourni en annexe 6.

5.3.2. FALAISES VIVES

Comme décrit dans le guide méthodologique des plans de prévention des risques littoraux, l'aléa de référence pour les falaises vives correspond au taux d'évolution moyen annuel constaté (Tx) extrapolé pour 100 ans, auquel il convient d'ajouter une marge de sécurité correspondant à la valeur du recul du trait de côte (l_{max}) consécutif à un évènement brutal.

Selon la pertinence des informations disponibles dans le cadre de cette étude, nous établirons s'il est possible de correctement définir la valeur de la marge de sécurité. Si ce n'est pas le cas, l'aléa sera défini en ne considérant que le taux de recul de référence extrapolé à 100 ans.

Ce taux de référence sera appréhendé en compilant l'ensemble des données disponibles et permettant d'avoir une vision relativement exhaustive du fonctionnement des falaises vives littorales. Les sources d'informations suivantes seront utilisées :

1. Le degré d'exposition des falaises aux houles déferlantes,
2. La géologie (connaissance du type de roche),
3. L'évolution historique du trait de côte,
4. L'analyse des relevés des mouvements ponctuels,
5. Les fiches d'observation du littoral et le questionnaire aux communes littorales.

L'approche consiste donc à compiler un panel relativement large d'information caractérisant un tronçon de falaise donné afin d'établir un aléa de référence. Toutefois, compte tenu des faibles vitesses d'évolution des falaises, le calcul précis du taux moyen de recul (Tx) reste délicat.

Degré d'exposition aux houles

Du degré d'exposition des falaises aux houles déferlantes peut dépendre la célérité des évolutions en pied de falaise par exemple. L'analyse de ce paramètre revêt donc une grande importance afin d'établir un taux d'évolution en adéquation avec ce forçage.

La connaissance du degré d'exposition aux houles d'un tronçon du littoral à falaises vives se fera à l'aide des résultats des différents modèles de propagation décrits au chapitre 3.6.

La géologie

L'évolution des falaises est très dépendante de la géologie des terrains rencontrés (nature et structure) et donc de la résistance plus ou moins grande des matériaux en place. La connaissance générale de ce paramètre à l'échelle du littoral de Loire-Atlantique est issue des données du BRGM (cartes géologiques et site web <http://infoterre.brgm.fr/>).

Ces informations ont été complétées grâce :

- aux données bibliographiques, en particulier l'étude de CREOCEAN relative les falaises de Mesquer et Piriac-sur-Mer et l'étude EEG-SIMECSOL concernant les falaises de Préfailles à la Bernerie-en-Retz.
- aux visites de site qui ont permis de distinguer les falaises stables des falaises fragiles et l'importance des agents continentaux (altération liée au ruissellement ou l'infiltration des eaux pluviales).

Évolution historique du trait de côte

La comparaison de l'évolution du trait de côte au niveau des falaises doit permettre de donner des indicateurs quant aux taux d'évolution de ces dernières. De manière pratique, cette approche reste difficile à mettre en œuvre en raison des faibles vitesses d'évolution des falaises et des imprécisions liées à la localisation du trait de côte sur des jeux de photographies aériennes.

Analyse des mouvements ponctuels

La base de données mouvements de terrain établie par le BRGM donne accès à un inventaire des événements ponctuels de type effondrements par exemple. La consultation de cette base de données permet donc d'apprécier de l'évolution de certains tronçons de falaises.

Par ailleurs, les études réalisées par CREOCEAN sur les communes de Mesquer et Piriac-sur-Mer et par EEG-SIMECSOL sur les communes de Préfailles, Pornic et la Bernerie-en-Retz peuvent donner des informations sur les mouvements ponctuels historiques observés sur des tronçons particuliers de falaises.

Fiches d'observation du littoral et le questionnaire aux communes littorales

La campagne de terrain réalisée en Février 2009 a permis d'observer l'ensemble des falaises vives du littoral de Loire-Atlantique. L'ensemble de ces observations a été consigné au travers de fiches (cf. fascicule B – fiches d'inspection du littoral et de ouvrages) où il a particulièrement été fait état de la présence d'ouvrages de protection et/ou de zones d'éboulements.

Finalement, le questionnaire envoyé aux communes littorales devrait permettre de consigner les événements ayant pu toucher les falaises vives du littoral de Loire-Atlantique.

5.4. METHODOLOGIE POUR LA CONNAISSANCE DES PHENOMENES DE SUBMERSION MARINE

5.4.1. NIVEAUX D'EAU DE REFERENCE

Niveau statique :

L'aléa submersion marine de référence sur l'ensemble du littoral de l'étude sera établi à l'aide des informations fournies dans l'étude SHOM/CETMEF de 2008 sur les niveaux extrêmes de pleine mer sur la façade Manche et Atlantique. Cette étude donne les niveaux d'eau rattachés à des périodes de retour incluant à la fois le niveau déterministe de la marée astronomique et le niveau aléatoire des surcotes dépressionnaires. Ce niveau sera utilisé comme référence pour réaliser la cartographie en comparant avec les niveaux altimétriques terrestres (niveaux de période de retour 20, 50 et 100 ans).

Dans le cas où des informations auront pu être collectées quant aux événements historiques de submersion marine (via le questionnaire envoyé aux communes littorales, le fichier de recensement des catastrophes naturelles et le retour d'expérience sur la tempête Xynthia), ces données seront comparées aux niveaux précédemment évoqués.

Niveau dynamique :

Sur la frange côtière et plus précisément dans la zone déferlement jusqu'à la ligne de rivage, une surélévation due à l'action des vagues se rajoute au niveau statique. Cette surélévation qualifiée de dynamique peut être appréhendée sur des événements de houle de référence à l'aide de la formulation établie par Stockdon et al. (cf. § 3.1.2). Nous établirons les valeurs de cette contribution dynamique afin d'identifier les éventuelles zones de brèche (cordon dunaire ou ouvrages de défense de première ligne) par lesquelles pourrait pénétrer le flux de marée.

De manière pratique, cette surélévation dynamique totale (appelée « run-up » selon la terminologie anglo-saxonne) est constituée de deux composantes : la surélévation moyennée sur la durée de l'état de mer (appelée « set-up ») et la surélévation instantanée maximale (appelée « swash ») correspondant à l'excursion maximale du jet de rive. Dans le cadre de la présente étude, seule la contribution du « set-up » sera conservée, d'une part car elle est représentative de la durée d'action de l'état de mer considéré (soit sur une durée d'une heure au moins) et, d'autre part, car le calcul de la valeur précise du « swash » reste aléatoire en raison de la méconnaissance de la topographie précise du haut de plage.

Dans les traicts, l'action du vent peut entraîner une accumulation d'eau en fond de lagune. Au même titre que l'approche due au déferlement des vagues sur les zones de littoral ouvert, nous estimerons les surélévations attendues en fond de traict sous l'hypothèse de différents vents de référence. Ces valeurs seront ajoutées aux valeurs statiques pour identifier les éventuelles zones de brèches par lesquelles les flux de marée pourraient pénétrer.

Changement climatique :

La prise en compte des effets du changement climatique sur la surélévation du niveau marin se fera en retenant la valeur pessimiste du rapport de l'ONERC de 2010 (hypothèse haute des estimations du GIEC 2007) à +0,60m pour l'horizon 2100 (valeur retenue en concertation avec la Maîtrise d'Ouvrage).

5.4.2. ALTIMETRIE DES TERRAINS LITTORAUX

Les sources de données altimétriques terrestres seront soit :

- prioritairement les levés LIDAR de juin 2010 et de septembre 2011 fournis par la DREAL. La précision altimétrique de cette donnée est de l'ordre du centimètre,
- la BD ALTI de l'IGN. La précision altimétrique est d'un mètre pour cette donnée. La densité spatiale est d'un point tous les 25m.

5.4.3. QUALIFICATION DU NIVEAU DE SUBMERSION

Conformément à la méthodologie employée pour l'étude des risques de submersion sur le littoral vendéen (Sogreah, 2000) et en accord avec la Maîtrise d'Ouvrage, il a été adopté la qualification suivante :

- submersion faible à moyenne si la hauteur d'eau est inférieure à 1,0m,
- submersion moyenne à forte si la hauteur d'eau est supérieure à 1,0m.

La cartographie obtenue permettra de donner une idée de l'emprise des zones submersibles.

oOo

REFERENCES

OUVRAGES ET ETUDES

BERKHOFF J.C.W. (1972). Computation of combined refraction/diffraction. Proc. 13th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp 471-490.

COASTAL ENGINEERING MANUAL, 2002. Longshore sediment transport. Part 3-2. Washington DC.

CREOCEAN, 2002. Erosion du littoral des communes de Piriac-sur-Mer et Mesquer. Diagnostic et recommandations pour le compte des communes de Piriac-sur-Mer et Mesquer.

CREOCEAN, 2003. Dynamique sédimentaire et l'évolution du littoral. Programme de travaux de défense de côte, pour le compte de la commune de Saint-Brévin-les-Pins (rapport 102036 RA2indB).

EEG – SIMECSOL, 1999. Etude générale de comportement des falaises littorales de Pornic, Préfailles, la Bernerie-en-Retz.

HALLERMEIER, 1980. Sand notion initiation by water waves. Two asymptotes "J. waterwaves Harbors Division 106".

LCHF, 1987. Catalogue sédimentologique des côtes françaises. Côtes de la Manche et de l'Atlantique de la Baie du Mont-Saint-Michel à la frontière espagnole.

ONERC, 2010. Synthèse. Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles. Direction générale de l'énergie et du climat.

PREFECTURE DE LA REGION PAYS DE LA LOIRE, 2006. Directive Territoriale d'Aménagement de l'estuaire de la Loire. 19 septembre 2006.

SCE, 2004. SAGE du marais Breton et du bassin versant de la baie de Bourgneuf. Atlas cartographique.

SOGREAH, 1997. Aménagement du secteur du Port Charly et de l'estacade du Croisic. Etude préalable d'agitation et de courantologie pour le compte du Conseil Général de Loire Atlantique.

SOGREAH, 2000. Etude des risques de submersion marine sur le littoral Vendéen, pour le compte de la Direction Départementale de l'Equipement de la Vendée (rapport N°14154).

SOGREAH, 2002. Etat des lieux du Domaine Public Maritime du trait de Pen-Bé – Mesquer pour le compte du syndicat des ostréiculteurs de Pen-Bé (rapport 71 1095).

SOGREAH, 2002. Etude hydraulique et sédimentologique et proposition de confortement, pour le compte du centre marin de Pen-Bron (rapport 716231).

SOGREAH, 2006. Expertise et connaissance du système estuarien. Tome 1, analyse historique. Mission d'étude d'approfondissement et d'évaluation de scénarios visant à

améliorer le fonctionnement hydrosédimentaire de l'estuaire de la Loire. Pour le compte du GIP Loire Estuaire (rapport 1711457).

SOGREAH, 2007. Expertise et connaissance du système estuarien. Tome 2, bilan sédimentaire. Mission d'étude d'approfondissement et d'évaluation de scénarios visant à améliorer le fonctionnement hydrosédimentaire de l'estuaire de la Loire. Pour le compte du GIP Loire Estuaire (rapport 1711457).

SOGREAH, 2008. Analyse du contexte hydrodynamique local et recherche de techniques de mesure permettant de préciser le devenir des vases clapées non stabilisées sur le site de la Lambarde, pour le compte du GIP Loir Estuaire. Tome 1 : Analyse des forçages et de leurs effets (rapport 1711728 R1).

SOGREAH/IN VIVO, 2002. Etude de faisabilité d'un traitement adapté de la Baie de la Baule, pour le compte de la mairie de la Baule-Escoublac (rapport 711097).

STOCKDON H.F., HOLMAN R.A., HOWD P.A, SALLENGER Jr. A.H., 2006. Emperical parameterization of set up, swash and run up. Coastal Engineering.

TESSIER, 2006. Caractérisation et dynamique des turbidités en zone côtière : l'exemple de la région marine Bretagne Sud. Thèse de l'université de Bordeaux. IFREMER, Brest.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2005. Influence of grain size on sediment transport rates with emphasis ont the total longshore rate. ERDC/CHL, CHETN-II-48.

VANNEY J.R., 1968. Carte sédimentologique sous-marine des côtes de France au 1/100 000^{ème} – Saint-Nazaire.

WANG X.L., SWAIL V.R., ZWIERS F.Z., 2006. Climatology and changes of extratropical cyclone activity : comparison of ERA-40 with NCEP-NCAR reanalysis for 1958-2001. J. Climate, 19(13), 3145-3166.

SITES INTERNET

- IFEN, Observatoire du littoral : <http://www.littoral.ifen.fr/Cartographie.6.0.html>
- DREAL Pays de Loire : <http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/>
- BRGM, InfoTerre : <http://infoterre.brgm.fr/>

oOo

FIGURES



Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

Unités sédimentaires du littoral Pays de la Loire

Affaire N : 1711836

Figure N° : 0-1

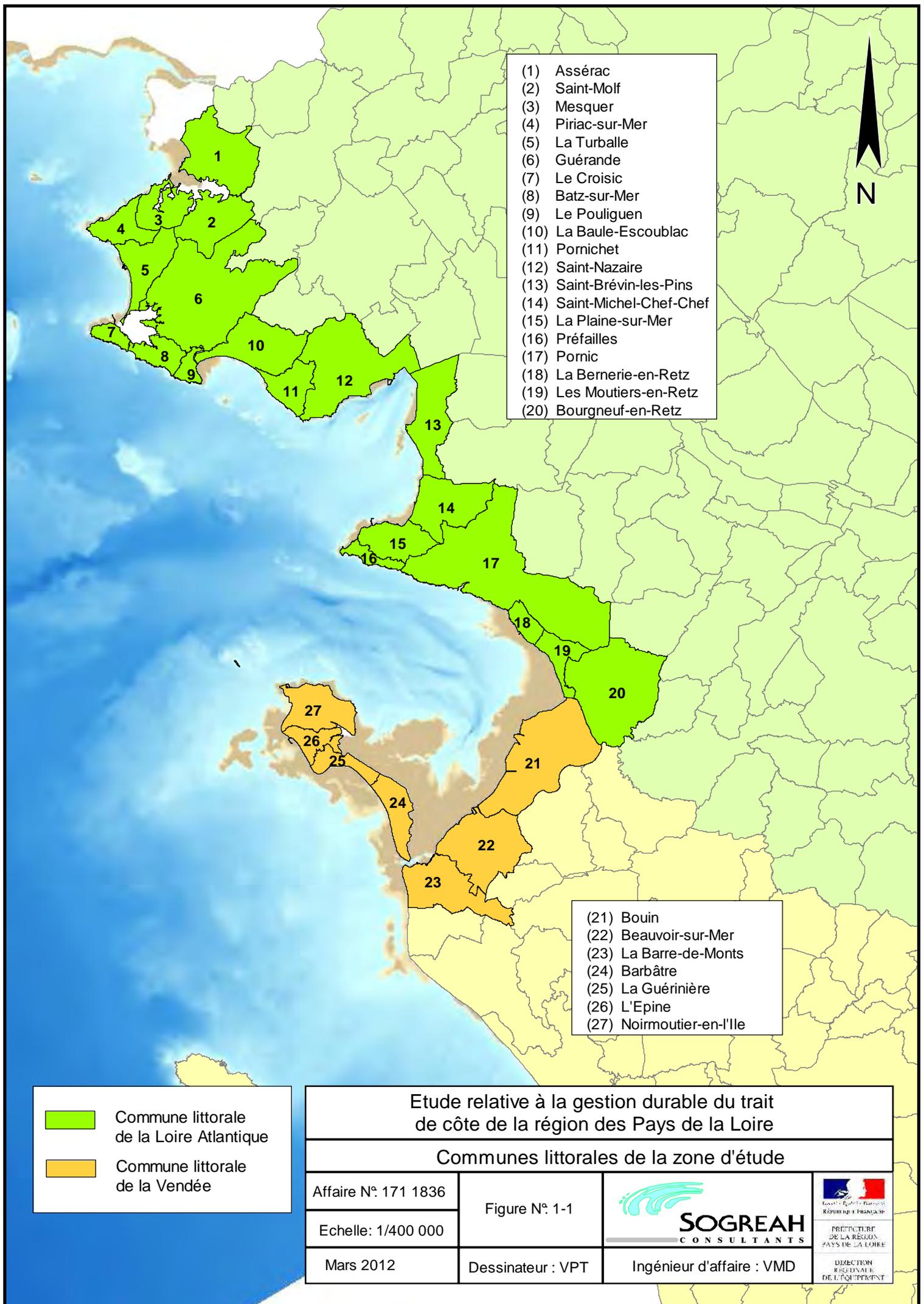
Mars 2012

Dessinateur : VPT



Ingénieur d'affaire : VMD





- (1) Assérac
- (2) Saint-Molf
- (3) Mesquer
- (4) Piriac-sur-Mer
- (5) La Turballe
- (6) Guérande
- (7) Le Croisic
- (8) Batz-sur-Mer
- (9) Le Pouliguen
- (10) La Baule-Escoublac
- (11) Pornichet
- (12) Saint-Nazaire
- (13) Saint-Brévin-les-Pins
- (14) Saint-Michel-Chef-Chef
- (15) La Plaine-sur-Mer
- (16) Préfailles
- (17) Pornic
- (18) La Bernerie-en-Retz
- (19) Les Moutiers-en-Retz
- (20) Bourgneuf-en-Retz

- (21) Bouin
- (22) Beauvoir-sur-Mer
- (23) La Barre-de-Monts
- (24) Barbâtre
- (25) La Guéinière
- (26) L'Epine
- (27) Noirmoutier-en-l'Île

Commune littorale de la Loire Atlantique
 Commune littorale de la Vendée

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire			
Communes littorales de la zone d'étude			
Affaire N°: 171 1836	Figure N°: 1-1		 <small>REPUBLIQUE FRANÇAISE</small> PRÉFECTURE DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE
Echelle: 1/400 000	Dessinateur : VPT	Ingénieur d'affaire : VMD	<small>DIRECTION RÉGIONALE DE L'ÉQUIPEMENT</small>
Mars 2012			

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

Typologie du trait de côte

Affaire N° 171 1836

Figure N° 1-2

Echelle: 1/250 000

Mars 2012

Dessinateur : VPT



- Plages littorales
- Côtes à falaises vives
- Dignes à la mer

Etude relative à la gestion durable du trait de côte dans la région des Pays de la Loire

Bathymétrie générale

Affaire N°: 171 1836

Figure N°: 1-3

Echelle: 1/400 000

Mars 2012

Dessinateur : VPT

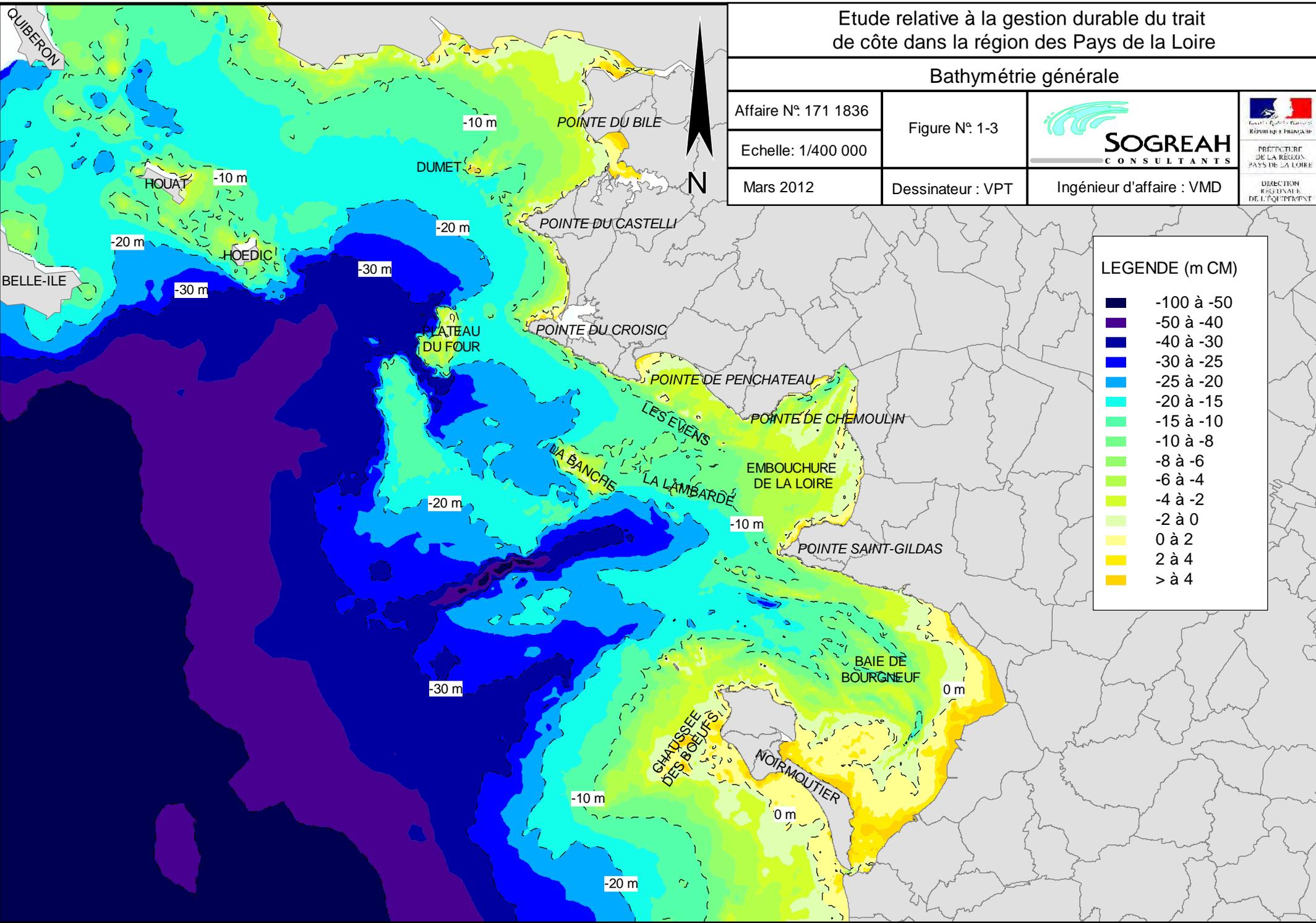


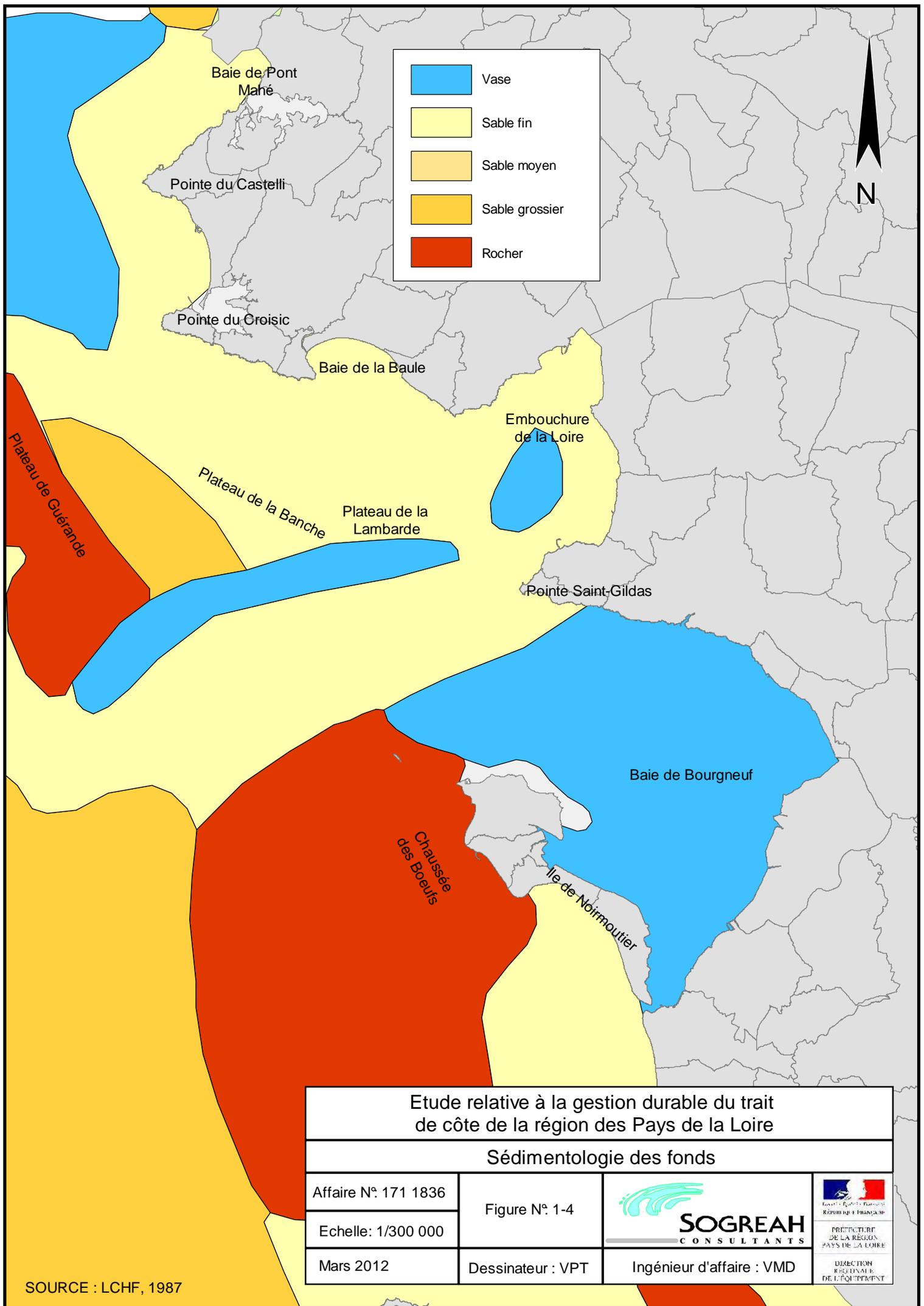
PRÉFECTURE DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE

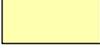
DIRECTION RÉGIONALE DE L'ÉQUIPEMENT

LEGENDE (m CM)

- 100 à -50
- 50 à -40
- 40 à -30
- 30 à -25
- 25 à -20
- 20 à -15
- 15 à -10
- 10 à -8
- 8 à -6
- 6 à -4
- 4 à -2
- 2 à 0
- 0 à 2
- 2 à 4
- > à 4



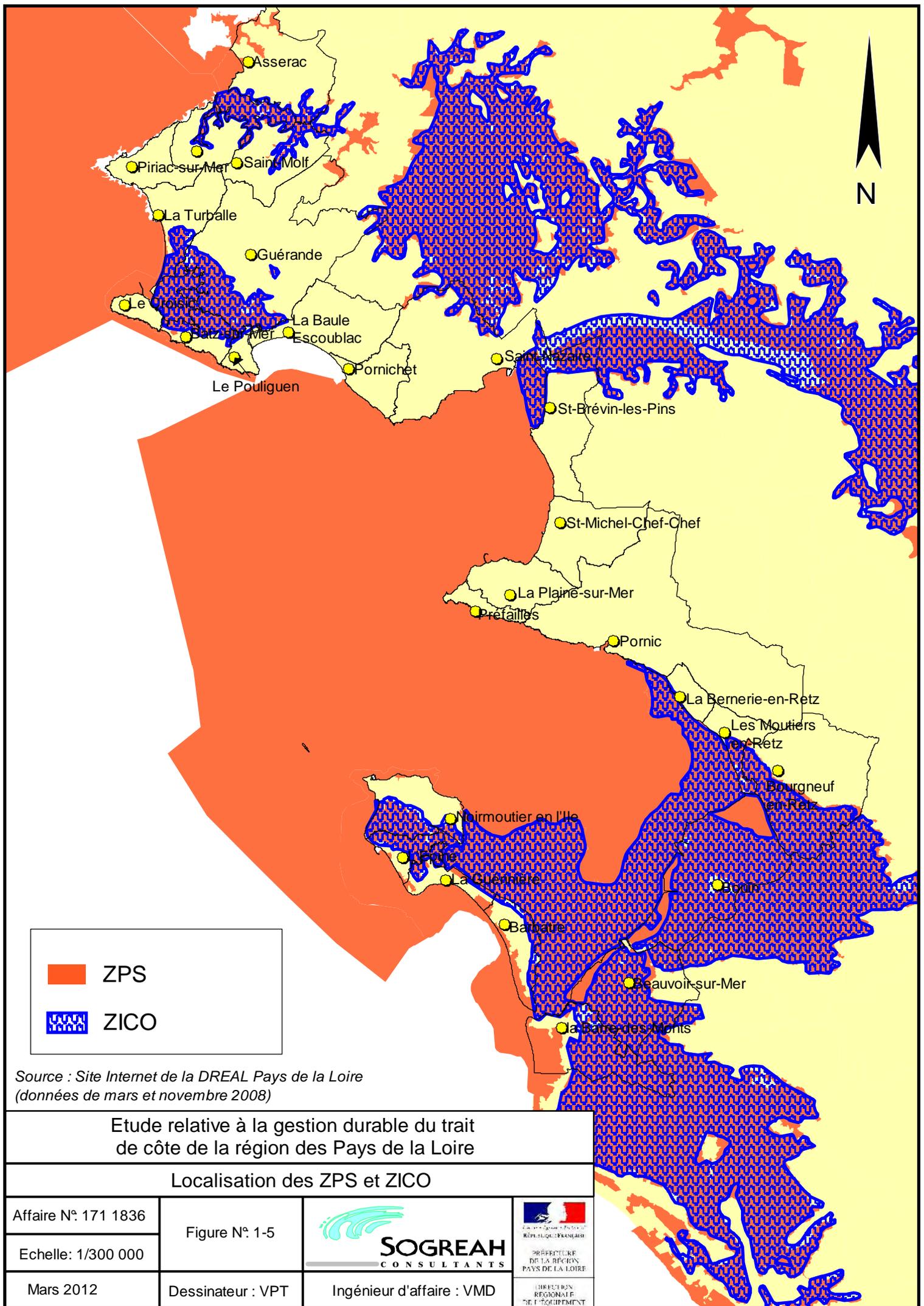


	Vase
	Sable fin
	Sable moyen
	Sable grossier
	Rocher



Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire			
Sédimentologie des fonds			
Affaire N°: 171 1836	Figure N°: 1-4		 <small>REPUBLIQUE FRANÇAISE</small> PRÉFECTURE DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE
Echelle: 1/300 000			
Mars 2012	Dessinateur : VPT	Ingénieur d'affaire : VMD	
<small>DIRECTION RÉGIONALE DE L'ÉQUIPEMENT</small>			

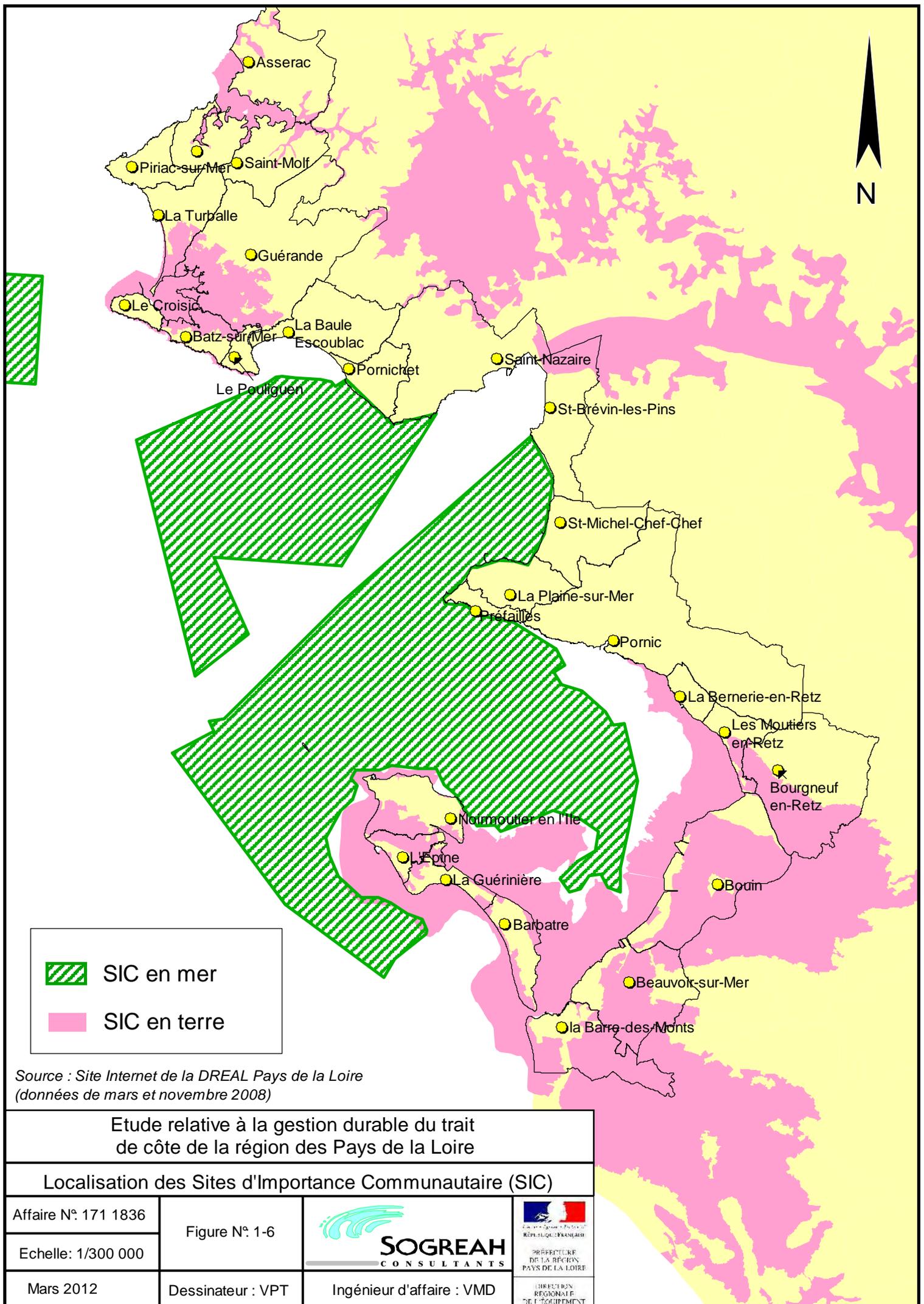
SOURCE : LCHF, 1987



Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

Localisation des ZPS et ZICO

Affaire N°: 171 1836	Figure N°: 1-5		 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE PRÉFECTURE DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE
Echelle: 1/300 000			
Mars 2012	Dessinateur : VPT	Ingénieur d'affaire : VMD	DIRECTION RÉGIONALE DE L'ÉQUIPEMENT

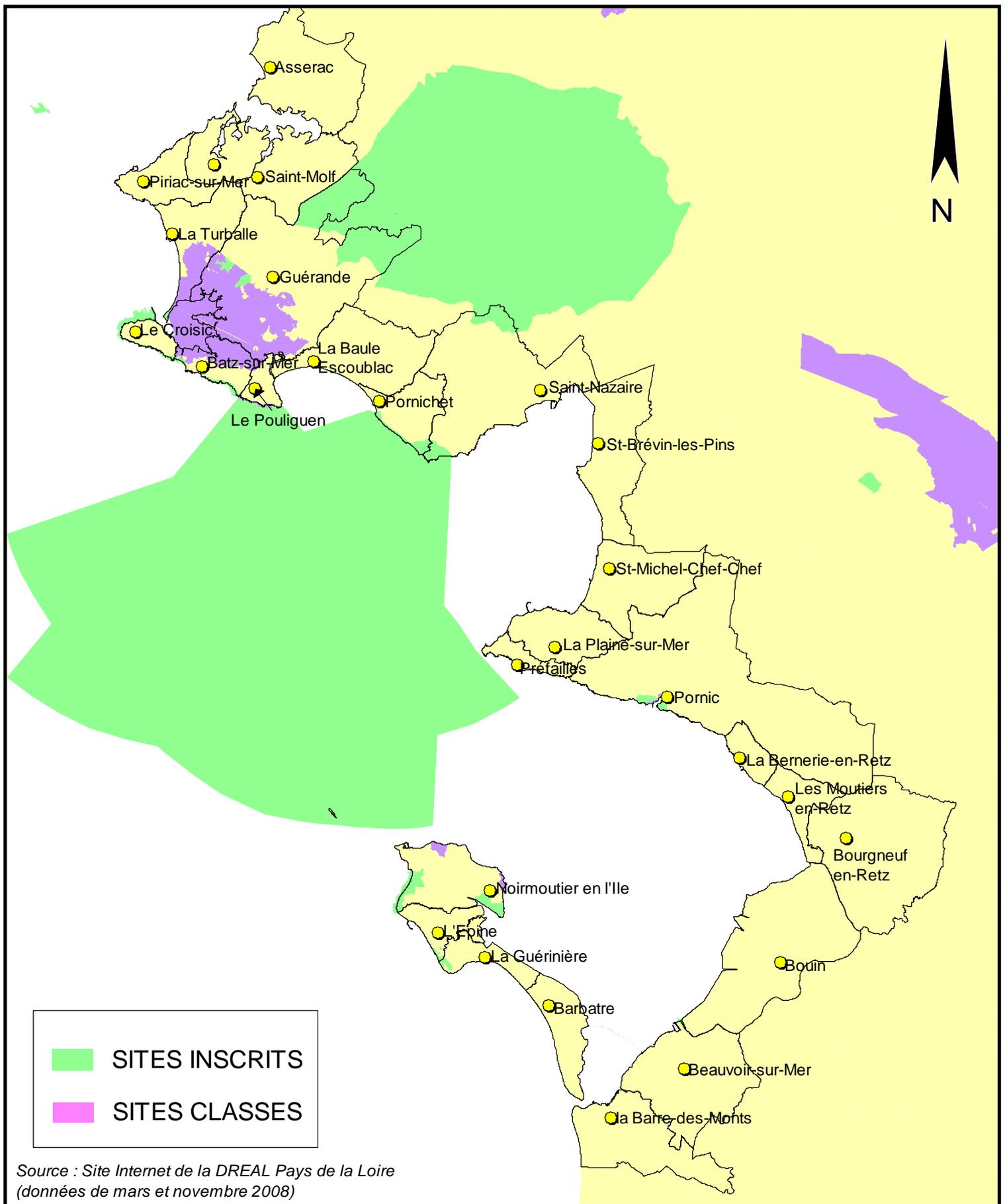


Source : Site Internet de la DREAL Pays de la Loire
(données de mars et novembre 2008)

Etude relative à la gestion durable du trait
de côte de la région des Pays de la Loire

Localisation des Sites d'Importance Communautaire (SIC)

Affaire N°: 171 1836	Figure N°: 1-6		 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE PRÉFECTURE DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE
Echelle: 1/300 000			
Mars 2012	Dessinateur : VPT	Ingénieur d'affaire : VMD	DIRECTION RÉGIONALE DE L'ÉQUIPEMENT

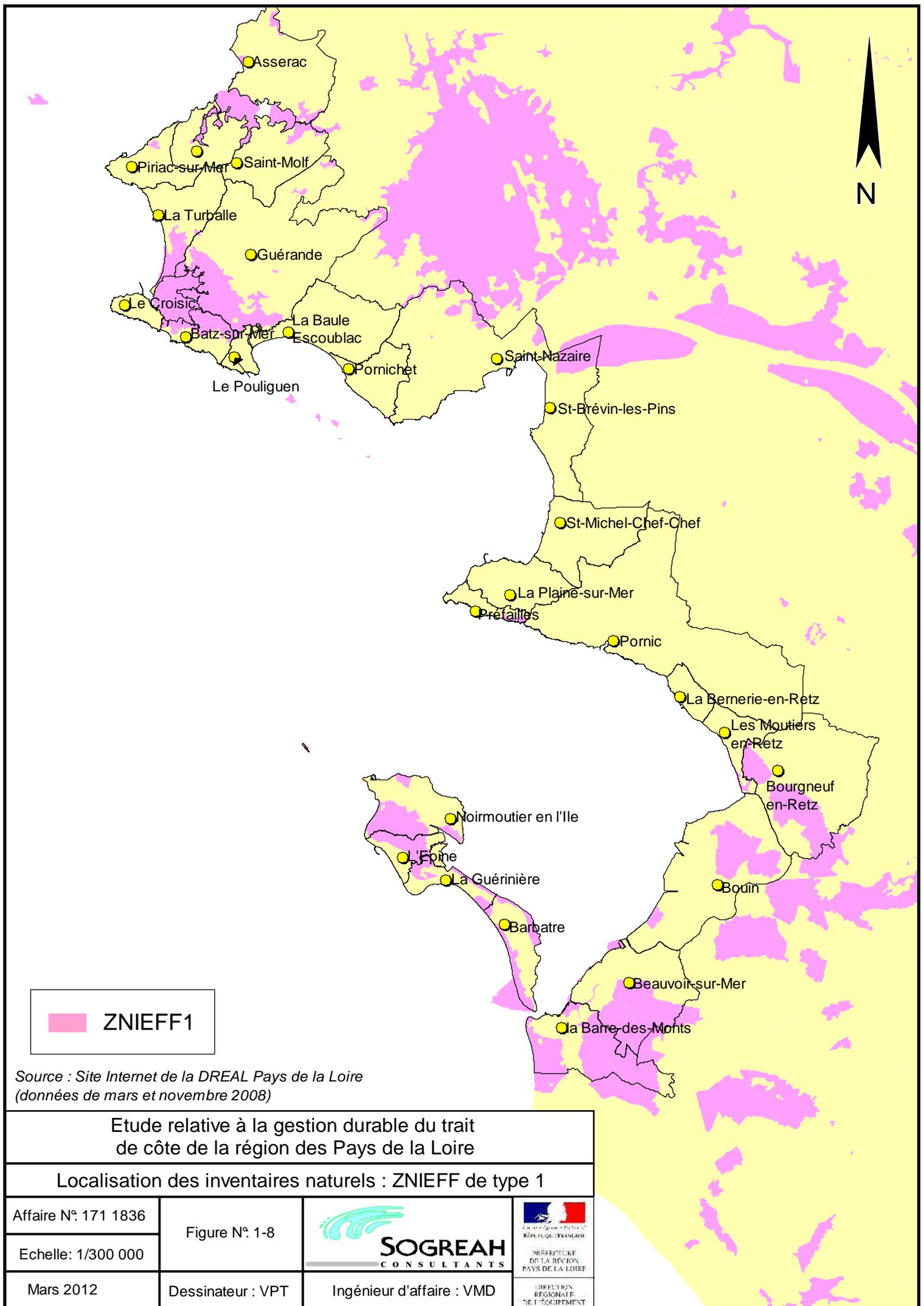


Source : Site Internet de la DREAL Pays de la Loire
(données de mars et novembre 2008)

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

Localisation des Sites Inscrits et Sites Classés

Affaire N°: 171 1836	Figure N°: 1-7		 <small>RÉPUBLIQUE FRANÇAISE</small>
Echelle: 1/300 000			
Mars 2012	Dessinateur : VPT	Ingénieur d'affaire : VMD	<small>DIRECTEUR RÉGIONAL DE L'ÉQUIPEMENT</small>



 ZNIEFF1

Source : Site Internet de la DREAL Pays de la Loire
(données de mars et novembre 2008)

Etude relative à la gestion durable du trait
de côte de la région des Pays de la Loire

Localisation des inventaires naturels : ZNIEFF de type 1

Affaire N°: 171 1836

Figure N°: 1-8

Echelle: 1/300 000

Mars 2012

Dessinateur : VPT



Ingénieur d'affaire : VMD



DIRECTION
RÉGIONALE
DE L'ÉQUIPEMENT



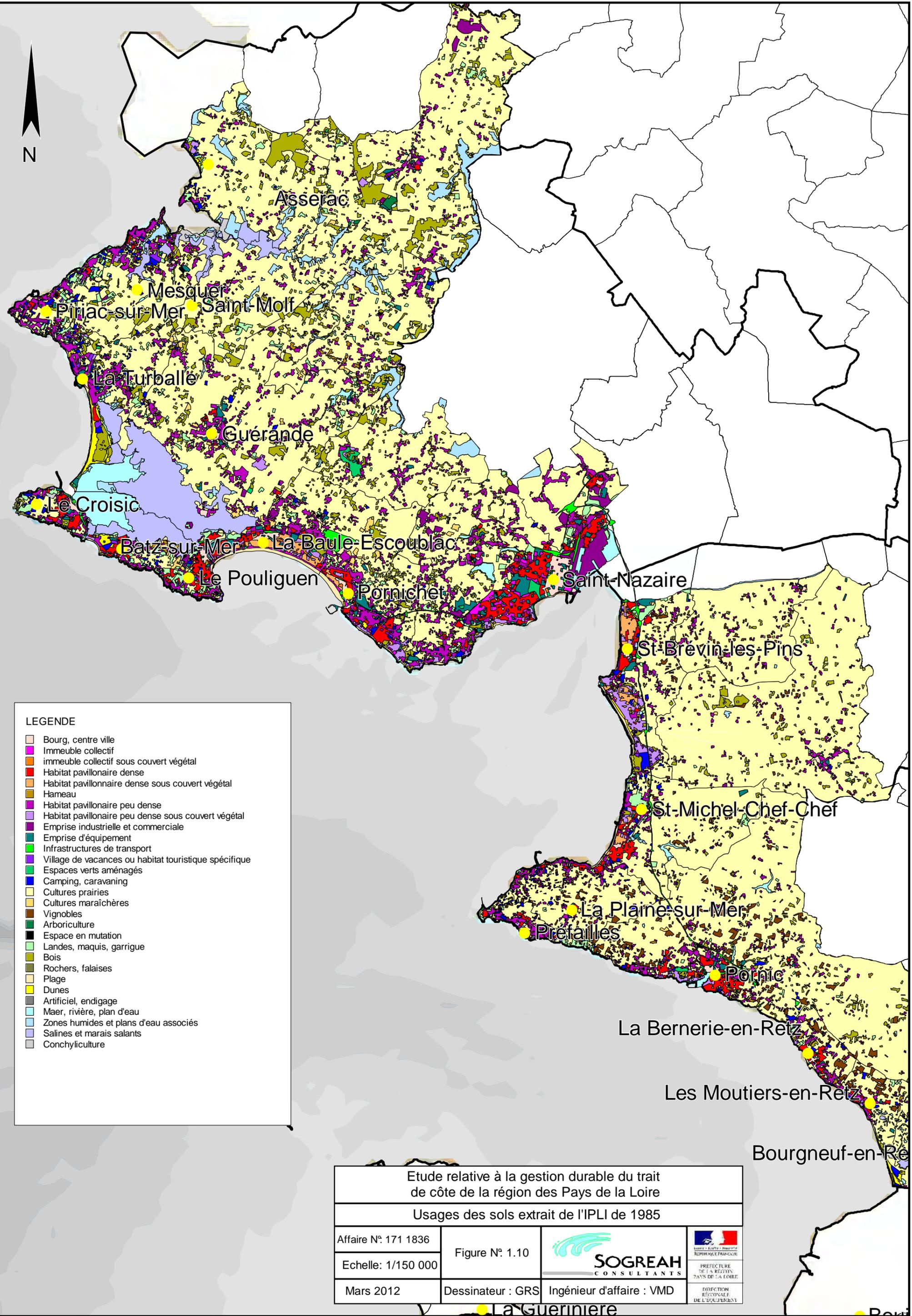
 ZNIEFF 2

Source : Site Internet de la DREAL Pays de la Loire
(données de mars et novembre 2008)

Etude relative à la gestion durable du trait
de côte de la région des Pays de la Loire

Localisation des inventaires naturels : ZNIEFF de type 2

Affaire N°: 171 1836	Figure N°: 1-9		 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE PRÉFECTURE DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE
Echelle: 1/300 000			
Mars 2012	Dessinateur : VPT	Ingénieur d'affaire : VMD	DIRECTION RÉGIONALE DE L'ÉQUIPEMENT

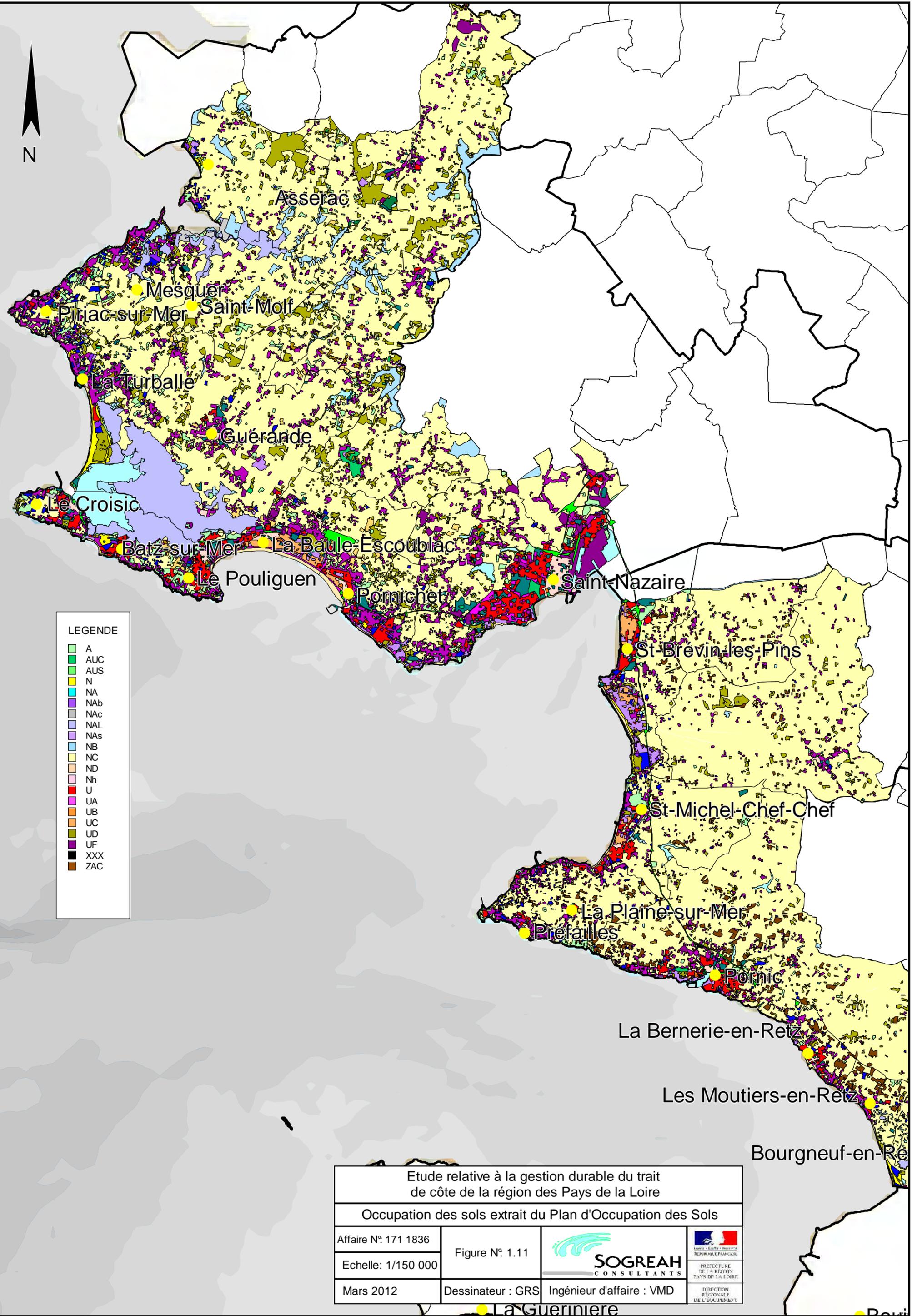


LEGENDE

- Bourg, centre ville
- Immeuble collectif
- immeuble collectif sous couvert végétal
- Habitat pavillonnaire dense
- Habitat pavillonnaire dense sous couvert végétal
- Hameau
- Habitat pavillonnaire peu dense
- Habitat pavillonnaire peu dense sous couvert végétal
- Emprise industrielle et commerciale
- Emprise d'équipement
- Infrastructures de transport
- Village de vacances ou habitat touristique spécifique
- Espaces verts aménagés
- Camping, caravaning
- Cultures prairies
- Cultures maraichères
- Vignobles
- Arboriculture
- Espace en mutation
- Landes, maquis, garrigue
- Bois
- Rochers, falaises
- Plage
- Dunes
- Artificiel, endigage
- Maer, rivière, plan d'eau
- Zones humides et plans d'eau associés
- Salines et marais salants
- Conchyliculture

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire			
Usages des sols extrait de l'IPLI de 1985			
Affaire N°: 171 1836	Figure N°: 1.10		 PREFECTURE DE LA REGION PAYS DE LA LOIRE
Echelle: 1/150 000	Dessinateur : GRS		
Mars 2012			DIRECTION REGIONALE DE L'EQUIPEMENT

La Gueriniere

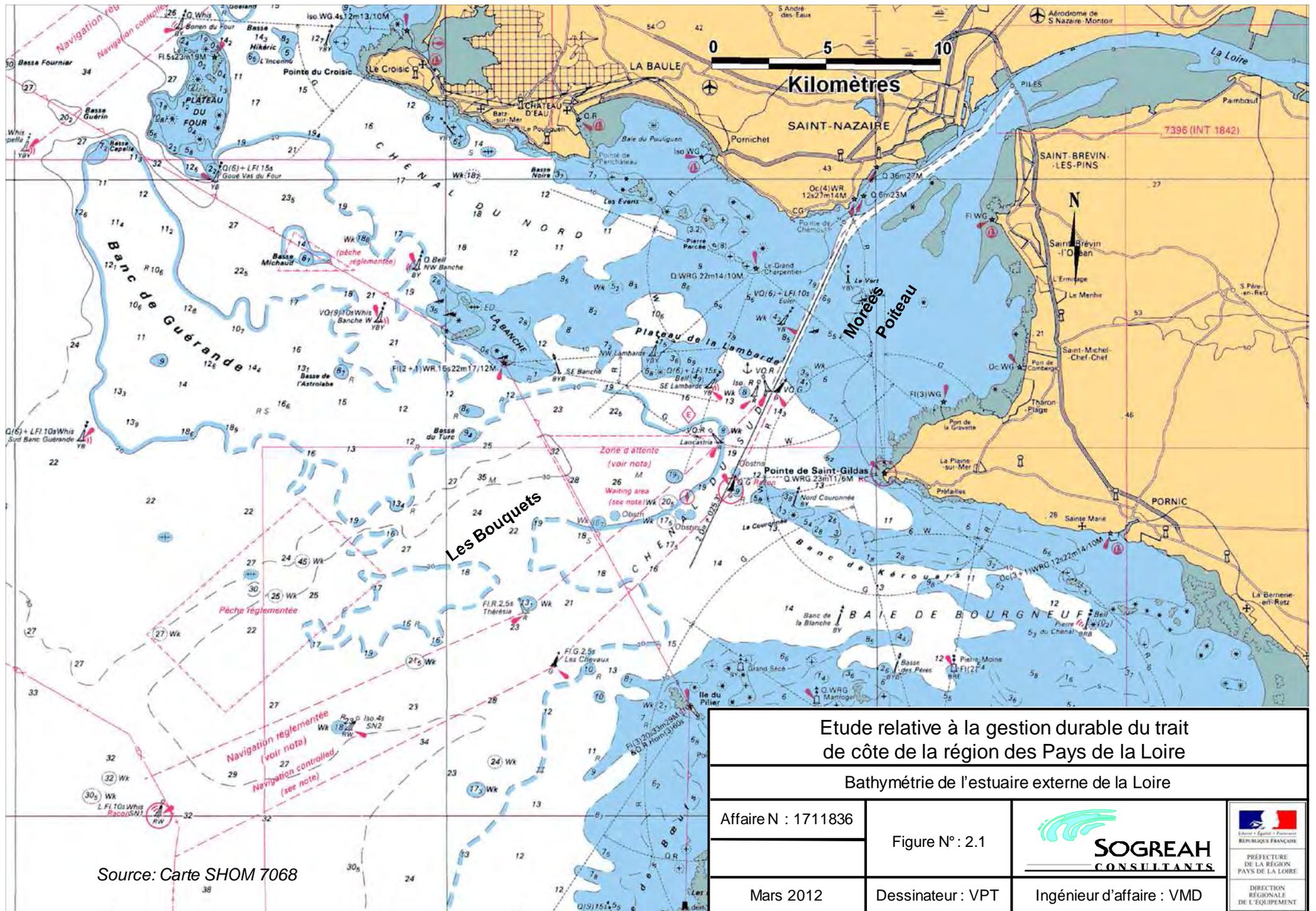


LEGENDE

■	A
■	AUC
■	AUS
■	N
■	NA
■	NAb
■	NAC
■	NAL
■	NAs
■	NB
■	NC
■	ND
■	Nh
■	U
■	UA
■	UB
■	UC
■	UD
■	UF
■	XXX
■	ZAC

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire			
Occupation des sols extrait du Plan d'Occupation des Sols			
Affaire N°: 171 1836	Figure N°: 1.11		
Echelle: 1/150 000	Dessinateur : GRS		
Mars 2012			

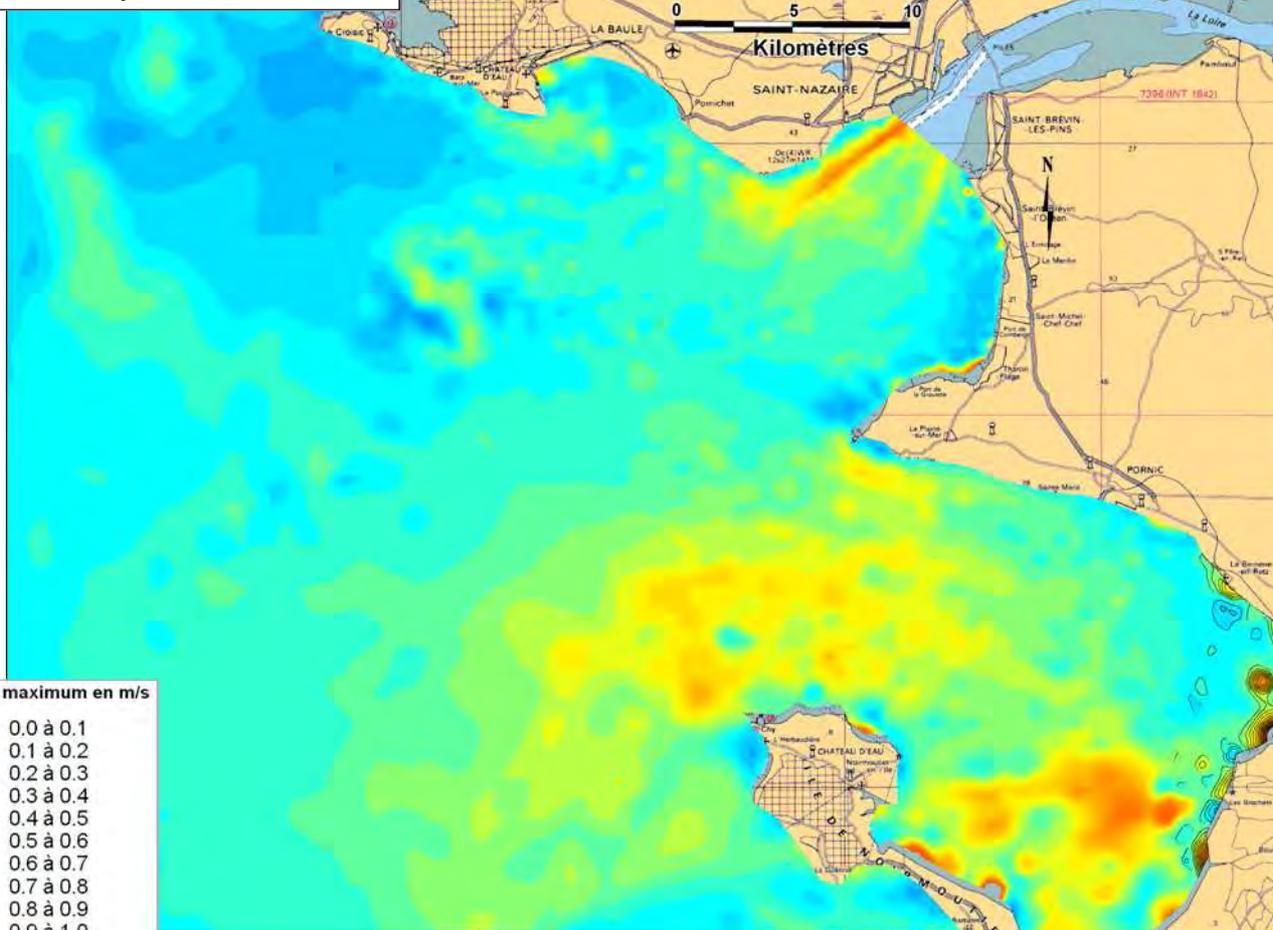
La Guerinière



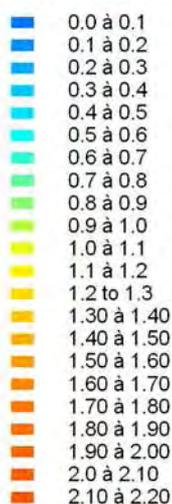
Source: Carte SHOM 7068

<p>Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire</p> <p>Bathymétrie de l'estuaire externe de la Loire</p>			
Affaire N : 1711836		Figure N° : 2.1	
Mars 2012		Dessinateur : VPT	
		Ingénieur d'affaire : VMD	
			
		 PRÉFECTURE DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE DIRECTION RÉGIONALE DE L'ÉQUIPEMENT	

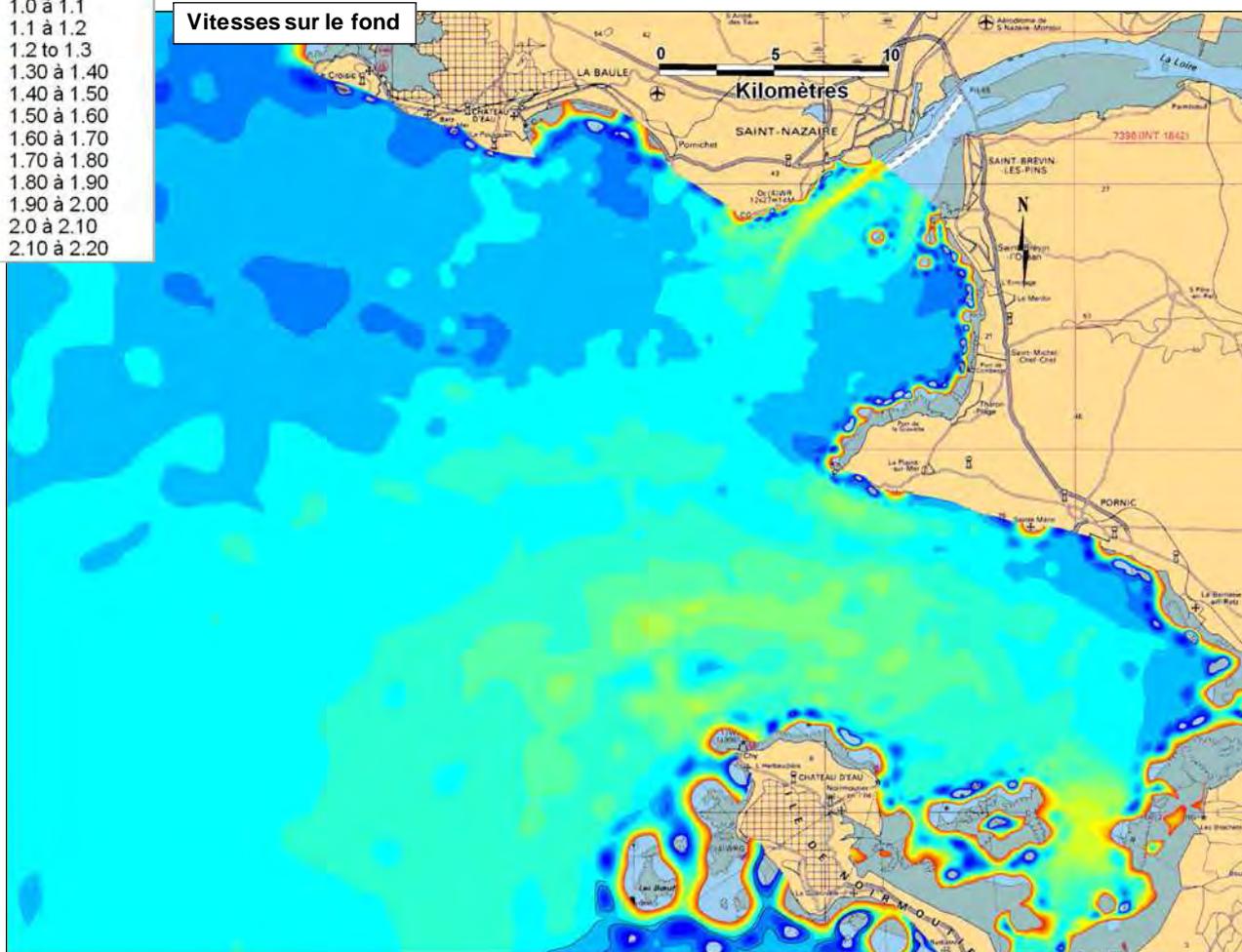
Vitesses moyennées sur la verticale



Vitesses maximum en m/s



Vitesses sur le fond



Période4 : Petite crue du 8 au 21 mars 1999

- Revif : coef 30 à 112
- Fort débit (1200-2600m³/s)
- Vents moyens à forts
- Houle faible à moyenne (<1.5m)

Fond de plan : carte SHOM 7395

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

Vitesses maximales des courants de marée observées pour une petite crue

Affaire N : 1711836

Figure N° : 2.2

SOGREAH
CONSULTANTS



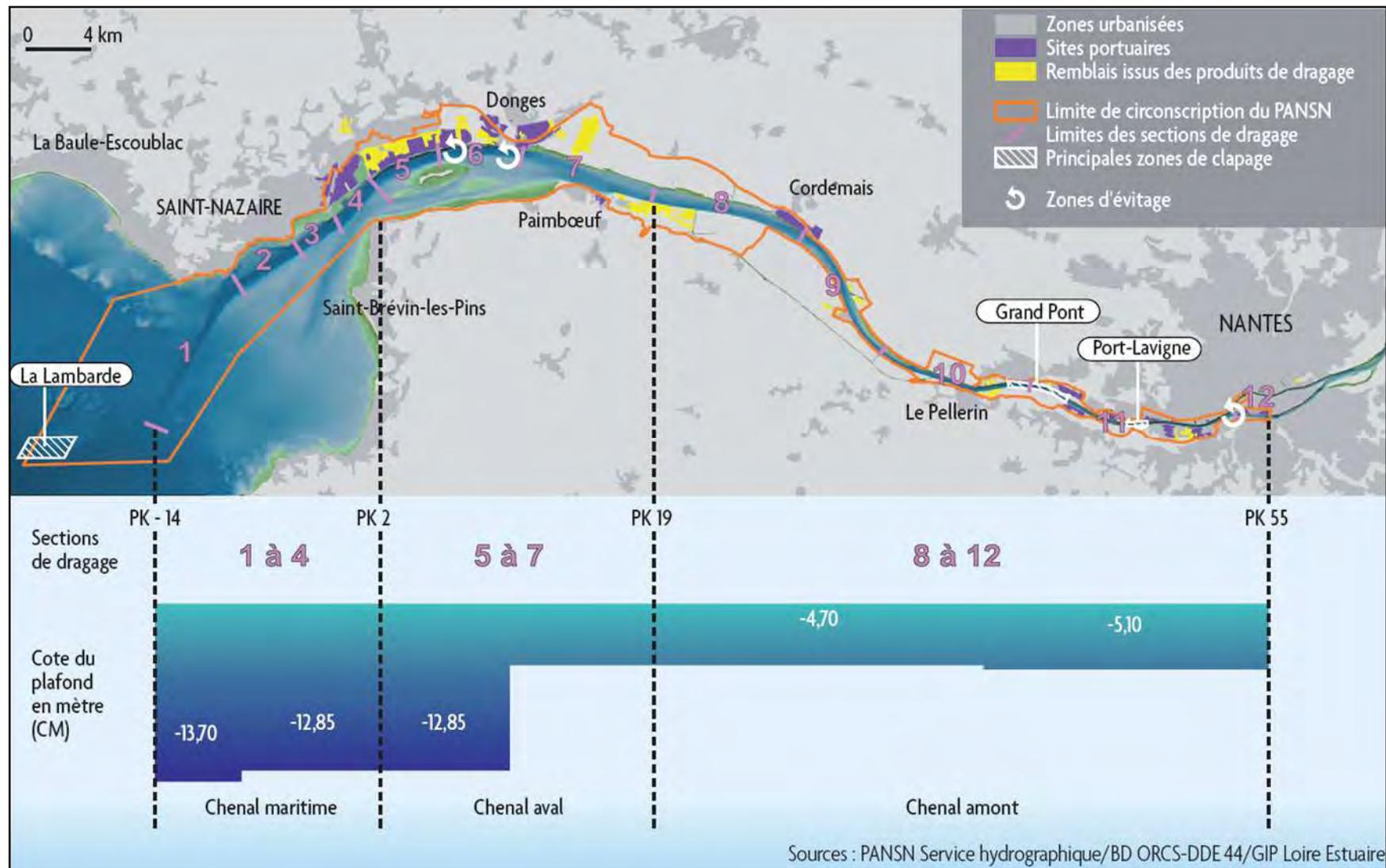
PREFECTURE DE LA REGION DES PAYS DE LA LOIRE

DIRECTION REGIONALE DE L'EQUIPEMENT

Mars 2012

Dessinateur : VPT

Ingénieur d'affaire : VMD



Les dragages d'entretien dans l'estuaire. Cahier indicateurs N°1. GIP Loire Estuaire. Novembre 2007

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

Localisation des zones de dragage

Affaire N : 1711836

Figure N° : 2.3

Mars 2012

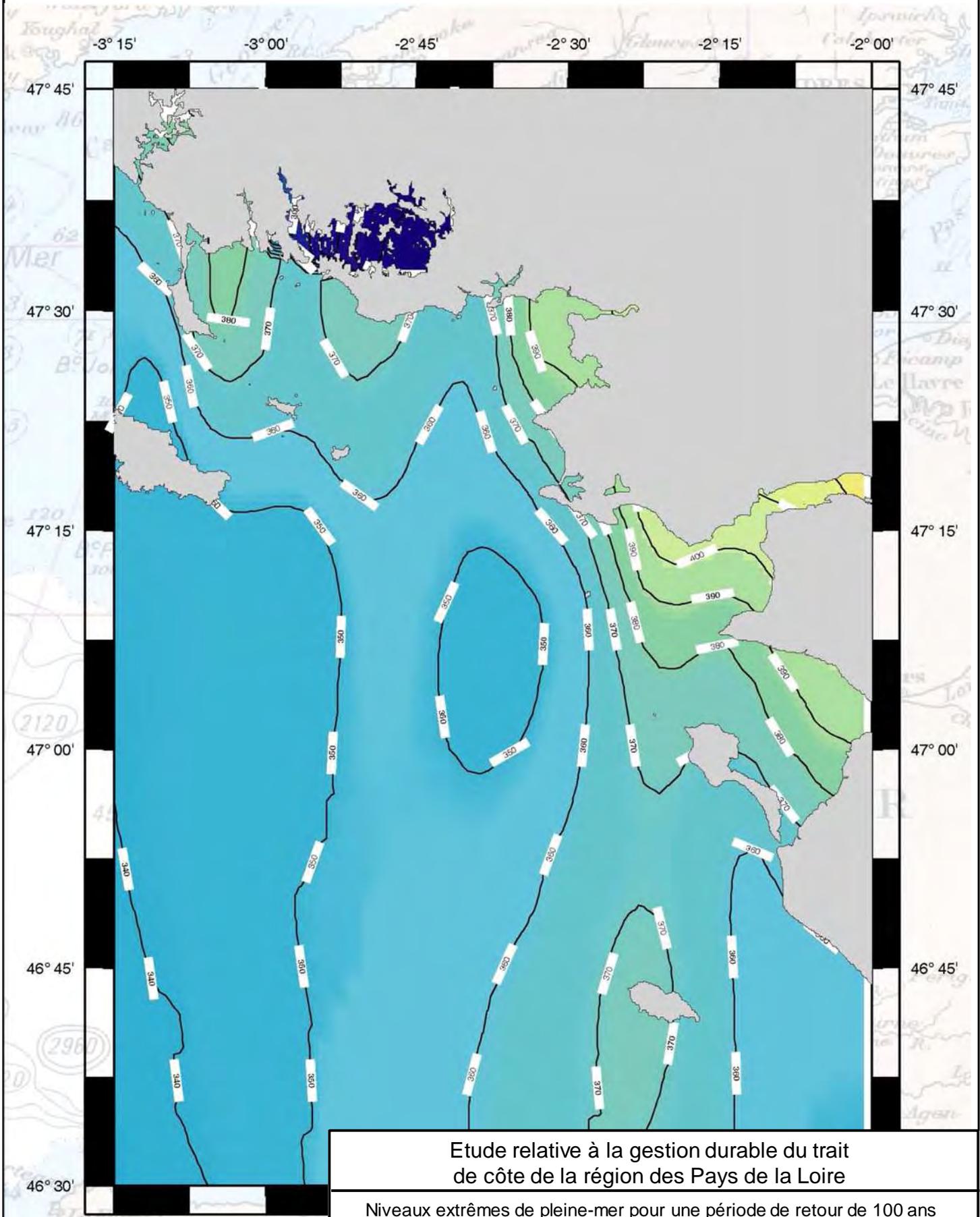
Dessinateur : TLT

 SOGREAH
CONSULTANTS

Ingénieur d'affaire : VMD

 PRÉFECTURE
DE LA RÉGION
PAYS DE LA LOIRE
DIRECTION
RÉGIONALE
DE L'ÉQUIPEMENT

Source : SHOM/CETMEF, 2008



Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

Niveaux extrêmes de pleine-mer pour une période de retour de 100 ans

Affaire N : 1711836

Figure N° :3.1

Mars 2012

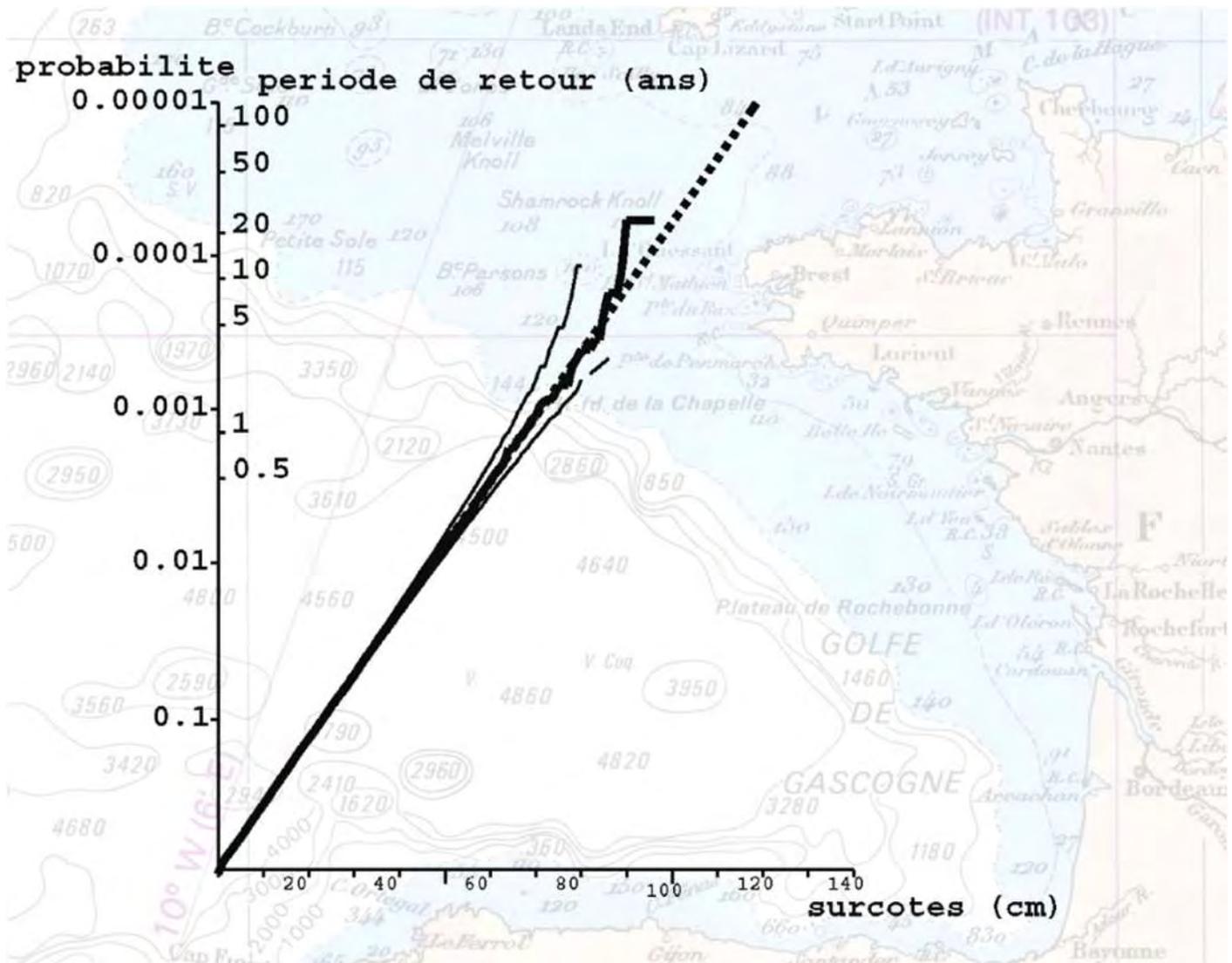
Dessinateur : VPT



PRÉFECTURE DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE

DIRECTION RÉGIONALE DE L'ÉQUIPEMENT

Ingénieur d'affaire : VMD



Source : SHOM/CETMEF, 2008

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

Dynamique des surcotes à la Pointe Saint-Gildas

Affaire N : 1711836

Figure N° : 3.2

Mars 2012

Dessinateur : VPT

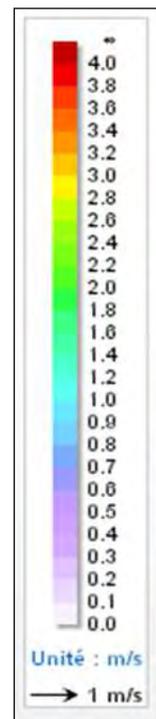
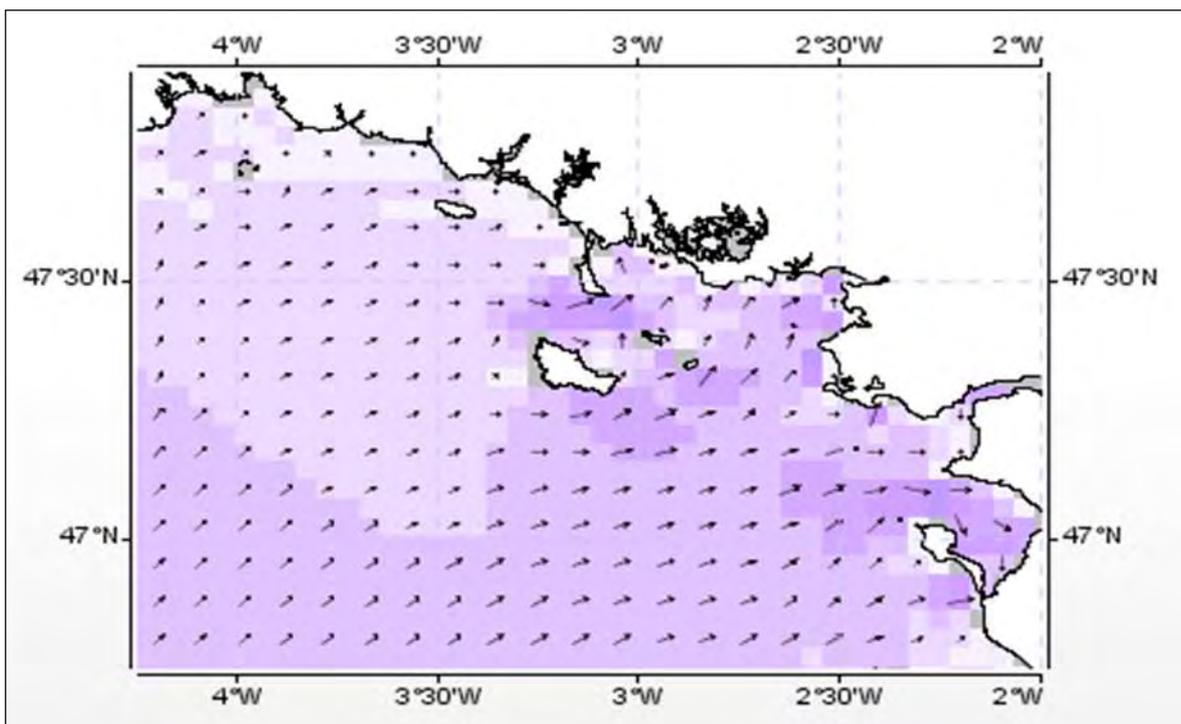
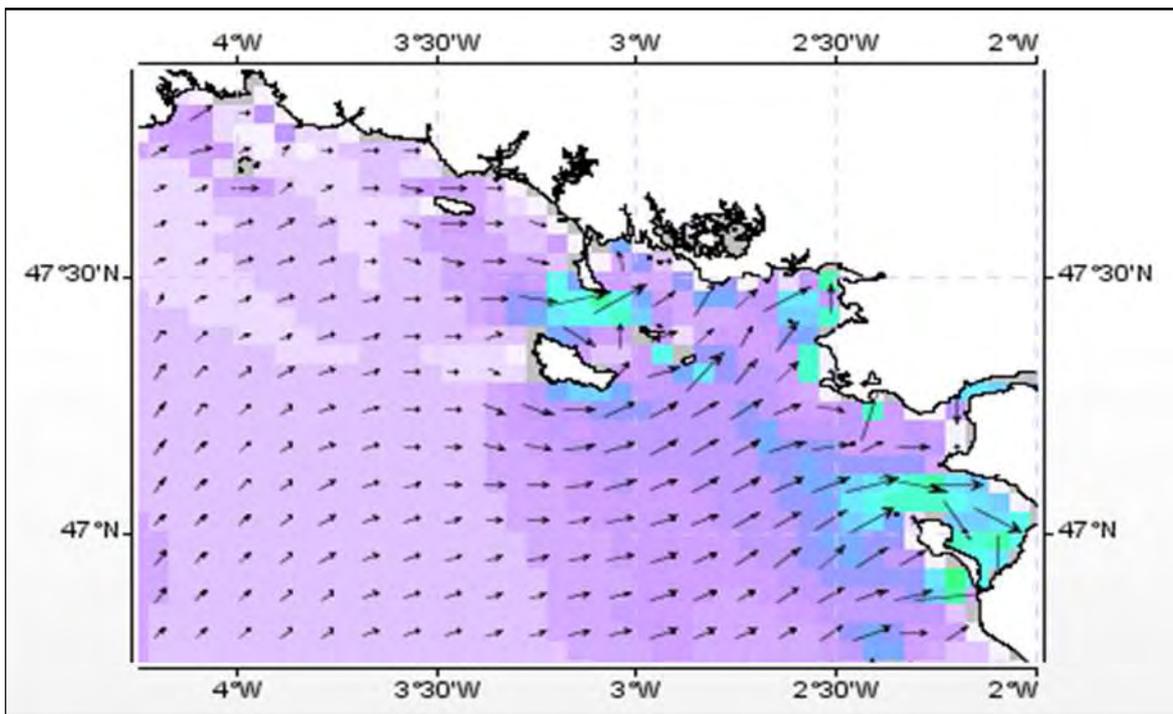


Ingénieur d'affaire : VMD



PRÉFECTURE DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE

DIRECTION RÉGIONALE DE L'ÉQUIPEMENT



Courants de marée instantanés (PM -3h, coeff. 100)
PREVIMER, 2007. Surface (en haut) et fond (en bas)

Etude relative à la gestion durable du trait
de côte de la région des Pays de la Loire

Courants de marée d'après PREVIMER

Affaire N : 1711836

Figure N° : 3.3

Mars 2012

Dessinateur : VPT

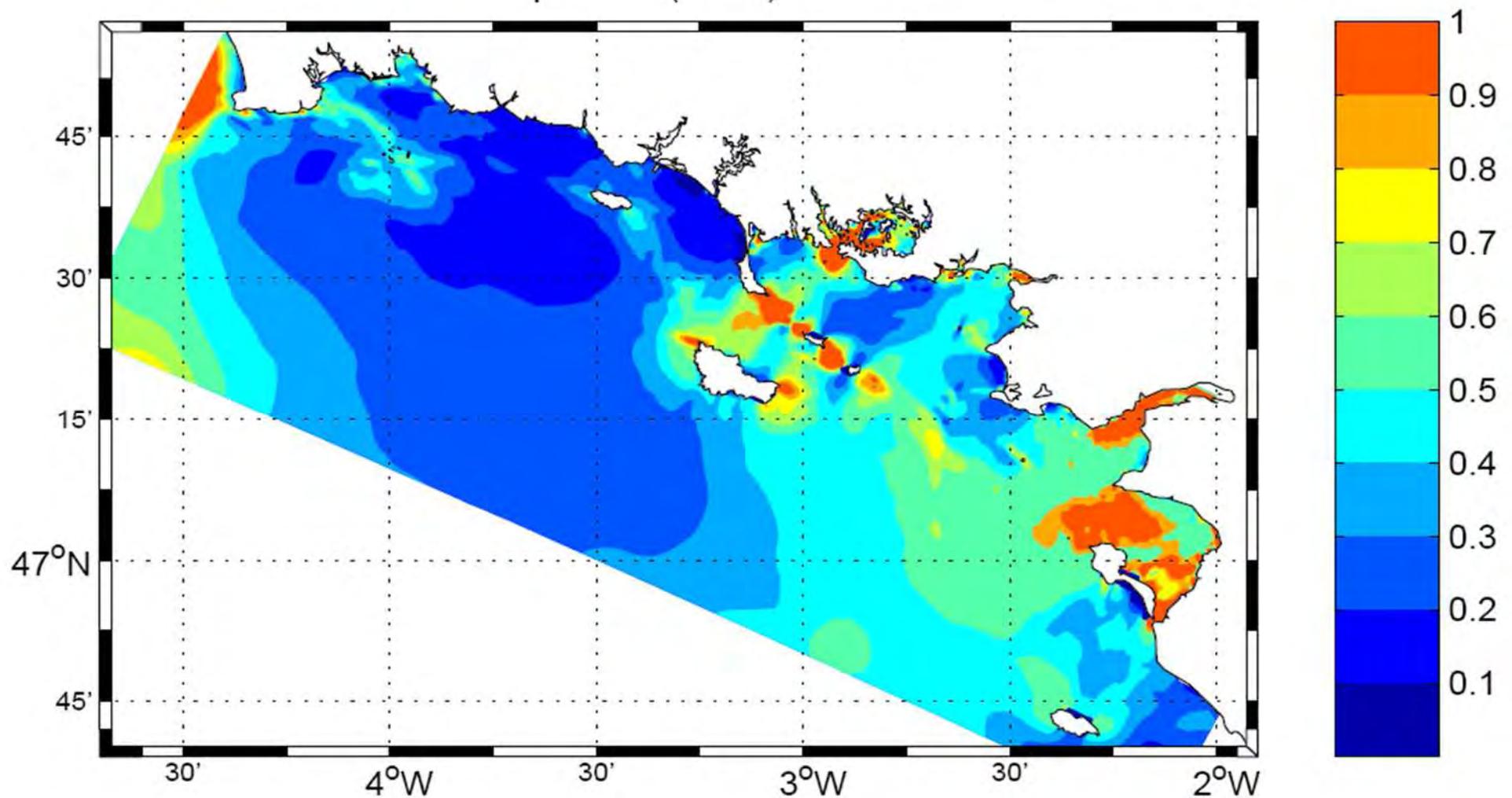
SOGREAH
CONSULTANTS

Ingénieur d'affaire : VMD



PRÉFECTURE
DE LA RÉGION
PAYS DE LA LOIRE

DIRECTION
RÉGIONALE
DE L'ÉQUIPEMENT



Courants de marée maximaux en vive eau (coef.100) – TESSIER, 2006
(moyennés sur la verticale – exprimés en m/s)

Etude relative à la gestion durable du trait
de côte de la région des Pays de la Loire

Courants de marée d'après B. TESSIER

Affaire N : 1711836

Figure N° : 3.4

Mars 2012

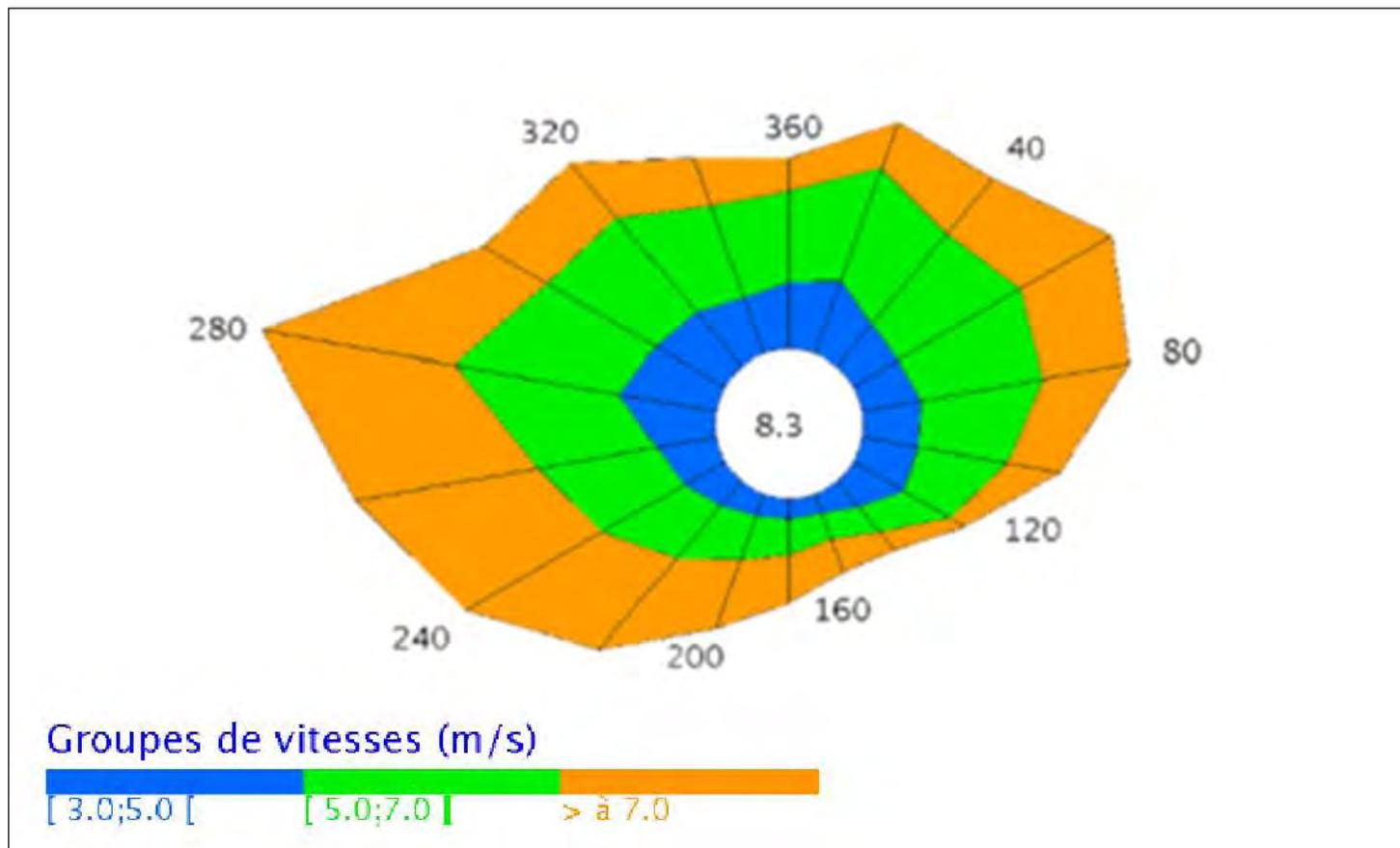
Dessinateur : VPT


SOGREAH
CONSULTANTS

Ingénieur d'affaire : VMD



Rose des vents au Talut sur la période 1985/2004 (Météo France)



Etude relative à la gestion durable du trait
de côte de la région des Pays de la Loire

Rose des vents au Talut

Affaire N : 1711836

Figure N° : 3.5

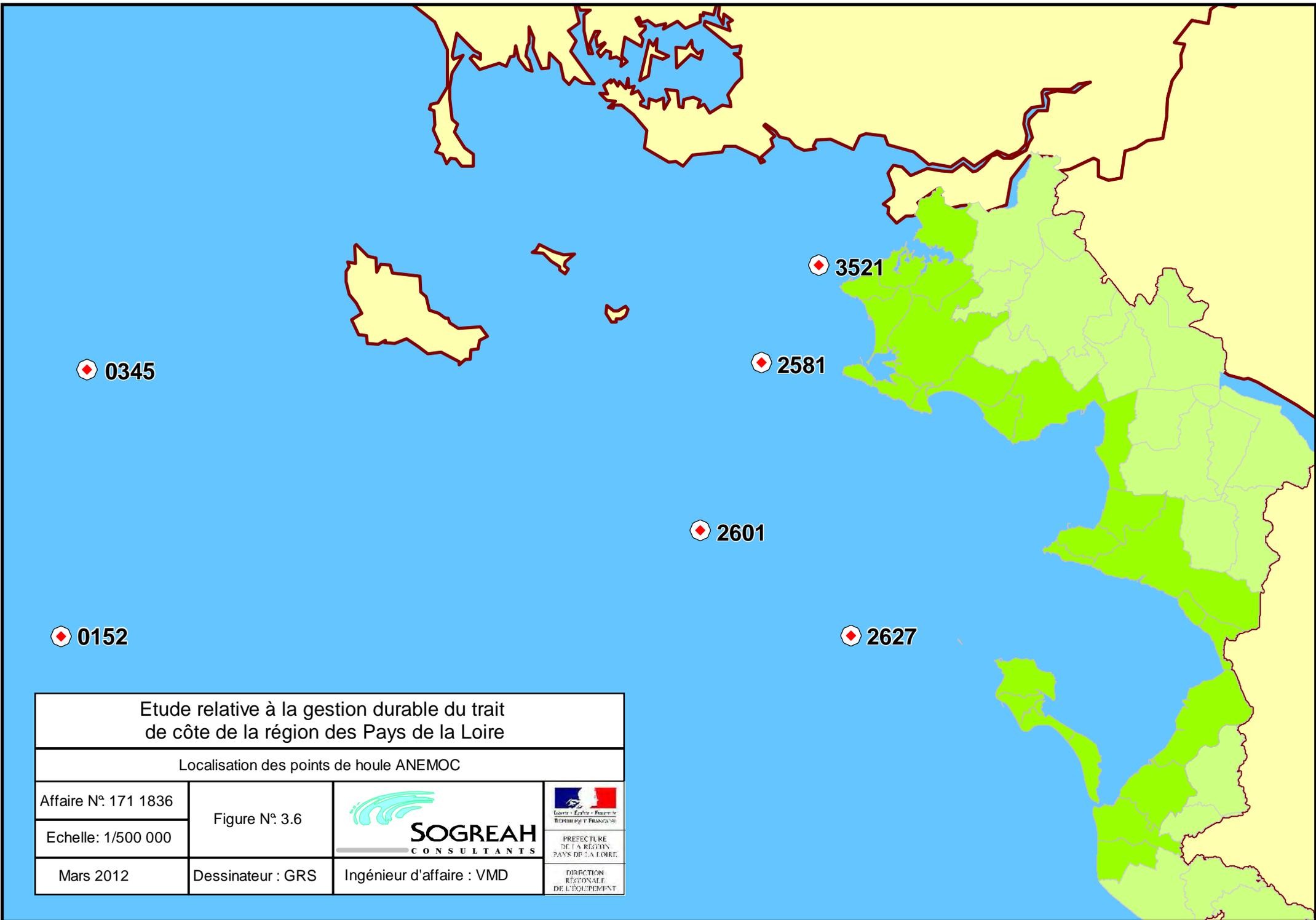

SOGREAH
CONSULTANTS


RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
PRÉFECTURE
DE LA RÉGION
PAYS DE LA LOIRE
DIRECTION
RÉGIONALE
DE L'ÉQUIPEMENT

Mars 2012

Dessinateur : VPT

Ingénieur d'affaire : VMD



Etude relative à la gestion durable du trait
de côte de la région des Pays de la Loire

Localisation des points de houle ANEMOC

Affaire N°: 171 1836	Figure N°: 3.6		 <small>COLORE • ÉGALITÉ • FRATERNITÉ</small> <small>REPUBLIQUE FRANÇAISE</small>
Echelle: 1/500 000			
Mars 2012	Dessinateur : GRS	Ingénieur d'affaire : VMD	<small>DIRECTION</small> <small>RÉGIONALE</small> <small>DE L'ÉQUIPEMENT</small>

POINT ANEMOC COAST_0345 (profondeur : -101,9 m CM)

Secteurs →	Directions moyennes des houles (degrés Nord)																Total
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
Hmo (m) ↓	0 - 360	22.5	45.0	67.5	90.0	112.5	135.0	157.5	180.0	202.5	225.0	247.5	270.0	292.5	315.0	337.5	
0.0 - 0.5	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.03	0.02	0.03	0.17	0.76	1.15	0.08	0.02	2.38
0.5 - 1.0	0.21	0.25	0.24	0.23	0.19	0.09	0.12	0.12	0.13	0.13	0.36	1.46	5.18	7.67	0.76	0.32	17.45
1.0 - 1.5	0.22	0.22	0.21	0.18	0.15	0.17	0.17	0.10	0.14	0.20	0.56	1.92	8.15	8.80	0.73	0.30	22.22
1.5 - 2.0	0.09	0.09	0.05	0.03	0.06	0.07	0.07	0.08	0.11	0.20	0.53	1.91	8.05	5.32	0.34	0.11	17.10
2.0 - 2.5	0.04	0.01	0.00	0.01	0.02	0.03	0.02	0.06	0.04	0.09	0.40	1.89	6.27	2.92	0.15	0.06	12.01
2.5 - 3.0	0.01		0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.04	0.07	0.31	1.60	5.37	1.31	0.08	0.02	8.86
3.0 - 3.5	0.00					0.00	0.00	0.01	0.03	0.03	0.23	1.38	3.69	0.66	0.04	0.01	6.09
3.5 - 4.0								0.00	0.01	0.02	0.15	1.26	2.28	0.34	0.02	0.01	4.09
4.0 - 4.5								0.00	0.01	0.02	0.10	0.99	1.56	0.23	0.01	0.00	2.92
4.5 - 5.0								0.00	0.00	0.01	0.09	0.84	0.98	0.14	0.00		2.08
5.0 - 5.5								0.00		0.01	0.06	0.66	0.65	0.06			1.45
5.5 - 6.0									0.00	0.04	0.46	0.50	0.50	0.03			1.02
> 6.0										0.00	0.09	1.18	1.03	0.04			2.33
Total	0.59	0.60	0.52	0.46	0.43	0.36	0.39	0.43	0.52	0.81	2.95	15.73	44.47	28.67	2.22	0.85	100.00

POINT ANEMOC COAST_0152 (profondeur : -119,2 m CM)

Secteurs →	Directions moyennes des houles (degrés Nord)																Total
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
Hmo (m) ↓	0 - 360	22.5	45.0	67.5	90.0	112.5	135.0	157.5	180.0	202.5	225.0	247.5	270.0	292.5	315.0	337.5	
0.0 - 0.5	0.02	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.09	0.40	0.66	0.19	0.02	1.52
0.5 - 1.0	0.26	0.23	0.23	0.21	0.17	0.12	0.12	0.08	0.07	0.09	0.24	1.03	3.62	6.72	1.26	0.39	14.86
1.0 - 1.5	0.27	0.26	0.30	0.28	0.23	0.22	0.15	0.10	0.12	0.15	0.44	1.61	5.88	9.82	1.55	0.43	21.80
1.5 - 2.0	0.14	0.13	0.13	0.11	0.15	0.09	0.10	0.09	0.08	0.18	0.43	1.57	6.24	7.24	0.72	0.22	17.61
2.0 - 2.5	0.09	0.04	0.02	0.02	0.08	0.05	0.06	0.05	0.04	0.10	0.34	1.55	5.06	4.61	0.35	0.12	12.61
2.5 - 3.0	0.02	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.02	0.04	0.04	0.07	0.26	1.23	4.51	2.97	0.17	0.05	9.43
3.0 - 3.5	0.01		0.00	0.01	0.00		0.01	0.01	0.02	0.03	0.17	1.09	3.35	1.68	0.11	0.01	6.51
3.5 - 4.0	0.00				0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.11	0.99	2.32	0.91	0.07	0.01	4.46
4.0 - 4.5								0.00	0.01	0.01	0.08	0.81	1.65	0.53	0.05	0.01	3.15
4.5 - 5.0								0.00	0.00	0.01	0.07	0.70	1.21	0.34	0.03	0.00	2.37
5.0 - 5.5								0.00	0.00	0.01	0.05	0.53	0.80	0.20	0.01		1.60
5.5 - 6.0									0.00	0.03	0.45	0.58	0.58	0.14	0.00		1.19
> 6.0											0.05	1.18	1.47	0.18			2.88
Total	0.81	0.69	0.72	0.65	0.66	0.51	0.48	0.41	0.42	0.69	2.29	12.82	37.09	35.98	4.51	1.27	100.00

Etude relative à la gestion durable du trait
de côte de la région des Pays de la Loire

Distribution des hauteurs des états de mer du large

Affaire N : 1711836

Figure N° : 3.7

Mars 2012

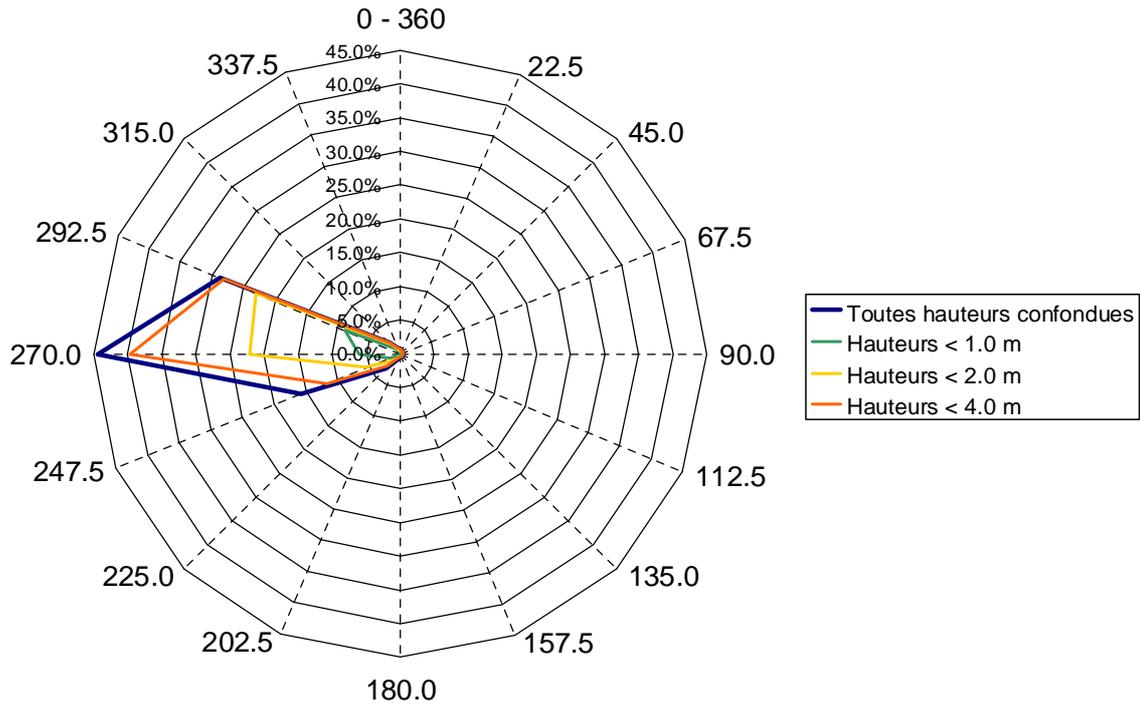
Dessinateur : VPT



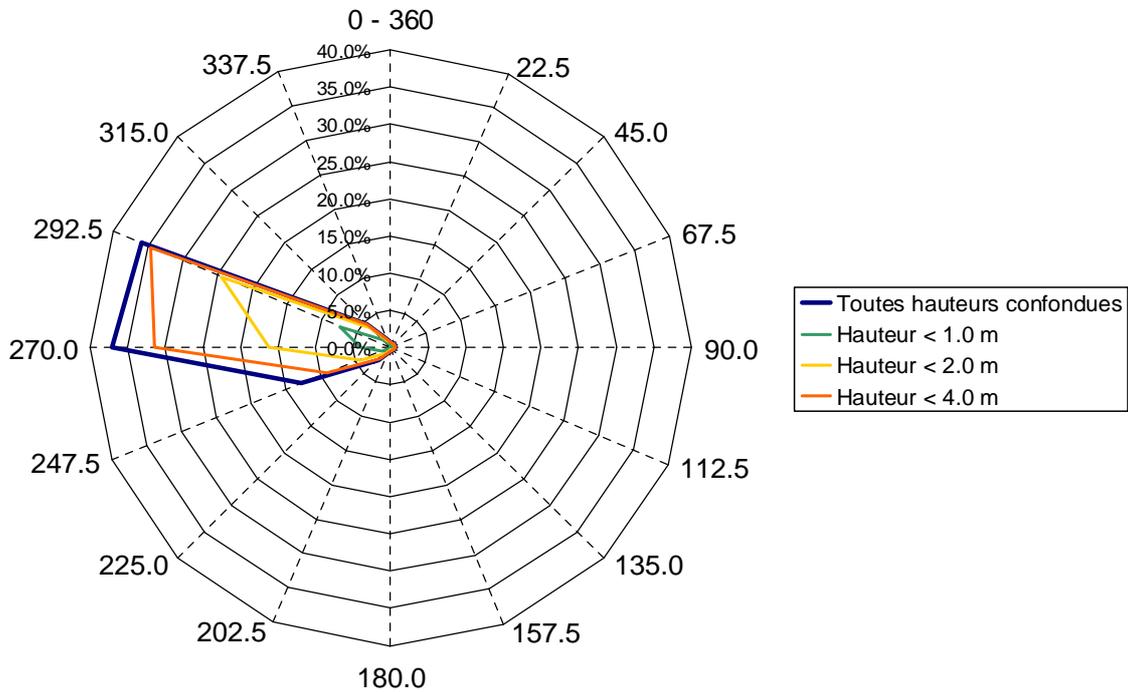
Ingénieur d'affaire : VMD



POINT ANEMOC COAST_0345 (profondeur : -101,9 m CM)



POINT ANEMOC COAST_0152 (profondeur : -119,2 m CM)



Etude relative à la gestion durable du trait
de côte de la région des Pays de la Loire

Roses des houles du large

Affaire N : 1711836

Figure N° : 3.8

Mars 2012

Dessinateur : VPT


SOGREAH
CONSULTANTS

Ingénieur d'affaire : VMD



PRÉFECTURE
DE LA RÉGION
PAYS DE LA LOIRE

DIRECTION
RÉGIONALE
DE L'ÉQUIPEMENT

POINT ANEMOC COAST_0345 (profondeur : -101,9 m CM)

Secteurs →	Directions moyennes des houles (degrés Nord)																Total
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0 - 360	22.5	45.0	67.5	90.0	112.5	135.0	157.5	180.0	202.5	225.0	247.5	270.0	292.5	315.0	337.5		
0 - 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
3 - 5	0.27	0.41	0.41	0.36	0.21	0.09	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02	0.04	0.03	0.09	0.07	0.19	2.30
5 - 7	0.17	0.11	0.06	0.06	0.15	0.17	0.22	0.13	0.12	0.11	0.29	0.64	0.71	0.91	0.32	0.19	4.37
7 - 9	0.06	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.07	0.13	0.13	0.22	0.65	2.63	6.17	7.32	0.61	0.15	18.28
9 - 11	0.06	0.03	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0.09	0.14	0.23	0.93	4.08	11.67	10.43	0.70	0.18	28.65
11 - 13	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.04	0.11	0.17	0.71	4.48	13.72	6.44	0.38	0.11	26.25
13 - 15	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.05	0.28	2.94	9.93	3.06	0.13	0.01	16.47
15 - 17	0.00						0.00	0.01	0.01	0.01	0.05	0.74	2.12	0.42	0.00	0.00	3.37
17 - 19							0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.16	0.10				0.27
19 - 21								0.00	0.00	0.00		0.02	0.01				0.04
> 21																	0.00
Total	0.59	0.60	0.52	0.46	0.43	0.36	0.39	0.43	0.52	0.81	2.95	15.73	44.47	28.67	2.22	0.85	100.00

POINT ANEMOC COAST_0152 (profondeur : -119,2 m CM)

Secteurs →	Directions moyennes des houles (degrés Nord)																Total
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0 - 360	22.5	45.0	67.5	90.0	112.5	135.0	157.5	180.0	202.5	225.0	247.5	270.0	292.5	315.0	337.5		
0 - 3	0.00	0.00	0.00				0.00									0.00	0.01
3 - 5	0.26	0.36	0.44	0.37	0.22	0.10	0.05	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05	0.03	0.04	0.10	0.14	2.21
5 - 7	0.27	0.21	0.19	0.20	0.33	0.29	0.22	0.11	0.10	0.10	0.24	0.57	0.64	0.85	0.60	0.35	5.27
7 - 9	0.12	0.05	0.05	0.03	0.05	0.05	0.09	0.14	0.11	0.20	0.51	2.23	4.91	7.42	1.35	0.30	17.60
9 - 11	0.10	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.06	0.10	0.11	0.19	0.73	3.36	9.33	11.70	1.44	0.28	27.59
11 - 13	0.06	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.06	0.14	0.52	3.44	11.41	9.73	0.74	0.18	26.45
13 - 15	0.00		0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.04	0.21	2.22	8.42	5.69	0.27	0.03	16.95
15 - 17							0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.04	0.72	1.95	0.55	0.01	3.28
17 - 19							0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.18	0.35	0.00			0.54
19 - 21							0.00	0.00	0.00			0.04	0.05				0.09
> 21																	0.00
Total	0.81	0.69	0.72	0.65	0.66	0.51	0.48	0.41	0.42	0.69	2.29	12.82	37.09	35.98	4.51	1.27	100.00

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

Distribution des périodes des états de mer du large

Affaire N : 1711836

Figure N° : 3.9

Mars 2012

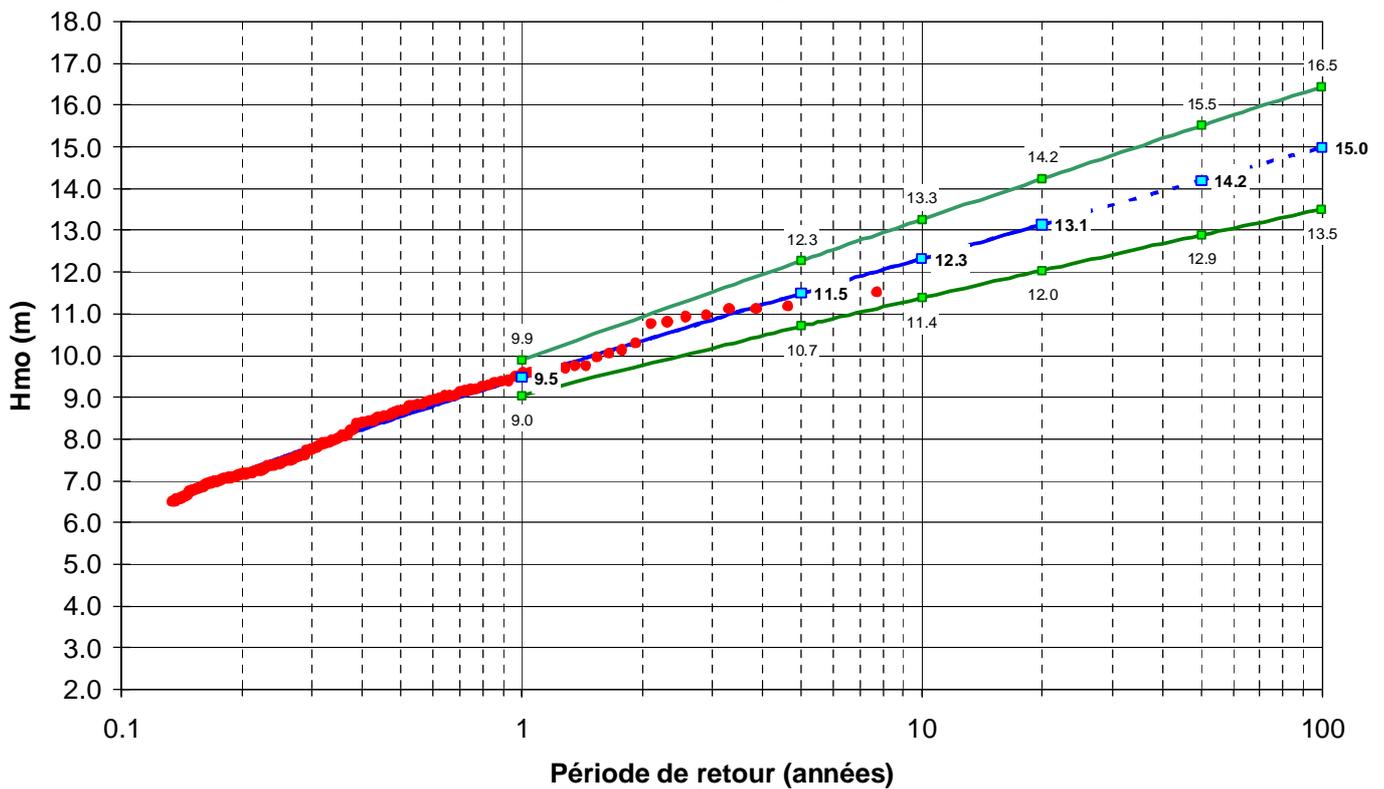
Dessinateur : VPT



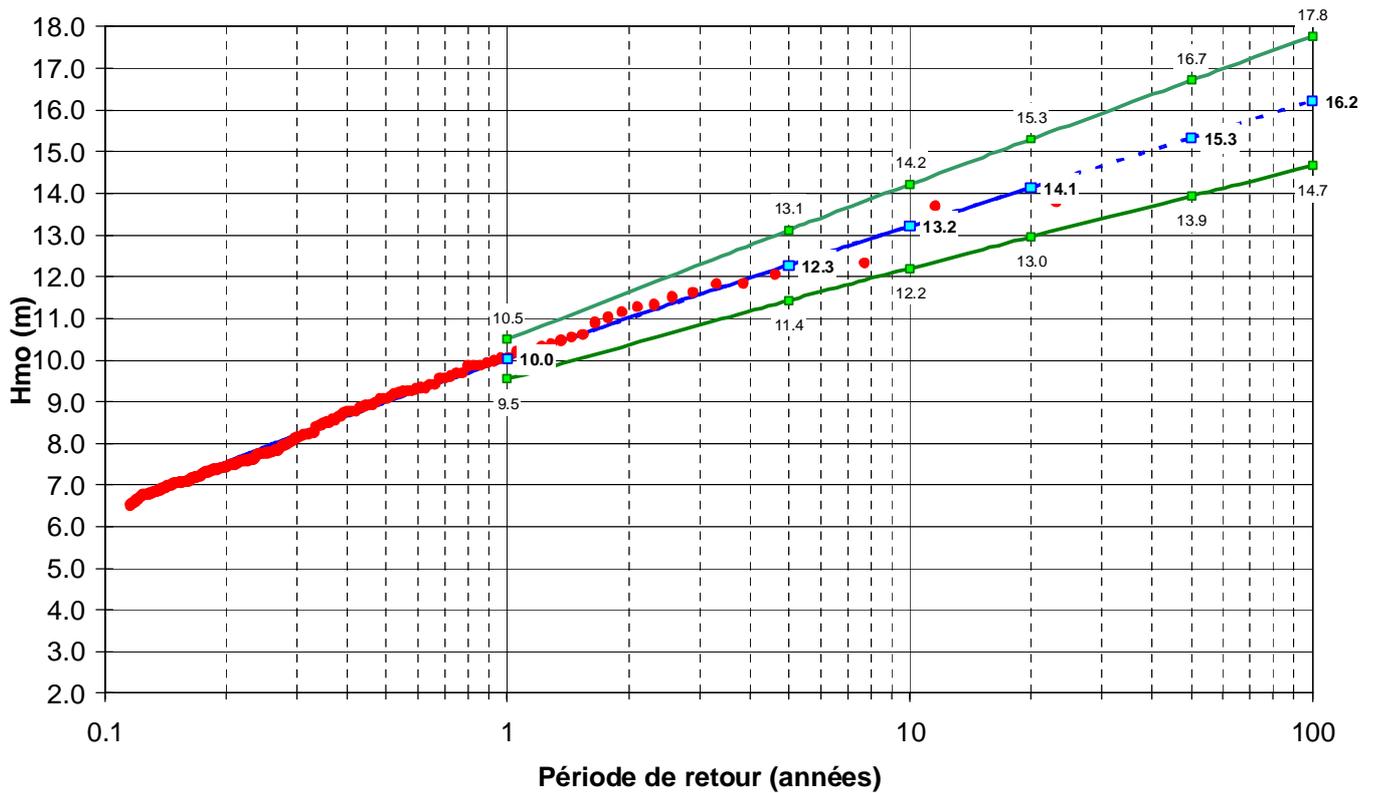
Ingénieur d'affaire : VMD



POINT ANEMOC COAST_0345 (profondeur : -101,9 m CM)



POINT ANEMOC COAST_0152 (profondeur : -119,2 m CM)



- *Données brutes*
- *Interpolation*
- *Intervalle de confiance 90%*

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire			
Graphiques des extrêmes des états de mer du large			
Affaire N : 1711836	Figure N°: 3.10		 PRÉFECTURE DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE DIRECTION RÉGIONALE DE L'ÉQUIPEMENT
Mars 2012	Dessinateur : VPT	Ingénieur d'affaire : VMD	

POINT ANEMOC COAST_3521 (profondeur : -17 m CM)

		Directions moyennes des houles (degrés Nord)															
Secteurs →	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
Hmo (m) ↓	0 - 360	22.5	45.0	67.5	90.0	112.5	135.0	157.5	180.0	202.5	225.0	247.5	270.0	292.5	315.0	337.5	Total
0.0 - 0.5	0.04	0.01	0.01						0.57	1.19	3.98	19.22	0.87	0.02	0.01	0.01	25.92
0.5 - 1.0	0.09	0.04	0.00						0.13	1.02	7.43	22.93	0.63	0.04	0.06	0.07	32.44
1.0 - 1.5									0.06	0.76	9.68	8.61	0.21	0.00			19.31
1.5 - 2.0									0.01	0.30	7.11	3.48	0.06				10.95
2.0 - 2.5									0.00	0.11	4.01	1.61					5.73
2.5 - 3.0										0.04	2.14	0.89					3.07
3.0 - 3.5										0.01	1.13	0.39					1.53
3.5 - 4.0									0.00	0.55	0.12						0.67
4.0 - 4.5											0.20	0.01					0.21
4.5 - 5.0											0.10	0.01					0.11
5.0 - 5.5											0.04						0.04
5.5 - 6.0											0.01						0.01
> 6.0																	0.00
Total	0.13	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.77	3.43	36.37	57.27	1.76	0.06	0.07	0.08	100.00

POINT ANEMOC COAST_2581 (profondeur : -29,7 m CM)

		Directions moyennes des houles (degrés Nord)															
Secteurs →	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
Hmo (m) ↓	0 - 360	22.5	45.0	67.5	90.0	112.5	135.0	157.5	180.0	202.5	225.0	247.5	270.0	292.5	315.0	337.5	Total
0.0 - 0.5	0.06	0.07	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.05	0.26	0.38	0.92	6.37	20.03	0.36	0.04	0.03	28.63
0.5 - 1.0	0.13	0.08	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.21	0.48	1.64	16.59	13.06	0.29	0.13	0.09	32.78
1.0 - 1.5	0.01							0.01	0.10	0.43	1.71	12.64	2.23	0.12	0.03	0.02	17.31
1.5 - 2.0								0.00	0.05	0.26	1.36	6.99	0.73	0.04	0.01	0.01	9.44
2.0 - 2.5									0.02	0.08	0.86	3.96	0.45	0.01			5.38
2.5 - 3.0									0.01	0.03	0.45	2.27	0.18				2.94
3.0 - 3.5									0.00	0.02	0.26	1.36	0.08				1.72
3.5 - 4.0									0.01	0.11	0.80	0.01					0.92
4.0 - 4.5									0.00	0.05	0.42	0.00					0.47
4.5 - 5.0										0.02	0.20	0.00					0.23
5.0 - 5.5										0.01	0.08						0.09
5.5 - 6.0										0.00	0.05						0.05
> 6.0											0.05						0.05
Total	0.20	0.14	0.03	0.01	0.03	0.03	0.01	0.09	0.65	1.68	7.39	51.79	36.76	0.82	0.21	0.15	100.00

POINT ANEMOC COAST_2601 (profondeur : -29,3 m CM)

		Directions moyennes des houles (degrés Nord)															
Secteurs →	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
Hmo (m) ↓	0 - 360	22.5	45.0	67.5	90.0	112.5	135.0	157.5	180.0	202.5	225.0	247.5	270.0	292.5	315.0	337.5	Total
0.0 - 0.5	0.03	0.03	0.04	0.06	0.02	0.02	0.02	0.03	0.06	0.11	0.26	1.31	7.37	1.51	0.07	0.04	11.00
0.5 - 1.0	0.22	0.22	0.17	0.13	0.11	0.07	0.06	0.11	0.18	0.16	0.55	3.54	21.29	0.93	0.21	0.20	28.14
1.0 - 1.5	0.07	0.04	0.01	0.00	0.02	0.02	0.03	0.03	0.10	0.22	0.64	4.20	15.42	0.51	0.10	0.05	21.46
1.5 - 2.0	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.05	0.15	0.55	4.00	8.65	0.19	0.03	0.02	13.68
2.0 - 2.5	0.00							0.01	0.03	0.09	0.38	3.48	5.11	0.09	0.01	0.01	9.22
2.5 - 3.0								0.00	0.01	0.03	0.22	2.58	2.60	0.04	0.00		5.48
3.0 - 3.5								0.00	0.01	0.02	0.13	2.14	1.31	0.02			3.63
3.5 - 4.0								0.00	0.00	0.01	0.10	1.71	0.71	0.00			2.53
4.0 - 4.5									0.00	0.06	1.15	0.43					1.65
4.5 - 5.0									0.00	0.02	0.79	0.25					1.06
5.0 - 5.5									0.00	0.01	0.57	0.16					0.73
5.5 - 6.0										0.00	0.41	0.08					0.49
> 6.0										0.01	0.81	0.10					0.92
Total	0.34	0.30	0.22	0.19	0.16	0.11	0.11	0.22	0.45	0.79	2.92	26.69	63.46	3.30	0.43	0.32	100.00

POINT ANEMOC COAST_2627 (profondeur : -28,9 m CM)

		Directions moyennes des houles (degrés Nord)															
Secteurs →	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
Hmo (m) ↓	0 - 360	22.5	45.0	67.5	90.0	112.5	135.0	157.5	180.0	202.5	225.0	247.5	270.0	292.5	315.0	337.5	Total
0.0 - 0.5	0.02	0.02	0.04	0.02	0.01	0.00	0.01	0.03	0.06	0.10	0.31	1.43	7.61	1.26	0.07	0.03	11.02
0.5 - 1.0	0.19	0.19	0.13	0.08	0.08	0.04	0.05	0.04	0.10	0.16	0.45	3.95	21.41	0.78	0.17	0.18	28.00
1.0 - 1.5	0.05	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.07	0.16	0.65	4.76	15.26	0.48	0.08	0.07	21.62
1.5 - 2.0	0.01	0.00						0.01	0.02	0.10	0.51	4.66	8.31	0.17	0.03	0.01	13.84
2.0 - 2.5									0.02	0.06	0.32	4.26	4.52	0.08	0.02	0.00	9.27
2.5 - 3.0								0.00	0.01	0.02	0.18	3.22	2.02	0.03	0.00		5.48
3.0 - 3.5									0.00	0.01	0.12	2.51	0.97	0.01			3.62
3.5 - 4.0									0.00	0.10	1.94	0.50					2.54
4.0 - 4.5									0.00	0.03	1.27	0.26					1.56
4.5 - 5.0									0.00	0.01	0.91	0.13					1.05
5.0 - 5.5										0.00	0.64	0.07					0.71
5.5 - 6.0										0.00	0.41	0.02					0.43
> 6.0										0.00	0.83	0.02					0.86
Total	0.27	0.23	0.17	0.10	0.09	0.06	0.06	0.10	0.27	0.61	2.69	30.78	61.11	2.81	0.37	0.29	100.00

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

Distribution des hauteurs des états de mer en zone côtière

Affaire N : 1711836

Figure N°: 3.11



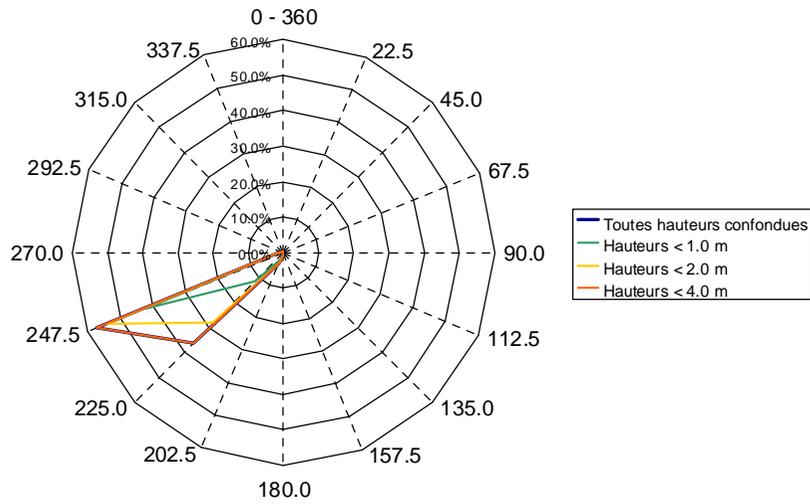
Mars 2012

Dessinateur : VPT

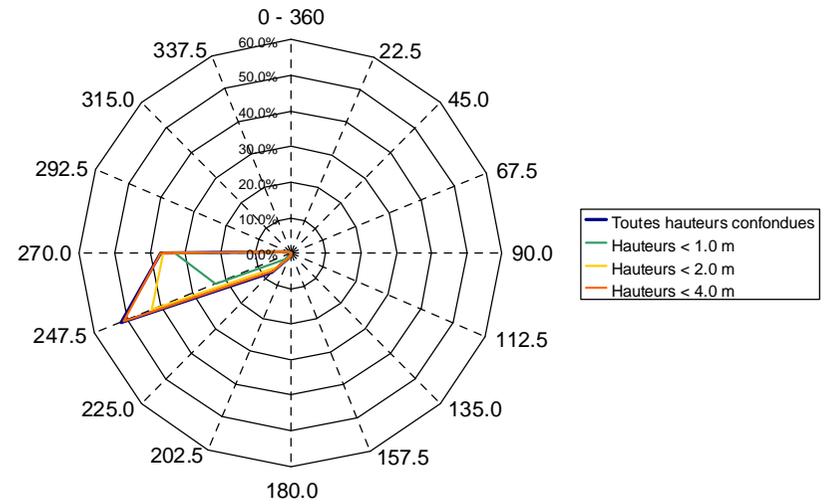
Ingénieur d'affaire : VMD



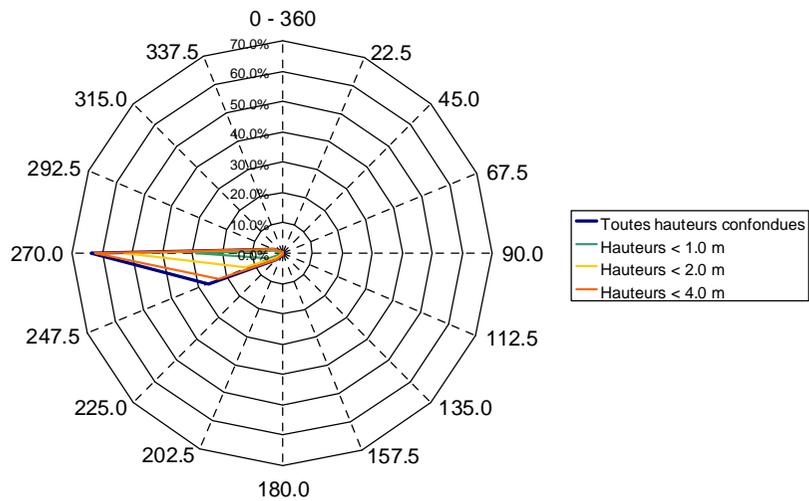
POINT ANEMOC COAST_3521 (profondeur : -17 m CM)



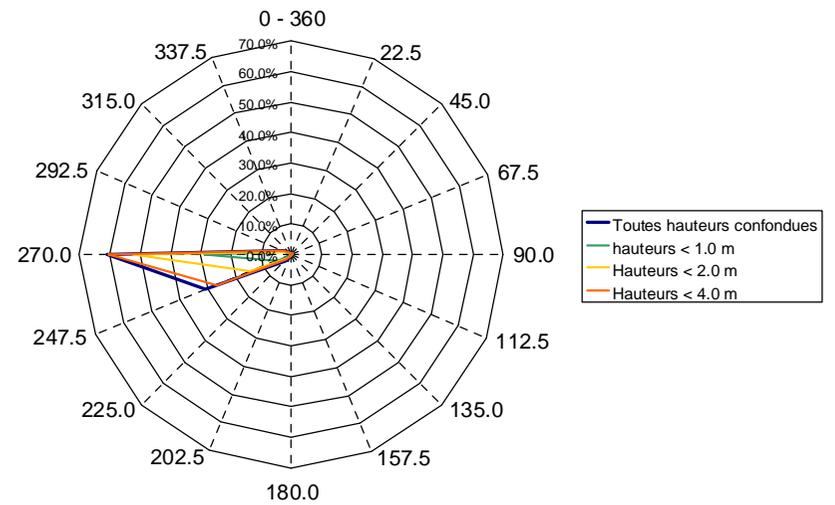
POINT ANEMOC COAST_2581 (profondeur : -29,7 m CM)



POINT ANEMOC COAST_2601 (profondeur : -29,3 m CM)



POINT ANEMOC COAST_2627 (profondeur : -28,9 m CM)



Etude relative à la gestion durable du trait
de côte de la région des Pays de la Loire

Roses des houles en zone côtière

Affaire N : 1711836

Figure N°: 3.12

Mars 2012

Dessinateur : VPT



Ingénieur d'affaire : VMD



DIRECTION
REGIONALE
DE L'EQUIPEMENT

POINT ANEMOC COAST_3521 (profondeur : -17 m CM)

Directions moyennes des houles (degrés Nord)																	
Secteurs →	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0 - 3	0.03	0.02	0.01						0.00	0.00	0.00	0.01	0.01		0.00	0.00	0.09
3 - 5	0.09	0.03							0.22	0.26	0.35	0.53	0.34	0.01	0.02	0.06	1.93
5 - 7		0.00							0.44	1.31	2.83	2.03	0.52	0.01	0.01	0.00	7.15
7 - 9	0.00								0.08	0.93	4.88	3.82	0.36	0.01	0.01	0.00	10.09
9 - 11									0.01	0.44	7.78	11.01	0.32	0.02	0.00	0.00	19.59
11 - 13									0.01	0.33	9.22	16.52	0.11	0.00	0.01	0.00	26.22
13 - 15									0.00	0.10	7.05	15.91	0.07	0.01	0.01	0.00	23.16
15 - 17									0.00	0.04	2.72	6.27	0.03	0.00			9.06
17 - 19										0.02	1.12	0.96					2.11
19 - 21										0.00	0.40	0.19					0.60
>21											0.01	0.00					0.02
Total	0.13	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.77	3.43	36.37	57.27	1.76	0.06	0.07	0.08	100.00

POINT ANEMOC COAST_2581 (profondeur : -29,7 m CM)

Directions moyennes des houles (degrés Nord)																	
Secteurs →	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0 - 3	0.05	0.07	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.22
3 - 5	0.13	0.07	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.04	0.11	0.13	0.29	0.48	0.73	0.26	0.07	0.09	2.45
5 - 7	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.38	0.72	1.62	4.08	2.59	0.25	0.04	0.01	9.76
7 - 9	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.11	0.49	2.18	10.85	10.30	0.11	0.02	0.01	24.08
9 - 11	0.00		0.00			0.00	0.00	0.00	0.03	0.17	1.79	12.13	11.24	0.09	0.02	0.02	25.49
11 - 13	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.11	0.99	11.41	8.39	0.06	0.03	0.01	18.95
13 - 15				0.00	0.00		0.00	0.00	0.01	0.03	0.41	8.66	4.21	0.04	0.02	0.00	13.37
15 - 17									0.00	0.01	0.08	3.09	1.32	0.02	0.00		4.52
17 - 19			0.00							0.01	0.04	0.84	0.03	0.00			0.91
19 - 21											0.00	0.24	0.00				0.24
>21												0.01					0.01
Total	0.20	0.14	0.03	0.01	0.03	0.03	0.01	0.09	0.65	1.68	7.39	51.79	36.76	0.82	0.21	0.15	100.00

POINT ANEMOC COAST_2601 (profondeur : -29,3 m CM)

Directions moyennes des houles (degrés Nord)																	
Secteurs →	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0 - 3	0.01	0.02	0.04	0.06	0.02	0.00			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.17
3 - 5	0.22	0.21	0.15	0.11	0.11	0.06	0.05	0.03	0.04	0.04	0.08	0.10	0.16	0.14	0.10	0.15	1.76
5 - 7	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.11	0.20	0.22	0.48	1.42	1.66	0.50	0.08	0.05	4.87
7 - 9	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.11	0.24	0.70	5.04	13.38	1.41	0.06	0.03	21.06
9 - 11	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.05	0.17	0.78	6.29	17.48	0.78	0.05	0.03	25.71
11 - 13	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.10	0.60	6.24	15.21	0.29	0.07	0.03	22.64
13 - 15	0.00				0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.22	4.75	11.39	0.14	0.06	0.01	0.01	16.62
15 - 17						0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.05	1.85	3.63	0.03	0.00		5.58
17 - 19		0.00					0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.73	0.50	0.00			1.26
19 - 21											0.00	0.26	0.06				0.33
>21												0.01	0.00				0.01
Total	0.34	0.30	0.22	0.19	0.16	0.11	0.11	0.22	0.45	0.79	2.92	26.69	63.46	3.30	0.43	0.32	100.00

POINT ANEMOC COAST_2627 (profondeur : -28,9 m CM)

Directions moyennes des houles (degrés Nord)																	
Secteurs →	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0 - 3	0.01	0.02	0.04	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.13
3 - 5	0.18	0.18	0.11	0.04	0.04	0.01	0.03	0.04	0.02	0.03	0.08	0.12	0.18	0.15	0.09	0.14	1.44
5 - 7	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.14	0.21	0.46	1.43	1.78	0.59	0.09	0.05	4.85
7 - 9	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.05	0.16	0.63	4.86	13.29	1.21	0.05	0.03	20.35
9 - 11	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.10	0.68	6.54	17.86	0.52	0.04	0.03	25.67
11 - 13	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.08	0.55	7.31	14.93	0.22	0.05	0.03	23.22
13 - 15	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.23	6.11	10.24	0.11	0.04	0.02	0.02	16.79
15 - 17			0.00					0.00	0.00	0.01	0.05	2.79	2.75	0.02	0.00		5.62
17 - 19							0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	1.19	0.27	0.00		0.00	1.49
19 - 21											0.00	0.41	0.01				0.43
>21												0.01					0.01
Total	0.27	0.23	0.17	0.10	0.09	0.06	0.06	0.10	0.27	0.61	2.69	30.78	61.11	2.81	0.37	0.29	100.00

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

Distribution des périodes des états de mer en zone côtière

Affaire N : 1711836

Figure N°: 3.13

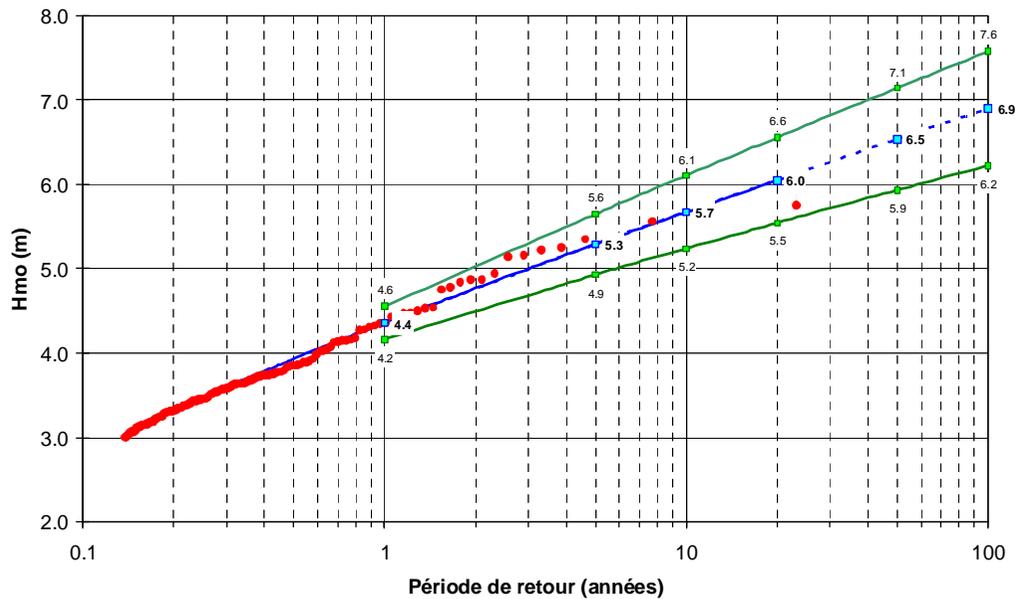
Mars 2012

Dessinateur : VPT

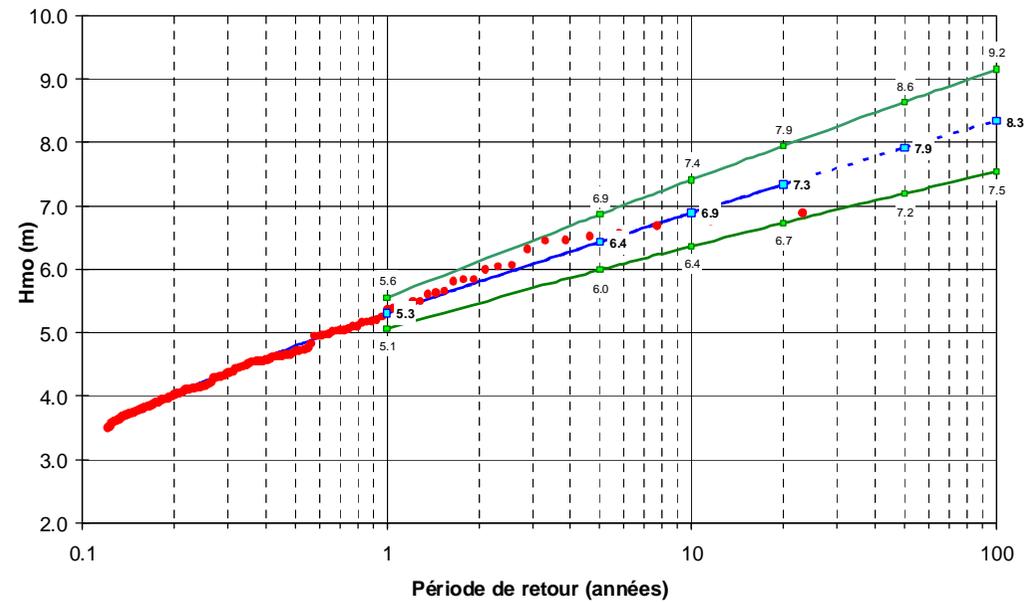
Ingénieur d'affaire : VMD



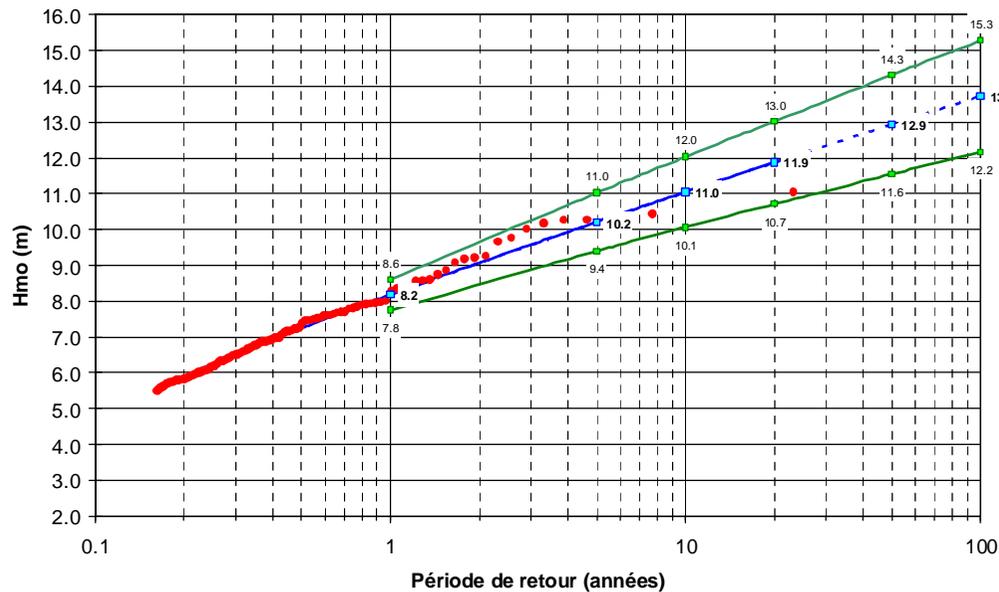

POINT ANEMOC COAST_3521 (profondeur : -17 m CM)



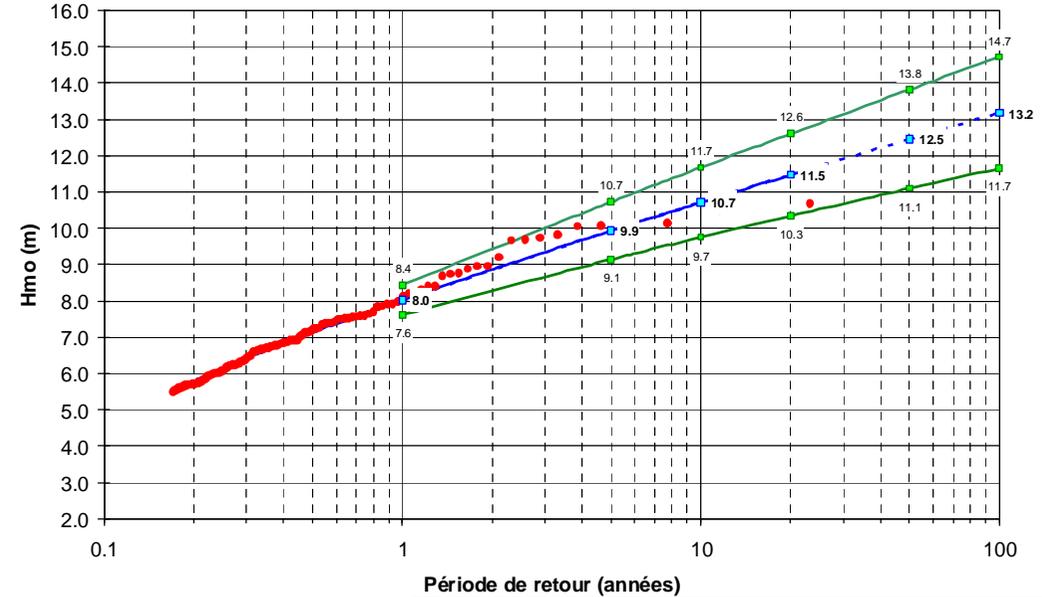
POINT ANEMOC COAST_2581 (profondeur : -29,7 m CM)



POINT ANEMOC COAST_2601 (profondeur : -29,3 m CM)



POINT ANEMOC COAST_2627 (profondeur : -28,9 m CM)



Période de retour (années)

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire			
Graphiques des extrêmes des états de mer en zone côtière			
Affaire N : 1711836	Figure N°: 3.14		
Mars 2012	Dessinateur : VPT		

Etude relative à la gestion durable du trait
de côte de la région des Pays de la Loire

Emprise et maillage du modèle TOMAWAC

Affaire N° 171 1836

Figure N° 3.15



PREFECTURE
DE LA RÉGION
PAYS DE LA LOIRE

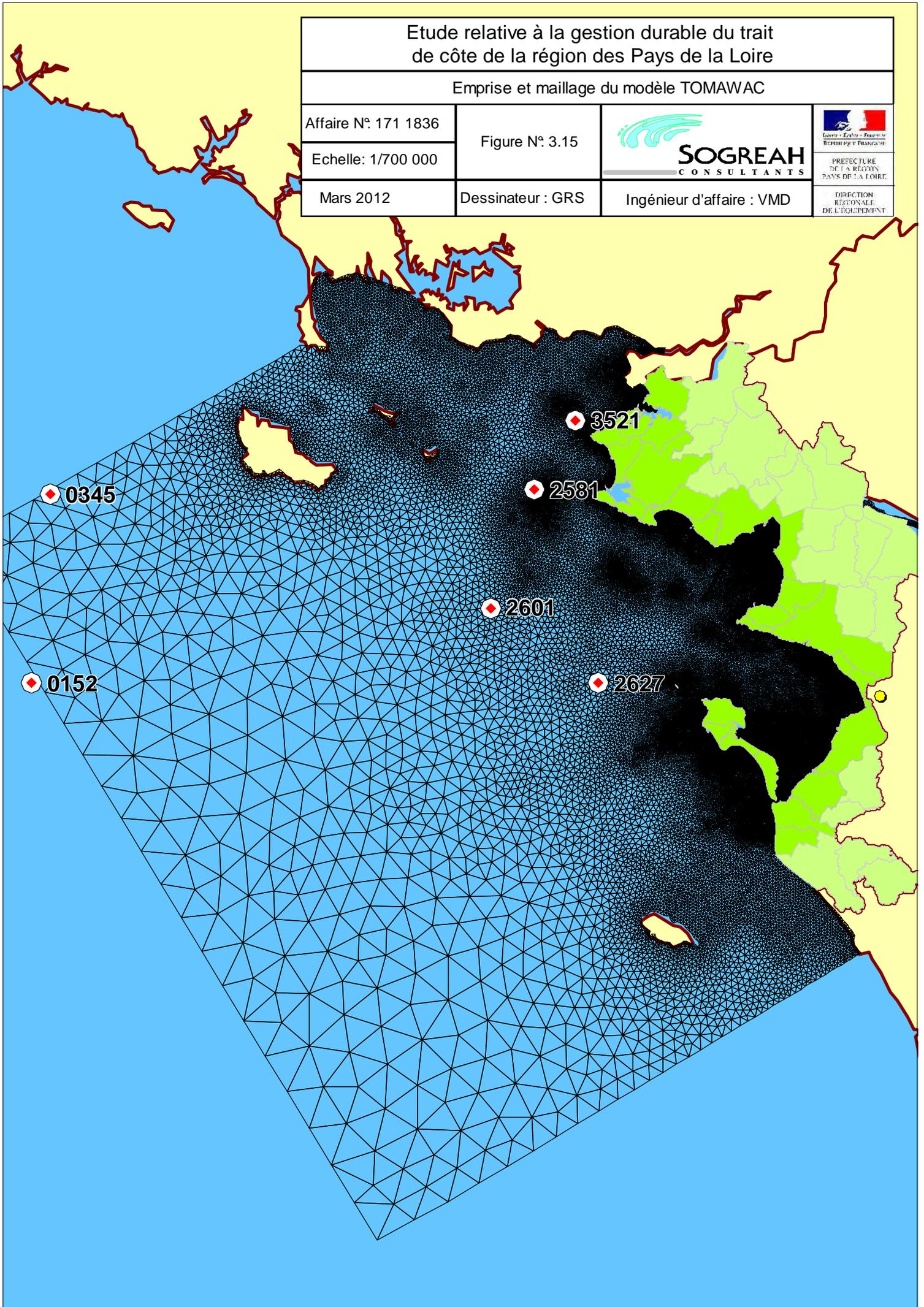
Echelle: 1/700 000

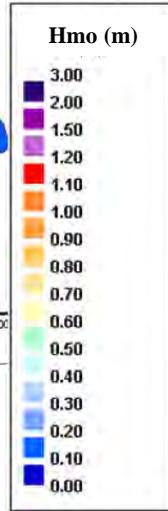
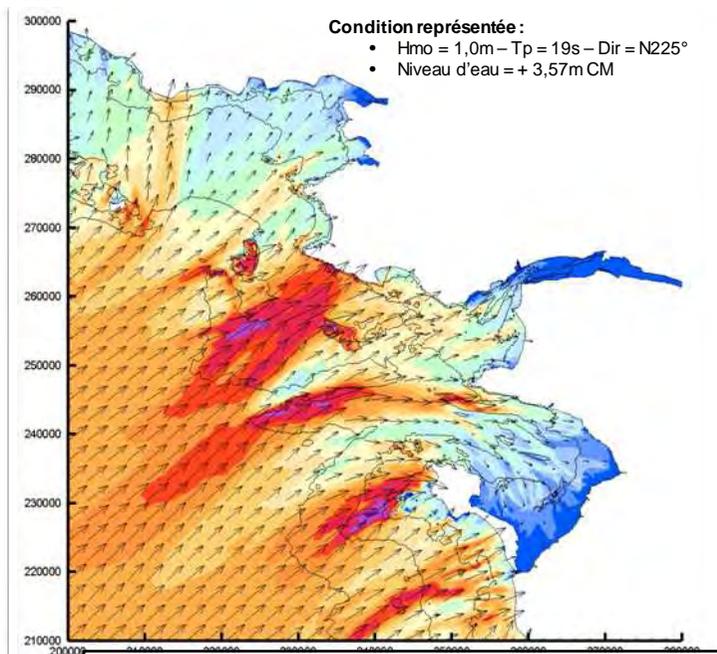
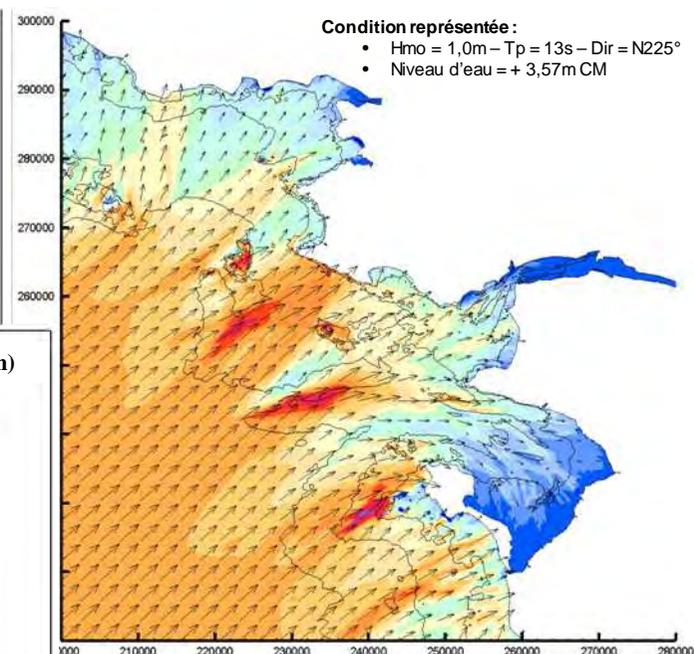
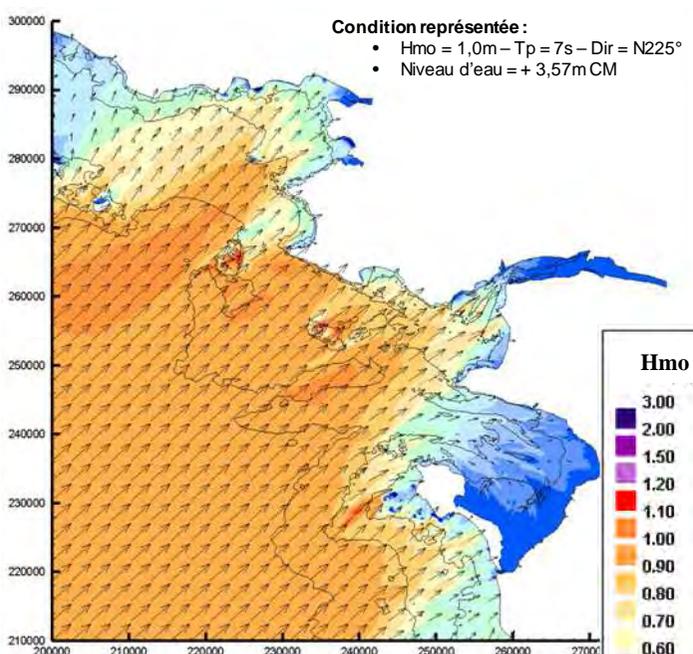
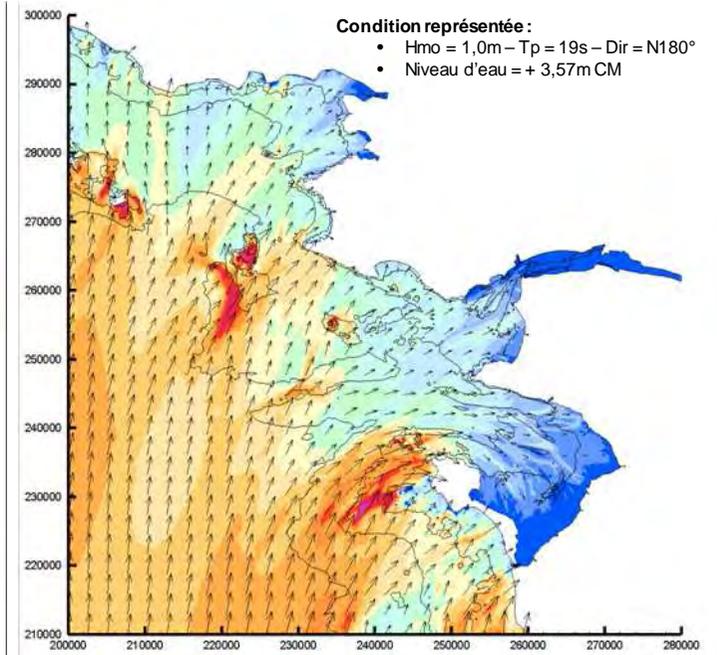
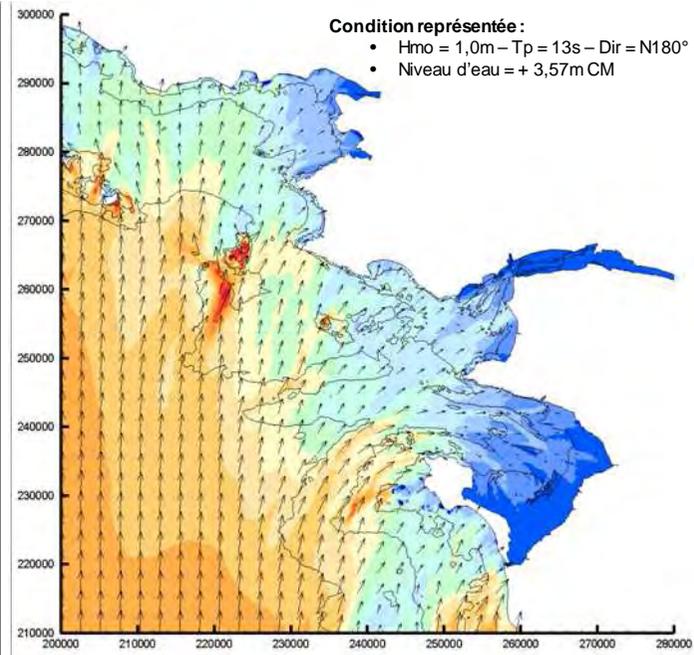
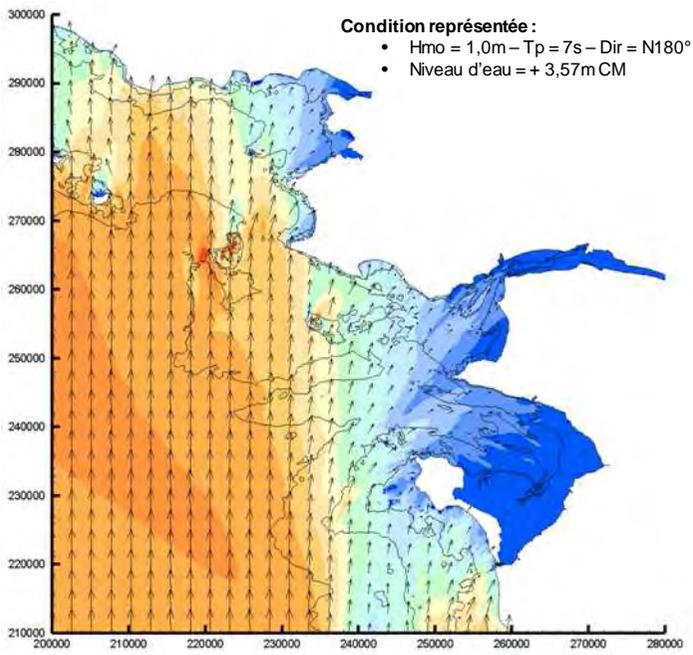
Mars 2012

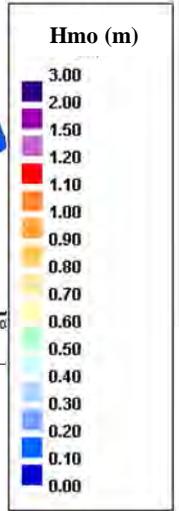
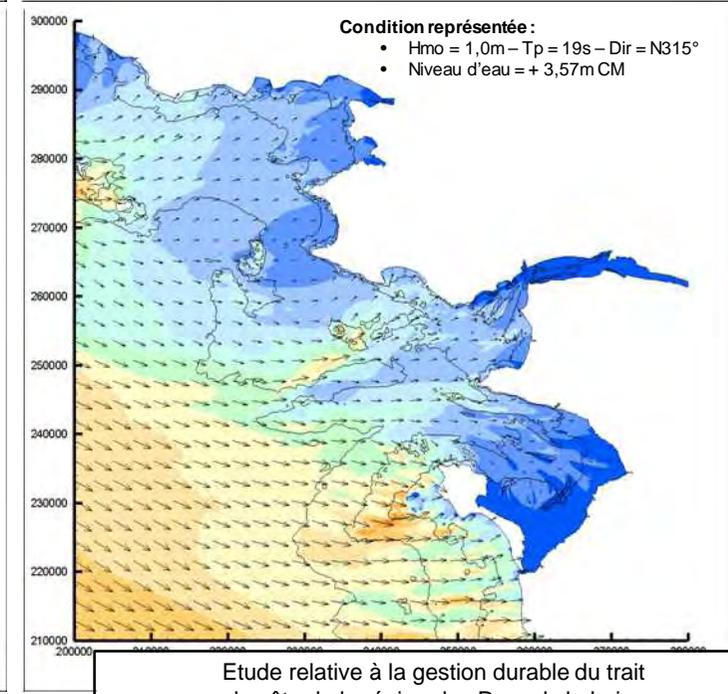
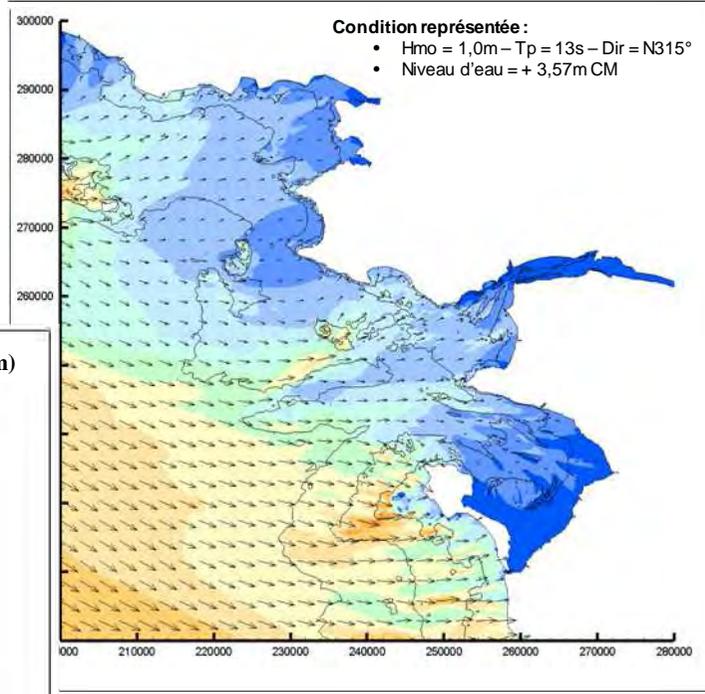
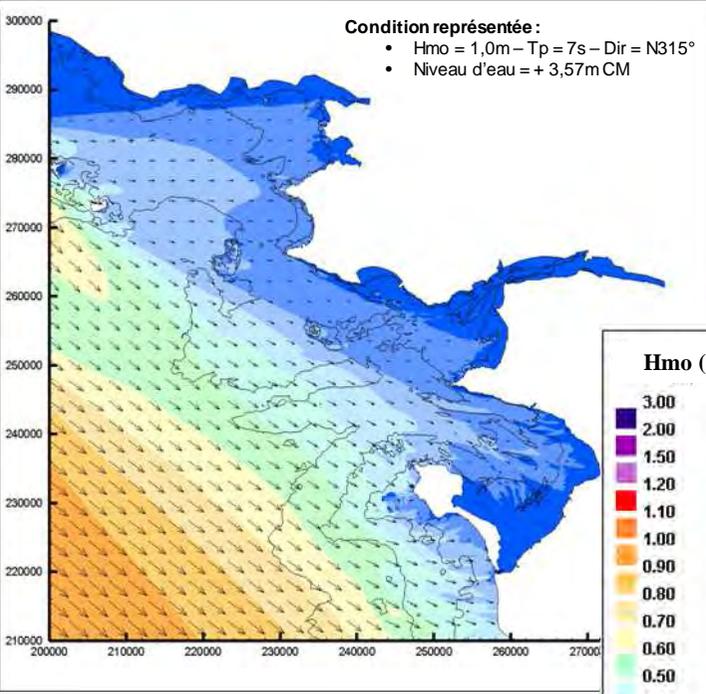
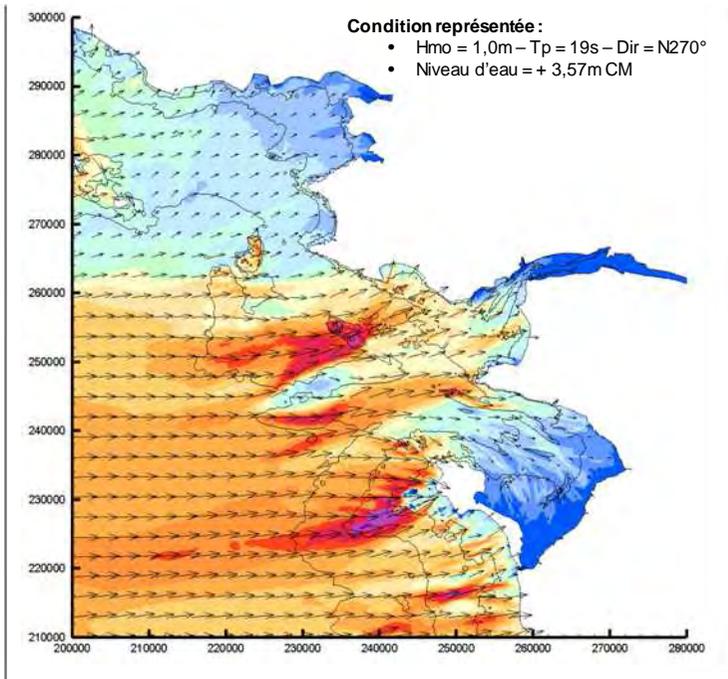
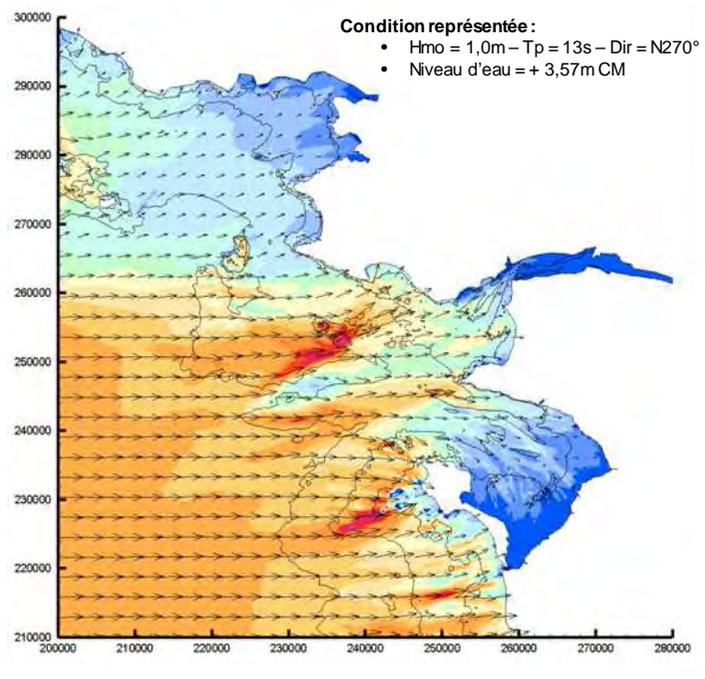
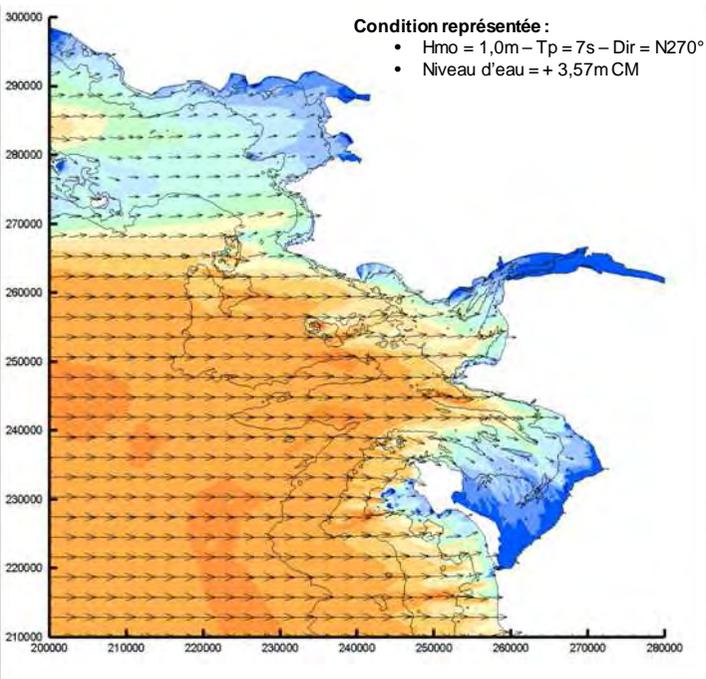
Dessinateur : GRS

Ingénieur d'affaire : VMD

DIRECTION
RÉGIONALE
DE L'ÉQUIPEMENT





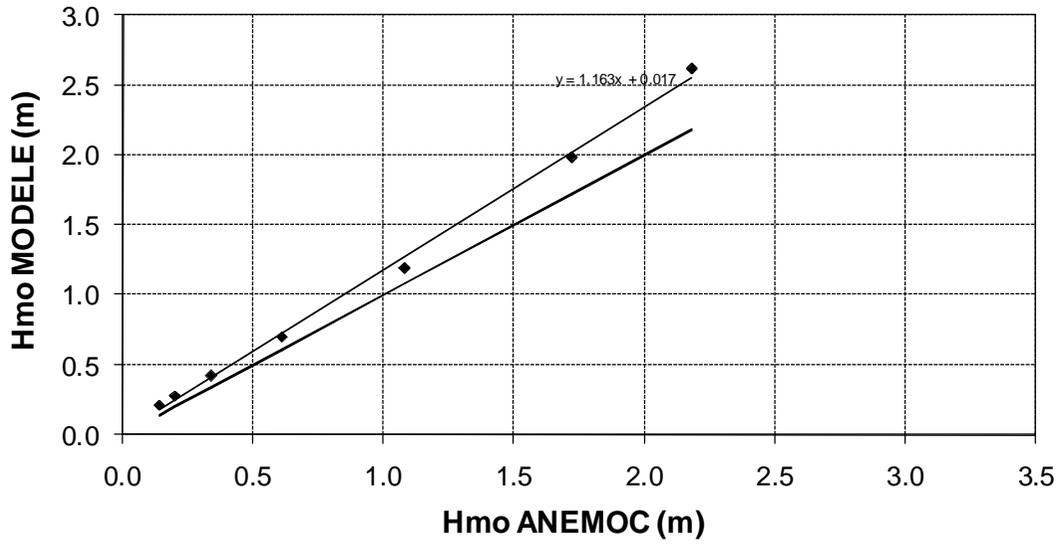


Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

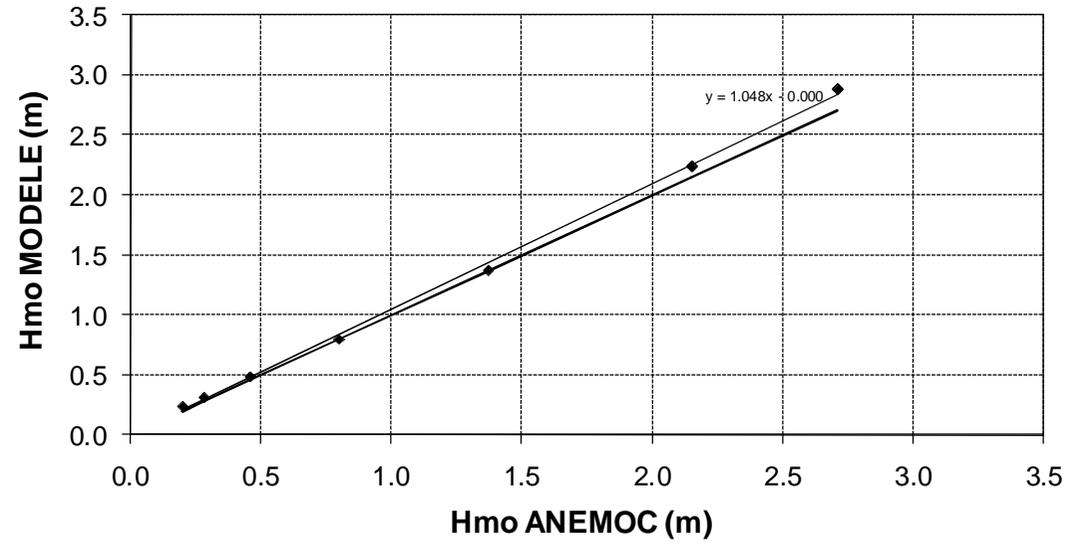
Epures de réfraction pour des houles de direction N270 et N315

Affaire N : 1711836	Figure N°: 3.17		
Mars 2012	Dessinateur : VPT		

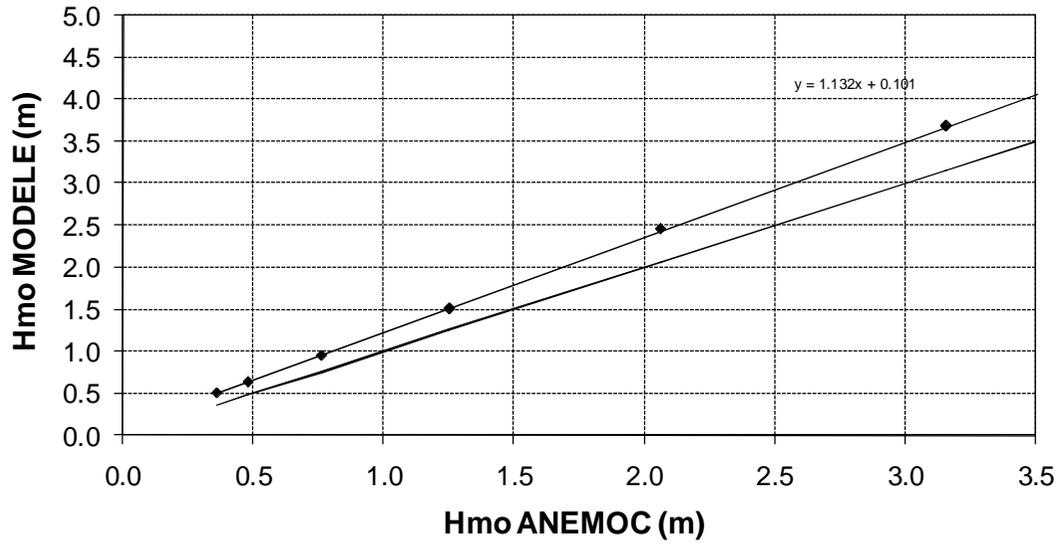
COAST_3521



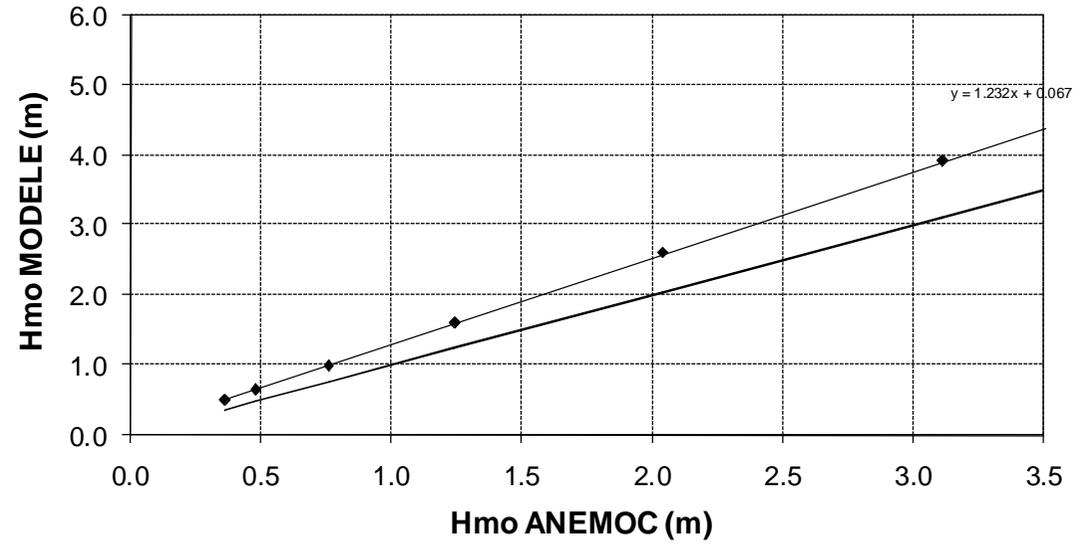
COAST_2581



COAST_2601

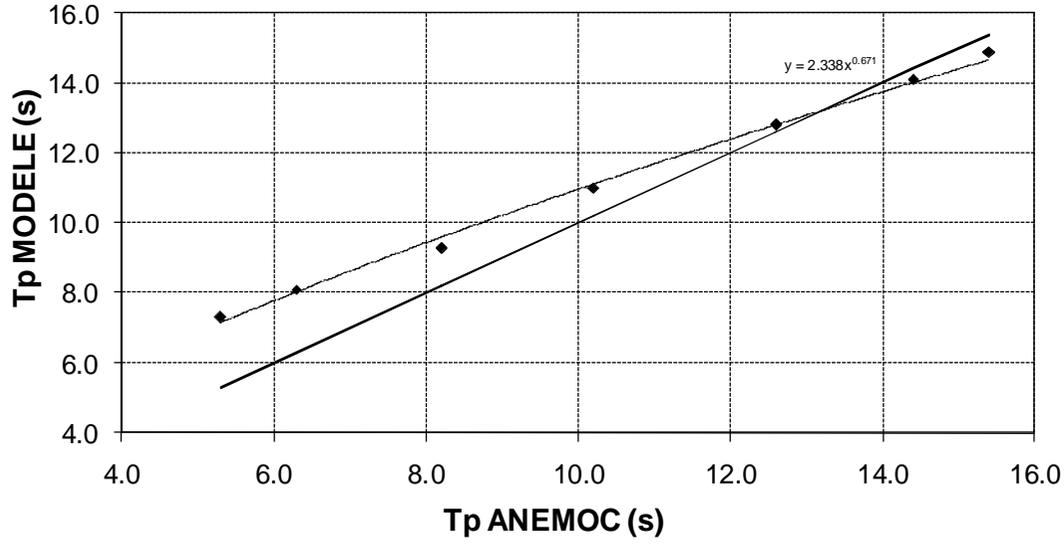


COAST_2627

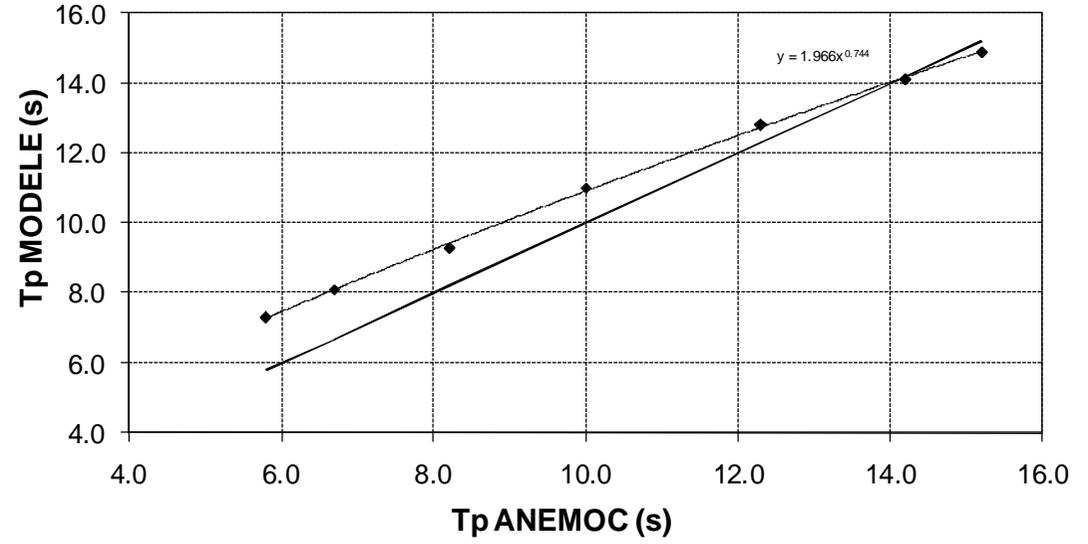


Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire			
Diagramme quantile-quantile en hauteur avant calibration			
Affaire N : 1711836	Figure N°: 3.18		
Mars 2012	Dessinateur : VPT		

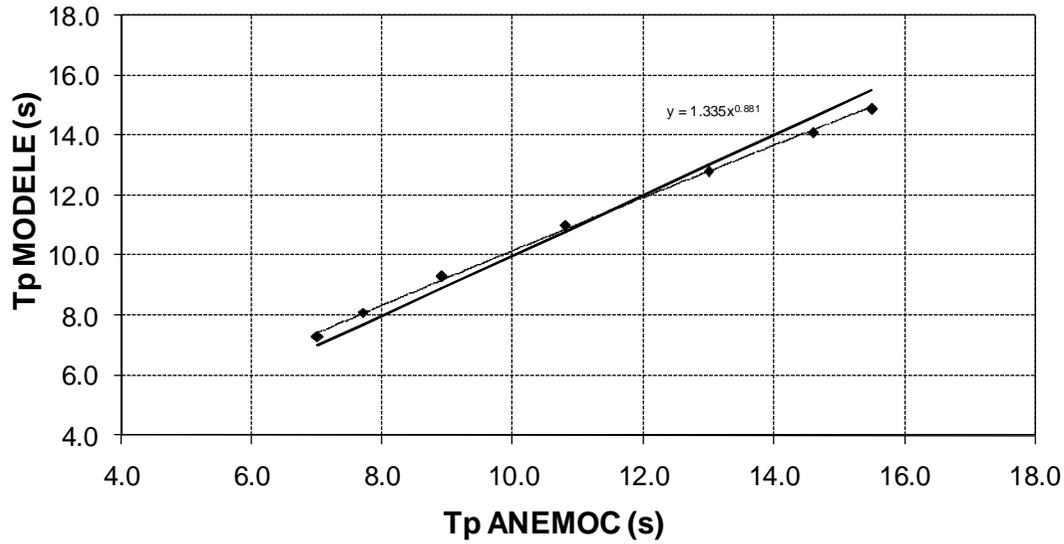
COAST_3521



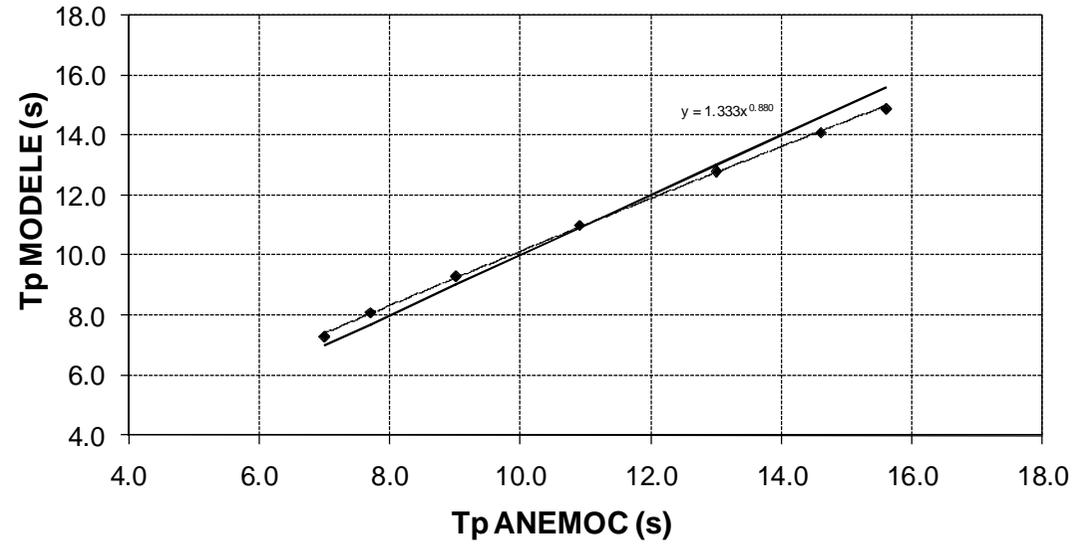
COAST_2581



COAST_2601

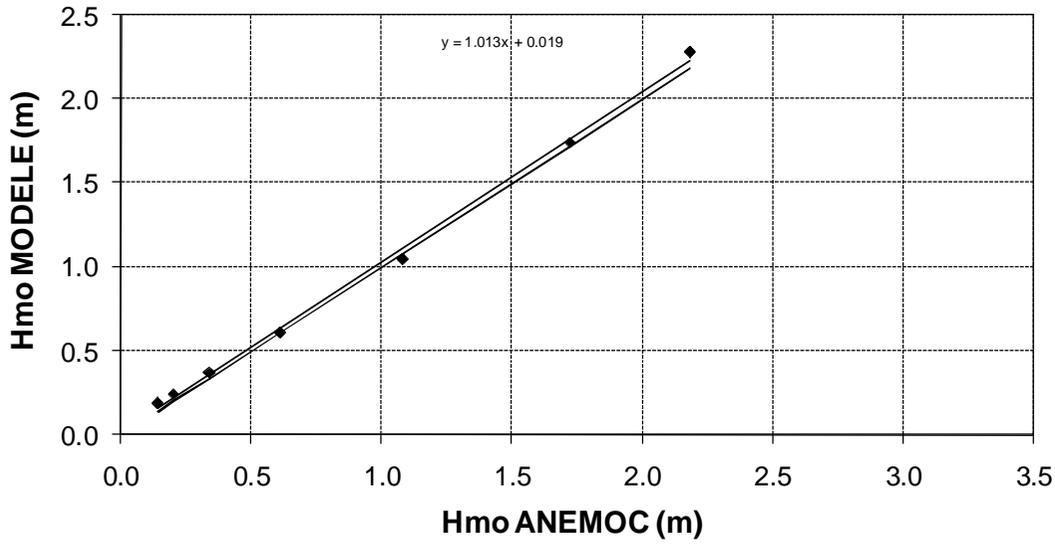


COAST_2627

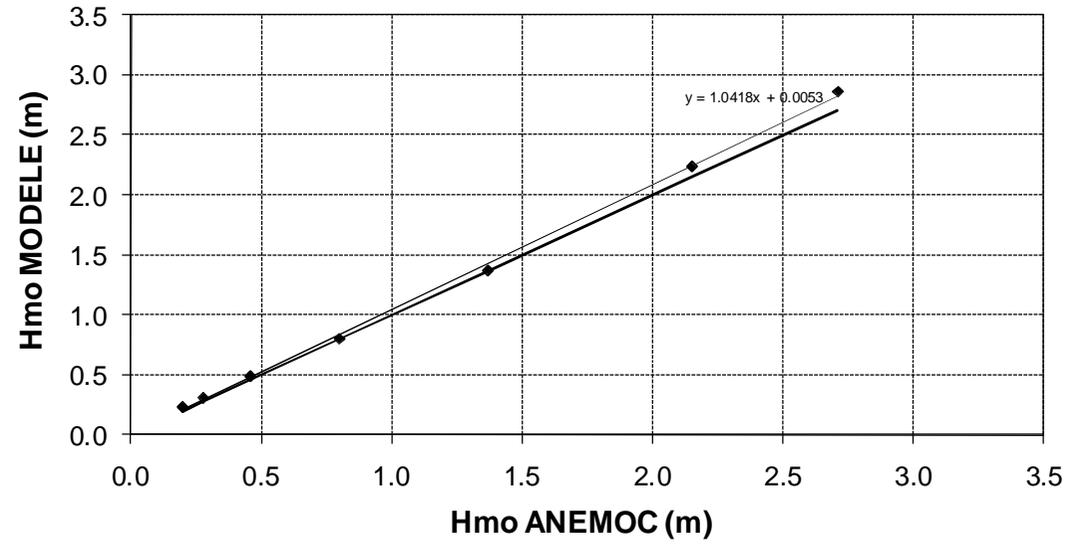


Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire			
Diagramme quantile-quantile en période avant calibration			
Affaire N : 1711836	Figure N°: 3.19		
Mars 2012	Dessinateur : VPT		

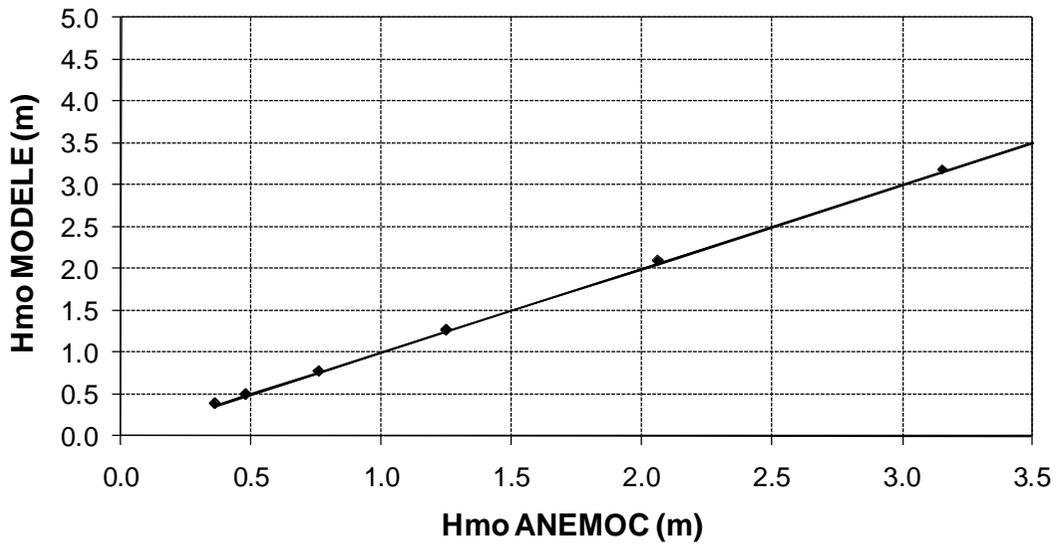
COAST_3521



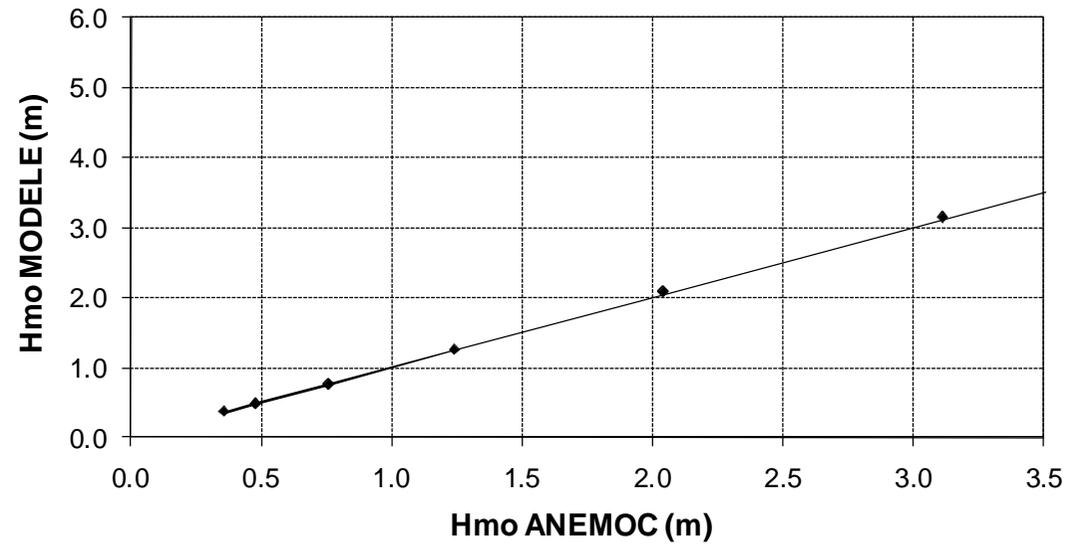
COAST_2581



COAST_2601

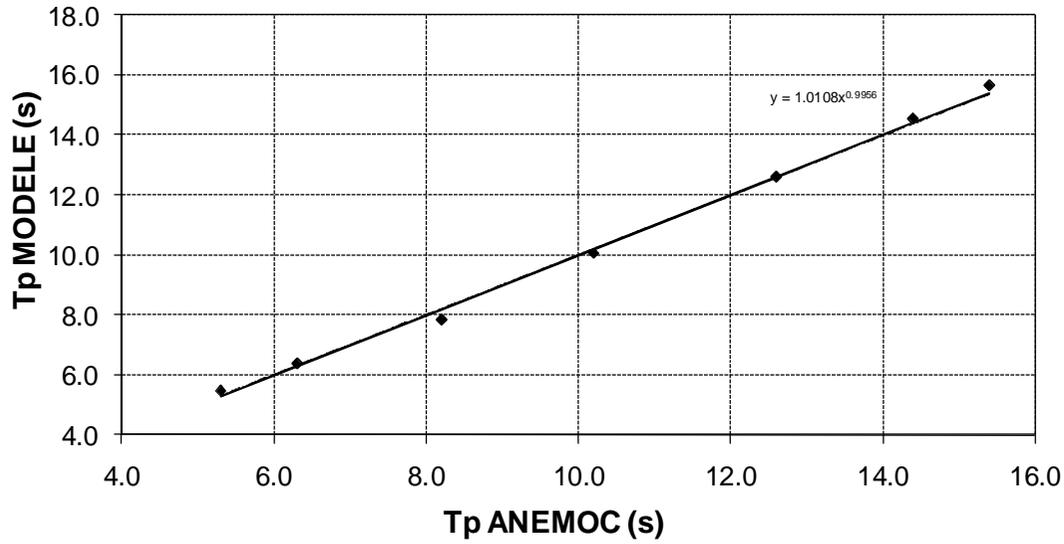


COAST_2627

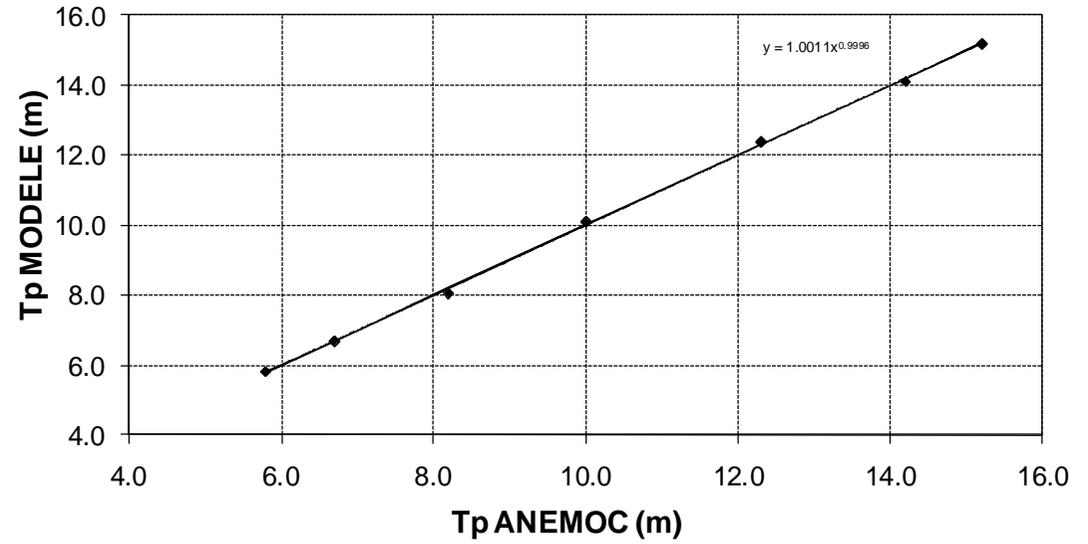


Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire			
Diagramme quantile-quantile en hauteur après calibration			
Affaire N : 1711836	Figure N°: 3.20		
Mars 2012	Dessinateur : VPT		

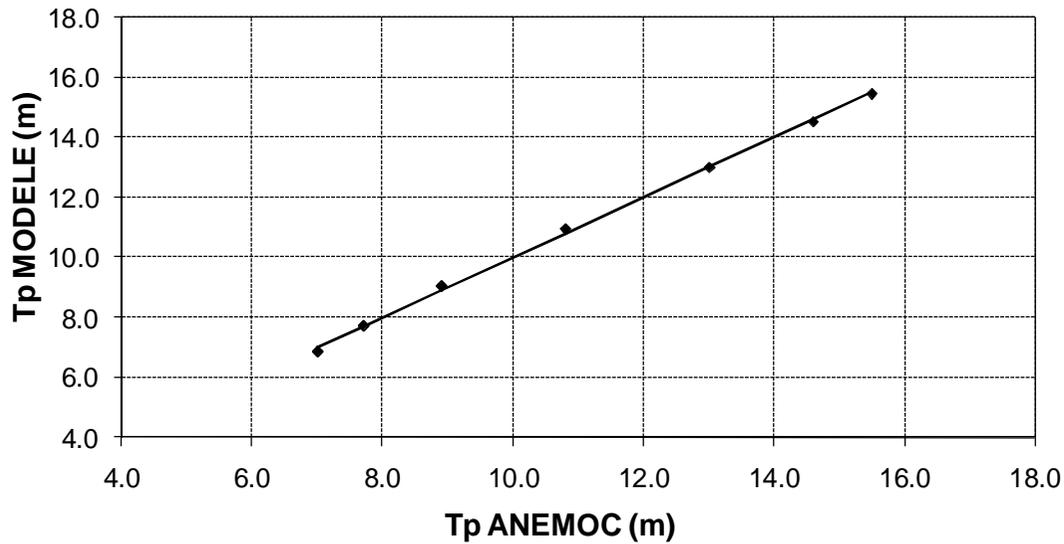
COAST_3521



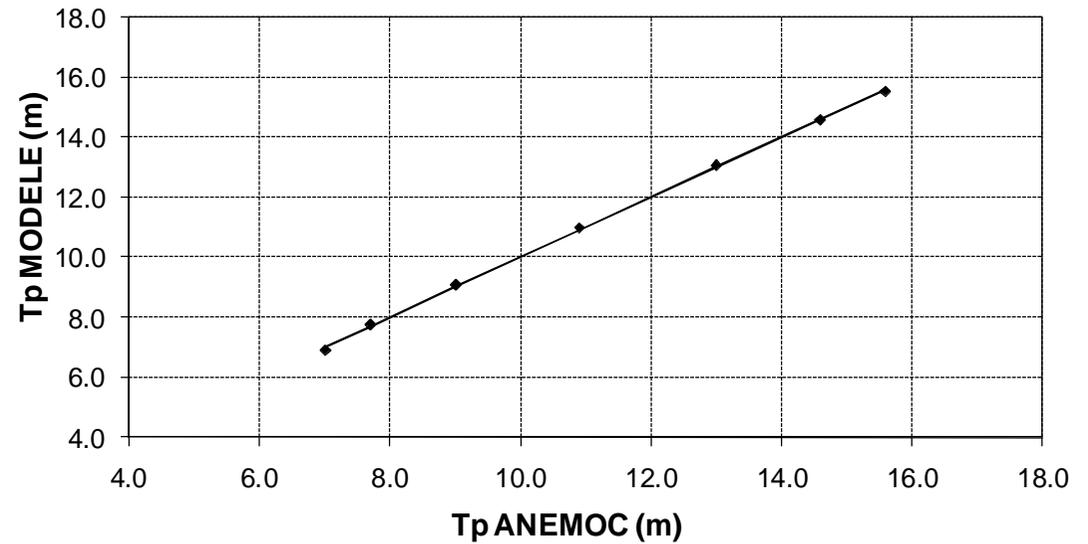
COAST_2581



COAST_2601

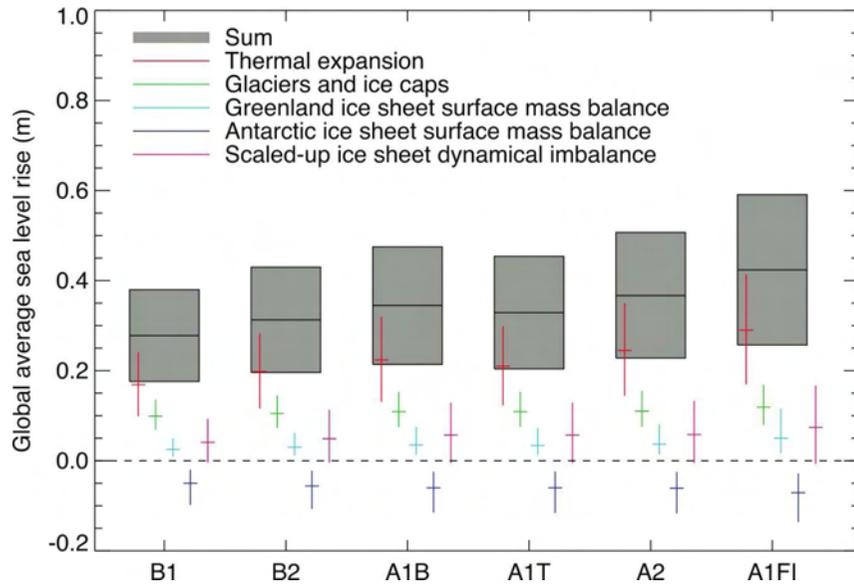


COAST_2627

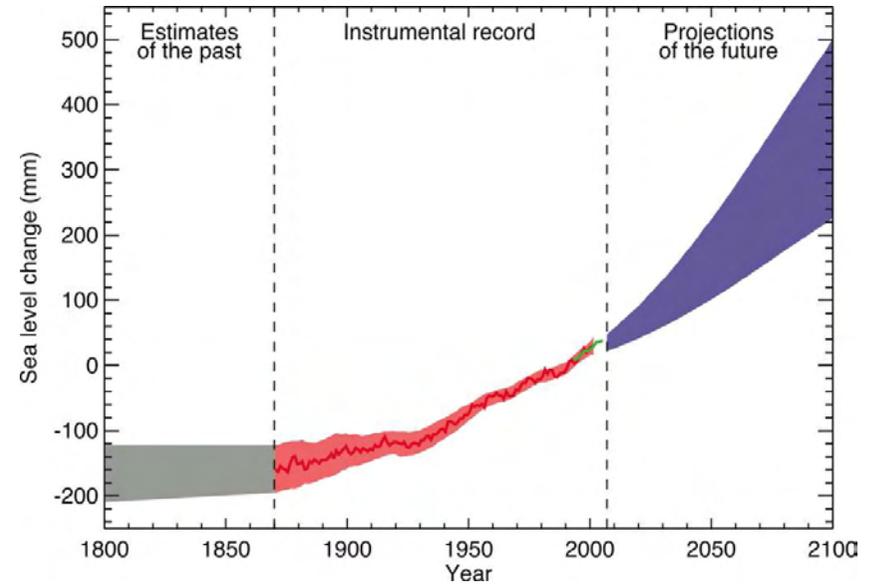


Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire			
Diagramme quantile-quantile en période après calibration			
Affaire N : 1711836	Figure N°: 3.21		
Mars 2012	Dessinateur : VPT		

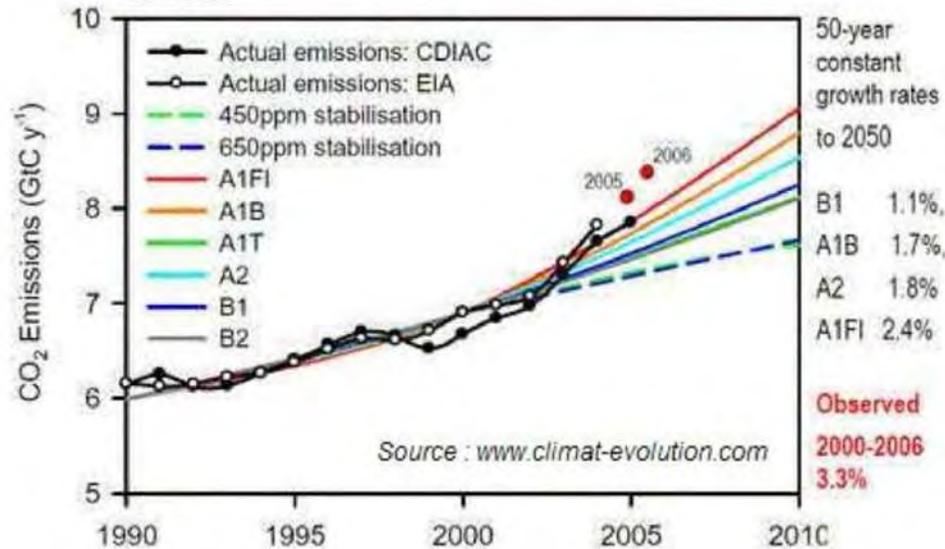
Estimations de l'élévation du niveau de la mer en fonction des différents scénarii d'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère



Estimations de l'élévation du niveau de la mer pour le scénario A1B



Evolution des taux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (en relation avec les taux des différents scénarii du GIEC 2007)



Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

Elévation du niveau de la mer et évolution des taux de gaz à effet de serre

Affaire N : 1711836

Figure N° : 3.22

Mars 2012

Dessinateur : VPT



Ingénieur d'affaire : VMD





Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

Unités sédimentaires du littoral Pays de la Loire

Affaire N : 1711836

Figure N° : 4-1

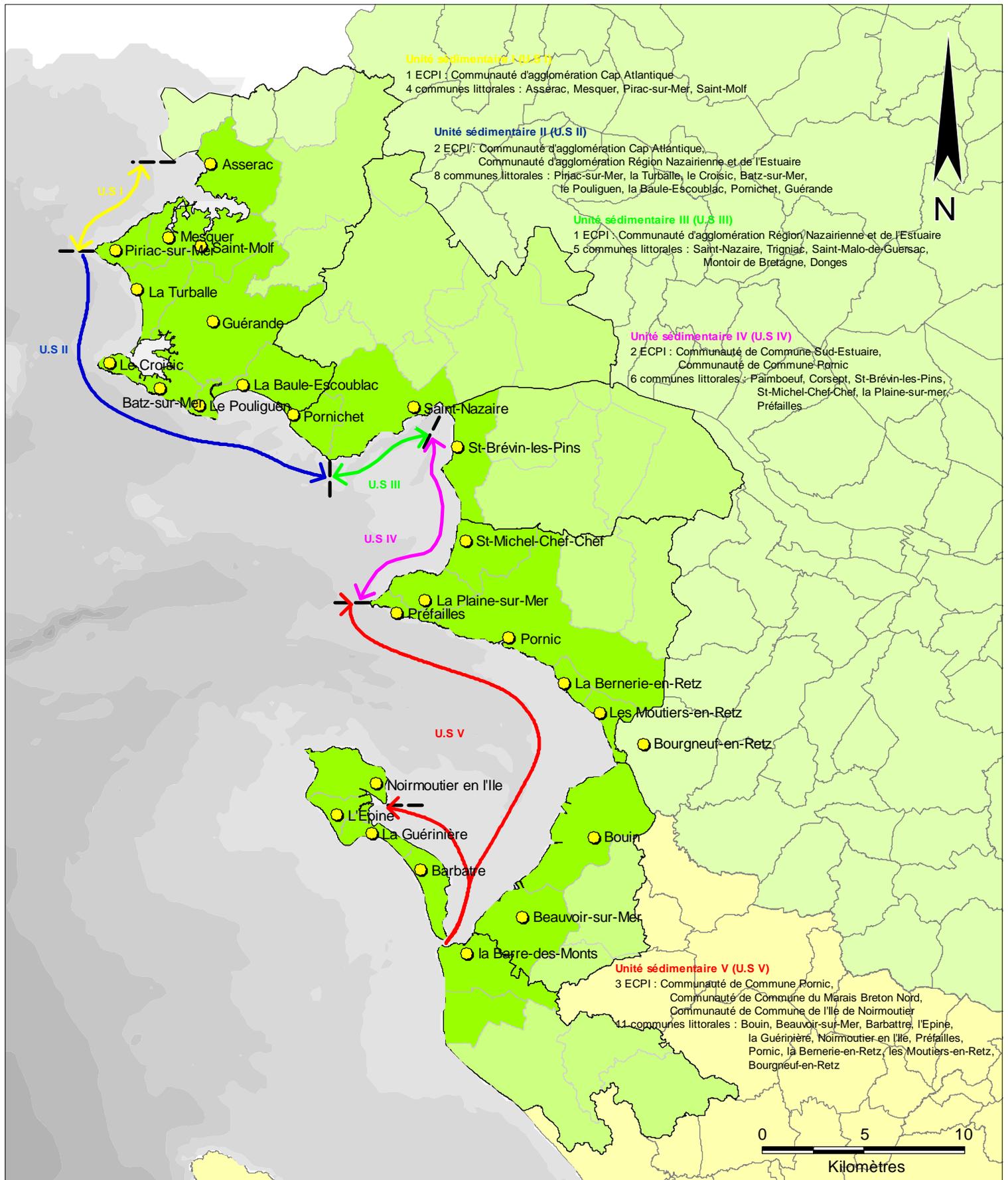
Mars 2012

Dessinateur : VPT


SOGREAH
CONSULTANTS

Ingénieur d'affaire : VMD





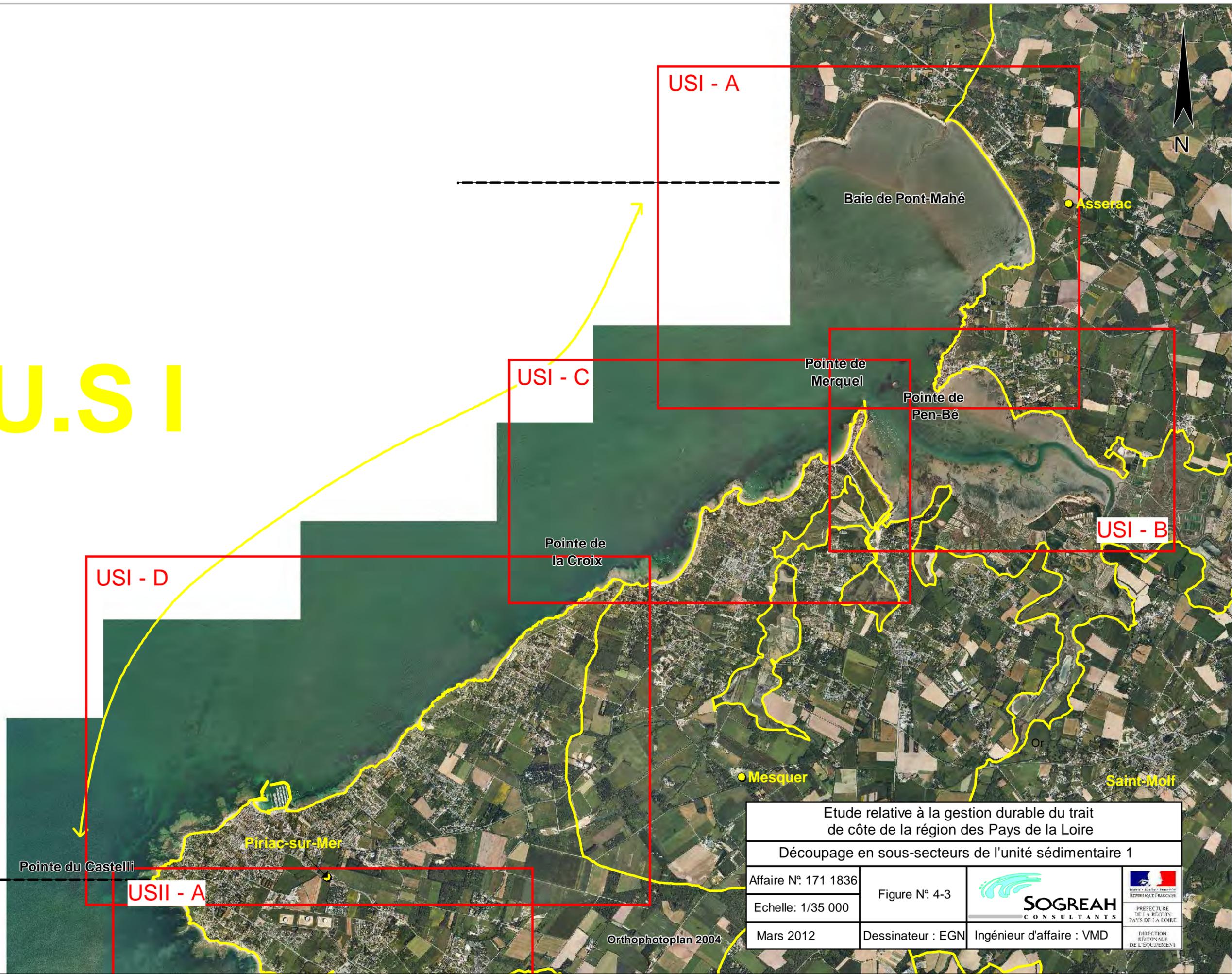
Unité sédimentaire (U.S)
 Limite entre deux U.S
 Limite entre EPCI
 Commune littoral EPCI
 Commune EPCI

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

Unités sédimentaires 1 à 5 de la Loire Atlantique

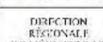
Affaire N°: 171 1836	Figure N°: 4-2	 SOGREAH CONSULTANTS	 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE PRÉFECTURE DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE DIRECTION RÉGIONALE DE L'ÉQUIPEMENT
Echelle: 1/400 000			
Mars 2012	Dessinateur : EGN	Ingénieur d'affaire : VMD	

U.S.I

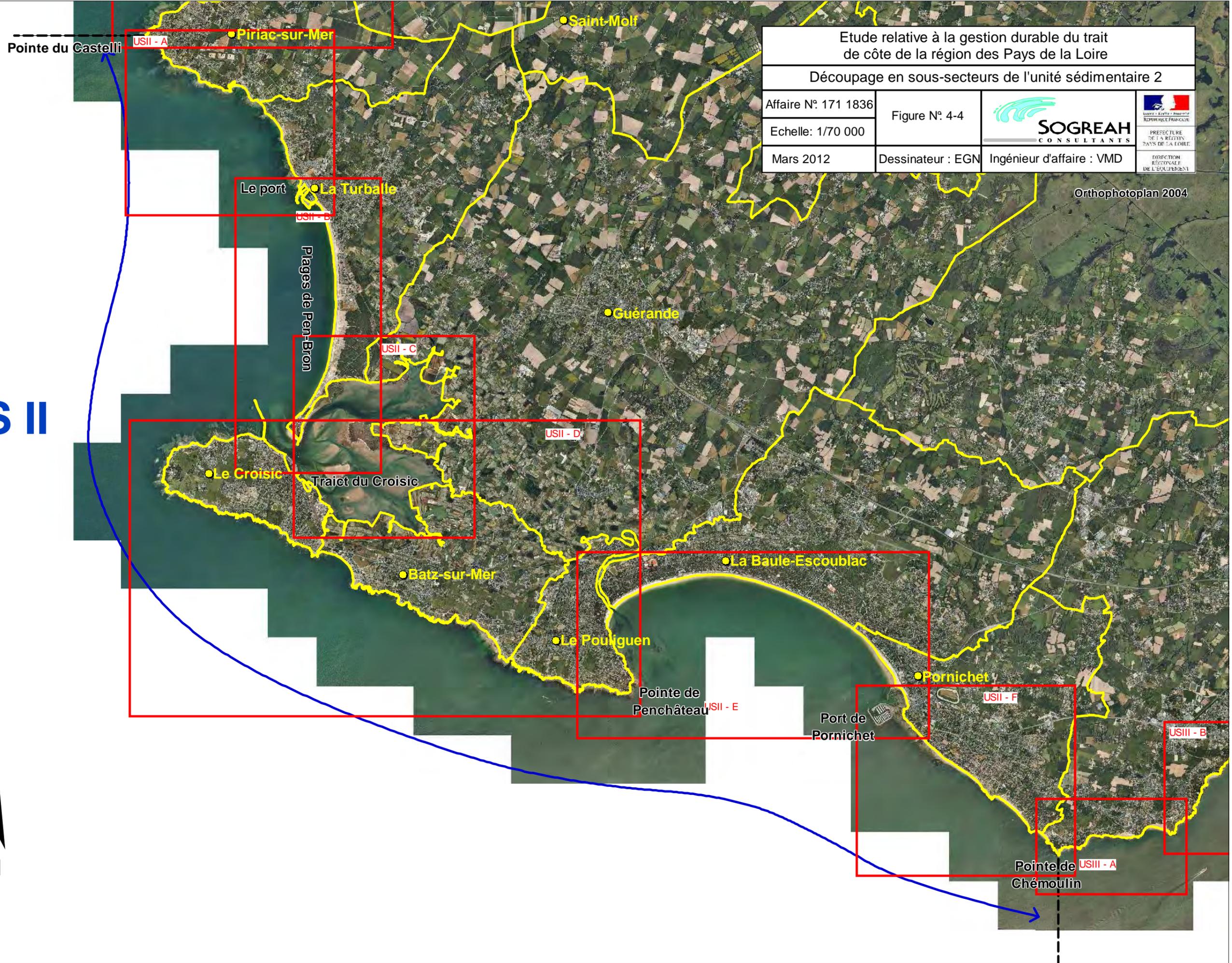


Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

Découpage en sous-secteurs de l'unité sédimentaire 1

Affaire N°: 171 1836	Figure N°: 4-3		
Echelle: 1/35 000	Dessinateur : EGN		
Mars 2012			

Orthophotoplan 2004



Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire		
Découpage en sous-secteurs de l'unité sédimentaire 2		
Affaire N°: 171 1836	Figure N°: 4-4	 <small>LEMINISTRE DE L'ÉQUIPEMENT REPUBLIQUE FRANÇAISE</small> <small>PREFECTURE DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE</small> <small>DIRECTION RÉGIONALE DE L'ÉQUIPEMENT</small>
Echelle: 1/70 000	Dessinateur : EGN	
Mars 2012	Ingénieur d'affaire : VMD	

Orthophotoplan 2004

U.S II



USII - A

● Piriac-sur-Mer

● Saint-Molf

Pointe du Castelli

Le port

● La Turballe

Plages de Pen-Bron

USII - C

● Guérande

USII - D

● Le Croisic

Traict du Croisic

● Batz-sur-Mer

● La Baule-Escoublac

● Le Pouliguen

Pointe de Penchâteau

USII - E

Port de Pornichet

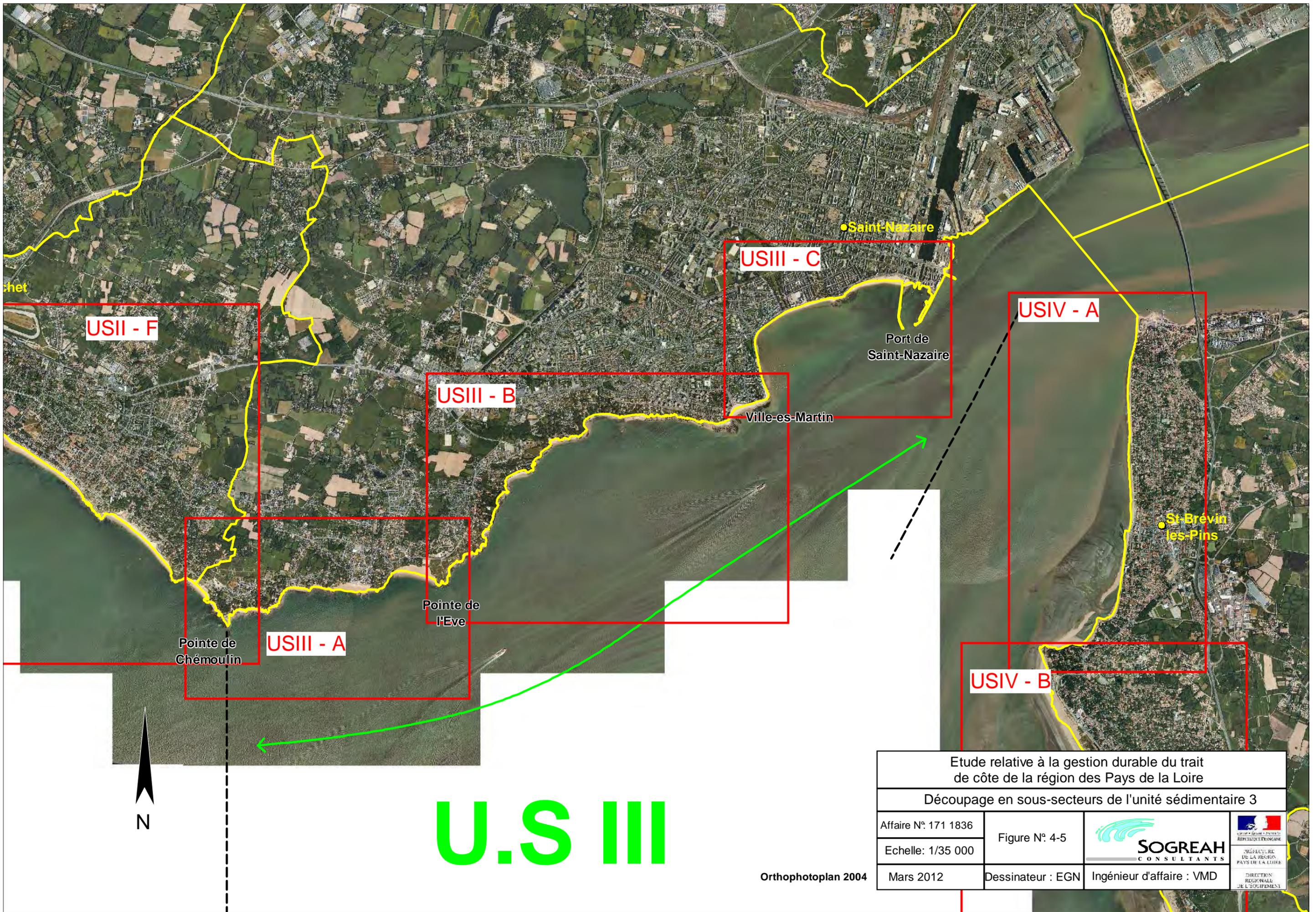
● Pornichet

USII - F

USIII - B

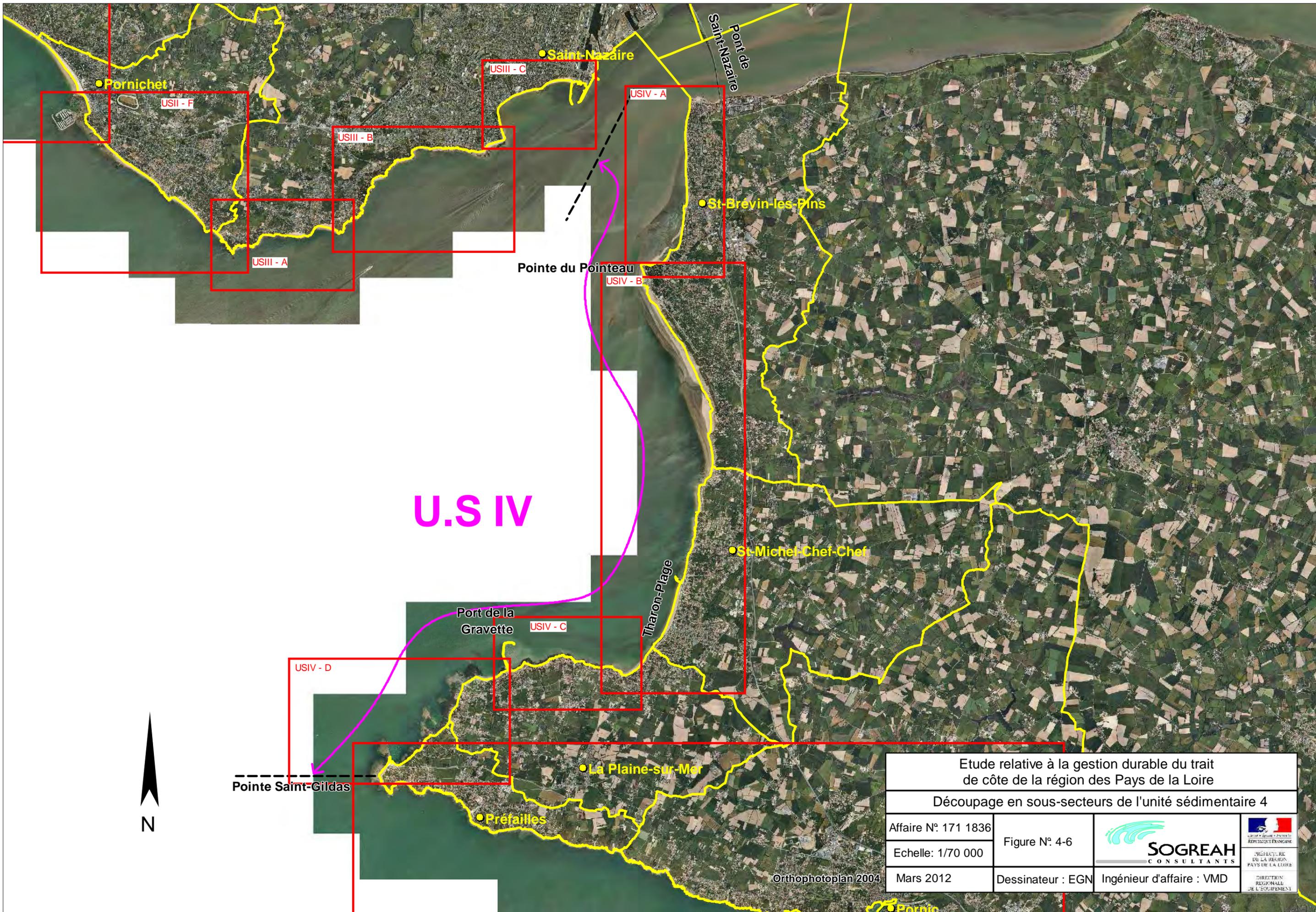
Pointe de Chémoulin

USIII - A



U.S III

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire			
Découpage en sous-secteurs de l'unité sédimentaire 3			
Affaire N° 171 1836	Figure N° 4-5		 PREFECTURE DE LA REGION PAYS DE LA LOIRE
Echelle: 1/35 000	Mars 2012		
Orthophotoplan 2004		 DIRECTION REGIONALE DE L'EQUIPEMENT	

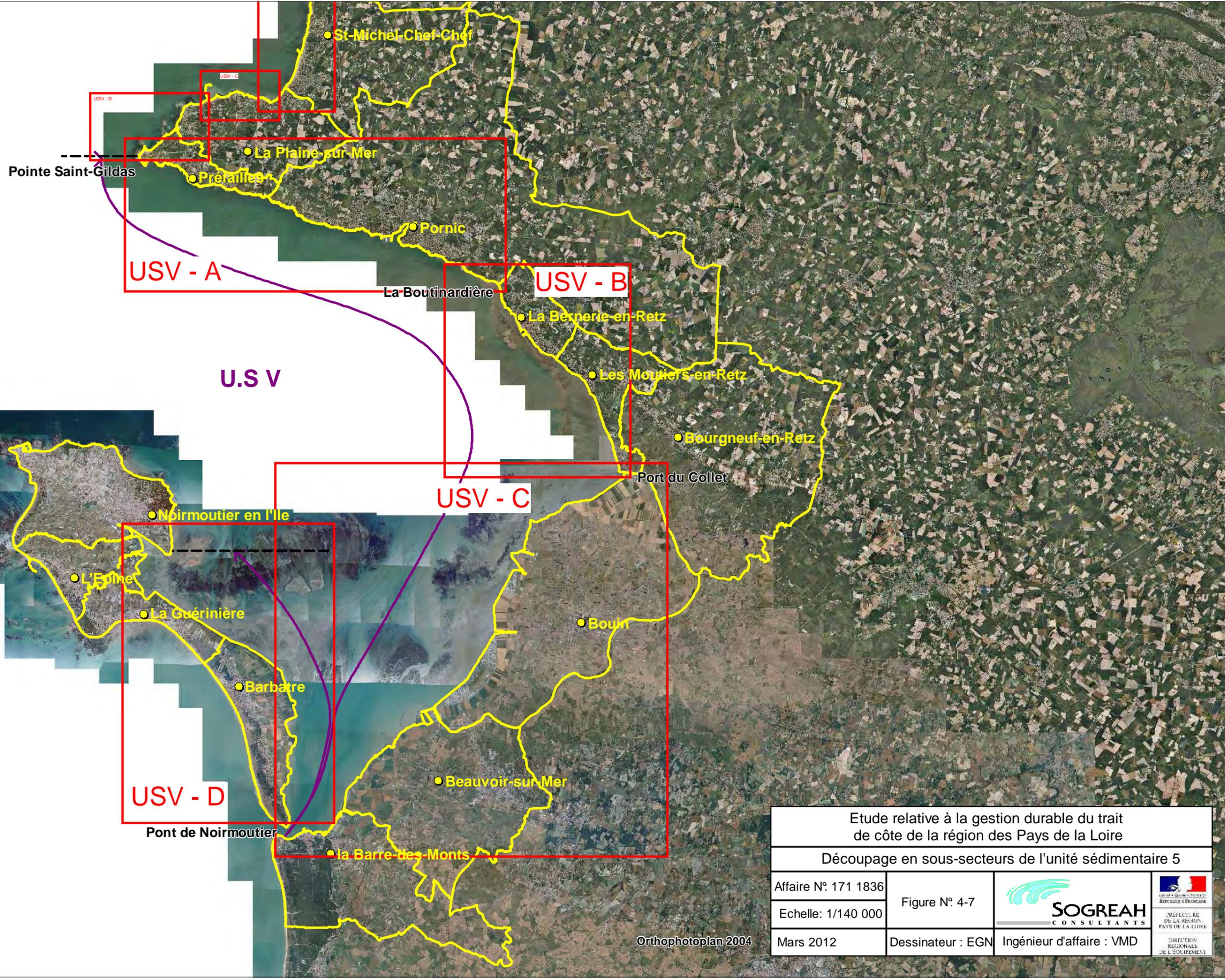


U.S IV

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

Découpage en sous-secteurs de l'unité sédimentaire 4

Affaire N°: 171 1836	Figure N°: 4-6		 PREFECTURE DE LA REGION PAYS DE LA LOIRE
Echelle: 1/70 000	Dessinateur : EGN		
Mars 2012	Orthophotoplan 2004 DIRECTION REGIONALE DE L'EQUIPEMENT		



Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

Découpage en sous-secteurs de l'unité sédimentaire 5

Affaire N°: 171 1836

Figure N°: 4-7



Echelle: 1/140 000

Dessinateur : EGN

Ingénieur d'affaire : VMD

PREFECTURE DE LA REGION PAYS DE LA LOIRE

Mars 2012

Dessinateur : EGN

Ingénieur d'affaire : VMD

DIRECTION REGIONALE DE L'EQUIPEMENT

Orthophotoplan 2004

ANNEXE 1
PRESENTATION DU LOGICIEL TOMAWAC

TOMAWAC

GENERATION ET PROPAGATION DES ETATS DE MER

OBJECTIF

TOMAWAC modélise la génération et la propagation des états de mer du domaine océanique jusqu'aux zones côtières. Il calcule l'évolution en espace et en temps du spectre directionnel d'énergie des vagues et peut traiter des conditions de mer variées et complexes : houles océaniques, clapots, états de mer à plusieurs pics en directions et/ou en fréquences. A partir du spectre directionnel d'énergie des vagues, le logiciel calcule, en tous points du maillage, les caractéristiques de l'état de mer : hauteur significative spectrale, direction moyenne de provenance, fréquences moyenne et de pic, étalement directionnel moyen, contraintes de radiation, etc.



UN LOGICIEL COMPLET ET PERFORMANT

TOMAWAC résout, par la méthode des éléments finis, l'équation d'évolution du spectre directionnel d'action d'onde de l'état de mer.

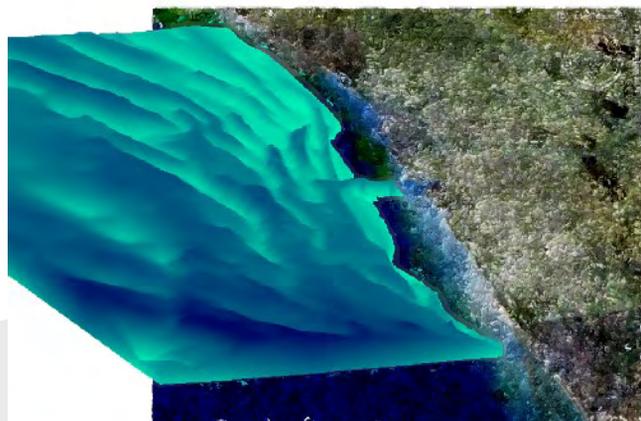
Le code fonctionne selon le mode de 3^{ème} génération:

Le spectre directionnel des vagues est décomposé en un nombre fini de fréquences et direction de propagation (typiquement 25 fréquences et 36 directions), ce qui permet une description fine de la répartition spectro-angulaire de l'énergie des vagues. Dans ce mode, les conditions de vent, mais aussi de courant et de niveau moyen de la mer, peuvent varier au cours du temps, ce qui permet de simuler dynamiquement les états de mer à l'échelle d'une tempête ou sur plusieurs mois, voire plusieurs années.

Les processus physiques régissant l'évolution du spectre directionnel sont traités à l'aide de modélisations assez sophistiquées.

TOMAWAC est un logiciel facile d'utilisation qui prend en compte les phénomènes physiques suivants :

- > Génération des vagues par le vent, dissipation par moutonnement et transferts d'énergie non-linéaires au sein du spectre (processus représentés schématiquement en mode paramétrisé et de façon détaillée en mode 3^{ème} génération)
- > Shoaling et réfraction de la houle par les fonds marins et les courants
- > Déferlement par courant contraire en cas de fort courant opposé aux vagues
- > Frottement sur le fond
- > Déferlement bathymétrique en faible profondeur d'eau
- > Bancs découvrants

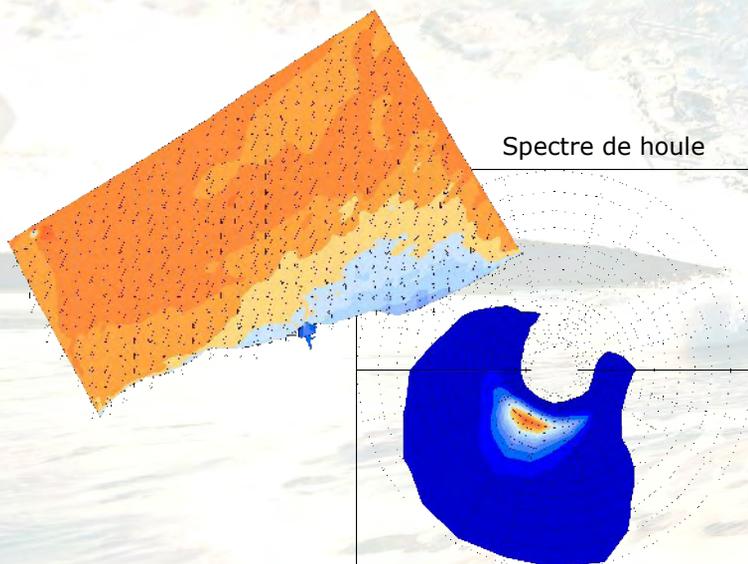


Propagation de la houle en Manche

UN ENVIRONNEMENT OUVERT ET PUISSANT

TOMAWAC offre à l'utilisateur un ensemble de sous-programmes, tous écrits en Fortran-90, pouvant être facilement modifiés de façon à répondre aux besoins spécifiques de l'utilisateur : imposition des conditions initiales ou de conditions aux limites complexes, introduction de nouvelles fonctions, tests de termes physiques, sources ou puits d'énergie alternatifs, couplage avec d'autres systèmes de modélisation...

Ce système est en constante évolution avec la sortie d'une nouvelle version régulièrement.



APPLICATIONS POUR L'INGENIERIE

Validé sur un ensemble de tests de référence et déjà utilisé lors de nombreuses études, TOMAWAC apparaît comme un outil adapté aux études de climatologie marine (océano-météorologie) pour caractériser un site donné et aux projets d'ingénierie nécessitant une bonne connaissance du climat de houle local et/ou de la transformation des états de mer à l'approche des côtes avec prise en compte des effets bathymétriques (conception d'ouvrages maritimes, transport sédimentaire par la houle, prédiction des états de mer de tempêtes, ...).

UN CODE INTEGRE AU SYSTEME TELEMAC

Le logiciel TOMAWAC est intégré au système de modélisation TELEMAC. Ce système regroupe un ensemble de logiciels dédié aux problèmes d'hydraulique de l'environnement : hydrodynamique, sédimentologie, qualité des eaux, houle et états de mer, écoulements souterrains.

TOMAWAC utilise les bibliothèques communes au système TELEMAC ce qui permet le couplage externe de ce dernier avec d'autres modules comme Telemac2D (hydrodynamique) ou Artémis (agitation portuaire).

Comme tous les logiciels du système TELEMAC, TOMAWAC est développé suivant les procédures d'Assurance Qualité en vigueur à la Division R&D d'EDF.

Le logiciel est fourni avec une documentation complète : notice théorique, manuel d'utilisation et d'initiation, dossier de validation. Des formations à l'utilisation de ce logiciel sont également proposées ainsi qu'une assistance fournie par des spécialistes de la modélisation.



Votre contact :
Claude GUILBAUD
SOGREAH

6, rue de Lorraine
38130 ECHIROLLES

Tel : +33 4 56 38 46 23

Fax : +33 4 76 33 43 32

telemac@sogreah.fr

www.telemacsystem.com

ANNEXE 2
PRESENTATION DU LOGICIEL MOPLA

Calcul des courants côtiers

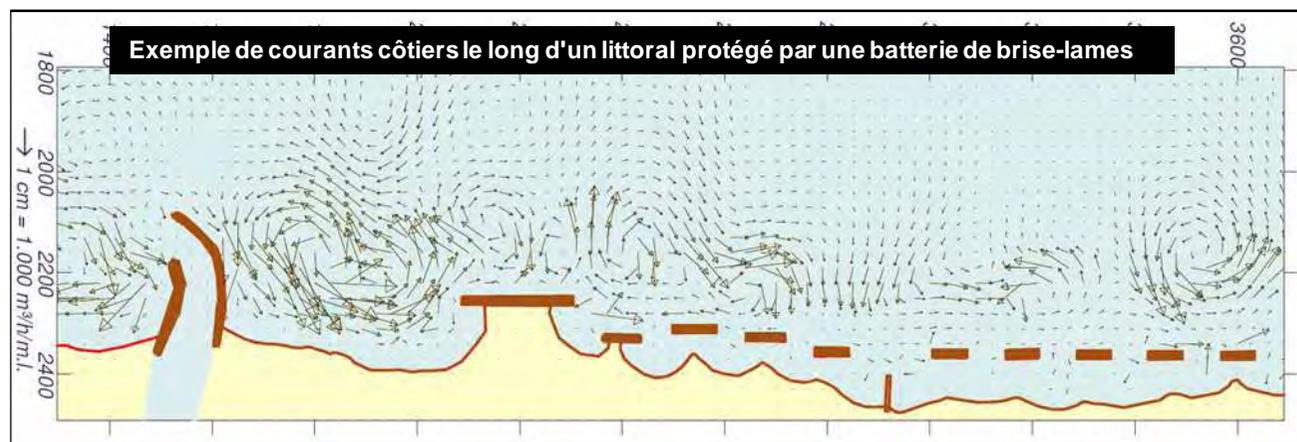
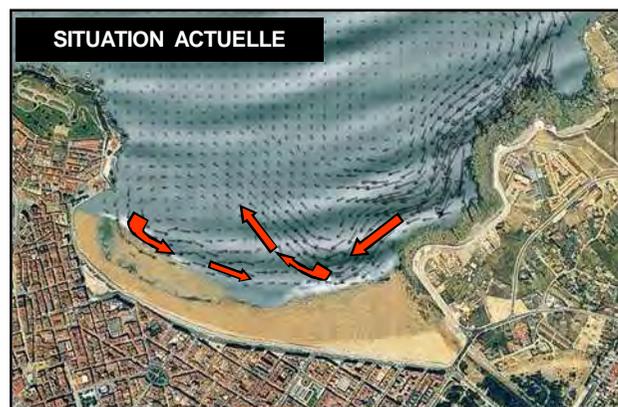
Le logiciel MOPLA permet de calculer la propagation de la houle en zone côtière et les courants littoraux qu'elle engendre.

Il prend en compte les phénomènes de réfraction dus à la profondeur, le frottement sur les fonds, le déferlement dû à la profondeur et à la cambrure et les flux sédimentaires.

Les calculs sont effectués sur une grille, en chaque point de cette dernière il est fourni :

- La hauteur significative et direction moyenne de la houle (vectoriels ou lignes d'isovaleurs),
- Les vitesses et directions des courants engendrés par la houle,
- Le transport sédimentaire.

Les figures ci-contre montrent des exemples de résultats fournis par le module.



MOPLA a été développé par le Groupe d'Ingénierie Océanographique et Côtière de l'Université de Cantabrie pour la Direction Générale des Côtes du Ministère de l'Environnement Espagnol.

ANNEXE 3
PRESENTATION DU LOGICIEL SMC

Equilibre en plan des plages

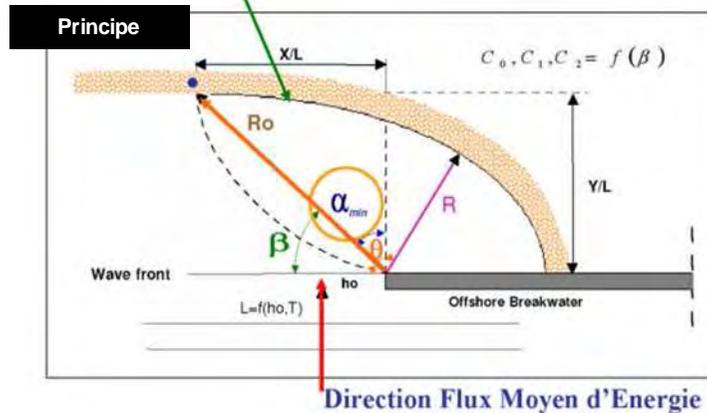
Le logiciel SMC permet de déterminer la configuration d'équilibre en plan d'une plage abritée par un cap ou une structure artificielle, à partir de la direction du flux moyen d'énergie au(x) point (s) de diffraction.

L'étude de la stabilité en plan utilise la méthodologie de forme d'équilibre proposée par González et Médina (2001), présentée de façon schématique ci-dessous.

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left(- \right) + C_2 \left(- \right)^2$$

$$= 90^{\circ} - \min$$

$$R_0 = Y \left(1 + \tan^2 \min \right)^{1/2}$$



Avec :

- R le rayon vecteur définissant la forme de la plage, ayant pour origine le point de diffraction
- R0 le rayon vecteur correspondant à l'extrémité non abritée de la plage (point P0)
- C0, C1, C2 trois coefficients dépendant de β
- β l'angle (fixe) que forment les fronts de houle avec le rayon vecteur R0
- θ l'angle (variable) que forment les fronts de houle avec le rayon vecteur R.

SMC a été développé par le Groupe d'Ingénierie Océanographique et Côtière de l'Université de Cantabrie pour la Direction Générale des Côtes du Ministère de l'Environnement Espagnol.

Exemple de formes d'équilibre de plages en arrière de caps ou ouvrages



Dans ce modèle β est fonction

- du nombre de longueurs d'onde ou distance adimensionnelle Y/L du point de diffraction à la ligne de côte, Y étant la distance à la ligne de côte et L la longueur d'onde,
- de la direction des fronts de houle coïncidant avec la direction du flux moyen d'énergie dans la zone du pôle de diffraction (point de contrôle). En effet, la plage n'est pas capable de répondre instantanément aux changements de direction de la houle et a tendance à s'orienter dans une position en équilibre avec les conditions énergétiques moyennes de la houle, d'où la prise en compte pour l'étude de la forme en plan de la direction des fronts définie par le flux moyen d'énergie au point de contrôle.

Notons que dans le cas où il n'existe pas de point de diffraction, ou si la diffraction n'affecte pas la plage, l'orientation de celle-ci sera parallèle au front de houle correspondant à la direction du flux moyen d'énergie.

ANNEXE 4
PRESENTATION DU LOGICIEL GENESIS

Evolution du trait de côte sur plusieurs années

GENESIS (GENERALized model for Simulating Shoreline change) est un système de modélisation numérique de l'évolution du trait de côte développé par le Corps d'Ingénieurs de l'armée américaine (CERC).

Le système GENESIS présente les caractéristiques suivantes :

- Il prend en compte l'évolution du trait de côte provoquée par les gradients du transport sédimentaire littoral.
- La zone du littoral étudiée va de 1 à 100 km environ.
- Les durées étudiées vont de 1 à 20 ans.

Fonctions du modèle

- Nombres presque arbitraires d'épis, de brise-lames forains, de rechargements de plages et de digues.
- La plupart des combinaisons d'ouvrages et de rechargements de plages sont acceptées.
- Le contournement du sable au niveau des épis et des jetées saturées est simulé.
- Diffractions multiples derrière les ouvrages.
- Transmission de la houle à travers les brise-lames forains.

Limites du modèle

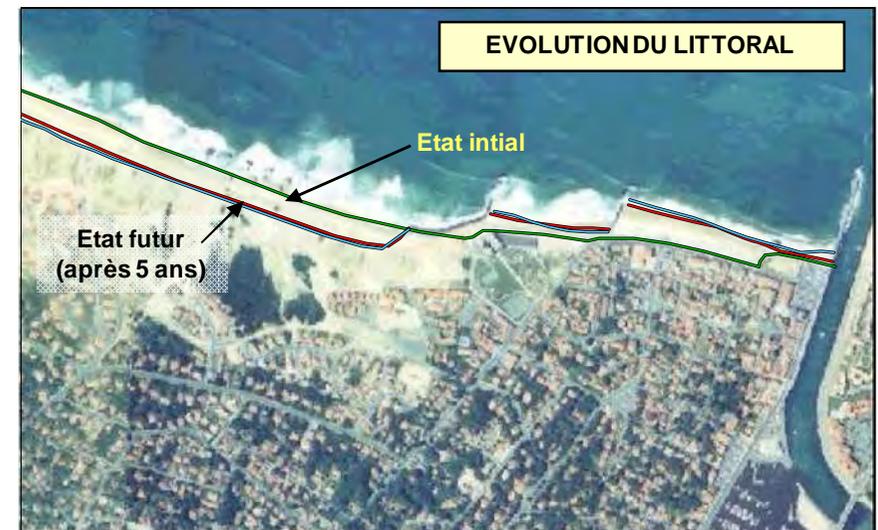
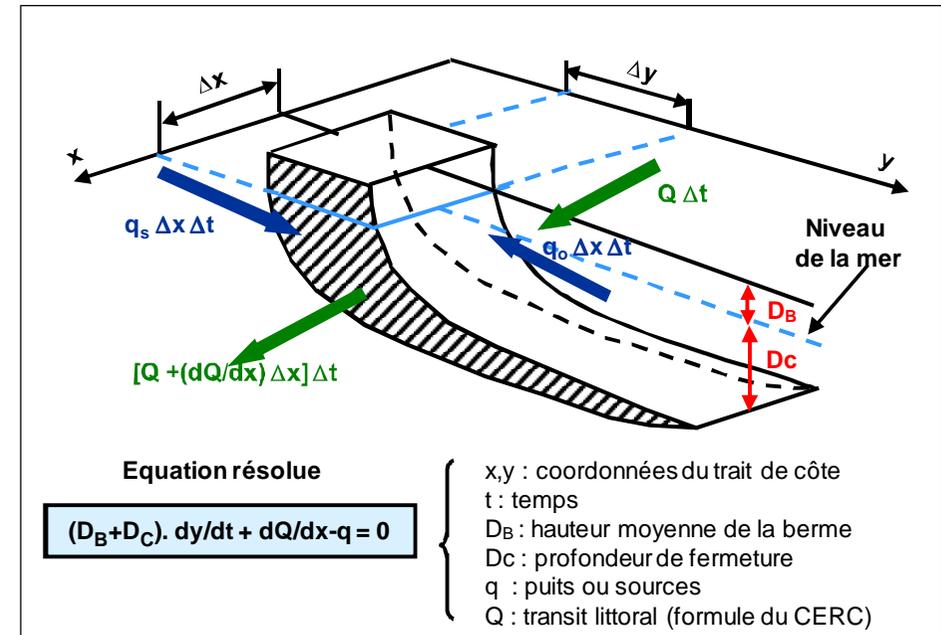
- Pas de possibilité d'inclure les fluctuations du niveau de marée.
- Transport sédimentaire provoqué par l'action de la houle uniquement.
- Limites inhérentes à la théorie de modélisation de l'évolution du trait de côte.

Références

Gravens, M B, Kraus, N C, et Hanson, H 1991. "GENESIS – Generalized Model for Simulating Shoreline Change", Vol.1 & 2: Workbook and Users Manual, Instruction Report CERC-89-19, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, 431 pp.

GENESIS a été développé grâce à la collaboration des institutions suivantes :

- Dépt de Recherche en Ressources en Eau (TVLR), Institut de Technologie de Lund, Université de Lund, Lund, Suède
- CERC (Centre de recherche et d'ingénierie côtière), US Army Waterways Experiment Station (Laboratoire d'expérimentation des voies navigables de l'armée américaine), Vicksburg, Mississipi, USA.



ANNEXE 5
PRESENTATION DU LOGICIEL SBEACH

Evolution du profil de plage

SBEACH est un système de modélisation de l'évolution du profil de plage adapté à la prévision de l'impact des tempêtes sur le littoral.

Le modèle permet également d'apprécier l'impact d'ouvrages longitudinaux de protection

Description

Le logiciel SBEACH permet de décrire l'impact des tempêtes (événements à court terme) sur le profil de plage et d'avant-plage.

Il permet en particulier de prévoir l'érosion du haut de plage et de la dune.

Des ouvrages tels que des digues ou des fonds durs peuvent être intégrés.

Fonctions du modèle

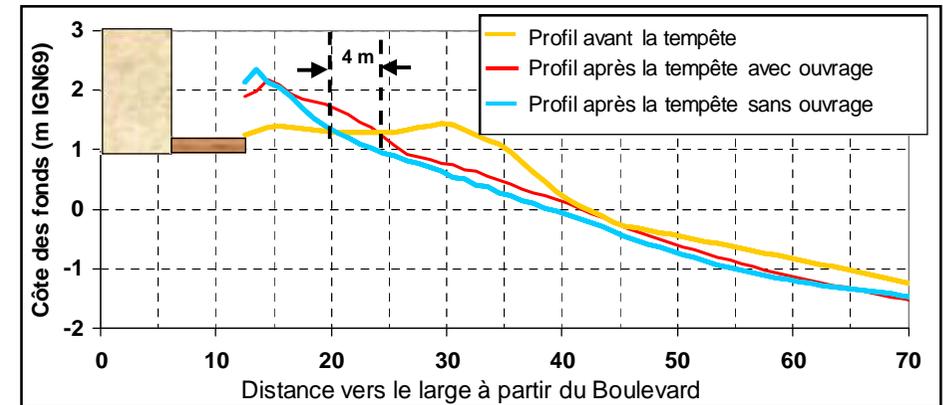
- Module interne de propagation de la houle aléatoire, y compris dans la zone de déferlement
- La fluctuation de la hauteur de la houle et du niveau de la mer dans le temps (tempêtes) peuvent être définis
- Calcul de l'érosion de la plage et de la dune à partir d'une formulation semi-empirique du taux de transport littoral représentant les mécanismes de formation de barres
- Description de l'impact des ouvrages (digue ou fonds durs).

Limites du modèle

- Pas de réflexion des vagues sur les ouvrages
- Evolution du profil limitée aux tempêtes (érosion)
- Pas de prévision des effets du transit littoral.

Références

- Kriebel, D.L., Kraus, N.N.C. and Larson, M., 1991. Engineering methods for predicting beach profile response. Proc. Coastal Sediments '91. ASCE, New York, pp. 557- 571.
- Larson, M. and Kraus, N.C., 1989. SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, Rep. 1, Empirical foundation and model development. Tech. Rep. CERC-89-9, U.S. Army Eng. Waterways Expt. Stn., Coastal Eng. Res. Center, Vicksburg, Miss.
- Larson, M. and Kraus, N.C., 1991. Mathematical modeling of the fate of beach fill. In: H.D. Niemayer, J. van Overeem and J. van de Graaff (Editeur), Artificial Beach Nourishments. Coastal Eng., 16: 83-114.
- Larson, M., Kraus, N.C. and Byrnes, M.B., 1990. SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, rep. 2, Numerical formulation and model tests. Tech. Rep. CERC-89-9, US Army Eng. Waterways Expt. Stn., Coastal Eng. Res. Center, Vicksburg, Miss.



SBEACH a été développé en collaboration avec :

- Dépt Ressources en Eau (TVRL), Lund Institute of Technology, Université de Lund, Suède.
- Coastal Engineering Research Center, US Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, USA. 04/02 MFN

ANNEXE 6
QUESTIONNAIRE AUX COMMUNES LITTORALES

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

NOM DE LA COMMUNE :

Informations fournies par Mme, Mr :

La carte fournie en pièce jointe (échelle 1/25 000) peut vous permettre de localiser les éléments intéressants à la réflexion

SUBMERSION(S) MARINE(S) (si plusieurs événements connus, il vous est possible de remplir plusieurs fiches) :

Année :

Causes (rupture ouvrages/cordon dunaire, franchissement ouvrages/cordon dunaire) :

Durée et surfaces inondées :

Dégâts matériels / humains :

Réparations :

Photographies historiques, plans, autres disponibles... :

Historique des aménagements (siècle précédents, avant la seconde guerre mondiale, dernières décennies (préciser si possible) :

Gestion des zones basses :

En période de tempête, existe-t-il des problèmes d'évacuation des eaux de rivière ou de marais ?

Les zones basses, situées en contrebas des niveaux marins, sont-elles protégées par un réseau de digues ? Quel est l'organisme de gestion ?

Observations diverses :

Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire

EROSION MARINE :

Description des phénomènes observés (recul ou avancée du trait de côte, abaissement ou exhaussement de la plage, recul ou avancée du cordon dunaire...) :

Quel est l'événement le plus important connu ?

Localisation des phénomènes observés :
Quelles sont les zones propices à l'érosion ?

Quelles sont les zones propices à l'engraissement ?

Savez-vous quels types de mécanismes sont à l'origine de l'érosion côtière ?
(Action marine, action éolienne, action de l'infiltration / du ruissellement des eaux pluviales, action humaine...)

Estimation de la célérité des phénomènes observés (depuis quand, à quel rythme, accélération ces dernières années ?) :

Photographies historiques, plans, autres disponibles... :

Observations diverses :

ENJEUX LITTORAUX :

Listing des enjeux majeurs pouvant être ou ayant été touchés par les phénomènes d'érosion ou de submersion marine :

Quels sont les enjeux économiques et les enjeux environnementaux majeurs sur votre commune / sur votre littoral / dans le cadre de votre activité?
Pouvez-vous les localiser ?

Quels sont les projets d'urbanisation en cours (PLU) ? Les projets d'aménagements divers (infrastructures, loisirs...) ? Pouvez-vous les localiser ?

Quelles sont, pour vous, les zones à protéger contre le risque d'érosion ? Les zones qui peuvent accepter une érosion ?

RISQUES LITTORAUX

Quels sont les types d'occupation du sol principalement touchés par l'érosion ? Quels ont été les dommages engendrés ? Personnes et biens concernés ?

Que pensez-vous de l'efficacité des ouvrages de protection contre l'érosion? Avez-vous observé ou eu connaissance des dysfonctionnements d'ouvrages ?

Avez-vous connaissance de zones n'ayant pas connues d'érosion mais que vous considèreriez comme zone à risque ?

Avez-vous connaissance des projets liés à la lutte contre l'érosion (à court, moyen ou long terme) ?
Avez-vous des idées sur les actions ou aménagements qui pourraient améliorer la situation vis à vis du risque érosion ?