


## VIGITHAU – MODULE DE SUBMERSION MARINE

### ***Phase I-1 : Diagnostic approfondi des données et études existantes***



*Avril 2017*

	<b>BRL ingénierie</b>  <b>1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001</b> <b>30001 NIMES CEDEX 5</b>
---	---

<b>Date du document</b>	<b>16/09/2016</b>
<b>Contact</b>	<b>François CARNUS</b>

<b>Titre du document</b>	Phase I 1 : Diagnostic approfondi des données et études existantes
<b>Référence du document :</b>	A00070_Litto_SMBT_I_1_V3
<b>Indice :</b>	C

<b>Date émission</b>	<b>Indice</b>	<b>Observation</b>	<b>Dressé par</b>	<b>Vérifié et Validé par</b>
22/12/2016	A	1 <sup>ère</sup> Version - provisoire	NPR	FCA
24/03/2017	B	Reprises suite aux remarques du SMBT et à des compléments bibliographiques	NPR	FCA
28/04/2017	C	Reprises suite aux remarques du SMBT	NPR	FCA
16/05/2017	D	Reprises suite aux remarques du SMBT	NPR	FCA

# VIGITHAU - MODULE DE SUBMERSION MARINE

## *Phase I-1 : Diagnostic approfondi des données et études existantes - Volet Maritime*

PREAMBULE .....	1
1. INVENTAIRE ET DESCRIPTION DES ETUDES ET DONNEES EXISTANTES.....	2
2. DONNEES PATRIMONIALES.....	4
2.1 Données topographiques/bathymétriques	4
2.2 Données spécifiques aux ouvrages	6
3. DONNEES HISTORIQUES - EVENEMENTS EXTREMES .....	12
3.1 Enquêtes de terrain	13
3.1.1 Objectifs	13
3.1.2 Description de la méthode : questionnaire et personnes ciblées	13
3.1.3 Résultats et analyses	14
3.1.3.1 Balaruc le Vieux	14
3.1.3.2 Balaruc les Bains	14
3.1.3.3 Bouzigues	14
3.1.3.4 Frontignan	14
3.1.3.5 Marseillan	15
3.1.3.6 Mèze	15
3.1.3.7 Sète	15
3.1.3.8 Analyse	16
3.2 Réseaux d'observations et de mesures / fournisseurs de données	20
3.2.1 Inventaires des observatoires	20
3.2.2 Historique des événements extrêmes : description des paramètres physiques des tempêtes	21
3.2.3 Analyse statistique liée à ces événements	24
3.2.3.1 Niveau d'eau « en mer » - Station Sète dock Richelieu	24
3.2.3.2 Débits dans les graus entre l'étang de Thau et la mer	26
3.2.3.3 Niveau d'eau dans l'étang de Thau	26
3.2.3.4 Hauteur significative de la houle	28
3.2.3.5 Longueur d'onde et période de la houle	30
3.2.4 Conséquences des tempêtes historiques	30
3.3 Synthèse des études et méthodes employées pour la caractérisation des aléas	36
3.3.1 PPRI	36
3.3.2 TRI	36
3.3.3 Atlas BRGM	37
3.3.4 Etude EGIS pour le SYBLE sur les étangs avec crue/tempête	37
3.3.5 Comparatif	39
3.4 Données sur les dégâts	40

<b>4. STRATEGIE DE MODELISATION .....</b>	<b>44</b>
<b>4.1 Fonctionnement hydraulique du site</b>	<b>44</b>
<b>4.2 Construction des modèles</b>	<b>44</b>
4.2.1 Stratégie	44
4.2.2 Logiciels utilisés	46
4.2.2.1 Suite logiciel TELEMAT	46
4.2.2.2 TELEMAT-2D	47
4.2.2.3 TOMAWAT	47
4.2.3 Emprises	47
4.2.4 Données topographiques et bathymétriques	51
4.2.5 Structuration du maillage	51
4.2.6 Module ouvrage	53
<b>4.3 Conditions aux limites et forçages</b>	<b>55</b>
<b>4.4 Evènements de calage et de validation</b>	<b>57</b>
<b>4.5 Eléments de choix pour la définition des aléas</b>	<b>61</b>
4.5.1 Options pour la définition des scénarii	61
4.5.2 Paramètres à prendre en compte	61
<b>5. CONCLUSION .....</b>	<b>62</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>63</b>
Annexe 1 : Estimations de l'aléa surcote, Traitements statistiques des données du marégraphe de Sète réalisée par le SMT	64
Annexe 2 : Aléas PPRI	78
Annexe 3 : TRI scénario moyen	86
Annexe 4 : Atlas BRGM évènement cinquantennale	95



---

# TABLE DES ILLUSTRATIONS

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Emprise des données topographiques / bathymétriques disponibles.....	5
Figure 2 : Ouvrages sur le secteur d'étude - Ouest.....	7
Figure 3 : Ouvrages sur le secteur d'étude - centre.....	8
Figure 4 : Ouvrages sur le secteur d'étude - Est.....	9
Figure 5 : Phénomènes physiques lors d'une tempête.....	12
Figure 6 : Informations géographiques collectées lors des entretiens avec les élus – Ouest.....	17
Figure 7 : Informations géographiques collectées lors des entretiens avec les élus – centre.....	18
Figure 8 : Informations géographiques collectées lors des entretiens avec les élus – Est.....	19
Figure 9 : Localisation des données.....	20
Figure 10 : Période de retour des surcotes et niveaux horaires.....	24
Figure 11 : Période de retour des houles.....	29
Figure 12 : Tempête 16/12/1997.....	30
Figure 13 : Tempête du 27 novembre 2014 – plage des Aresquiers à Frontignan.....	31
Figure 14 : PHE – Ouest.....	33
Figure 15 : PHE – centre.....	34
Figure 16 : PHE – Est.....	35
Figure 17 : Niveau d'eau en fonction des scénarii.....	39
Figure 18 : Arrêtés CATNAT.....	41
Figure 19 : Population en zone inondable.....	42
Figure 20 : Stratégie de modélisation - Articulation entre les divers modèles.....	45
Figure 21 : Stratégie de modélisation (échelle non réaliste).....	46
Figure 22 : Emprise modèle terrestre.....	49
Figure 23 : Emprise modèle maritime.....	50
Figure 24 : Lignes de structure.....	52
Figure 25 : Exemple de maillage du « module ouvrage » au niveau de Frontignan.....	54
Figure 26 : Conditions aux limites.....	56
Figure 27 : Hauteur significative de la houle à la bouée de Sète lors de la tempête de novembre 2014.....	57
Figure 28 : Séries marégraphiques à Marseillan et Sète lors de la tempête de novembre 1982 ....	58
Figure 29 : Séries marégraphiques dans l'étang de Thau lors de la tempête de novembre 1982.....	58
Figure 30 : Localisation des éléments de calage et de validation.....	60
Figure 31 : Signal horaire du marégraphe de Sète en cm par rapport au zéro géographique (IGN-69) sur la période de 1986 à 2015 en considérant les niveaux moyens estimés (1986-1999) par la numérisation des tracés papiers.....	65
Figure 32 : Signal horaire du marégraphe de Sète en cm par rapport au zéro géographique (IGN-69) sur la période de 1986 à 2015 en considérant les niveaux maximum estimés (1986-1999) par la numérisation des tracés papiers.....	65

Figure 33 : Ajustement par la méthode moments de la loi de Gumbel sur les surcotes maximum trimestrielle atteintes pour plusieurs durée de l'évènement de surcote sur les données du marégraphe (valeurs moyennes de la numérisation des tracés papiers 1986-1999) .....	69
Figure 34 : Ajustement par la méthode moments de la loi de Gumbel sur les surcotes maximum trimestrielle atteintes pour plusieurs durée de l'évènement de surcote sur les données du marégraphe (valeurs maximales de la numérisation des tracés papiers 1986-1999) .....	72
Figure 35 : Courbes Intensité de surcote (en mNGF) au marégraphe de Sète (valeur maximale numérisée) en fonction de la durée de la surcote pour différentes période de retour de la plus forte (en haut) à la plus basse (en bas) respectivement (retour 100ans, 50 ans, 20 ans, 10 ans, 5 ans, 2 ans, 1 an, 6 mois) .....	73
Figure 36 : Ajustement par la méthode moments de la loi de Gumbel sur les surcotes maximum trimestrielle atteintes pour plusieurs durée de l'évènement de surcote sur les données du marégraphe (valeurs maximales de la numérisation des tracés papiers 1986-1999) .....	73
Figure 37 : Ajustement par la méthode moments de la loi de Gumbel sur les surcotes maximum trimestrielle atteintes pour plusieurs durée de l'évènement de surcote sur les données du marégraphe à 10 mn de 2004 à 2015.....	76
Figure 38 : Aléas PPRI 1/7 .....	79
Figure 39 : Aléas PPRI 2/7 .....	80
Figure 40 : Aléas PPRI 3/7 .....	81
Figure 41 : Aléas PPRI 4/7 .....	82
Figure 42 : Aléas PPRI 5/7 .....	83
Figure 43 : Aléas PPRI 6/7 .....	84
Figure 44 : Aléas PPRI 7/7 .....	85
Figure 45 : TRI scénario moyen 1/8 .....	87
Figure 46 : TRI scénario moyen 2/8 .....	88
Figure 47 : TRI scénario moyen 3/8 .....	89
Figure 48 : TRI scénario moyen 4/8 .....	90
Figure 49 : TRI scénario moyen 5/8 .....	91
Figure 50 : TRI scénario moyen 6/8 .....	92
Figure 51 : TRI scénario moyen 7/8 .....	93
Figure 52 : TRI scénario moyen 8/8 .....	94
Figure 53 : Planche atlas BRGM évènement cinquantennale 1/7.....	96
Figure 54 : Planche atlas BRGM évènement cinquantennale 2/7.....	97
Figure 55 : Planche atlas BRGM évènement cinquantennale 3/7.....	98
Figure 56 : Planche atlas BRGM évènement cinquantennale 4/7.....	99
Figure 57 : Planche atlas BRGM évènement cinquantennale 5/7.....	100
Figure 58 : Planche atlas BRGM évènement cinquantennale 6/7.....	101
Figure 59 : Planche atlas BRGM évènement cinquantennale 7/7.....	102

---

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Bibliographie .....	3
Tableau 2 : Données topographiques et bathymétriques .....	4
Tableau 3 : Récapitulatif des ouvrages sur la zone d'étude .....	10
Tableau 4 : Entretiens avec les communes .....	13
Tableau 5 : Paramètres physiques associés aux évènements extrêmes .....	23
Tableau 6 : Données marégraphiques à Sète dock Richelieu .....	24
Tableau 7 : Période de retour des surcotes et niveaux horaires .....	25
Tableau 8 : Données marégraphiques de l'étang de Thau .....	26
Tableau 9 : Maximum des enregistrements des stations de l'étang de Thau .....	27
Tableau 10 : Niveau d'eau maximum par station de l'étang de Thau lors des tempêtes historiques .....	27
Tableau 11 : Données de houle .....	28
Tableau 12 : Période de retour des houles .....	28
Tableau 13 : Houle et Niveau d'eau atlas BRGM .....	37
Tableau 14 : Période de retour crue / tempête .....	38
Tableau 15 : Niveau d'eau en fonction des scénarii .....	38
Tableau 16 : Récapitulatif des scénarii par étude .....	40
Tableau 17 : Récapitulatif des éléments de calage et de validation .....	59
Tableau 18 : Valeurs pour le calcul de l'intervalle de confiance selon Dick et Darwin .....	66
Tableau 19 : Table de Student .....	67
Tableau 20 : Estimations des surcotes horaires au marégraphe de Sète par le CEREMA sur 31 années de données de 1953 à 2007 .....	68
Tableau 21 : Paramètres ajustés par la méthode des moments ainsi que moyenne ( $\mu$ ) et écart type de l'échantillon pour les différentes durées de surcote analysées .....	69
Tableau 22 : Courbes Intensité de surcote (en mNGF) au marégraphe de Sète (valeur moyenne numérisée) en fonction de la durée de la surcote pour différentes période de retour de la plus forte (en haut) à la plus basse (en bas) respectivement (retour 100ans, 50 ans, 20 ans, 10 ans, 5 ans, 2 ans, 1 an, 6 mois) .....	70
Tableau 23 : Estimations de la surcote (en mètre NGF) au marégraphe de Sète (valeur moyenne de numérisation) selon la durée de la surcote en heure et la période de retour de l'évènement .....	70
Tableau 24 : Estimations de la surcote (en mètre NGF) borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %, au marégraphe de Sète (valeur moyenne de numérisation) selon la durée de la surcote en heure et la période de retour de l'évènement .....	71
Tableau 25 : Estimations de la surcote (en mètre NGF) borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95 %, au marégraphe de Sète (valeur moyenne de numérisation) selon la durée de la surcote en heure et la période de retour de l'évènement .....	71
Tableau 26 : Paramètres ajustés par la méthode des moments ainsi que moyenne ( $\mu$ ) et écart type de l'échantillon pour les différentes durées de surcote analysées .....	72
Tableau 27 : Paramètres ajustés par la méthode des moments ainsi que moyenne ( $\mu$ ) et écart type de l'échantillon pour les différentes durées de surcote analysées .....	74
Tableau 28 : Estimations de la surcote (en mètre NGF) au marégraphe de Sète (valeur maximale de numérisation) selon la durée de la surcote en heure et la période de retour de l'évènement .....	74

---

Tableau 29 : Estimations de la surcote (en mètre NGF) borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %, au marégraphe de Sète (valeur maximale de numérisation) selon la durée de la surcote en heure et la période de retour de l'évènement .....	74
Tableau 30 : Estimations de la surcote (en mètre NGF) borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95 %, au marégraphe de Sète (valeur maximale de numérisation) selon la durée de la surcote en heure et la période de retour de l'évènement .....	75
Tableau 31 : Paramètres ajustés par la méthode des moments ainsi que moyenne ( $\mu$ ) et écart type de l'échantillon pour les différentes durées de surcote analysées .....	76
Tableau 32 : Estimations de la surcote (en mètre NGF ) au marégraphe de Sète à 10 mn, selon la durée de la surcote en minute et la période de retour de l'évènement .....	77
Tableau 33 : Estimations de la surcote (en mètre NGF) borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %, au marégraphe de Sète à 10 mn, selon la durée de la surcote en minute et la période de retour de l'évènement .....	77
Tableau 34 : Estimations de la surcote (en mètre NGF) borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95 au marégraphe de Sète à 10 mn, selon la durée de la surcote en minute et la période de retour de l'évènement .....	77

# PREAMBULE

Le **SMBT** a développé **VigiThau** : un outil de gestion environnementale conçu en phase 1 du Contrat de gestion intégrée du territoire de Thau. Il est constitué d'une plateforme d'avertissement et d'un modèle bassin versant simulant les écoulements et les transferts de pollution vers la lagune de Thau. Il s'inscrit dans le prolongement du programme Omega Thau.

De son côté, BRLi a monté, en partenariat, et réalisé le projet « **Litto CMS** » destiné à développer un service d'aide aux collectivités et gestionnaires du littoral pour la prévention et la gestion des crises submersion marine.

Au vu de ces éléments de contexte, il est apparu évident que les intérêts du SMBT et de BRLi convergeaient pour la réalisation d'un projet pour l'étude et la prévision du risque submersion marine sur le territoire du bassin de Thau.

L'objectif de ce projet, et de l'accord de coopération qui en découle entre le SMBT et BRLi, est de développer des services similaires à ceux rendus par VigiThau sur le plan sanitaire, mais cette fois pour la gestion du risque inondation par débordement de cours d'eau ou par submersion marine, et de la lagune à savoir : une évaluation du risque et un dispositif d'avertissement en temps réel.

Le projet sera réalisé en deux phases elles même scindées en sous-phases :

- Phase I : Chaîne de modélisation et cartographie des aléas submersions et inondation sur le littoral et l'étang de Thau
  - Phase I-1 : Diagnostic approfondi des données et études existantes
  - Phase I-2 : Modélisation dynamique du processus de submersion marine
  - Phase I-3 : Cartographie des aléas submersion
  - Phase I-4 : Cartographie des aléas inondation pluviale et fluviale sous contrainte de submersion marine
- Phase 2 : Développement d'un service pour la prévision et la gestion des crises de submersion marine sur le territoire du bassin de Thau
  - Phase II-1 : Configuration, test et optimisation du service
  - Phase II-2 : Faisabilité service opérationnel

**Le présent rapport concerne uniquement la phase I-1 : Diagnostic approfondi de la thématique submersion marine : données et études existantes. Il s'agit ici de collecter les données nécessaires à la construction d'un modèle de submersion marine, pour la modélisation de scénarii d'aléa mais également dans le but de développer un outil de prévision des submersions marines.**

# 1. Inventaire et description des études et données existantes

Les données et études existantes ont été en partie mises à disposition par le SMBT ou récupérés directement. Les principaux organismes fournisseurs sont les suivants :

- CEREMA
- SHOM
- IGN
- BRGM
- DREAL
- DDTM
- IFREMER
- Port Sud de France
- VNF

Ces études et données sont exploitées dans la suite de ce rapport. Les sources des données sont citées dans chaque chapitre.

Le tableau suivant récapitule l'ensemble de la bibliographie analysée.



Tableau 1 : Bibliographie

Type	Titre	Auteur	Année	Fourniture SMT
Rapport	Impacts morphologiques des surcotes et vagues de tempêtes sur le littoral méditerranéen	Gervais	2012	X
Rapport	Surcotes dans le golfe du Lion et conditions atmosphériques : variabilité contemporaine et future (1905-2100)	Ullmann	2008	X
Rapport	Etude générale pour la protection et l'aménagement durable du lido de Sète à Marseillan	BCEOM	2001	X
Rapport	Dynamique des systèmes littoraux et des milieux marins côtiers - Zoom sur le littoral du Languedoc Roussillon	BRGM	2012	X
Rapport	Contribution au recensement des submersions marines historiques liées aux tempêtes sur le littoral français métropolitain	BRGM	2011	X
Rapport	Submersions marines historiques	BRGM	2013	X
Rapport	Impact du changement climatique - Adaptation et coûts associés en France pour les risques côtiers	BRGM	2009	X
Rapport	Etat des connaissances sur les effets potentiels du changement climatique sur les aléas côtiers en Languedoc Roussillon	BRGM	2011	X
Rapport	Amélioration de la méthode RNACC : Caractérisation des incertitudes relatives à la quantification des impacts de l'élévation du niveau marin	BRGM	2011	X
Rapport	CECILE : L'évolution pluri décennale du trait de côte : synthèse bibliographique	BRGM	2011	X
Rapport	Mise en œuvre opérationnelle du "Réseau Tempête" sur le littoral du Languedoc Roussillon	BRGM	2012	X
Rapport	Suivi par vidéo numérique de l'expérimentation de techniques de protection du littoral du lido de Sète à Marseillan - phase 1 : présentation et validation du système ARGUS	BRGM	2012	X
Rapport	MISEEVA : Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité de la zone côtière Languedoc Roussillon face à la submersion marine	BRGM	2013	X
Rapport	Evaluation des submersion marines lors des tempêtes en Languedoc Roussillon - Atlas cartographique	BRGM	2012	X
Rapport	Suivi par vidéo numérique de l'expérimentation de techniques de protection du littoral du lido de Sète à Marseillan - rapport d'avancement	BRGM	2013	X
Rapport	"Réseau tempête" Languedoc Roussillon : activité 2012-2013 et développement des outils en ligne	BRGM	2013	X
Rapport	Evolution à long terme des morphologies côtières sur le littoral du Languedoc Roussillon	BRGM	2013	X
Rapport	"Réseau tempête" Languedoc Roussillon 2013-2014	BRGM	2015	X
Rapport	Analyse des données de houle Sète mesures du 21/05/2003 au 31/10/2009	CETMEF	2009	X
Rapport	Traitement des séries marégraphiques du Golfe du Lion - Extraction et étude statistique des évènements de référence	CETE MED	2010	X
Rapport	Traitement des séries marégraphiques du Golfe du Lion - Extraction et étude statistique des évènements de référence	CETE MED	2010	X
Rapport	Digitalisation de signaux marins ou d'étangs du Golfe du Lion	CETE MED	2007	X
Rapport	Etude générale pour la protection et la mise en valeur du littoral des communes de Frontignan la Peyrade et Villeneuve les Maguelone Phase 3	SMNLR	2005	X
Rapport	Etude générale pour la protection et la mise en valeur du littoral des communes de Frontignan la Peyrade et Villeneuve les Maguelone Phase 3	SMNLR	2004	X
Rapport	Analyse de la tempête marine du 4 décembre 2003	SMNLR	2003	X
Rapport	Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc Roussillon du 08 au 15 octobre 2010	DREAL	2010	X
Rapport	Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc Roussillon des 14 et 15 janvier 2010	DREAL	2010	X
Rapport	Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc Roussillon du 20 au 22 octobre 2009	DREAL	2009	X
Rapport	Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc Roussillon du 28 novembre au 1er décembre 2014	DREAL	2014	X
Rapport	Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc Roussillon du 12 au 16 mars 2011	DREAL	2011	X
Rapport	Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc Roussillon du 23 octobre au 06 novembre 2011	DREAL	2011	X
Rapport	Les risques littoraux : Observation, protection et prévention des risques			X
Rapport	Estimation de la période de retour de la tempête du 16 décembre 1997	STNMTE	1998	X
Rapport	Traitement des séries marégraphiques du Golfe du Lion - Présentation de l'étude	DREAL		X
Rapport	Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc Roussillon du 04 au 08 mars 2013	DREAL	2013	X
Rapport	Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc Roussillon du 19 au 22 novembre 2007	EID DRE	2007	X
Rapport	Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc Roussillon du 19 au 22 novembre 2007	EID DRE	2007	X
Rapport	Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc Roussillon du 19 au 22 novembre 2007	EID DRE	2007	X
Rapport	Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc Roussillon du 02 au 04 janvier 2008	DRE	2008	X
Rapport	Traitement des séries marégraphiques du Golfe du Lion - Partie homogénéisation recalage temporel	CETE MED	2010	X
Rapport	Analyse historique des séries marégraphiques du Golfe du Lion	CETE MED	2010	X
Rapport	Analyse historique des séries marégraphiques du Golfe du Lion	CETE MED	2010	X
Rapport	Traitement des séries marégraphiques du Golfe du Lion - Extraction et étude statistique des évènements de référence	CETE MED	2010	X
Rapport	Etude du fonctionnement hydraulique du complexe "Etangs palavasiens - Etang d'Ingril - Etang de l'Or" en situation de crue et de tempête marine	EGIS	2012	X
Rapport	Etude du fonctionnement hydraulique du complexe "Etangs palavasiens - Etang d'Ingril - Etang de l'Or" en situation de crue et de tempête marine	EGIS	2012	X
Rapport	Opération de protection et de mise en valeur du lido de Frontignan	Artélia	2013	X
Rapport	Rapport CANDHIS bouée Sète Marseillan	CEREMA	2016	
Rapport	Rapport CANDHIS bouée Sète	CEREMA	2016	
Rapport	Traitement et analyse des séries marégraphiques du Golfe du Lion	CEREMA	2013?	
Rapport	Hydrologie de l'étang de Thau	Audouin	1965	
Rapport + SIG	Territoire à Risque Important d'inondation (TRI) de Béziers-Agde	DDTM34	2013	X
Rapport + SIG	Territoire à Risque Important d'inondation (TRI) de Montpellier-Lunel-Mauguio-Palavas	DDTM34	2013	X
Rapport + SIG	Territoire à Risque Important d'inondation (TRI) de Sète	DDTM34	2013	X
Rapport + SIG	Niveaux extrêmes du SHOM			X
SIG	"BD TOPO"	IGN	2014	X
SIG	"SCAN 25"	IGN	2012	X
SIG	"hydro Sud-Ouest bassin submersion"			X
SIG	"Niveaux d'eau 2015"			X
SIG	"Zones inondées bassin vendéen"			X
SIG	"Evolution trait de côte"			X
SIG	"PHE"	DDTM34		X
SIG	"CATNAT"			X
SIG	"PHE"	DDTM34		X
SIG	"PPRI"	DDTM34	2014	X
SIG	"Bathymétrie chenaux"	Lesur	2015	X
SIG	"Bathymétrie étang du Bagnas"	INGEO	2013	X
SIG	"Bathymétrie étangs Thau, Peyrade, Mouettes, Ingril, Vic"	IFREMER	2004-2010	X
SIG	"Topographie"	IGN	2012	X
SIG	"Topographie"	IGN	2012	X
SIG	"Bathymétrie port de Sète"	Port SdF	2015	X
SIG	"Bathymétrie frange littorale"	SHOM	2011	X
SIG	"Bathymétrie frange littorale"	SHOM	2014	X
SIG	"Bathymétrie chenaux"	VNF	2008-2015	X
SIG	"Atlas des zones inondées"			
SIG	"Atlas des Zones inondables"	DREAL LR	2010	
SIG	"Bathymétrie Méditerranée"	SHOM	2005	
SIG	"Bathymétrie frange littorale"	SHOM	2005	
SIG	"Bathymétrie frange littorale"	SHOM	2005	
Tableau	"Analyse des données de houle Sète mesures du 21/05/2003 au 31/10/2009"	CETMEF	2009	X
Tableau	"Marégramme Sète"			X
Tableau	"Marégramme Sète"			X
Tableau	"Marégramme Sète"	CEREMA	2016	
Tableau	"Marégramme Sète"	SHOM		

Source : BRLI 2017

## 2. Données patrimoniales

### 2.1 DONNEES TOPOGRAPHIQUES/BATHYMETRIQUES

L'ensemble des données topographiques et bathymétriques collectées sont récapitulées dans le tableau suivant.

Tableau 2 : Données topographiques et bathymétriques

Référence	Source	Date	Type	Echelle en plan	Emprise
Homonim	SHOM	2015	raster	100m	Mer Méditerranée métropolitaine
Litto3D SHOM 5m	SHOM	2011	raster	5m	Bande côtière 1 à 3km large département Hérault et Gard
Litto3D SHOM 1m 2009	SHOM	2009	raster	1m	Bande côtière 1 à 3km large Communes d'étude
Litto3D SHOM 1m 2014	SHOM	2014-2015	raster	1m	Bande côtière 1 à 3km large Communes d'étude
Litto3D IGN 1m	SMBT - IGN	2012	raster	1m	Communes d'étude
Etang Thau	SMBT - Ifremer	2010	ponctuel	30m largeur étang 150m longueur étang	Etang de Thau
Etang Ingril	SMBT - Ifremer	2004	ponctuel	30m largeur étang 150m longueur étang	Etang d'Ingril
Etang Vic	SMBT - Ifremer	2004-2005	ponctuel	30m largeur étang 150m longueur étang	Etang de Vic
Port Sète	SMBT - Port Sud France	2015	ponctuel	50cm	Port Sète
Canal Rhône Sète	SMBT - VNF	2008-2015	ponctuel	50cm	Canal du Rhône à Sète Palavas à Sète
Grau Marseillan	SMBT - Lesur	2015	ponctuel	1m	Grau Marseillan
Grau Sète Ouest	SMBT - Lesur	2015	ponctuel	1m	Grau Sète Ouest
Grau Sète Est	SMBT - Lesur	2015	ponctuel	1-10m	Grau Sète Est
Etang Bagnas	SMBT - INGEO	2013	ponctuel	1m largeur étang 100m longueur étang	Etang du Bagnas (partiel)

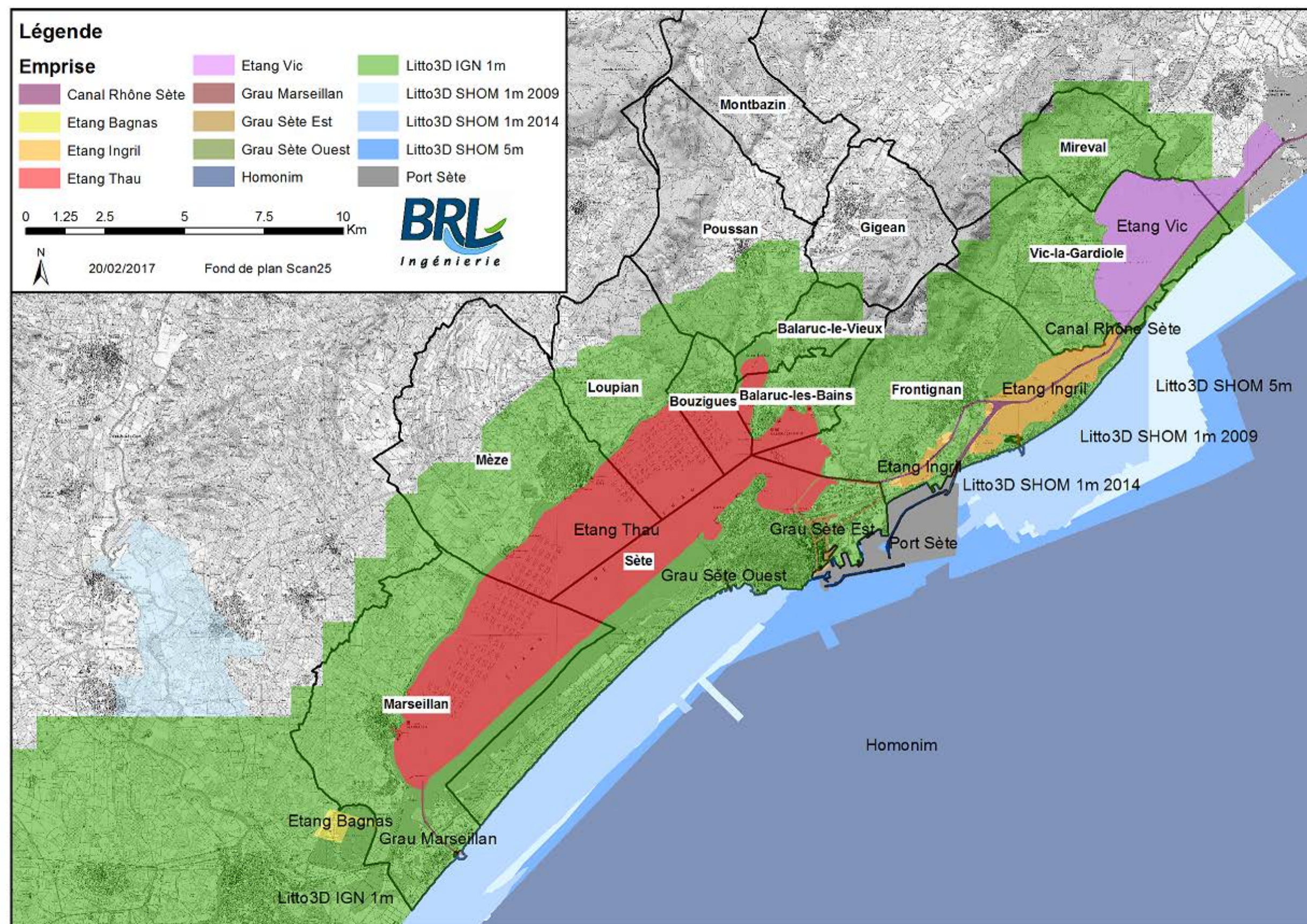
Source : BRLI 2016

Les données bathymétriques sont très complètes et suffisantes pour les besoins des modélisations prévues. Les données topographiques paraissent également complètes, des levés topographiques ponctuels pourront toutefois être à prévoir notamment sur des ouvrages de petites dimensions. Ces mesures complémentaires pourront être définies après la réalisation des premiers essais de modélisations (submersion marine).

Les emprises des données collectées sont illustrées sur la carte page suivante.



Figure 1 : Emprise des données topographiques / bathymétriques disponibles



Source : BRLi 2017



## 2.2 DONNEES SPECIFIQUES AUX OUVRAGES

Les communes rencontrées dans le cadre de l'étude ne disposent pas de données sur leurs ouvrages maritimes (cf. 3.1 Enquêtes de terrain).

Un travail spécifique sur les ouvrages avec une analyse détaillée est prévu pour la phase I 2 de l'étude. Les ouvrages sont simplement ici présentés dans les grandes lignes à partir de la base de données sur les ouvrages de la DREAL. Les principales informations de cette base de données sont la localisation et la nature des ouvrages.

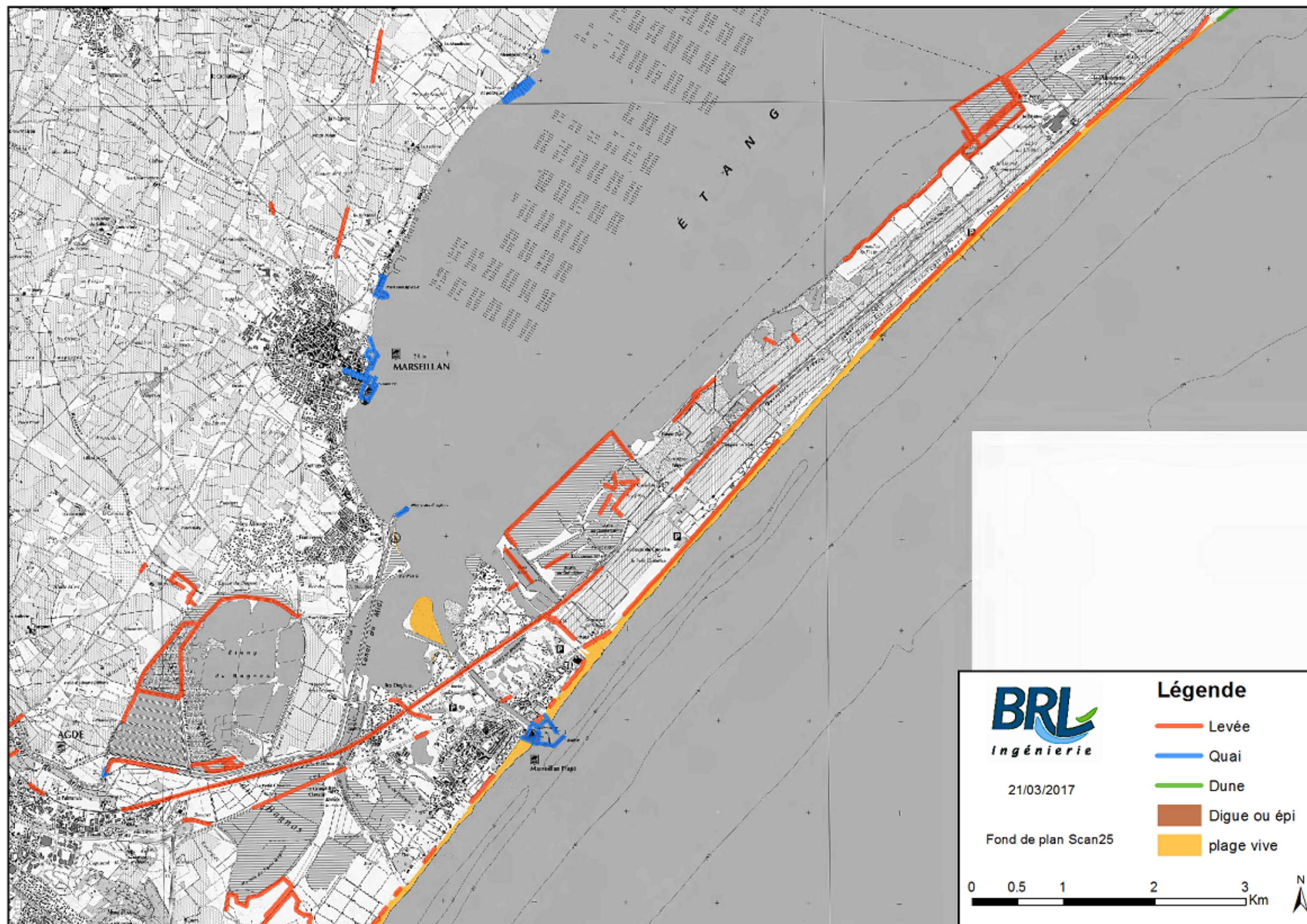
Cette base de données ne dispose pas de données attributaires (ex : date, matériaux, état, etc...) mais elle pourrait servir de socle à un inventaire patrimonial rendu nécessaire dans le cadre de la future compétence GEMAPI.

Le secteur d'étude comporte plusieurs types d'ouvrages :

- Levées (en terre)
- Quais
- Digue et épis
- Des dunes et plages que l'on considérera ici comme des ouvrages littoraux

les informations issues de la base de données sur les ouvrages de la DREAL sont présentées sur la figure page suivante.

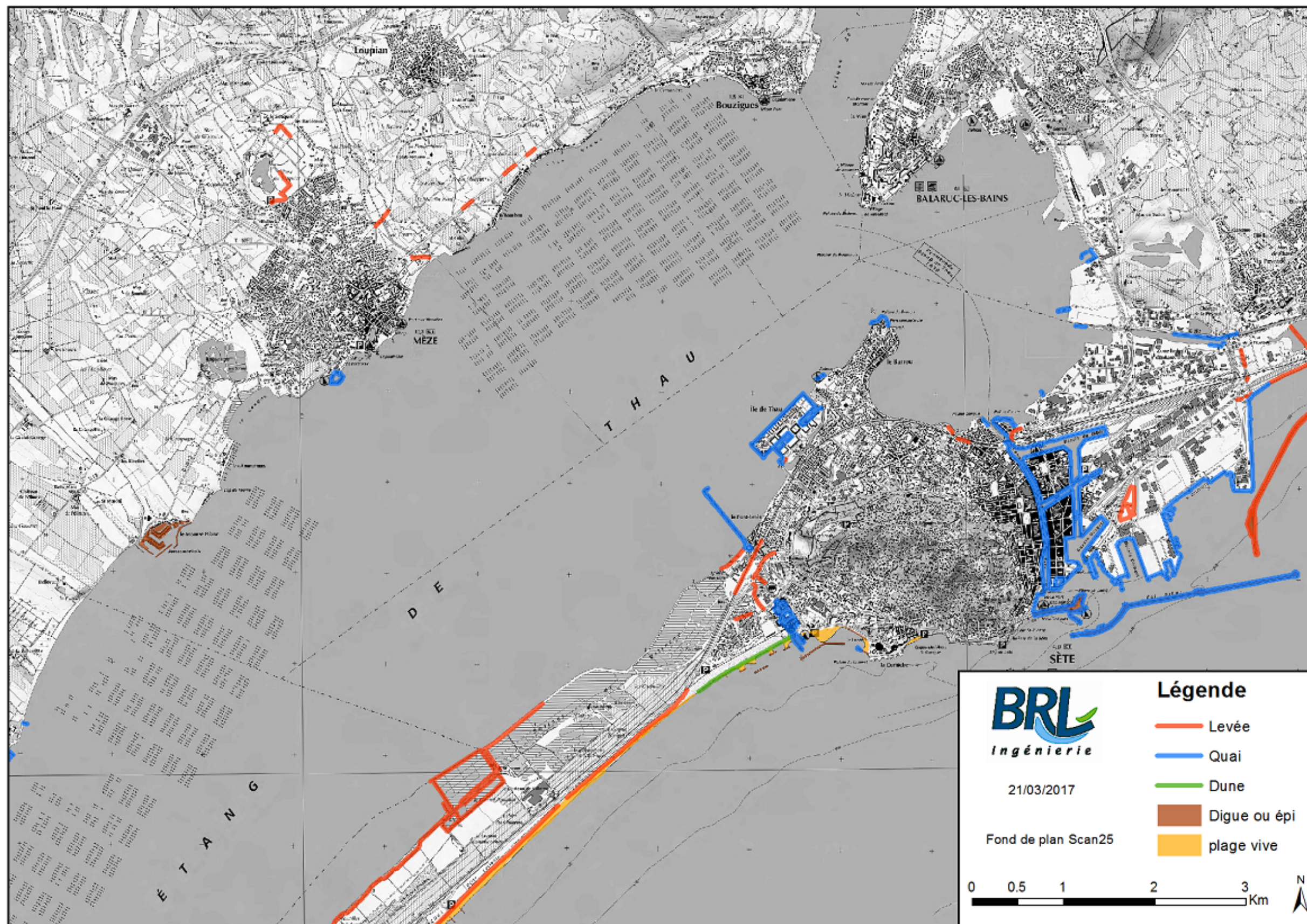
Figure 2 : Ouvrages sur le secteur d'étude - Ouest



Source : DREAL, BRLi 2017



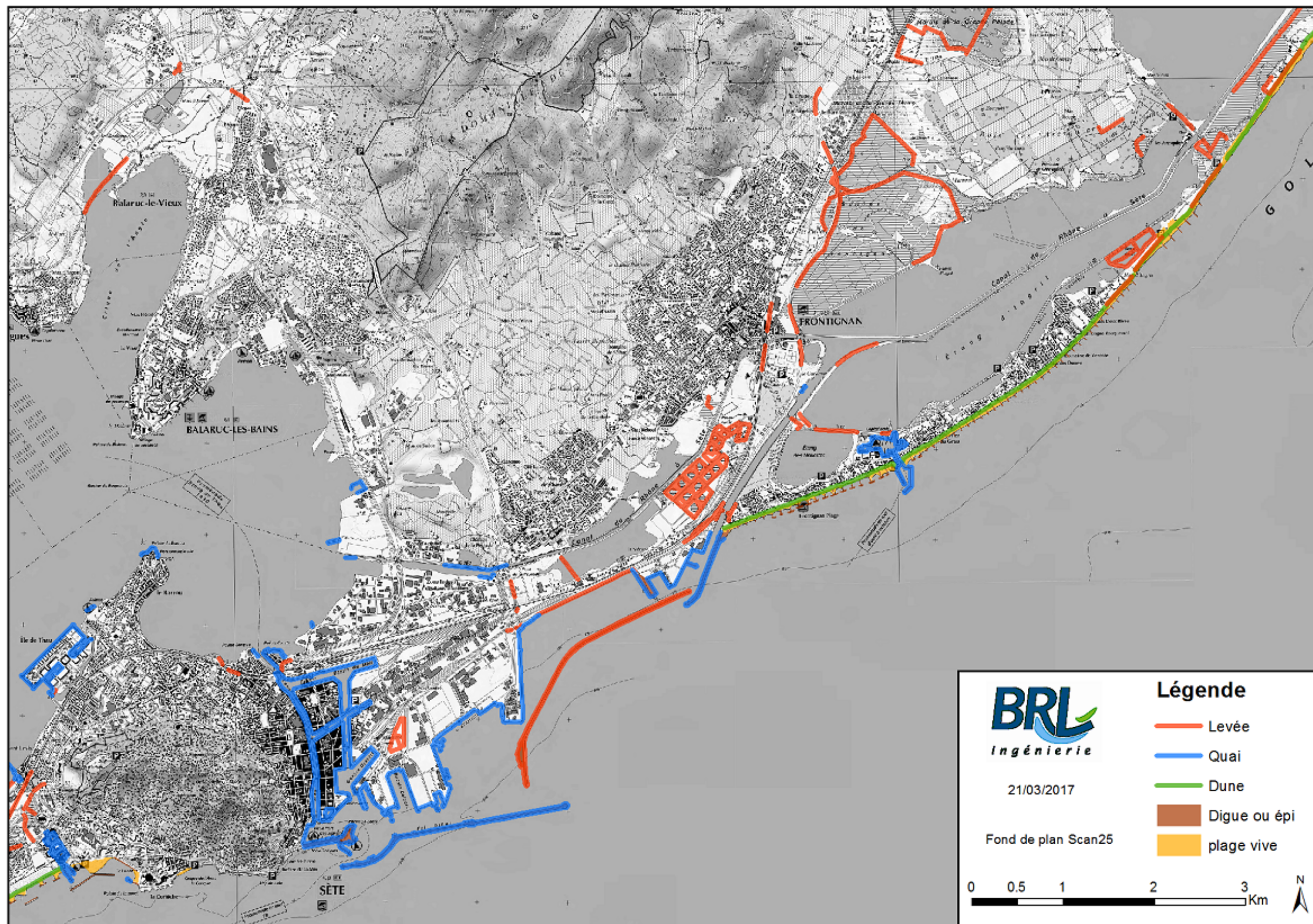
Figure 3 : Ouvrages sur le secteur d'étude - centre



Source : DREAL, BRLi 2017



Figure 4 : Ouvrages sur le secteur d'étude - Est



Source : DREAL, BRLi 2017



Le tableau suivant récapitule les informations sur ces ouvrages par commune.

Tableau 3 : Récapitulatif des ouvrages sur la zone d'étude

Commune	Type	Nombre	Linéaire (m)	Moyenne (m)
Balaruc-le-Vieux	Levéée	2	135	68
Frontignan	Barrage en terre	1	57	57
	Digue / Epi	82	7 531	92
	Levéée	74	24 157	326
	Dune	12	7 662	639
	Quai	13	9 660	743
	Plage vive	2	7 220	3 610
Loupian	Levéée	5	368	74
Marseillan	Barrage en dur	1	4	4
	Digue / Epi	5	1 351	270
	Levéée	34	9 083	267
	Quai	25	5 615	225
	Plage vive	3	4 640	1 547
Mèze	Digue / Epi	1	1 580	1 580
	Levéée	6	1 159	193
	Quai	1	729	729
Mireval	Levéée	7	1 780	254
Poussan	Levéée	5	895	179
Sète	Digue / Epi	17	8 334	490
	Levéée	55	30 478	554
	Dune	1	1 182	1 182
	Quai	55	33 734	613
	Plage vive	8	12 450	1 556
Vic-la-Gardiole	Levéée	24	7 585	316
	Dune	9	3 829	425
	Plage vive	1	4 500	4 500
Total	Barrage en dur	1	4	4
	Barrage en terre	1	57	57
	Digue / Epi	105	18 796	179
	Levéée	212	75 640	357
	Dune	22	12 673	576
	Quai	94	49 738	529
	Plage vive	14	28 810	2 058
	Tous	449	185 718	414

Source : DREAL, BRLi 2017

A noter que les linéaires des « Digue / Epi » et « Plage vive » présentent une marge d'erreur de quelque mètres voire une dizaine de mètre pour les grands ouvrages. Ces entités sont de type polygone dans la base de données et la « longueur » du polygone a été mesurée « manuellement ».

D'après la base de données, le secteur d'étude présente 449 ouvrages au total pour un linéaire de presque 186km.

En nombre, les ouvrages majoritaires sont les levées (en terre), puis viennent en second quasiment à égalité les digues / épis et les quais. En linéaire, les levées sont les plus importantes avec 76km de linéaire, alors que les quais représentent 49km de linéaire. Les dunes et les plages vives sont moins représentées sur le secteur, notamment en nombre, mais ces ouvrages sont plus long en moyenne (2km pour les plages vives).

Ces données sur les ouvrages sont assez complètes (type d'ouvrage et données patrimoniales) mais aussi assez générales. Elle seront à compléter spécifiquement dans les phases suivantes pour les besoins de l'étude. La liste suivante (non exhaustive) illustre les paramètres qui pourraient être nécessaires pour les ouvrages :

- Type d'ouvrage
- Direction normale à l'ouvrage
- Cote de la crête / du pied
- Pente de l'ouvrage
- Granulométrie (pour les dunes)
- Etc...

## 3. Données historiques - événements extrêmes

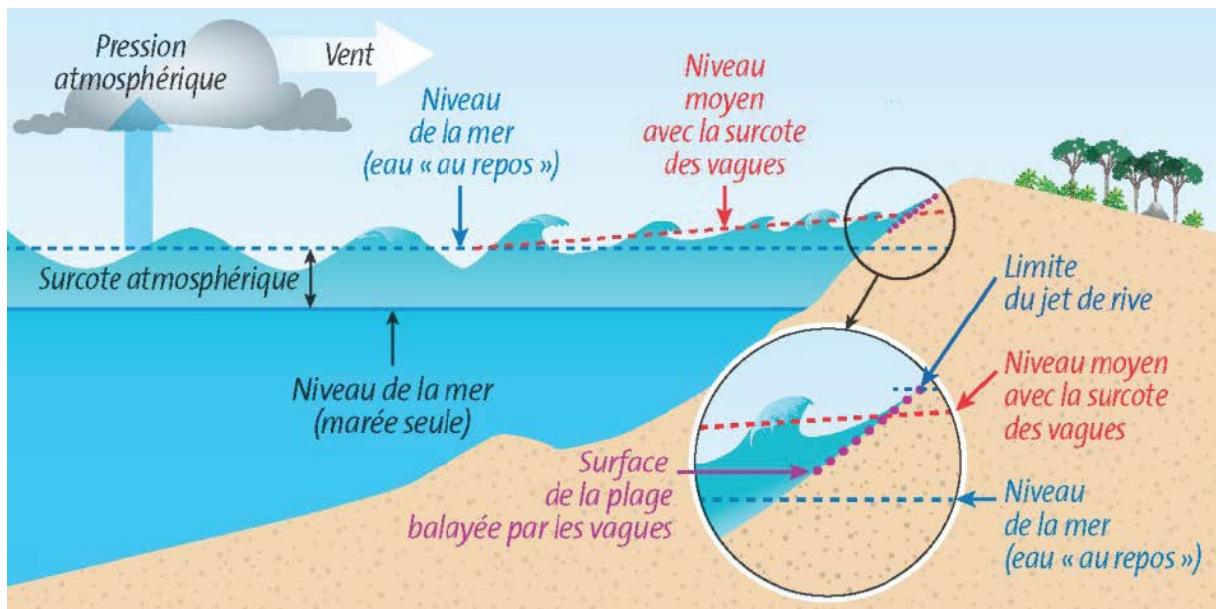
### NOTE INTRODUCTIVE CONCERNANT LES PARAMETRES PERTINENTS

Les phénomènes de tempêtes marines peuvent être caractérisées par une houle et un niveau d'eau élevé. Les tempêtes sont la conséquence de phénomènes météo, eux-mêmes caractérisés par un vent et une pression atmosphérique. Le principal moteur de la houle est le vent. Le niveau d'eau marin est régi par quatre composantes :

- La marée astronomique : de faible amplitude en Méditerranée, il s'agit de l'évolution prévisible du niveau d'eau.
- Le vent : le vent peut avoir une incidence sur le niveau marin en « inclinant » un plan d'eau à l'échelle d'un étang ou sur une plus grande distance (par exemple la mer Méditerranée). Ainsi un fort mistral va avoir tendance à abaisser le niveau marin sur le secteur d'étude, tandis qu'un vent de Sud Sud-Est va avoir tendance à l'augmenter.
- La houle : une forte houle va avoir tendance à augmenter les niveaux marins du fait du shoaling et du déferlement bathymétrique à la côte.
- La pression atmosphérique : les dépressions peuvent générer une surcote barométrique, de l'ordre de un centimètre par hectopascal.

Tous ces phénomènes peuvent se combiner et sont à l'origine des tempêtes tel qu'illustré sur la figure suivante.

Figure 5 : Phénomènes physiques lors d'une tempête



Source : BRGM

Pour caractériser des tempêtes, une attention particulière doit être portée aux niveaux d'eau et à la houle. Dans la suite de l'étude et sauf mention contraire, lorsque l'on parle de niveau d'eau (et notamment de statistiques sur les niveaux d'eau), il s'agit du niveau moyen avec la surcote des vagues (surcote atmosphérique comprise). Les contributions des autres paramètres (vent, dépression, etc...) ayant engendrées le niveau d'eau et la houle doivent être vues comme des causes alors que ce sont les conséquences qui nous intéressent. Tous les paramètres ne seront donc pas étudiés dans les détails même si les données disponibles sont mentionnées.

## 3.1 ENQUETES DE TERRAIN

### 3.1.1 Objectifs

L'objectif des enquêtes de terrain est de récolter des informations fines sur la zone d'étude, les acteurs de terrain ayant une connaissance particulièrement détaillée de leur territoire. Les informations collectées sont principalement d'ordre historique mais également sur la connaissance du fonctionnement hydraulique du territoire.

### 3.1.2 Description de la méthode : questionnaire et personnes ciblées

Des questionnaires ont été envoyés aux personnes ressources dans les communes. Des entretiens ont ensuite été réalisés avec ces personnes, conjointement avec les entretiens « fluvial & ruissellement ».

Les questions posées lors de ces entretiens sont les suivantes :

- Quels sont les événements historiques les plus marquant vis-à-vis des aléas littoraux (submersion, érosion) sur le territoire de votre commune ?
- Quelles informations pouvez-vous mettre à disposition sur événements (laisses de submersion, cartographies de zones inondées, coupure de presse, photographies, archives...) ?
- Quels sont, selon vous, les secteurs menacés par un aléa littoral et qui n'ont pas été touchés par des événements historiques ?
- Quels sont les ouvrages de protection du littoral recensés sur la commune ?
- Quels sont les autres ouvrages et équipements (portes à flot, ponts, routes, etc...) qui jouent un rôle important vis-à-vis de la protection contre les submersions marines ?

Les communes suivantes ont été rencontrées :

Tableau 4 : Entretiens avec les communes

Communes	Nom	Mail	Téléphone	Entretien
Balaruc le Vieux	Mme Garcia Anne Marie	dgs@ville-balarucvieux.fr	04 67 18 40 00	03/11/2016
	M. Gybely Claude	<a href="mailto:claud.gybely@ville-balarucvieux.fr">claud.gybely@ville-balarucvieux.fr</a>	06 79 83 03 88	
Balaruc les bains	M. Canato David	<a href="mailto:David.canato@mairie-balaruc-les-bains.fr">David.canato@mairie-balaruc-les-bains.fr</a>	04 67 80 92 05	03/11/2016
Bouzigues	Mme Rosay Eliane	<a href="mailto:mairie.bouzigues@wanadoo.fr">mairie.bouzigues@wanadoo.fr</a>	04 67 78 30 12	03/11/2016
	M. Archimbeau Olivier			
	M. Paqueriaud Michel			
Frontignan	Mme Osmo Anne-France	<a href="mailto:af.osmo@ville-frontignan.fr">af.osmo@ville-frontignan.fr</a>	04 67 18 51 52	09/11/2016
	Mme De Oliveira Marianne	<a href="mailto:mdeoliveira@ville-frontignan.fr">mdeoliveira@ville-frontignan.fr</a>	04 67 18 51 74	
	Mme Sandevor Alice			
	Mme Léon			
Marseillan	M. Garcia Fabrice	<a href="mailto:Fabrice.Garcia@marseillan.com">Fabrice.Garcia@marseillan.com</a>	04 67 01 08 40	15/11/2016
	M. Dumas Didier			
	M. Gueylard Michael			
Mèze	M. Rodriguez			15/11/2016
	M. Viudez			
	M. Novak			
Sète	M. Laurence Thierry	<a href="mailto:laurence@ville-sete.fr">laurence@ville-sete.fr</a>		09/11/2016

Source : SMT, BRLi 2017

### 3.1.3 Résultats et analyses

#### 3.1.3.1 Balaruc le Vieux

Une submersion marine ancienne a eu lieu en 1907. Les submersions historiques se limitent aux marais en bordure d'étang, sans dépasser le chemin de la rivière.

La commune n'a pas connu de phénomène d'érosion côtière. En revanche, les apports en limons de la Vène provoquent de l'accrétion à son embouchure.

Hormis les submersions historiques, il n'y a pas de secteurs particuliers menacés par un aléa littoral. Les zones menacées le sont directement de par leur topographie (points bas).

Il n'y a pas sur la commune d'ouvrage de protection du littoral ou d'autres ouvrages et équipements jouant un rôle vis-à-vis de la submersion marine.

#### 3.1.3.2 Balaruc les Bains

Il n'y a pas eu de submersion marine à proprement parler sur la commune. Lors de la dernière tempête du 13/10/2016, l'eau était au ras de la route en bordure d'étang près du port. Des pontons ont subis des dégâts, de par l'impact des vagues.

Il n'y a pas de secteurs menacés par un aléa littoral.

Il n'y a pas sur la commune d'ouvrage de protection du littoral ou d'autres ouvrages et équipements jouant un rôle vis-à-vis de la submersion marine.

#### 3.1.3.3 Bouzigues

Des submersions marines ont été observées en 1982 rue de la République et en 2002 au lieu-dit « la Côte Bleue ».

Il n'y a pas de secteurs particuliers menacés par un aléa littoral. La cartographie du PPRi est jugée comme bien représentative de l'aléa.

Il n'y a pas sur la commune d'ouvrage de protection du littoral hormis les digues des ports qui ont un rôle sur les vagues. En revanche, la route du front d'étang joue un rôle vis-à-vis de la submersion marine.

#### 3.1.3.4 Frontignan

Les tempêtes suivantes ont eues un impact sur la commune :

- Octobre 1982
- Décembre 1997
- Novembre 1999
- Septembre 2006
- Novembre 2014
- Octobre 2016

Un projet de « Protection et mise en valeur du lido de Frontignan » est en cours. La commune recommande de se rapprocher du Maître d'Ouvrage (Thau Agglo) pour en savoir plus, les thématiques de submersion, d'érosion et d'ouvrages ayant déjà fait l'objet d'un diagnostic pour cette étude.



### 3.1.3.5 Marseillan

Les deux tempêtes les plus importantes en termes de submersion sur la commune sont la tempête d'octobre 1982 et la tempête d'octobre 2016.

Les phénomènes d'érosion sont liés aux coups de mer.

Il n'y a pas de secteurs menacés par un aléa littoral.

Il n'y a pas sur la commune d'ouvrage de protection du littoral ou d'autres ouvrages et équipements jouant un rôle vis-à-vis de la submersion marine.

### 3.1.3.6 Mèze

Les tempêtes suivantes, classées décroissant d'importance, ont eues un impact sur la commune :

- Octobre 1982
- Novembre 2014 (classement CATNAT)
- Octobre 2016

Les phénomènes d'érosion sont liés aux coups de mer.

Les secteurs considérés comme menacés sont ceux dont l'altimétrie est basse. Le zonage du PPRI est considéré comme bien représentatif de la situation. Les vagues génèrent des franchissements non significatif et la problématique est surtout liée au niveau d'eau. La commune est la plus vulnérable lors des tempêtes combinées à des événements pluvieux.

Il n'y a pas sur la commune d'ouvrage de protection du littoral ou d'autres ouvrages et équipements jouant un rôle vis-à-vis de la submersion marine.

### 3.1.3.7 Sète

Les tempêtes suivantes ont eues un impact sur la commune :

- Octobre 1982 : Tempête la plus forte avec 2014
- Décembre 1997 : Tempête « d'importance » un peu moindre
- Novembre 1999 : Tempête « d'importance » un peu moindre
- Décembre 2003 : Tempête « d'importance » moindre
- Novembre 2014 : Tempête la plus forte avec 1982

Les problématiques sur la communes sont principalement liées au niveau d'eau, bien qu'il n'y ait jamais eu de submersion de grande ampleur. Les zones exposées à la houle restent limitées, de par la protection des ouvrages du port notamment. La route de la corniche subit des franchissements par forte houle, sans provoquer de submersions importantes à l'arrière, les terrains ayant une altimétrie élevée. Les ouvrages portuaires résistent bien aux tempêtes : Epi Dellon et digue Zifmar.

Il n'y a pas de dynamique d'érosion « continue » sur la commune. Ce sont les coups de mer qui sont responsables de l'érosion. Il peut y avoir de grandes variations saisonnières sur les plages, il y a érosion ou accrétion successivement en fonction de la direction des tempêtes. Il faut noter également un point « d'érosion » ponctuel à la base du Môle Saint Louis.

Les secteurs menacés par une submersion marine et non touchés par des événements historiques sont les suivants :

- Le Barrou

- Pointe Longue
- Pointe Courte
- Zone industrielle des Eaux Blanches

### 3.1.3.8 Analyse

La situation sur le secteur d'étude est assez homogène.

Les communes n'ont pas souvenir d'épisodes importants de submersion marine lors des tempêtes historiques, seules des submersions ponctuelles nous ont été signalées. La problématique de submersion est liée directement au niveau d'eau, bien que la houle semble avoir également avoir un effet sur les communes du littoral.

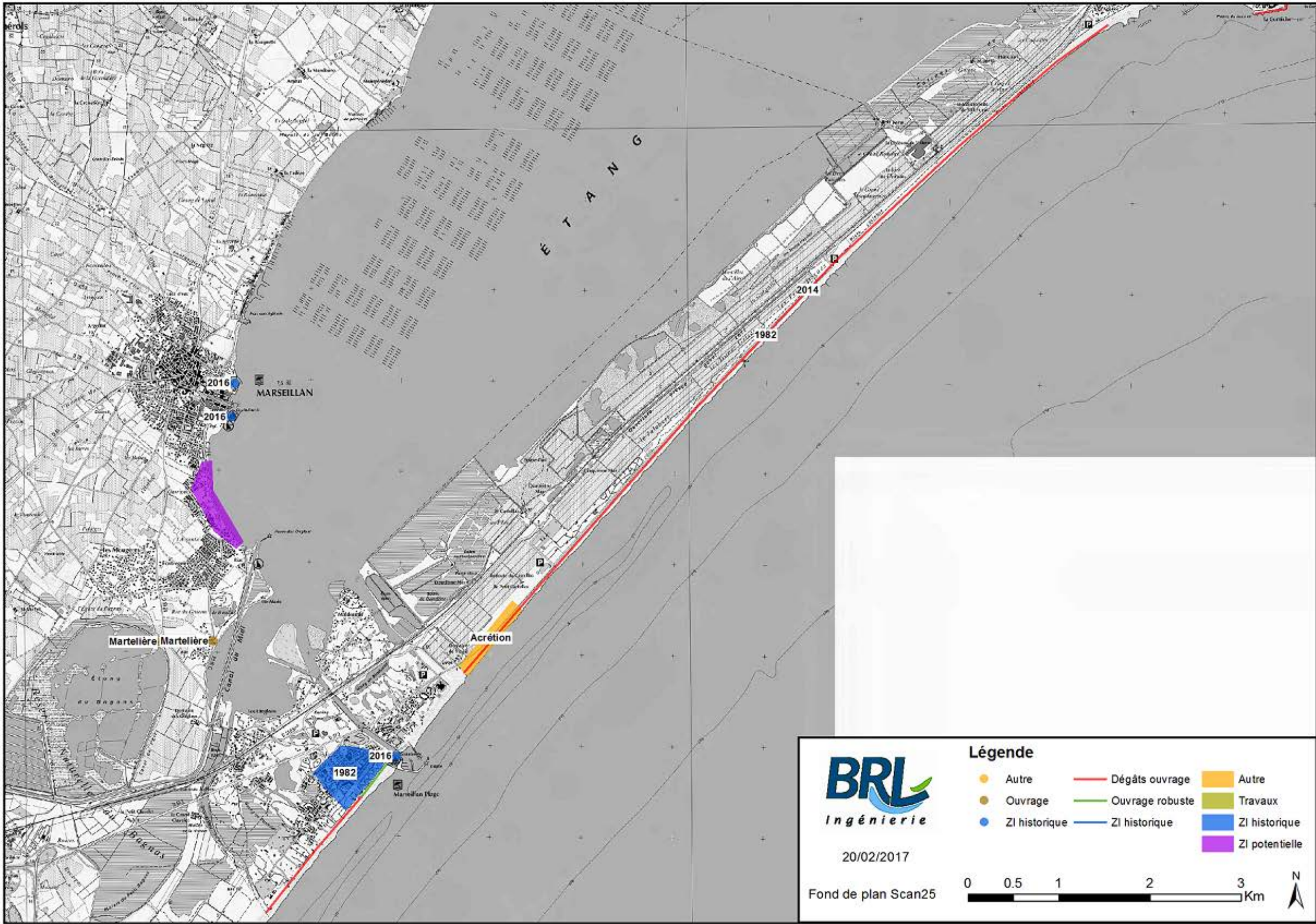
Les secteurs qui semblent les plus vulnérables bien que non touchés historiquement sont identifiés de par leur altimétrie basse.

Il n'y a pas, sur les communes, d'ouvrages de protection contre les submersions marines recensés.

Enfin, la problématique d'érosion côtière est associée aux tempêtes sans évolutions long terme mentionnées par les communes. Seules les communes littorales sont concernées.

Toutes les informations géographiques collectées lors de ces entretiens sont représentées sur les cartes pages suivantes.

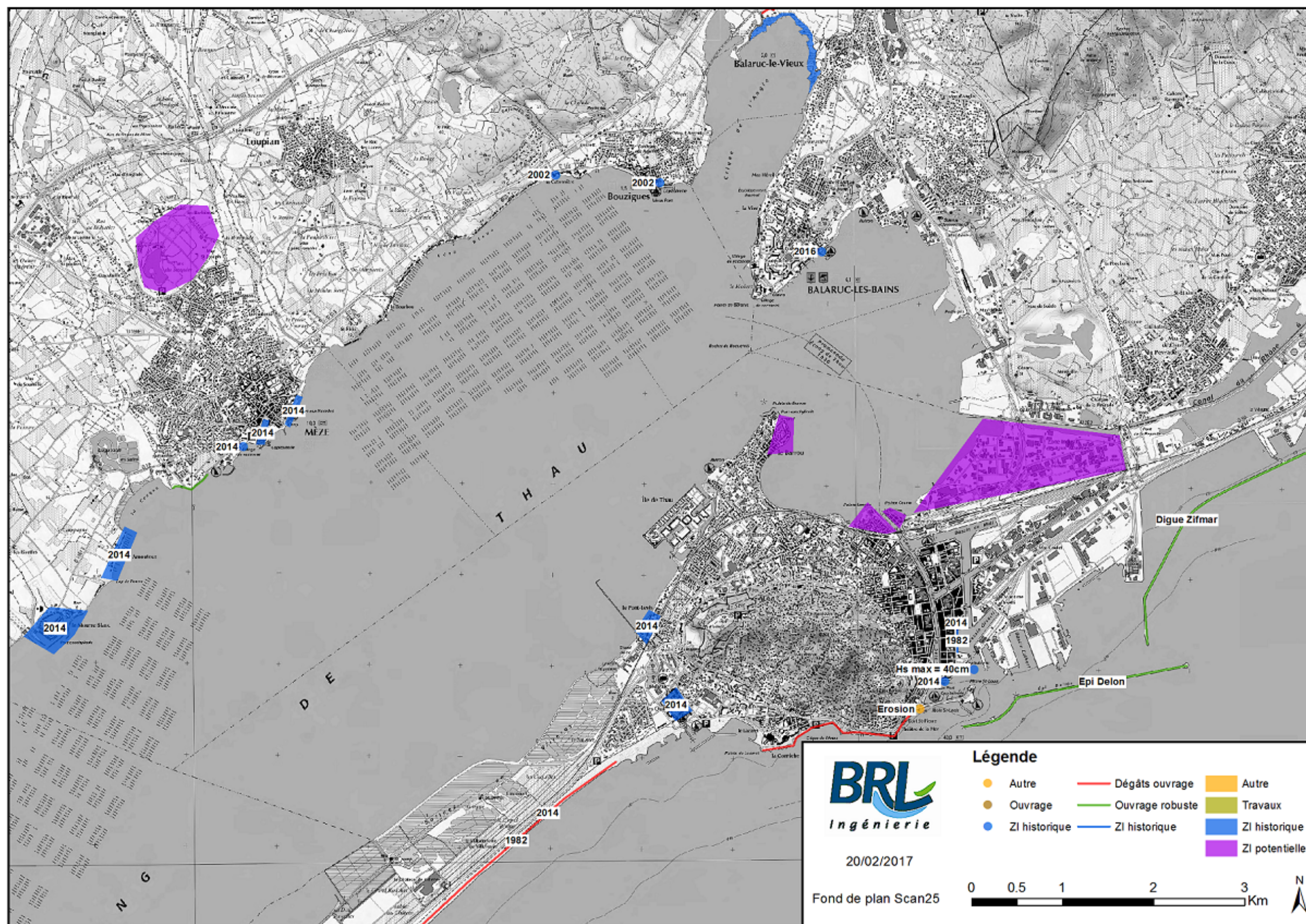
Figure 6 : Informations géographiques collectées lors des entretiens avec les élus - Ouest



Source : SMT, BRLi 2017



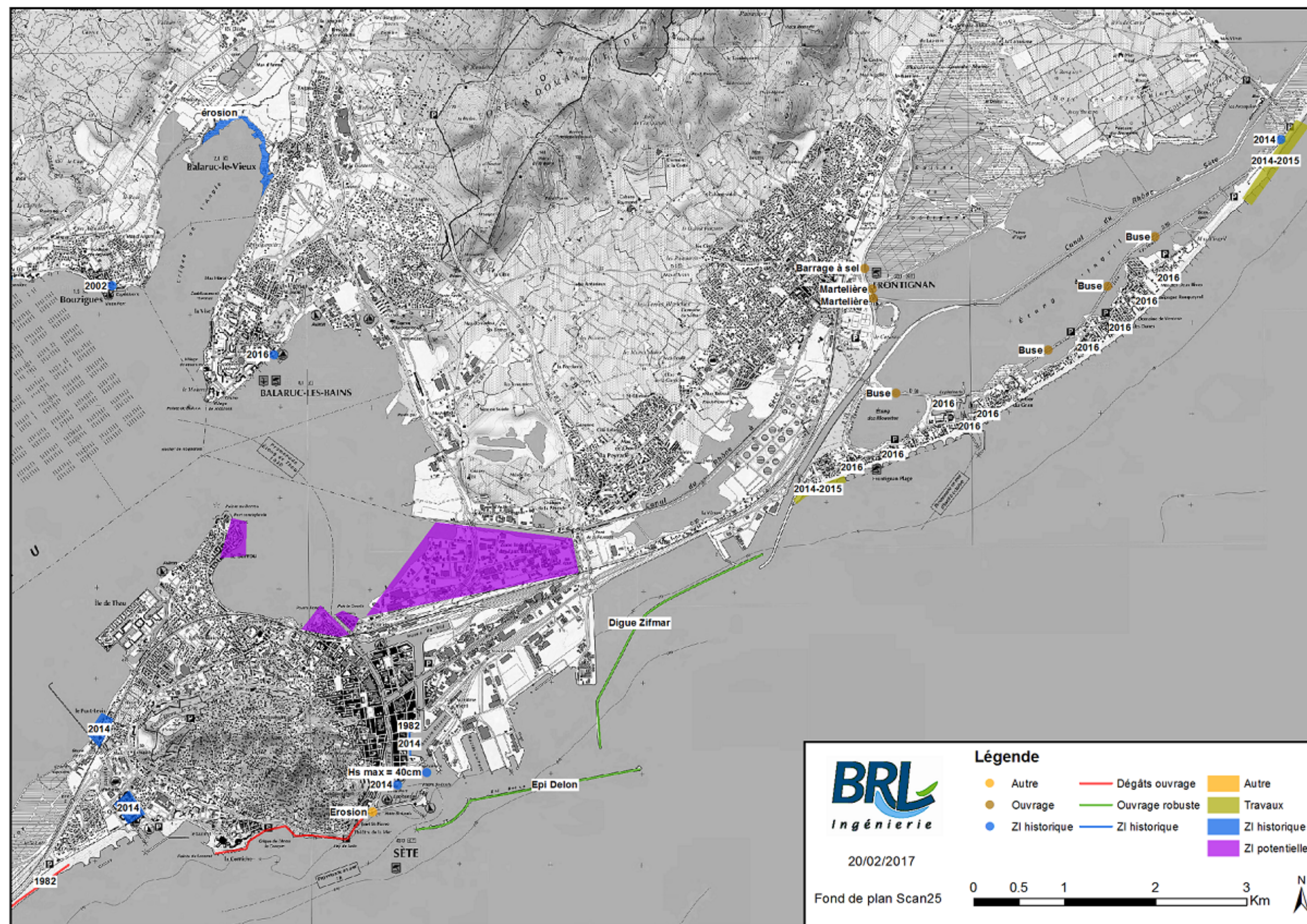
Figure 7 : Informations géographiques collectées lors des entretiens avec les élus - centre



Source : SMTB, BRLi 2017



Figure 8 : Informations géographiques collectées lors des entretiens avec les élus - Est



Source : SMT, BRLI 2017



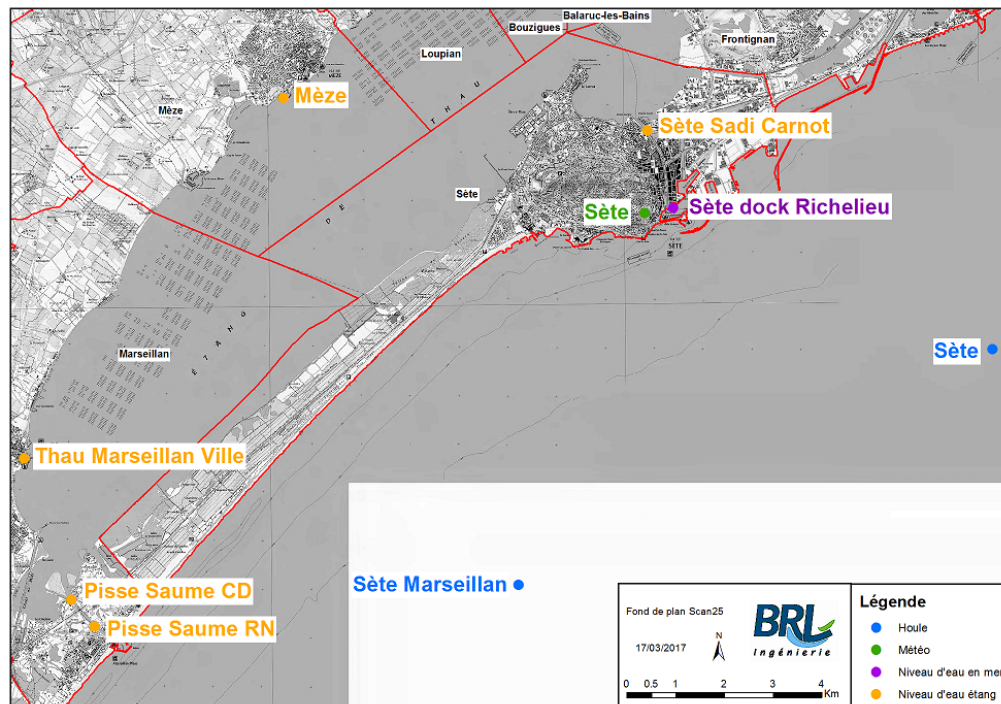
## 3.2 RESEAUX D'OBSERVATIONS ET DE MESURES / FOURNISSEURS DE DONNEES

### 3.2.1 Inventaires des observatoires

Sur le site d'étude, il existe les observatoires suivants :

- Données de houles :
  - Bouée « Sète Marseillan »
  - Bouée « Sète »
- Données marégraphiques « en mer » : station « Sète Dock Richelieu »
- Données marégraphiques dans l'étang de Thau pour les stations suivantes :
  - « Mèze » (position approximative sur la carte)
  - « Pisse Saume CD »
  - « Pisse Saume RN »
  - « Sète Sadi Carnot »
  - « Sète Bassin de Thau » (position identique à « Sète Sadi Carnot » sur la carte)
  - « Thau Marseillan ville »
- Données météo à la station de Sète
- Réseau « Tempêtes » de la région Languedoc Roussillon (1940-2017 avec des données précises à partir de 2011) : chaque tempête importante donne lieu à une fiche d'observation comportant les caractéristiques de la tempête. Plus la tempête est importante et plus l'analyse est faite dans le détail.

Figure 9 : Localisation des données



Source : BRGM, DREAL LR, thèse Gervais, thèse Ullmann, BRLi

Les données issues de ces observatoires ont permis l'analyse dans les paragraphes à suivre.



### 3.2.2 Historique des événements extrêmes : description des paramètres physiques des tempêtes

Le tableau page suivante présente les paramètres physiques des tempêtes historiques dont le maximum de la hauteur significative de la houle a dépassé 5m pendant la tempête. Pour les tempêtes très récentes, postérieures à 2010, un seuil inférieur (4m50) a été retenu afin de référencer des tempêtes encore « présentes dans les mémoires ».

Ces données proviennent de la compilation de plusieurs sources. Pour une même tempête, quand des valeurs légèrement différentes sont référencées, les valeurs estimées plus précises ou les plus importantes suivant les cas de figures sont conservées.

Les données de houle postérieures à 1988 sont issues de deux bouées au large de Sète (Sète Marseillan et Sète). Les données plus anciennes sont issues de re-jeux numériques.

Les sources des re-jeux numériques sont décrites en détail dans la thèse de Mathieu Gervais : « Impacts morphologiques des surcotes et vagues de tempêtes sur le littoral méditerranéen ». Les caractéristiques principales des modèles ainsi sont rappelées ici :

- Les sorties du modèle de houle SIMAR, venant du projet européen HIPOCAS (Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe, par les Puertos d'Estado espagnol), à partir des vents NCEP/NCAR. Ces sorties ont été utilisées pour les données les plus anciennes, de 1958 à 1978.
- Une nouvelle modélisation SWAN des vagues (Simulating WAVes Nearshore ; version 4.0) accomplie à partir de la ré-analyse « NCEP2 » de la NOAA. Elle prend le relais des données HIPOCAS, du fait d'une meilleure précision. Les dates concernées vont de 1979 jusqu'aux premières données d'octobre 1988 où les mesures des houlographes sont disponibles.
- Enfin, d'après la base de données des impacts de tempêtes, 46 événements majeurs propres de la période couverte par NCEP2, ont été explorés plus en détail à partir d'une nouvelle ré-analyse des conditions atmosphérique de la NOAA, dénommée CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) et remontant également à 1979. CFSR a été conçu et développé comme un modèle climatique global, haute résolution. C'est un système couplé qui regroupe des données atmosphériques, océaniques, terrestres, ainsi que des données sur les glaciers. La précision bien supérieure des vents ont permis de générer des simulations de houle avec SWAN bien plus réalistes.

Les simulations CFSR sont celles qui définissent le mieux l'intensité et la forme du houlogramme lors d'une tempête, ainsi que la direction de la houle. Les simulations HIPOCAS se révèlent les plus imprécises, mais permettent tout de même de détecter la plupart des événements de houle suffisamment importants, mêmes s'ils sont le plus souvent sous-estimés. Ceci est également le cas des estimations depuis NCEP2, de qualité intermédiaire.

Ces données issues de modèles numériques, bien qu'imprécises, permettent néanmoins de donner une description des tempêtes historiques.

Les niveaux d'eau sont relevés dans le port de Sète (station Sète dock Richelieu et donc données « en mer »). La prédiction de marée est le niveau d'eau maximum atteint par la marée sur une période de deux jours avant et après la date de la tempête. Les informations météo sont relevées à la station météorologique de Sète.

Les périodes de retour pour la houle ont été établies à partir des analyses statistiques décrites au paragraphe [3.2.3 Analyse statistique liée à ces événements](#). Ces informations sur les périodes de retour sont données à titre informatif pour caractériser les tempêtes. Ces valeurs sont estimatives. Les périodes de retour de la houle et du niveau d'eau sont par ailleurs calculées de manière indépendante.

La houle maximale observée atteint une hauteur significative de 7m et une hauteur maximale de 10.8m pour la tempête de 1997. La durée des tempêtes au regard de la houle est assez variée, de moins d'une journée à plus de 5 jours en fonction du seuil retenu. Les périodes de retour estimées dépassent le domaine de validité des lois statistiques utilisées (données trop courtes en temps) pour plusieurs tempêtes, les valeurs « hautes » sont donc à relativiser. Quatre tempêtes ressortent en terme de valeur de houle : 1962, 1982, 1997 et 2003. La période de la houle est similaire entre les tempêtes avec des valeurs autour de 9 secondes. La direction de la houle est également assez constante entre les tempêtes, les coups de mer proviennent du Sud-Est à l'Est Sud-Est.

Concernant le niveau d'eau, la cote maximale atteinte est une cote « quasi instantanée » généralement issue d'un enregistrement moyenné sur 10 minutes. Les cotes maximales ont été atteintes en 1982 (1.10mNGF) et 2014 (1.11mNGF). Les maximums des niveaux horaires sont calculés sur une moyenne horaire et servent au calcul de la période de retour. Les valeurs sont assez différentes entre les tempêtes avec des variations du simple au double. Les durées des tempêtes, caractérisées par la durée d'observation de niveaux d'eau élevés, sont très variables, allant d'une demi-journée à trois jours et demis. **Quatre tempêtes peuvent être qualifiées de marquantes par rapport au niveau d'eau, il s'agit des tempêtes de 1982, 1997, 2003 et 2014.**

A propos des données météo, les dépressions sont assez similaires en fonction des tempêtes avec en moyenne un creusement jusqu'à 999Hpa. Les vents proviennent presque toujours du Sud Sud-Est mais leur intensité est plus variée avec un maximum de 133km/h en 1997.

Dans l'ensemble, les fortes houles et les niveaux hauts se produisent en même temps, seule la tempête de 2014 fait exception avec une hauteur significative de houle de « seulement » 4.9m mais un niveau d'eau record de 1.11mNGF.

L'aspect atypique de la tempête de 2014 : houle forte sans être exceptionnelle et niveau d'eau exceptionnel peut s'expliquer par le cumul des phénomènes suivants qui mis bout à bout engendrent un telle tempête :

- La marée, c'est-à-dire le niveau d'eau « normal », était très forte durant la tempête. Elle atteint 0.38mNGF soit quasiment le niveau maximum de la marée astronomique : 0.41mNGF.
- La pression atmosphérique atteinte ce jour-là correspond au minimum enregistré lors de toutes les tempêtes historiques dont les données sont disponibles.
- La direction du vent était légèrement différentes des autres tempêtes avec une orientation quasiment plein Est.

Les deux premiers points relevés, marée et pression atmosphérique, engendrent directement un niveau d'eau plus élevé sans conséquence directe sur la houle, expliquant en partie la singularité de la tempête de 2014. Le dernier point relevé sur la direction du vent montre bien une différence avec les autres tempêtes, mais les conséquences en termes de niveau d'eau et de houle ne sont pas forcément évidentes. Il peut s'agir d'un effet local dû à la configuration du port de Sète où se situe le marégraphe.

Tableau 5 : Paramètres physiques associés aux évènements extrêmes

Date	Houle							Niveau d'eau					Météo		
	Hauteur significative Hs (m)	Durée (h) Hs > 2m	Durée (h) Hs > 3m	Période de retour Hs (années)	Hauteur maximale (m)	Période (s)	Direction (°N)	Marée prédite (m NGF)	Cote maximum (m NGF)	Niveau horaire NH (m NGF)	Durée (h) NH > 0.5mNGF	Période de retour NH (années)	Pression (hPa)	Direction Vent (°N)	Intensité Vent (km/h)
22/10/1844															
21/06/1845															
21/03/1928													999	135	72
03/02/1959	5.0	72		3 - 5		10.1	116								
05/11/1962	6.3	51		> 25		10.1	128								
16/02/1967	5.2	62		5 - 9		9.2	134								
07/11/1982	6.0	57		> 16	10.0	9.2	134	0.38	1.10				1002		
17/11/1989	5.1	123	48	4 - 6	8.9	9.3	120	0.40	0.95						
14/02/1994	5.2	51		5 - 9	7.8	9.2	145	0.22		0.48		< 1			
19/10/1994	5.3	21		5 - 12	8.2	8.9	130	0.32							
16/12/1997	7.0	87	60	> 50	10.8	10.4	127	0.35	1.06	0.99		43			133
31/12/1998	5.0	30		3 - 5	7.3	8.1	136	0.33		0.49		< 1			
12/11/1999	5.3	41	36	5 - 10	9.9	8.9	127	0.35	0.75	0.67		1			108
03/12/2003	5.7	33	24	10 - 37	8.7	10.2		0.31		0.89	18	14	1002	110	115
21/02/2004	5.4	41	36	6 - 15	8.4	9.5	130	0.27		0.71		2			
03/01/2008	5.2	51	48	5 - 9	9.1	9.4	127	0.26	0.83	0.74	36	3	998	113	130
12/03/2011	5.3	96	36	5 - 12	8.6	9.0	128	0.19		0.62	12	< 1	999	113	87
05/03/2013	4.7	60	54	2	8.1	9.0	135	0.22	0.82	0.67	18	1	997	113	91
28/11/2014	4.9	96	60	3	7.6	8.5	113	0.38	1.11	1.03	84	67	997	100	109
13/10/2016	5.4	36	30	6 - 15	10.1	7.6	113	0.35	0.90	0.83	42	7	1003	113	108

Source : BRGM, DREAL LR, thèse Gervais, thèse Ullmann, DREAL, SHOM, BRLi

### 3.2.3 Analyse statistique liée à ces événements

Dans les chapitres à suivre, les analyses sur le niveau d'eau se font sur le niveau d'eau moyen avec la contribution de la surcote atmosphérique et celle liée aux vagues. Le jet de rive est en revanche exclu.

#### 3.2.3.1 Niveau d'eau « en mer » - Station Sète dock Richelieu

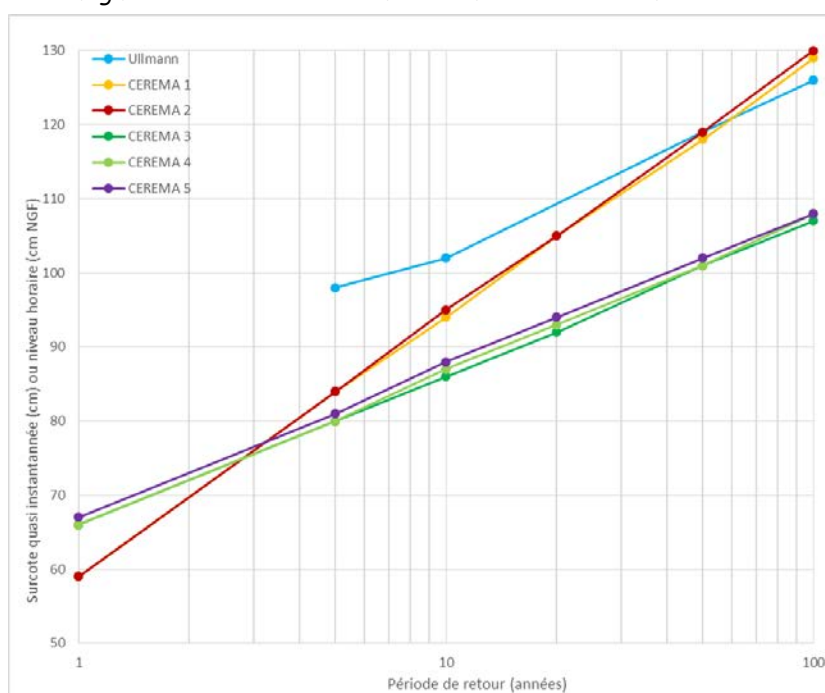
Deux sources de données fournissent des statistiques de niveau d'eau pour la station Sète dock Richelieu : thèse Ullmann et CEREMA. Les données sont décrites dans les tableaux et la figure à suivre.

Tableau 6 : Données marégraphiques à Sète dock Richelieu

Référence	Enregistrements				Ajustement		
	Type	Date de début	Date de fin	Période couverte (années)	Echantillonnage	Type	Paramètres
Ullman	surcote quasi instantanée	1986	1995	10	analyse hivernal		
CEREMA 1	surcote quasi instantanée	1986	1999	14	maximum annuel calendaire	Gumbel	a=15.1, b=59.3, N=14
CEREMA 2	surcote quasi instantanée	1986	1999	14	maximum annuel saisonnier	Gumbel	a=15.4, b=59.2, N=15
CEREMA 3	niveau horaire	1956?	2009?	37?	maximum annuel calendaire	Gumbel	a=8.8, b=66.1, N=37
CEREMA 4	niveau horaire	1956?	2009?	37?	maximum annuel saisonnier	Gumbel	a=9.1, b=65.6, N=37
CEREMA 5	niveau horaire	1956	2009	31.3	"sup seuil"	exponentiel	S=56, m=8.9, Nval=110, Nannées=31.3

Source : thèse Ullmann, CEREMA, BRLi

Figure 10 : Période de retour des surcotes et niveaux horaires



Source : thèse Ullmann, CEREMA, BRLi

Tableau 7 : Période de retour des surcotes et niveaux horaires

Période de retour (années)		1	5	10	20	50	100
Surcote quasi instantanée (cm)	Ullmann		98	102		119	126
Surcote quasi instantanée (cm)	CEREMA 1	59	84	94	105	118	129
Intervalle de confiance à 95%		48	71	79	86	96	102
		72	118	141	163	194	217
		54	77	85	93	104	112
Intervalle de confiance à 70%		64	96	110	124	144	159
Surcote quasi instantanée (cm)	CEREMA 2	59	84	95	105	119	130
Intervalle de confiance à 95%		48	72	80	87	97	104
		72	117	139	161	191	213
		55	77	86	94	105	114
Intervalle de confiance à 70%		64	96	110	125	144	159
Niveau horaire (cm NGF)	CEREMA 3	66	80	86	92	101	107
Intervalle de confiance à 95%		63	76	80	85	91	96
		70	89	98	107	119	128
		64	78	83	88	95	100
Intervalle de confiance à 70%		68	84	91	99	108	116
Niveau horaire (cm NGF)	CEREMA 4	66	80	87	93	101	108
Intervalle de confiance à 95%		62	75	80	85	92	96
		69	89	98	108	120	130
		64	77	86	88	95	101
Intervalle de confiance à 70%		67	84	92	99	109	117
Niveau horaire (cm NGF)	CEREMA 5	67	81	88	94	102	108
Intervalle de confiance à 95%		65	77	82	87	93	98
		69	86	93	101	110	118
		66	79	84	90	97	103
Intervalle de confiance à 70%		68	84	91	97	106	113

Source : thèse Ullmann, CEREMA, BRLi

Pour les enregistrements de type « surcote quasi instantanée », les deux modes d'échantillonnage du CEREMA : annuel calendaire ou annuel saisonnier donnent des résultats quasiment identiques. La comparaison avec l'échantillonnage « hivernal » de la thèse Ullmann est plus intéressante : les valeurs CEREMA sont plus faibles que les valeurs d'Ullmann pour les faibles périodes de retour. Cette tendance s'amenuise quand la période de retour augmente et va jusqu'à s'inverser pour la centennale.

On aura tendance à considérer les données CEREMA comme plus fiables car la période d'enregistrement est plus longue : 14 ans contre 10 ans. En revanche, les valeurs des grandes périodes de retour (100 ans voire 50 ans) sont à prendre avec grande précaution pour les deux sources, l'intervalle de confiance est très élevé. Une « règle classique » convient de limiter les calculs de période de retour à trois fois la longueur de l'enregistrement ce qui n'est pas le cas ici.

Pour les enregistrements de type « niveau horaire », les résultats sont quasiment identiques pour les trois échantillonnages du CEREMA. L'analyse des périodes de retour au paragraphe 3.2.2 Historique des évènements extrêmes : description des paramètres physiques des tempêtes est menée sur les niveaux horaires de manière à bénéficier des périodes d'enregistrements les plus longues et donc de l'analyse statistique la plus fiable. La loi CEREMA 3 est choisie arbitrairement.

Le niveau d'eau à Sète a également été étudié dans le détail directement par le SMBT, les résultats de cette étude sont présentés en Annexe 1.

### 3.2.3.2 Débits dans les graus entre l'étang de Thau et la mer

Les données de débitimétrie dans les graus entre l'étang de Thau et la mer sont en cours de transmission par le SMT.

### 3.2.3.3 Niveau d'eau dans l'étang de Thau

Les séries marégraphiques de l'étang de Thau : « Mèze », « Pisse Saume CD », « Pisse Saume RN », « Sète Sadi Carnot », « Sète Bassin de Thau » et « Thau Marseillan ville » ont été acquises par une convention auprès de la DREAL pour la présente étude.

Les informations à suivre sont issues des études réalisées sur ces données ainsi que des données elles-mêmes.

Ces données correspondent à des enregistrements collectés par le SMNLR sur des marégrammes papiers et ont fait l'objet en 2007 d'une numérisation par le CETE. En 2010, dans le cadre du traitement des séries marégraphiques du Golfe du Lion, le CETE a procédé à un ensemble d'analyses pour réaliser l'homogénéisation, ainsi que le recalage temporel et altimétrique des séries.

Ces enregistrements comportent quatre valeurs pour la donnée issues de la numérisation : minimum, barycentre, maximum et moyenne. Le tableau suivant présente les caractéristiques principales de chacun des enregistrements

Tableau 8 : Données marégraphiques de l'étang de Thau

Station	Géographie		Enregistrements				
	Commune	Position exacte	Date de début	Date de fin	Période couverte (années)	Durée effective (années)	Ratio effectif
Mèze	Mèze	Non	10/10/1977	14/10/1980	3.01	1.89	62.8%
Pisse Saume CD	Marseillan	Oui	03/10/1977	06/07/1984	6.76	4.74	70.2%
Pisse Saume RN	Marseillan	Oui	03/10/1977	24/07/1979	1.80	1.36	75.3%
Sète Sadi Carnot	Sète	Oui	28/09/1981	14/01/1983	1.23	0.96	78.4%
Sète Bassin de Thau	Sète	Non	04/10/1977	14/10/1980	3.03	1.76	58.1%
Thau Marseillan Ville	Marseillan	Oui	03/10/1977	13/12/1999	22.19	16.31	73.5%

Source : DREAL, SMNLR, BRLi

Les informations de positions pour les stations dont la position exacte n'est pas connue (présentation sur la *Figure 9 : Localisation des données*) font l'objet des hypothèses arbitraires suivantes :

- La station de Mèze est positionnée dans le port
- La station Sète Bassin de Thau est positionnée au même endroit que la station Sète Sadi Carnot

A l'exception de la station Thau Marseillan Ville, ces enregistrements marégraphiques sont plutôt anciens et couvrent des périodes assez courtes entre 1977 et 1984. Les ratio effectifs de mesures disponibles sont assez variables et compris entre 58.1% et 78.4%.

D'après les études relatives aux données, les enregistrements sont jugés de qualité « médiocre » (problèmes de numérisation, de calage altimétrique), mais ils sont néanmoins utilisables pour les évènements de tempête.

Les analyses à suivre sont données sur le niveau d'eau dit « moyen » lié à la numérisation des enregistrements.

Les maximums atteints par les marégraphes des différentes stations de l'étang de Thau sont synthétisés dans le tableau suivant.



Tableau 9 : Maximum des enregistrements des stations de l'étang de Thau

Station	Couverture enregistrement		Maximum enregistrement	
	Date de début	Date de fin	Date	Niveau d'eau (m NGF)
Mèze	10/10/1977	14/10/1980	27/10/1979	0.70
Pisse Saume CD	03/10/1977	06/07/1984	07/11/1982	0.91
Pisse Saume RN	03/10/1977	24/07/1979	19/01/1979	0.82
Sète Sadi Carnot	28/09/1981	14/01/1983	07/11/1982	0.57
Sète Bassin de Thau	04/10/1977	14/10/1980	27/10/1979	0.77
Thau Marseillan Ville	03/10/1977	13/12/1999	17/12/1997	0.78

Source : DREAL, BRLi

Pour les stations avec des enregistrements anciens entre 1977 et 1984 (tous sauf Thau Marseillan Ville), les maximums sont concordant entre les stations quand les périodes couvertes par les enregistrements se recoupent. Ainsi, le maximum enregistré est daté du :

- 07/11/1982 pour Pisse Saume CD et Sète Sadi Carnot : stations couvrant l'année 1982
- 27/10/1979 pour Mèze et Sète bassin de Thau : stations couvrant l'année 1979 entièrement mais pas 1982
- 19/01/1979 pour Pisse Saume RN : station ne couvrant ni 1979 entièrement ni 1982

Enfin, pour la station de Thau Marseillan Ville qui couvre une période temporelle beaucoup plus grande, le maximum relevé date du 17/12/1997.

Les maximums relevés sur les stations de l'étang de Thau lors des tempêtes historiques (cf. [Tableau 5 : Paramètres physiques associés aux événements extrêmes](#)) sont récapitulés dans le tableau suivant pour les tempêtes où des données sont disponibles.

Tableau 10 : Niveau d'eau maximum par station de l'étang de Thau lors des tempêtes historiques

Date tempête	Maximum niveau d'eau par station (m NGF)							
	Mèze	Pisse Saume CD	Pisse Saume RN	Sète Sadi Carnot	Sète Bassin de Thau	Thau Marseillan Ville		
07/11/1982	Pas de données	0.91	Pas de données	0.57 *	Pas de données	0.72		
17/11/1989		Pas de données		Pas de données		Pas de données	Pas de données	0.62
14/02/1994								0.63 *
19/10/1994								0.57 *
16/12/1997								0.78
31/12/1998								0.43
12/11/1999								0.72

\* Manque de données au niveau du pic de tempête sous estimant le maximum

Source : DREAL, BRLi

Des données sur la tempête historique de 1982 sont disponibles en trois stations bien que le pic de tempête ne soit pas enregistré à la station Sète Sadi Carnot. La station de Thau Marseillan Ville présente des enregistrements sur toutes les tempêtes historiques relevées pendant sa période d'enregistrement. Cependant, le maximum du niveau d'eau n'est pas relevé pour les deux tempêtes de 1994.

Des données issues de capteurs de pression permettant de mesurer indirectement le niveau d'eau dans l'étang de Thau sont également en cours de transmission par le SMBT.

### 3.2.3.4 Hauteur significative de la houle

Des données de houle sont disponibles pour les bouées « Sète – Marseillan » et « Sète » comme illustré à la *Figure 9 : Localisation des données*. Les données sont disjointes, sur deux périodes différentes et relativement courtes. Les données sont décrites dans le tableau à suivre.

Tableau 11 : Données de houle

Référence	Bouée	Enregistrements					Ajustement		
		Date de début	Date de fin	Période couverte (années)	Durée effective (années)	Ratio effectif	Loi	Seuil (m)	Paramètres
STNMTE	Sète Marseillan	11/10/1988	31/12/1997				carré ajustée	2.5	
CEREMA 1	Sète Marseillan	11/10/1988	29/01/2001	12.31	8.82	71.7%	GPD	3.4	s=0.8279, e=-0.1312
CEREMA 2	Sète Marseillan	11/10/1988	29/01/2001	12.31	8.82	71.7%	exponentielle	3.4	p=1.3643
CEREMA 3	Sète	21/05/2003	31/12/2015	12.62	10.90	86.4%	GPD	2.9	s=0.7799, e=-0.1659
CEREMA 4	Sète	21/05/2003	31/12/2015	12.62	10.90	86.4%	exponentielle	2.9	p=1.5017

Source : CEREMA, STNMTE, BRLI

Les périodes de retour des houles calculées à partir des cinq ajustements, ainsi que les intervalles de confiance s'il sont disponibles, sont présentées dans le tableau ci-dessous et dans la figure ci-après.

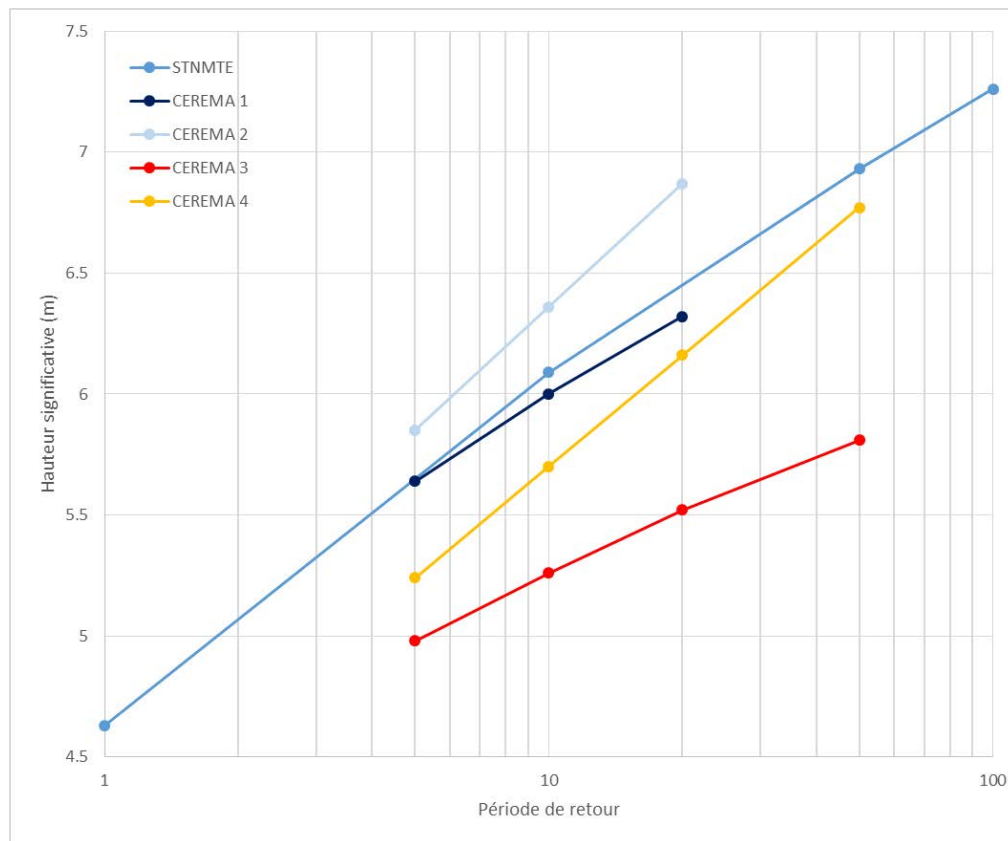
Tableau 12 : Période de retour des houles

Période de retour (années)		1	5	10	20	50	100 *
Hauteur significative (m)	STNMTE	4.63		6.09		6.93	7.26
Intervalle de confiance à 70%		4.43		5.78		6.56	6.87
		4.87		6.46		7.37	7.73
Hauteur significative (m)	CEREMA 1		5.64	6	6.32		
Intervalle de confiance à 70%			5.24	5.44	5.59		
			5.86	6.3	6.72		
			4.97	5.12	5.22		
Intervalle de confiance à 95%			6.2	6.76	7.34		
Hauteur significative (m)	CEREMA 2		5.85	6.36	6.87		
Intervalle de confiance à 70%			5.48	5.91	6.35		
			6.22	6.81	7.39		
			5.25	5.63	6.01		
Intervalle de confiance à 95%			6.58	7.24	7.9		
Hauteur significative (m)	CEREMA 3		4.98	5.26	5.52	5.81	
Intervalle de confiance à 70%			4.7	4.89	5.05	5.21	
			5.16	5.5	5.83	6.22	
			4.5	4.67	4.78	4.87	
Intervalle de confiance à 95%			5.36	4.78	6.21	6.83	
Hauteur significative (m)	CEREMA 4		5.24	5.7	6.16	6.77	
Intervalle de confiance à 70%			4.97	5.37	5.78	6.32	
			5.51	6.02	6.54	7.22	
			4.74	5.1	5.47	5.95	
Intervalle de confiance à 95%			5.82	6.4	6.97	7.74	

Source : STNMTE, CEREMA, BRLI



Figure 11 : Période de retour des houles



Source : STNMTE, CEREMA, BRLi

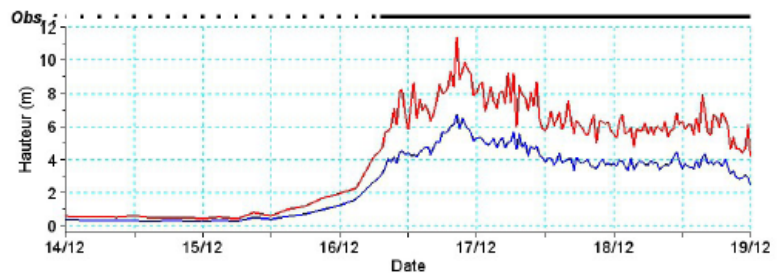
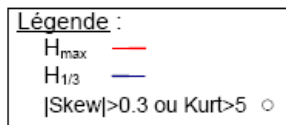
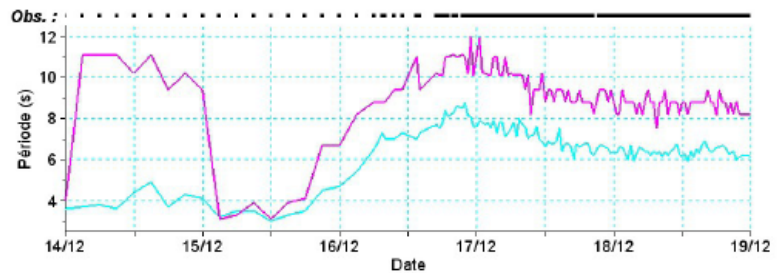
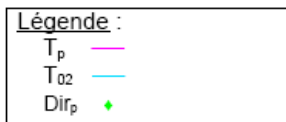
La loi exponentielle est réputée plus sécuritaire que la loi GPD et ceci est bien traduit dans l'analyse des données présentées. C'est-à-dire qu'à période de retour égale, la hauteur de houle est plus importante pour la loi exponentielle que pour la loi GPD.

Les données STNMTE de la bouée « Sète Marseillan » sont relativement proches des données CEREMA 1 (loi GPD) issue de la même bouée. Les données plus récentes de la bouée « Sète » donnent des valeurs de hauteur significatives nettement plus faibles à période de retour constante (70cm d'écart). Cette écart est de prime abord assez étonnant, dans le sens où les deux bouées ont une position « similaire » (profondeur quasi identique) et sont assez peu éloignées. Avec une lecture plus fine des données, cette différence pourrait s'expliquer par le poids de la tempête du 16/12/1997, de hauteur significative maximale 6.73m, qui est incluse dans les analyses des données STNMTE, CEREMA 1 et CEREMA 2. Il convient encore une fois de prendre avec précaution les périodes de retour annoncées par rapport à la durée des échantillons analysés (une dizaine d'année).

Pour l'analyse des périodes de retour du paragraphe 3.2.2 Historique des évènements extrêmes : description des paramètres physiques des tempêtes les valeurs sont estimées à partir des données CEREMA 3 et CEREMA 4, soient les données basées sur une période d'enregistrement la plus longue et qui plus est avec un enregistrement à la bouée de Sète. Les valeurs données sont encadrées avec ces deux lois (exponentielle et GPD).

A titre d'exemple, la figure suivante détaille les paramètres de la tempête de 1997. Ces données sont issues des fiches tempêtes réalisées par le CEREMA. Des fiches tempêtes sont disponibles pour la plupart des tempêtes récentes (postérieures à 1997).

Figure 12 : Tempête 16/12/1997

Évolution de  $H_{\max}$ ,  $H_{1/3}$ Évolution de  $T_p$ ,  $T_{02}$ ,  $\text{Dir}_p$ 

Pic du	$H_{1/3}$ (m)	$H_{\max}$ (m)	$T_{H1/3}$ (s)	$T_{H\max}$ (s)	$H_{m0}$ (m)	$T_p$ (s)	$T_{02}$ (s)	$T_e$ (s)	$\text{Dir}_p$ (°)	Etal (°)
16/12 20:30	6.73	11.42	9.9	9.0	7.94	11.0	8.6	9.7	NA	NA

Source : CEREMA

## 3.2.3.5 Longueur d'onde et période de la houle

La longueur d'onde et la période de la houle traduisent d'une certaine manière un même phénomène physique. La longueur d'onde est la distance entre deux crêtes de la houle alors que la période est le temps nécessaire à la houle pour parcourir la distance entre deux crêtes (soit la longueur d'onde). Ces deux paramètres sont liés par la formule suivante :

$$\frac{L}{T} = \sqrt{\frac{g * L}{2 * \pi} * \tanh\left(\frac{2 * \pi * d}{L}\right)}$$

$L$  : longueur d'onde ;  $T$  : période ;  $g$  : accélération pesanteur ;  $d$  : profondeur

Les données existantes sur les périodes sont très peu nombreuses et quasiment inexistantes pour les longueurs d'onde. Comme ces deux paramètres sont représentatifs du même phénomène, nous étudierons ici seulement la période de la houle.

Une analyse d'une partie de l'enregistrement du houlographe de Sète (2006 à 2014) montre que la période de la houle oscille entre 2 et 12.5 secondes avec une valeur moyenne de 4.6 secondes. Bien que la série analysée soit relativement courte, les valeurs de périodes sont représentatives des ordres de grandeur attendus. Des valeurs plus élevées existent certainement mais restent exceptionnelles.

D'après l'historique des tempêtes majeures sur le site d'étude (cf. [Tableau 5 : Paramètres physiques associés aux évènements extrêmes](#)), les périodes pics observées pendant les tempêtes sont de 7.6 à 10.4 secondes avec une valeur moyenne de 9.2 secondes. La période de la houle est plutôt « longue » pendant les tempêtes historiques mais reste plus faible que le maximum relevé dans l'enregistrement partiel. Les pics de hauteur significative et de période ne sont donc pas forcément concomitants.

## 3.2.4 Conséquences des tempêtes historiques

Les tempêtes qui ont frappées le secteur d'étude ont eues pour principales conséquences :

- des submersions marines localisées, soit près du trait de côte soit en bordure des étangs
- des dégâts sur les ouvrages littoraux (ruptures ou franchissement de cordons dunaires principalement)

La figure suivante illustre l'impact d'une tempête sur le littoral de Frontignan.

Figure 13 : Tempête du 27 novembre 2014 - plage des Aresquiers à Frontignan



Source : Inconnu

Une analyse des relevés de PHE (Plus Hautes Eaux) effectués par la DDTM a été faite pour essayer d'identifier les inondations d'origine marine (seules les PHE inférieures à 2 m NGF environ sont retenues ; 3 m NGF environ au niveau du trait de côte pour la mesure d'éventuels jets de rive). Trois dates ressortent de cette analyse : 1963, 1979 et 1982.

Les PHE correspondant à l'année 1963 sont très peu nombreuses. Seules deux valeurs (1.74mNGF et 1.78mNGF) sont relevées sur la commune de Balaruc le Vieux. Il n'est pas identifié de tempête en 1963 dans l'historique des tempêtes relevés (cf. Tableau 5 : Paramètres physiques associés aux événements extrêmes), l'origine marine de ces PHE est donc à confirmer.

Les PHE correspondant à l'année 1979 sont un peu plus nombreuses. Elles sont situées à la fois sur les communes de Balaruc le Vieux (6 valeurs : 1.37mNGF à 1.55mNGF) et de Mèze (3 valeurs : 1.3mNGF à 2.3mNGF). Il n'est pas non plus identifié de tempête en 1979 dans l'historique des tempêtes relevés, l'origine marine de ces PHE est donc à confirmer. La PHE 2.3mNGF à Mèze laisse à penser qu'il s'agit potentiellement d'une inondation du Pallas, cette cote à cet endroit paraissant peu probable pour une submersion marine.

Enfin, les mesures de PHE correspondant à l'année 1982 sont très fournies (29 valeurs) et réparties sur une grande partie du territoire d'étude. Les bornes (en m NGF) des PHE par commune sont les suivantes :

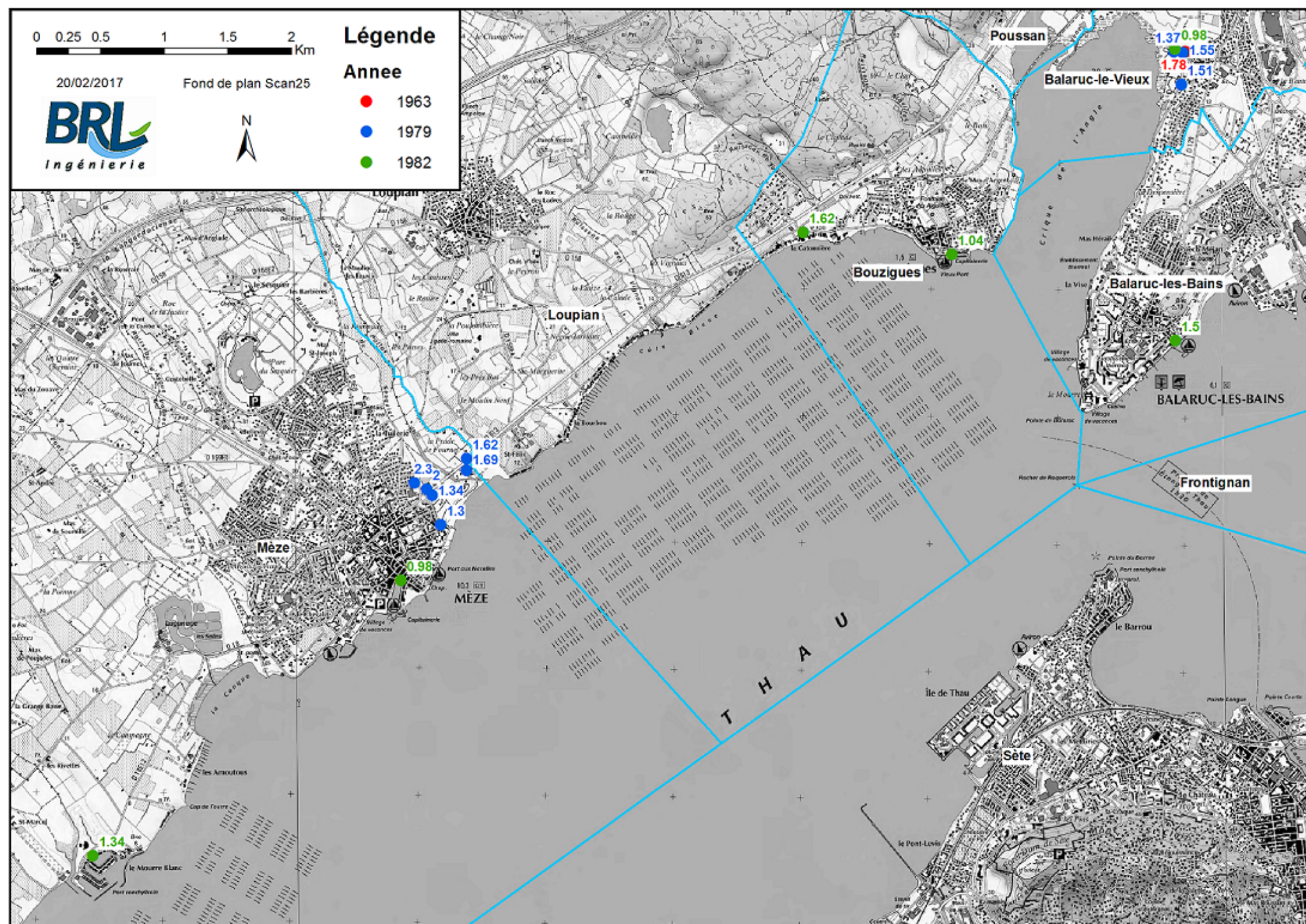
- Mèze : 0.98 – 1.32
- Bouzigues : 1.04 – 1.62
- Balaruc les Bains : 1.5
- Balaruc le Vieux : 0.98
- Frontignan : 0.96 – 3.05
- Vic la Gardiole : 1.39 – 1.91
- Mireval : 1.87 – 2.01

Les PHE de l'année 1982 sont datées pour la plupart précisément au 07/11/1982. Cette date est exactement identifiée dans l'historique des tempêtes, il y a donc peu de doute que ces PHE sont d'origine marine. Les PHE sont très hétérogènes, les valeurs variant d'environ 1 à 3 m NGF. On peut imaginer que les PHE d'une altitude de 3 m NGF sont des mesures de jet de rive et ne sont pas représentatives d'un niveau marin moyen. Certains points très proches les uns des autres possèdent des valeurs différentes et il ne se dégage pas de « tendance géographique » entre les différents points par rapport à leur localisation.

Les valeurs des PHE sont illustrées sur les cartes pages suivantes.



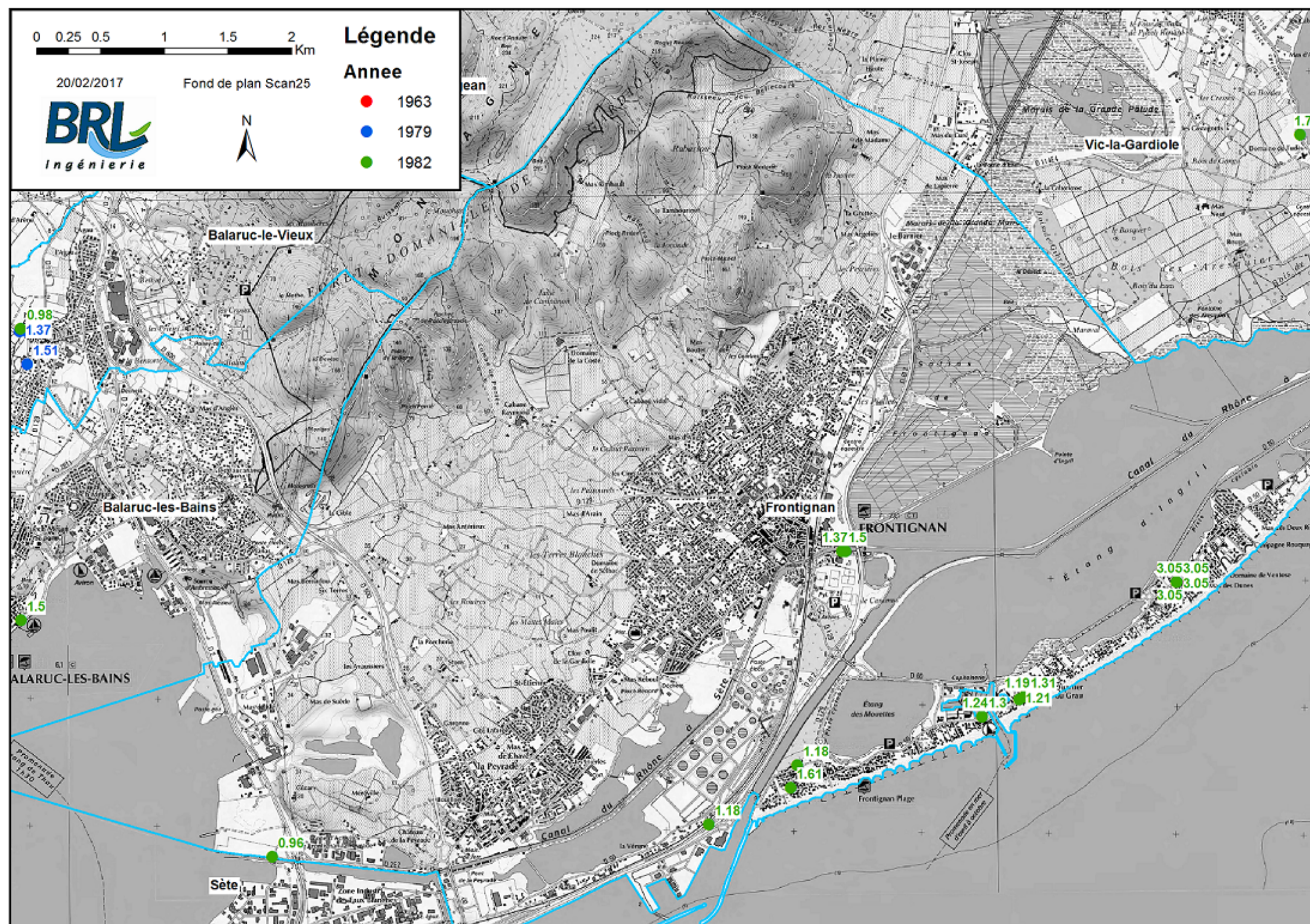
Figure 14 : PHE - Ouest



Source : DDTM, BRLi 2017



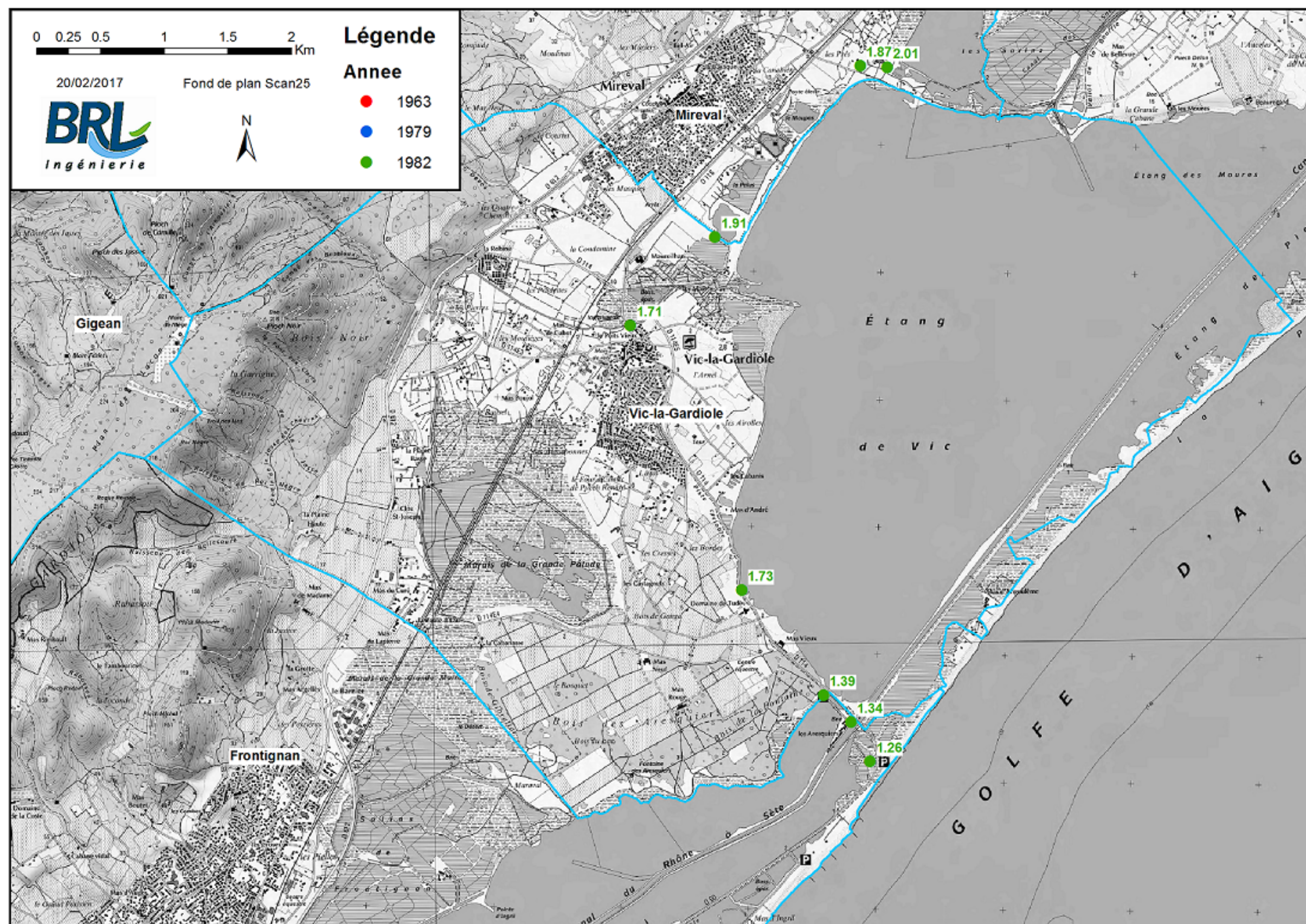
Figure 15 : PHE - centre



Source : DDTM, BRLI 2017



Figure 16 : PHE - Est



Source : DDTM, BRLi 2017



### 3.3 SYNTHÈSE DES ÉTUDES ET MÉTHODES EMPLOYÉES POUR LA CARACTÉRISATION DES ALÉAS

Plusieurs études de définition des aléas ont été réalisées sur le secteur d'étude. Celles-ci sont décrites en terme de méthodologie dans les paragraphes suivants.

#### 3.3.1 PPRI

Les études de Plan de Prévention des Risques Inondation fixent la cote de référence pour l'aléa submersion marine à 2 m NGF excepté dans les zones soumises au risque de déferlement où cette cote est portée à 3 m NGF.

La cote de référence est définie comme le maximum entre :

- un événement dont la période de retour théorique est de cent ans (cas du bassin de Thau)
- l'événement historique le plus fort relevé sur la zone d'étude

Les hauteurs d'eau sont calculées directement par projection de cette cote de référence sur la topographie. L'aléa est séparé en deux classes :

- Aléa modéré si la hauteur d'eau est inférieure à 50 cm
- Aléa fort si la hauteur d'eau est supérieure à 50 cm ou si le secteur est soumis au risque de déferlement.

Les aléas du PPRI sur le secteur d'étude sont présentés en Annexe 2 (une partie des aléas sur le Nord des étang notamment est d'origine « fluvial et ruissellement »).

#### 3.3.2 TRI

Les Territoires à Risque Important d'inondation présentent trois types d'événements :

- Événement « fréquent » : période de retour 10 ans, cote de référence 1.40 m NGF à 1.46 m NGF, données de la tempête de décembre 2003 utilisées principalement
- Événement « moyen » : période de retour 100 ans, cote de référence 2 m NGF, pas de données d'événement historique assez documenté pour être utilisées
- Événement « extrême » : période de retour 1000 ans, cote de référence 2.80 m NGF, pas de données d'événement historique assez documenté pour être utilisées. La décomposition du niveau d'eau est la suivante :
  - Marée : PMHA 0.47 m NGF
  - Surcote météorologique (vent et pression atmosphérique) : + 1.06m pour la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 70% de la surcote milléniale
  - Surcote liée à la houle : + 1.21m pour l'application de la formule de Stockdon avec une houle milléniale
  - Le total de 2.74 m NGF est arrondi à 2.80 m NGF

Les méthodologies employées pour cartographier chaque événement sont les suivantes :

- Événement « fréquent » : les hauteurs d'eau « de base » sont calculées par projection du niveau sur la topographie Litto 3D. Ces hauteurs d'eau sont modifiées « à dire d'expert » en fonction des données historiques (études existantes) et de l'impact des vagues sur le trait de côte.



- Evènement « moyen » : les hauteurs d'eau sont calculées par projection du niveau sur la topographie Litto 3D.
- Evènement « extrême » : les hauteurs d'eau sont calculées par projection du niveau sur la topographie Litto 3D.

Les résultats de l'évènement moyen sur le secteur d'étude sont présentés en Annexe 3.

### 3.3.3 Atlas BRGM

Les données topographiques utilisées proviennent de données LIDAR (2009) ainsi que de profils topographiques (1989 – 2001). L'aléa est calculé pour trois périodes de retour : 1 ans, 10 ans et 50 ans. Les valeurs de houle et de niveau d'eau associées sont récapitulées dans le tableau suivant.

Tableau 13 : Houle et Niveau d'eau atlas BRGM

Période de retour (années)	1	10	50
Hauteur significative (m)	4.63	6.09	6.93
Période pic (s)	9.8	10.2	11
Longueur d'onde (m)	149.9	162.4	188.9
Niveau horaire (cm NGF)	67	88	102

Source : BRGM

Les niveaux d'eau sont projetés sur les données topographiques dès lors qu'il y a une connexion entre la mer et la terre. De plus, un calcul de surcote lié à la houle et de jet de rive est effectué. Le niveau d'eau atteint est également projeté sur la topographie jusqu'au premier obstacle topographique susceptible de bloquer significativement l'écoulement.

Les résultats de l'aléa de période de retour 50 ans sur le secteur d'étude sont présentés en Annexe 4.

### 3.3.4 Etude EGIS pour le SYBLE sur les étangs avec crue/tempête

Cette étude a pour objectif d'analyser le fonctionnement des étangs autour de Palavas (depuis l'étang de l'Or à l'Est à l'étang d'Ingril côté Est) ainsi que de définir des solutions d'aménagements pour réduire la vulnérabilité du secteur avec comme outil un modèle numérique.

Nous nous intéresserons uniquement aux étangs « en commun » avec la présente étude : étang d'Ingril et à titre informatif étang de Vic ainsi que l'étang des Pierres Blanches. Pour plus d'information, se référer à l'étude complète référencée dans la bibliographie.

Les scénarii étudiés sont définis à la fois par un débit des bassins versants et une onde de tempête. En ce sens, elle diffère des études précédentes avec l'intégration des apports des bassins versants. Les niveaux d'eau et débits de pointe utilisés pour les modélisation en fonction de la période de retour de l'évènement sont les suivants.

Tableau 14 : Période de retour crue / tempête

Période de retour de l'évènement (années)			2	5	10	50	100
Niveau marin (m NGF)			0.8	0.9	1	1.3	1.5
Débits de pointe (m3/s)	Vallat Bouffie salins	Vic	1.2	1.8	2.7	6	7
	Villeneuve combe	Vic	9.8	20	30	73	80
	Escure	Vic	2.7	8	12	29	33
	Canabiere	Vic	0.8	2.5	3.7	9	15/10
	Font Sorbière	Vic	2.7	5.8	8.6	20	36/23
	Corene	Vic	2.4	5	8	18	29/20
	Deves	Vic	2.8	9	13	31	29/35
	Robine de Vic	Vic	4	7	11	28	11/30
	Belle Aure Nord Est	Ingril	4.3	13	20	48	54
	Frontignan	Ingril	2.9	9	13	33	36
	Rabasse	Ingril	2.8	7	11	23	29/26
	(Cours d'eau)	(Etang)					

Source : SYBLE EGIS 2012

A noter que les niveaux marins sont définis pour être utilisés comme condition au limite des modèles. Les contributions prises en compte pour définir ces niveaux ne sont pas clairement explicitées mais il semble y avoir au moins une prise en compte (partielle ?) d'une surcote liée à la houle sur la bordure littorale.

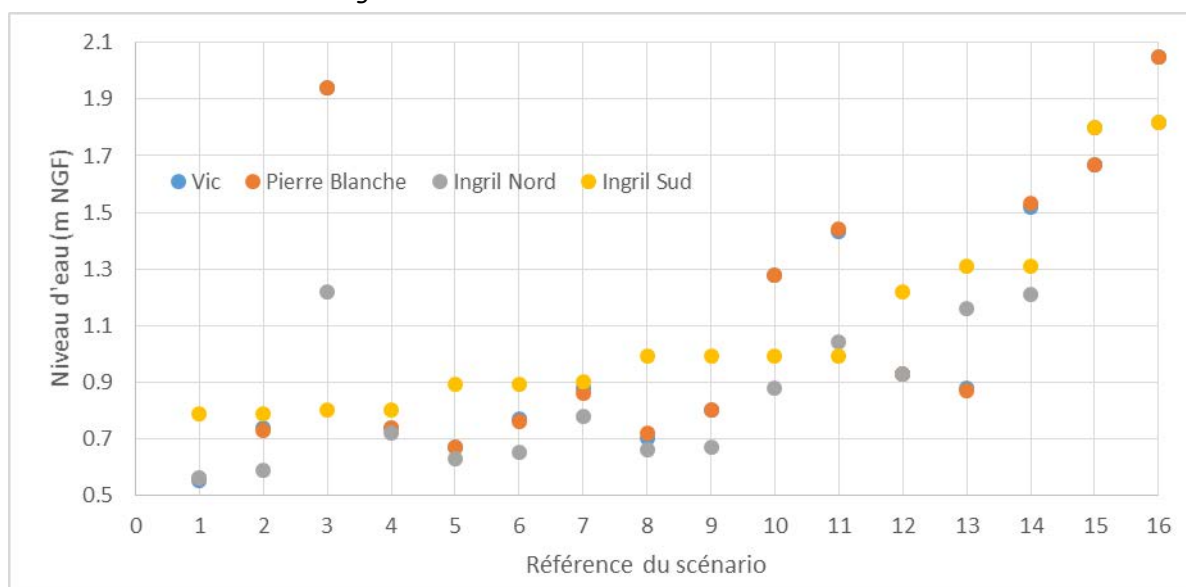
Les niveaux d'eau maximum modélisés dans les étangs pour différents scénarii sont présentés dans le tableau suivant et la figure suivante.

Tableau 15 : Niveau d'eau en fonction des scénarii

Référence scénario	Période de retour niveau d'eau marin (années)	Période de retour apports bassin versant (années)	Niveau d'eau maximum dans les étangs (m NGF)			
			Vic	Pierre Blanche	Ingril Nord	Ingril Sud
1	2	2	0.55	0.56	0.56	0.79
2	2	10	0.74	0.73	0.59	0.79
3	2	exceptionnel	1.94	1.94	1.22	0.8
4	2	2	0.74	0.74	0.72	0.8
5	5	5	0.67	0.67	0.63	0.89
6	5	10	0.77	0.76	0.65	0.89
7	5	5	0.88	0.86	0.78	0.9
8	10	5	0.7	0.72	0.66	0.99
9	10	10	0.8	0.8	0.67	0.99
10	10	50	1.28	1.28	0.88	0.99
11	10	100	1.43	1.44	1.04	0.99
12	50	10	0.93	0.93	0.93	1.22
13	100	2	0.88	0.87	1.16	1.31
14	100	100	1.52	1.53	1.21	1.31
15	exceptionnel	100	1.67	1.67	1.8	1.8
16	exceptionnel	exceptionnel	2.05	2.05	1.82	1.82

Source : SYBLE EGIS 2012

Figure 17 : Niveau d'eau en fonction des scénarii



Source : SYBLE EGIS 2012

L'évènement exceptionnel pour les apports des bassins versants est défini par un débit de 1,8 fois le débit centennal. L'évènement exceptionnel lié au niveau marin n'est pas clairement défini.

Quel que soit le scénario, les étangs du Vic et de la Pierre Blanche se comportent de la même manière. En fonction des scénarii, les différences de niveaux entre les étangs sont de 20 à 40 cm à l'exception du scénario 3 avec un écart de plus d'un mètre.

Si l'on s'intéresse uniquement à la submersion marine hors crues, le scénario 13 est le plus représentatif avec un niveau marin de période de retour 100 ans et une crue de période de retour 2 ans quasiment négligeable. Pour ce scénario, on observe des valeurs avec des différences notables entre les étangs :

- Vic : 0.88mNGF
- Pierre Blanche : 0.87mNGF
- Ingril Nord : 1.16mNGF
- Ingril Sud : 1.31mNGF

### 3.3.5 Comparatif

Comme expliqué précédemment, les contributions des niveaux d'eau pour l'étude SYBLE/EGIS n'étant pas clairement définies, cette étude est écartée de la comparaison. Les valeurs de niveaux d'eau des trois autres études sont récapitulées dans le tableau suivant.



Tableau 16 : Récapitulatif des scénarii par étude

Etude	Période de retour (années)	Niveau d'eau (m NGF)		
		Marée + Météo	+ Surcote houle	+ Jet de rive
PPRI	100		2	3
TRI	10		1.46	
	100		2	
	1000		2.8	
BRGM	1	0.67	1.18 *	2.05 *
	10	0.88	1.49 *	2.53 *
	50	1.02	1.72 *	2.92 *

\* Surcote houle et Jet de rive calculés par BRLi avec les formules de Stockdon pour une pente de plage à 1 : 20

les calculs BRGM sont variables en espace et les résultats détaillés ne sont pas fournis

Source : BRGM, PPRI, TRI

Les niveaux d'eau de la surcote liée à la houle et du jet de rive de l'étude du BRGM sont recalculés à titre informatif à partir de la méthodologie décrite et sur base d'une hypothèse sur la pente de la plage à 1 : 20. Ce calcul est estimatif, dans le but de permettre une comparaison avec les autres études. Les résultats exacts du BRGM ne sont pas fournis et sont variables en espace.

Quand les périodes de retour et les composantes du niveau d'eau sont identiques, les différentes études présentent des résultats très proches voir identiques :

- Période de retour 100 ans niveau d'eau marée + météo + surcote liée à la houle :
  - PPRI : 2mNGF
  - TRI : 2mNGF
- Période de retour 10 ans niveau d'eau marée + météo + surcote liée à la houle :
  - TRI : 1.46mNGF
  - BRGM : 1.49mNGF

Une analyse plus précise des emprises des zones inondées et une comparaison avec les aléas calculés pour la présente étude seront réalisées lors de la phase I 3.

### 3.4 DONNEES SUR LES DEGATS

Les cartes pages suivantes illustrent le nombre d'arrêté CATNAT sur le territoire d'étude ainsi que la population en zone inondable.

Figure 18 : Arrêtés CATNAT

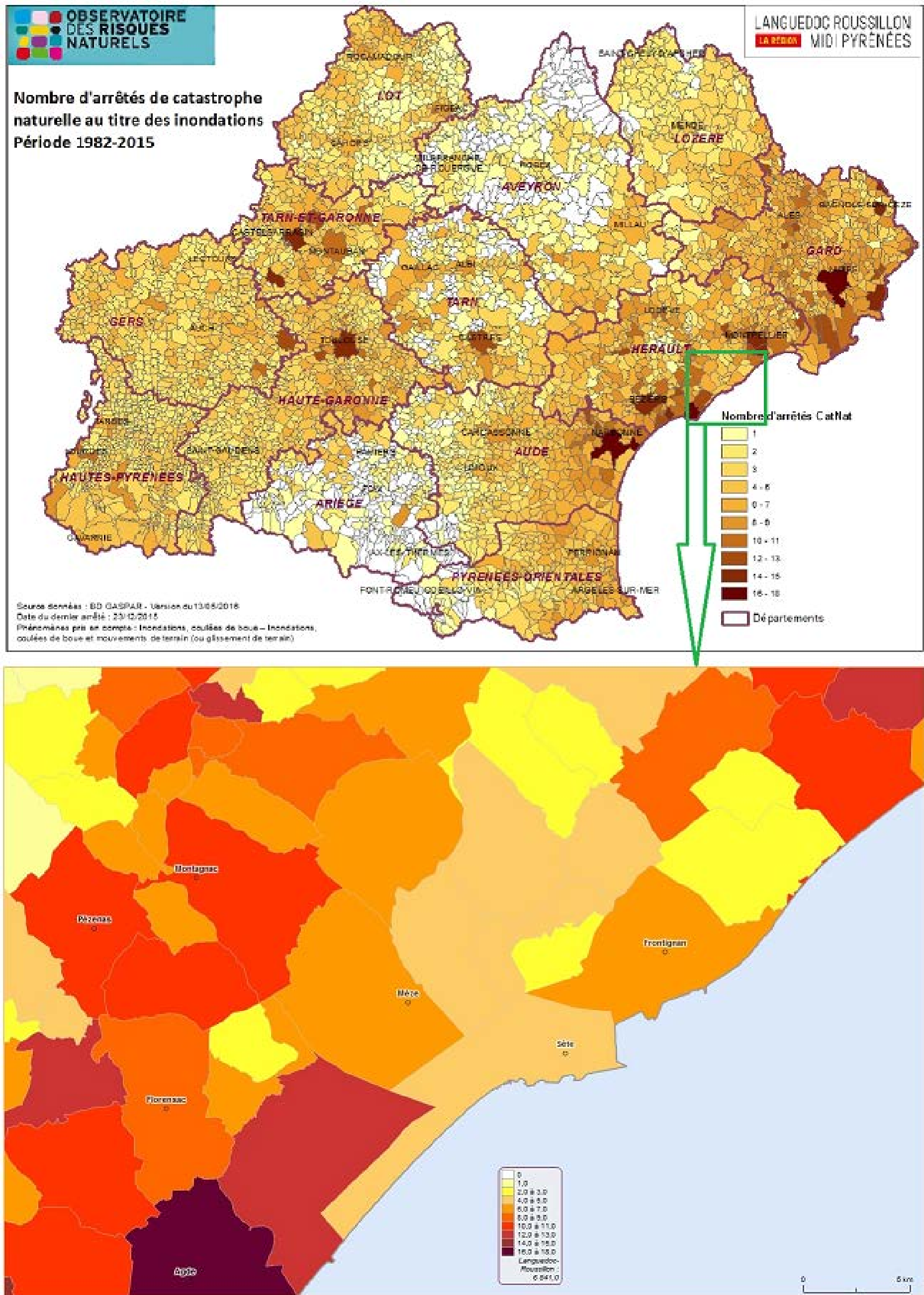
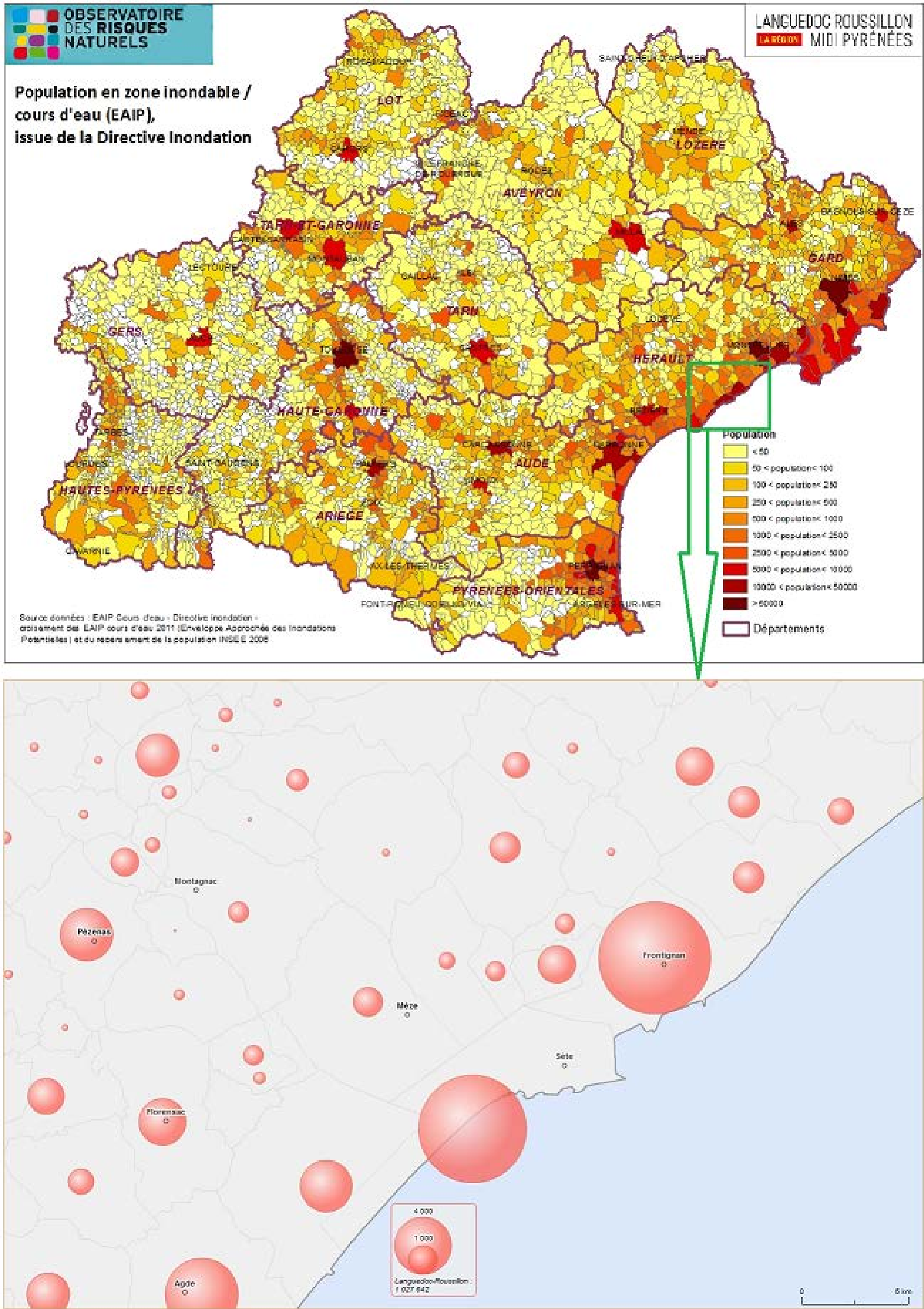


Figure 19 : Population en zone inondable





A l'échelle régionale, le nombre d'arrêtés CATNAT est plus important à l'Ouest de la région et sur la frange littorale méditerranéenne. On note également une forte concentration au niveau des grandes villes.

A l'échelle du territoire d'étude, la commune présentant le plus grand nombre d'arrêtés est Marseillan mais il n'y a pas de tendance géographique spécifique.

A l'échelle régionale, la population en zone inondable est plus importante sur la frange littorale méditerranéenne. On note également une forte concentration au niveau des grandes villes.

A l'échelle du territoire d'étude, les communes présentant la population en zone inondable la plus importante sont Sète et Frontignan. Dans l'ensemble, le littoral comporte plus de population en zone inondable comparé à l'arrière-pays.

On peut noter qu'il n'y a pas de lien flagrant entre le nombre d'arrêté CATNAT et la population en zone inondable.

## 4. Stratégie de modélisation

### 4.1 FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DU SITE

Au vu de ce diagnostic, nous faisons la différence entre deux zones aux comportements distincts : le pourtour des étangs et la frange littorale pour caractériser le fonctionnement hydraulique du site.

Sur le pourtour des étangs, les vagues ont un impact très limité. Ce secteur est sensible au niveau d'eau par rapport aux submersions marines. Les secteurs menacés le sont directement de par leur faible altimétrie.

Sur la frange littorale, la sensibilité au niveau d'eau est identique mais l'impact des vagues est beaucoup plus important. Le trait de côte est en grande partie sableux, soumis à l'érosion lors des épisodes de tempêtes. De plus, les vagues génèrent des submersions par jet de rive et peuvent potentiellement entraîner des brèches au niveau des cordons littoraux entraînant des submersions marines des zones arrières.

**Le secteur d'étude a subi des tempêtes historiques, les plus marquantes « dans la mémoire collective » étant 1982 et 1997.** Ces tempêtes sont caractérisées par des houles extrêmes avec toutefois des niveaux d'eaux qui n'étaient pas exceptionnels. Elles ont eu des conséquences sur le trait de côte, les ouvrages mais les submersions marines sont restées assez limitées et localisées (en comparaison avec la tempête Xynthia sur le littoral Atlantique par exemple).

### 4.2 CONSTRUCTION DES MODELES

#### 4.2.1 Stratégie

Au vu du fonctionnement hydraulique de la zone d'étude, deux zones sont à distinguer :

- La partie maritime, du large jusqu'au trait de côte où les phénomènes physiques prédominants pour la submersion marine sont la houle et le niveau d'eau.  
Nous construirons un modèle dit « **modèle maritime** » sur ce secteur.
- La partie terrestre, du trait de côte jusqu'aux altimétries élevées en incluant les étangs, graus, canaux, chenaux, etc... Sur cette aire d'étude, le niveau d'eau est la principale contribution au phénomène de submersion marine.  
Nous construirons un modèle dit « **modèle terrestre** » sur ce secteur.

A l'interface entre ces deux domaines, au niveau du trait de côte, il conviendra de :

- Traiter l'évolution du niveau d'eau lié à la transformation de la houle : remontée de l'eau le long de l'estran quand la topographie est en pente douce (essentiellement les plages)
- Traiter des franchissements par paquets de mer ou jets de rive
- Intégrer les possibilités de rupture d'ouvrage ou de cordons dunaire en lien avec les tempêtes.

Nous utiliserons un module spécifique développé par BRLi : le « **module ouvrage** »

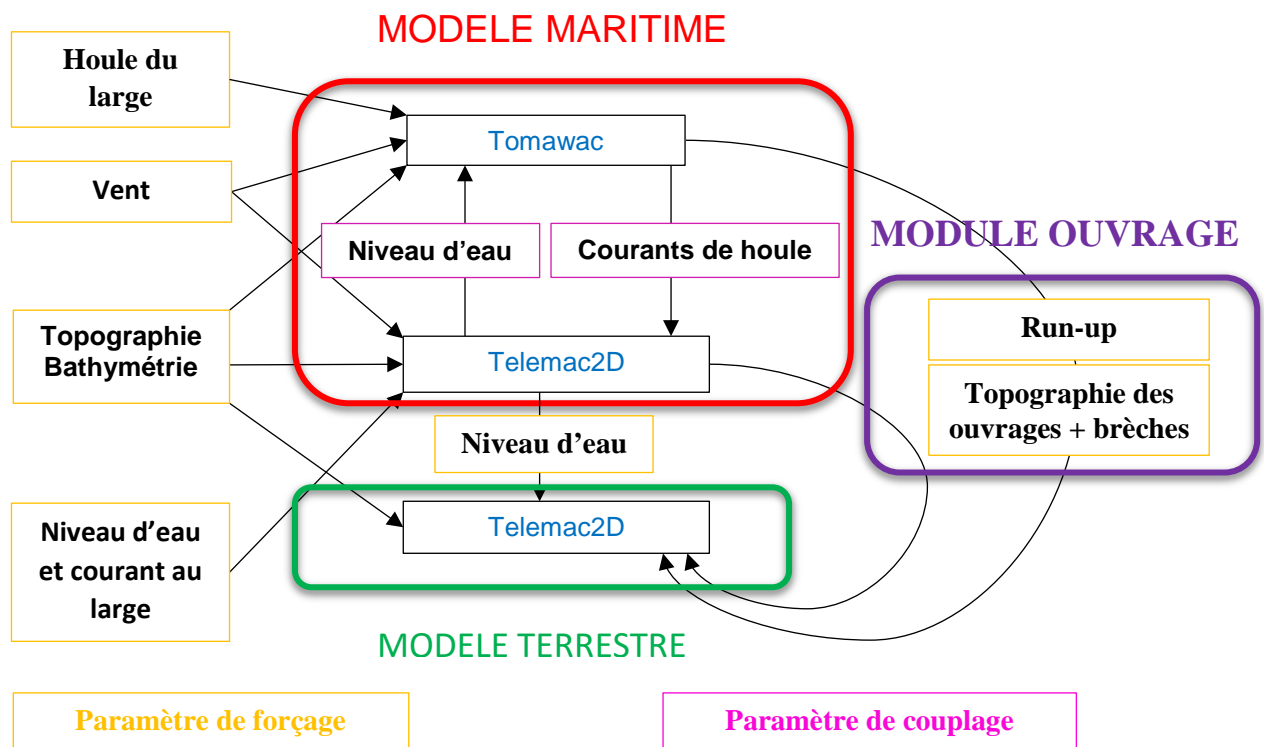
Les hypothèses proposées pour la construction et la mise en œuvre de chacun de ces modèles, maritime et terrestre, sont les suivantes :

- Modèle Maritime :
  - Maillage « lâche » au large et « fine » à la côte
  - Houle « au large » issue d'un modèle de plus grande emprise

- Niveau d'eau « au large » issu d'un modèle de plus grande emprise
- Propagation de la houle et du niveau d'eau jusqu'à la côte
- Couplage entre un modèle de propagation des houles (TOMAWAC) et un modèle courantologique (TELEMAC 2D donnant le niveau d'eau) pour prendre en compte l'augmentation du niveau marin lié au déferlement
- Prise en compte du vent et de ses conséquences sur le niveau marin
- Prise en compte indirecte de la pression atmosphérique (qui est déjà intégrée dans le niveau d'eau « au large », les variations de pression étant négligeables à l'échelle de la zone d'extension du modèle)
- Modèle Terrestre :
  - Maillage fin en lien avec la précision des données topographiques « fines »
  - Niveau d'eau issu du modèle maritime
  - Franchissements, jet de rive et brèches issues du module ouvrage
- Module Ouvrage :
  - Topographie « fine »
  - Houle issue du modèle maritime
  - Niveau d'eau issu du modèle maritime

Les figures suivantes illustrent l'articulation entre ces divers modèles.

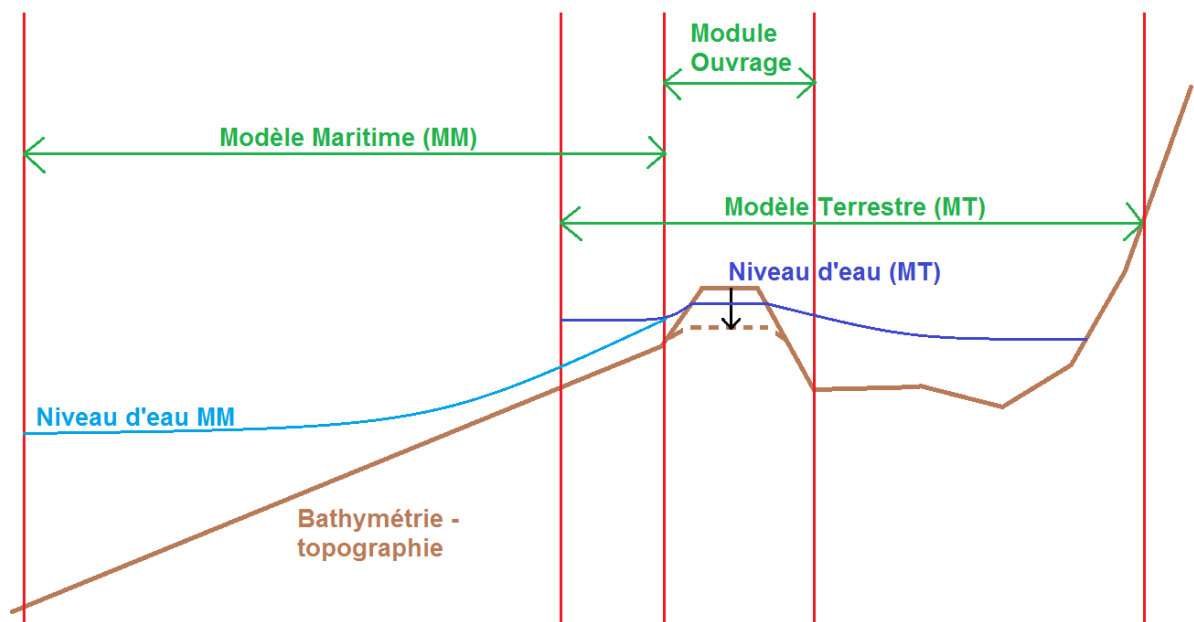
Figure 20 : Stratégie de modélisation - Articulation entre les divers modèles



Source : BRLi 2017



Figure 21 : Stratégie de modélisation (échelle non réaliste)



Source : BRLi 2017

## 4.2.2 Logiciels utilisés

### 4.2.2.1 Suite logiciel TELEMAC

Nous allons utiliser la suite logiciel TELEMAC pour réaliser les modèles : Telemac2D couplé à Tomawac pour le modèle maritime, Telemac2D pour le modèle terrestre. Le module ouvrage sera réalisé avec un code interne à BRLi.

Le système de modélisation en éléments finis TELEMAC, a été développé initialement par le Laboratoire National d'Hydraulique d'EDF et actuellement par un consortium qui comprend les entités suivantes : EDF, CEREMA, BAW, laboratoire de Daresbury, HR Wallingford et Artelia.

TELEMAC regroupe un ensemble de logiciels dédiés aux problèmes de mécanique des fluides de l'environnement : courantologie bi et tridimensionnelle, houle, sédimentologie, qualité d'eau.

Les principaux avantages que présente le système TELEMAC au regard de la présente étude sont les suivants :

- Le terrain est représenté par un assemblage d'éléments triangulaires de tailles et de formes variables formant le maillage de calcul. Cette technique « éléments finis » procure trois avantages essentiels :
  - le maillage épouse avec fidélité les géométries complexes que l'on rencontre sur le secteur d'étude : les épis et les chenaux notamment sont représentés avec précision,
  - elle autorise de densifier le maillage,
  - elle permet donc d'affiner les résultats fournis par le modèle dans les zones d'intérêt.
- L'outil de génération de maillage intégré au système TELEMAC adapte la densité du maillage à différents critères comme la profondeur ou la pente des fonds. Il réalise un compromis entre les besoins en précision dans les régions où l'hydraulique est complexe (estrans, berges d'un chenal, etc.) et le nombre total de points. Cette caractéristique est essentielle pour maintenir au modèle son caractère opérationnel en termes de précision et de temps de réponse.

- Tous les modules du système sont fondés sur la méthode des éléments finis. Ils partagent la même architecture, les mêmes structures de données et la même chaîne de traitement. Ils présentent donc une grande compatibilité et le transfert de données d'un code à l'autre est facile.

#### 4.2.2.2 TELEMAC-2D

Le logiciel TELEMAC-2D résout les équations de Barré de Saint-Venant à deux dimensions d'espace horizontal. Ses résultats principaux sont, en chaque point du maillage de résolution, la hauteur d'eau et la vitesse moyenne sur la verticale.

TELEMAC-2D trouve ses applications en hydraulique à surface libre, maritime ou fluviale et est capable de prendre en compte les phénomènes physiques suivants :

- Propagation des ondes longues avec prise en compte des effets non linéaires,
- Frottement sur le fond,
- Influence de la force de Coriolis,
- Influence de phénomènes météorologiques : pression atmosphérique et vent,
- Turbulence,
- Ecoulements torrentiels et fluviaux,
- Influence de gradients horizontaux de température ou de salinité sur la densité,
- Coordonnées cartésiennes ou sphériques pour les grands domaines,
- Zones sèches dans le domaine de calcul : bancs découvrant et plaines inondables,
- Entraînement par le courant et diffusion d'un traceur, avec des termes de création ou de disparition,
- Suivi de flotteurs et dérives lagrangiennes,
- Traitement de singularités : seuils, digues, buses,
- Prise en compte des forces de traînée des structures verticales,
- Prise en compte des courants de houle : par couplage avec le module TOMAWAC.

#### 4.2.2.3 TOMAWAC

Le logiciel TOMAWAC est l'acronyme de « TELEMAC-based Operational Model Addressing Wave Action Computation ». C'est un logiciel qui modélise l'évolution en espace et en temps du spectre directionnel de variance de la surface de la mer. L'interaction avec les processus suivants est prise en compte :

- Interaction houle – bathymétrie : prise en compte de la réfraction, diffraction propagation, rapprochement des vagues (shoaling), frottement sur le fond et déferlement bathymétrique,
- Interaction houle – atmosphère : prise en compte de la génération et de la propagation de la houle par le vent ainsi que du moutonnement,
- Interaction houle – courant : modification de la propagation et de la réfraction de la houle due aux courants.

### 4.2.3 Emprises

L'**emprise du modèle terrestre** est définie de manière à couvrir la zone d'étude. Les limites seront définies de la façon suivante :

- Limite « en terre » à la cote 3mNGF (cote « hors submersion maximale »)

- Limite à l'Est sur des secteurs d'altimétrie supérieure à 3mNGF ou sur « une ligne de structure » : route entre l'étang d'Ingril et l'étang de Vic
- Limite à l'Ouest sur des secteurs d'altimétrie supérieur à 3mNGF ou sur « une ligne de structure » : route près du lieu-dit « Sept Fonts » et écluse sur le canal du midi
- Limite « en mer » à quelques centaines de mètre du trait de côte de manière à avoir « un certain volume d'eau » pour la modélisation des entrées d'eau (position à affiner, à titre indicatif sur la carte)
- Les zones de grande taille et d'altimétrie supérieure à 3mNGF au sein du modèle ne sont pas modélisées (ex : Mont Saint Clair)

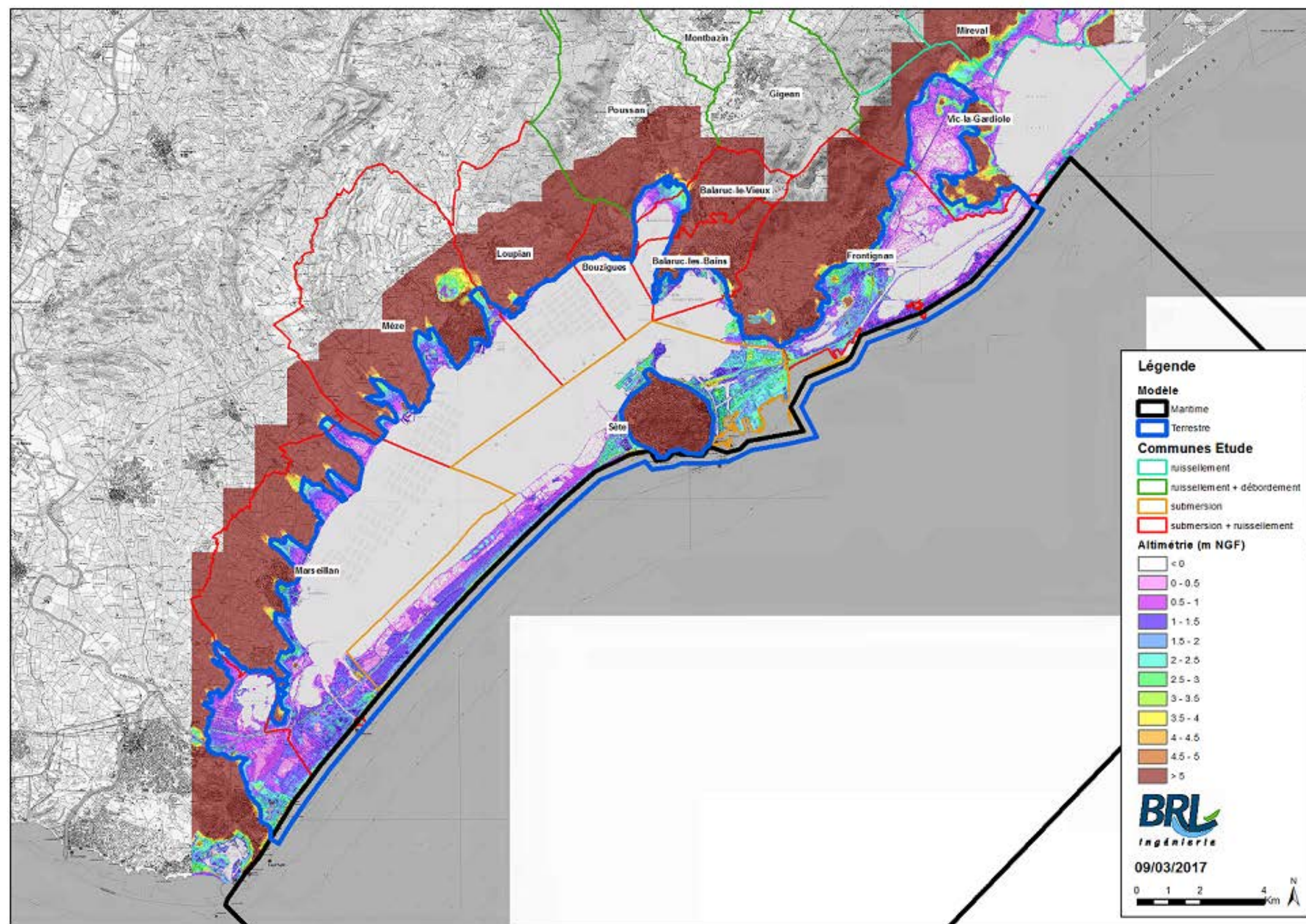
L'**emprise du modèle maritime** est définie de manière à alimenter le modèle terrestre, à éviter d'éventuels effets de bord et en étant compatible avec les conditions de forçage. Pour cela :

- La limite « à terre » est fixée au niveau du trait de côte (position à affiner, à titre indicatif sur la carte)
- La limite « au large » est fixée aux alentours de l'isobathe -70mCM et dans la zone couverte par le modèle dit « MARS3D » (cf. [4.3 Conditions aux limites](#))
- Limite à l'Ouest (Agde) et à l'Est (Mas d'Angoulême) à quelques kilomètres du modèle terrestre

Ces deux emprises sont illustrées sur les cartes pages suivantes. L'altimétrie et la bathymétrie sont données à titre informatif, les données réellement utilisées pour les modèles sont précisées au paragraphe [4.2.4 Données topographiques et bathymétriques](#).



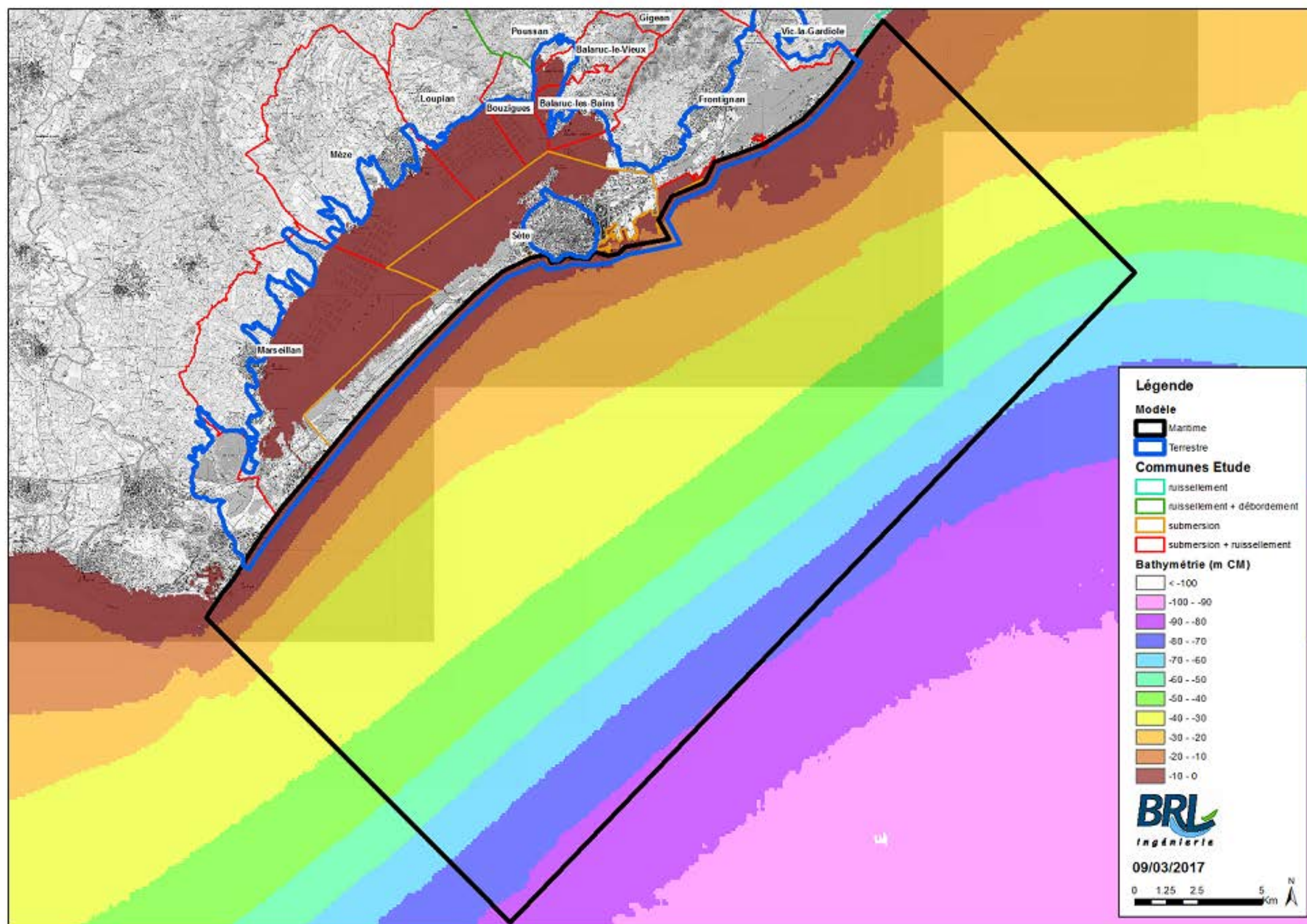
Figure 22 : Emprise modèle terrestre



Source : BRLi 2017



Figure 23 : Emprise modèle maritime



Source : BRLi 2017

#### 4.2.4 Données topographiques et bathymétriques

Les données topographiques et bathymétriques présentées au paragraphe 2.1 Données topographiques/bathymétriques seront utilisées comme données de base pour la construction du modèle. Un assemblage sera réalisé pour utiliser la donnée disponible la plus fine et la plus appropriée pour chaque secteur. Le résultat sera très semblable à la représentation des emprises sur la Figure 1 : Emprise des données topographiques / bathymétriques : chaque emprise visible représente la donnée utilisée.

Pour rappel, les données bathymétriques sont très complètes, avec des précisions planimétriques variables allant de 50cm à 150m. Les données topographiques, lidar uniquement d'une précision planimétrique d'un mètre, sont relativement complètes mais les premiers tests de modélisation permettront peut-être d'identifier des zones d'incertitude, sur les ouvrages de petite dimension notamment, qui nécessiteront des levés topographiques.

#### 4.2.5 Structuration du maillage

La définition des tailles de maille est une étape primordiale dans le processus de modélisation, notamment dans le but d'utiliser le modèle en prévision avec une contrainte de temps de calcul forte. Il s'agit donc ici de trouver un compromis entre bonne représentation des phénomènes physiques en jeu et temps de calcul raisonnable.

Les tailles de mailles envisagées pour le modèle maritime sont de l'ordre de :

- 500m « au large »
- 250m entre la côte et le large
- 100m près de la côte en dehors des zones d'intérêt
- Quelques dizaines de mètres à la côte sur les zones d'intérêt

La taille des mailles à la côte sur les zones d'intérêt pourra faire l'objet d'un test de sensibilité, notamment pour vérifier la bonne prise en compte de l'élévation du niveau moyen de la mer liée aux courants de houle.

Les tailles de mailles envisagées pour le modèle terrestre sont de l'ordre de :

- 100-200m sur les zones sans intérêt ou sans variation brusque d'altimétrie, par exemple l'étang de Thau sur sa partie « centrale » (hors rivage)
- 10-20m sur les zones d'intérêt de grande taille
- 2-5m sur les zones d'intérêt de petite taille

D'après notre expérience en la matière, ces valeurs de taille de maille doivent nous permettre de réaliser un modèle d'environ 1 million de nœuds pour une surface d'emprise d'environ 150 km<sup>2</sup>. Ce compromis taille de maille / précision nous paraît bien adapté aux phénomènes en jeu.

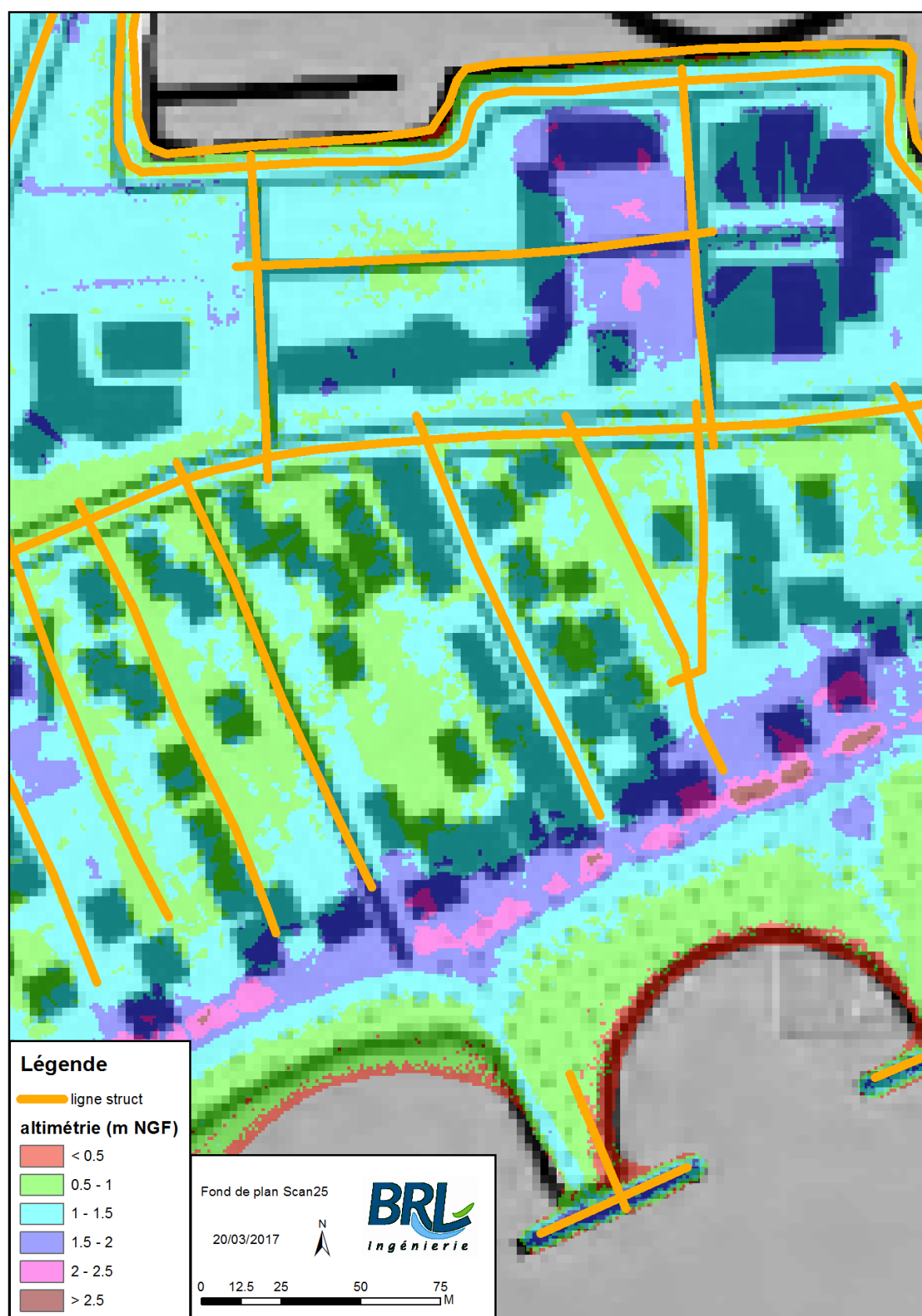
Le maillage sera également contraint par des lignes de structures sur lesquelles le maillage s'appuie. Ceci permet de bien représenter tous les accidents géographiques notables ainsi que de fixer dans le maillage des zones particulières.

Le maillage fera l'objet d'une discussion avec le SMBT pour optimiser le temps de calcul ou la précision des résultats sur des zones d'intérêt.

Par exemple sur la figure page suivante (Sud-ouest du port de Frontignan), les voies entre les bâtiments, les épis et les ruptures de pente (pied et crête) du bassin portuaire sont appuyés par des lignes de structure.



Figure 24 : Lignes de structure



Source : BRLi 2017

### 4.2.6 Module ouvrage

Deux types d'ouvrages sont à distinguer. Nous considérons d'une part les ouvrages (notés type A pour la suite) qui au cours d'un événement météo-océanique (tempête), peuvent voir évoluer leur topographie / bathymétrie (brèche par exemple) ou dont le volume d'eau créant des inondations par franchissement et/ou jet de rive est non négligeable. Il existe d'autre part (notés type B pour la suite) des ouvrages au sens plus patrimonial du terme.

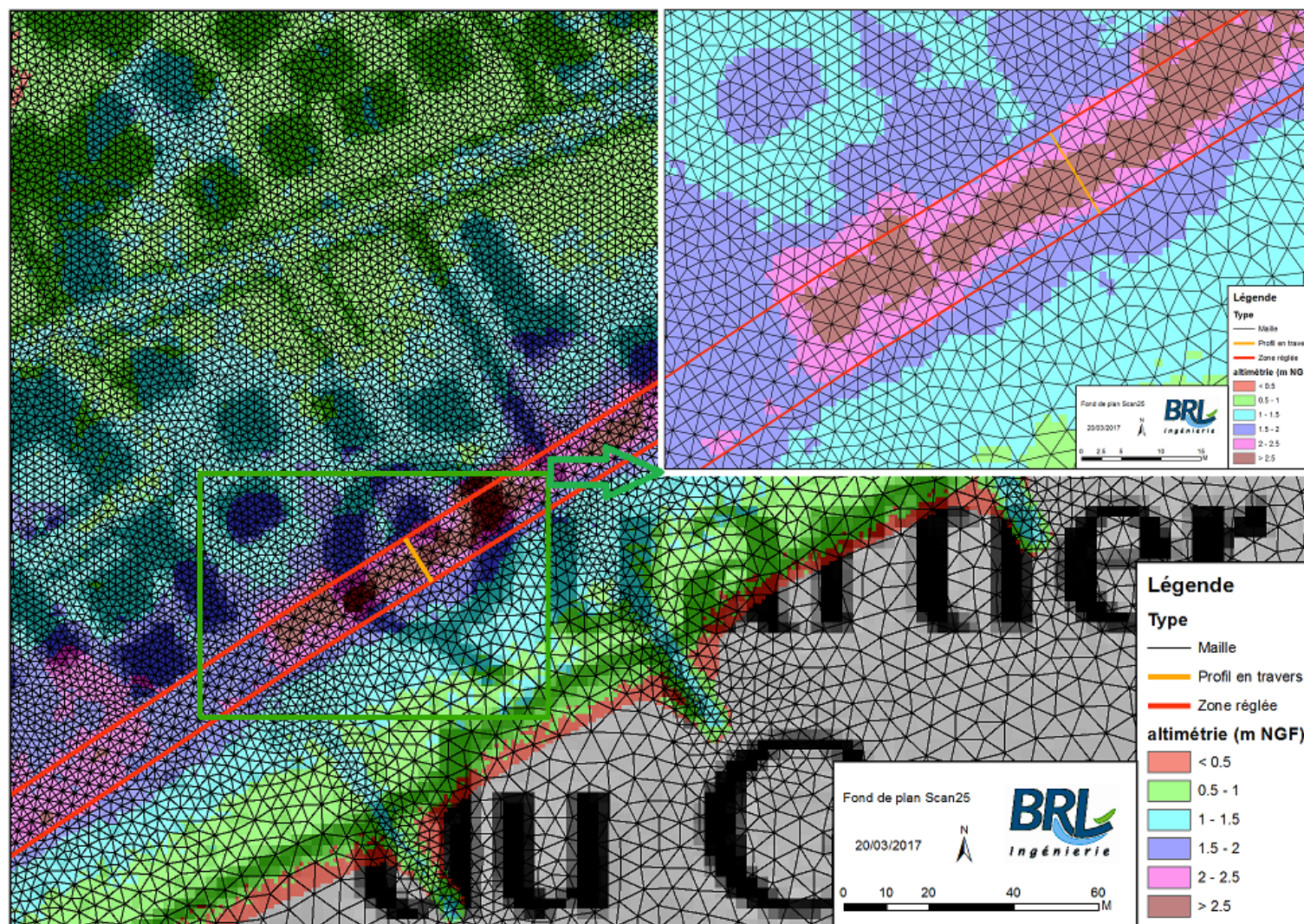
Seuls les ouvrages de type A seront intégrés au module ouvrage explicité dans le présent chapitre. L'ensemble des ouvrages de type B seront intégrées dans une base de donnée ouvrage qui sera détaillée en Phase I 2 du projet.

Le module ouvrage fera partie intégrante du maillage du modèle terrestre. Des profils en travers permettront de réaliser des calculs de franchissement, de jet de rive et définir les brèches potentielles. Les brèches potentielles dans les ouvrages seront déterminées à partir d'une matrice prenant en compte les paramètres suivants :

- altimétrie de l'ouvrage
- niveau d'eau
- houle
- durée de la sollicitation (niveau et houle).

La figure page suivante illustre un premier essai simpliste de maillage (triangles noirs) du module ouvrage sur le quartier du Grau à Frontignan. Toute la surface couverte par les ouvrages (entourée en rouge) est maillée avec un maillage dit « réglé ». Ceci permet de « fixer » des profils en travers (en orange) sur l'ensemble du linéaire des ouvrages.

Figure 25 : Exemple de maillage du « module ouvrage » au niveau de Frontignan



Source : BRLi 2017



### 4.3 CONDITIONS AUX LIMITES ET FORÇAGES

Les conditions aux limites et forçages utilisés pour les modèles proviendront essentiellement du programme MARC (Modélisation et Analyse pour la Recherche Côtière) proposé par l'IFREMER. Il s'agit de la suite du programme PREVIMER.

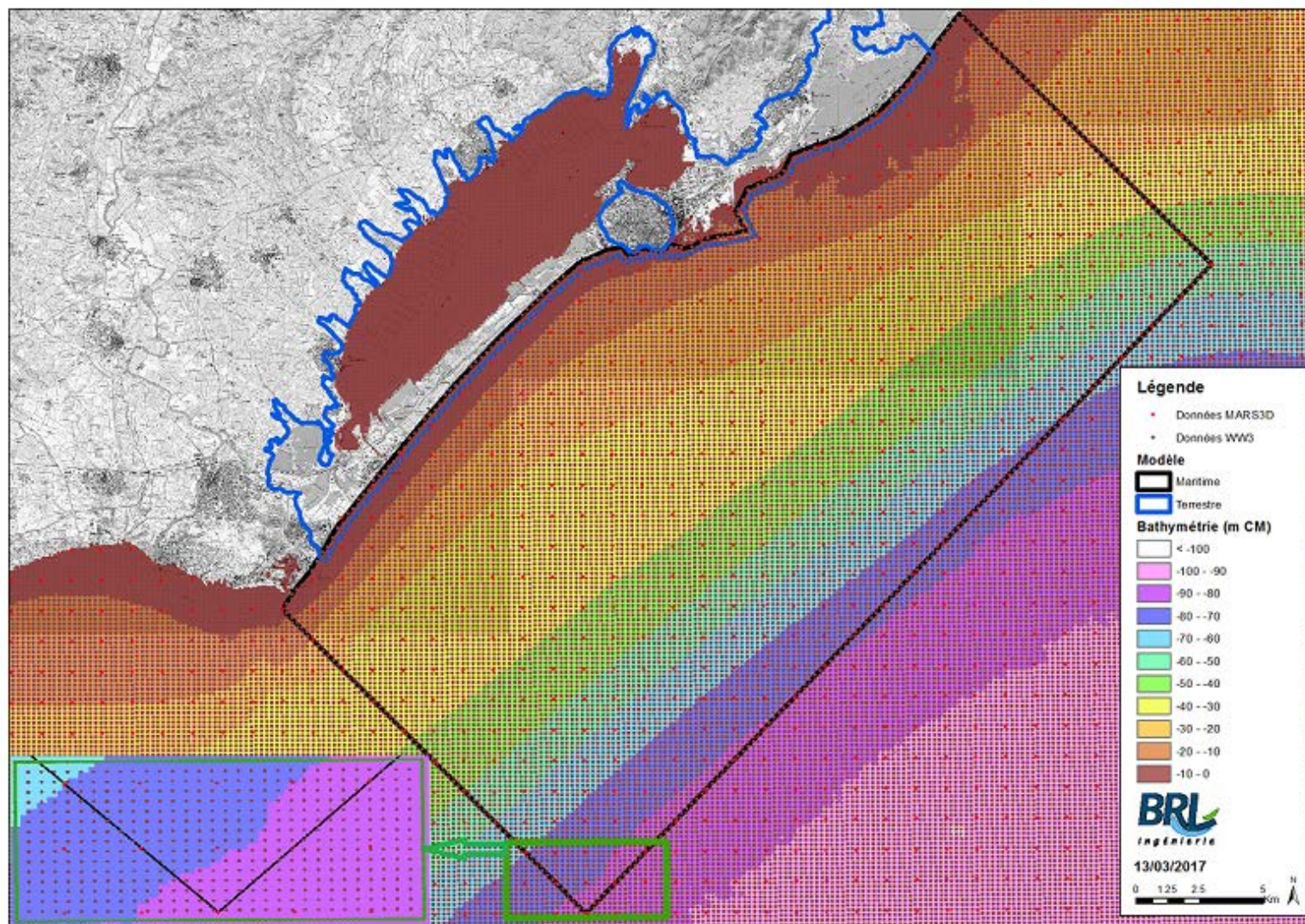
Les caractéristiques des modèles utilisés sont les suivantes :

- Modèle WW3 :
  - Données de houle (hauteur, période, direction)
  - Données de vent (intensité et direction)
  - Emprise : « Languedoc »
  - Taille de la maille du modèle : environ 200m
  - Données toutes les 3 heures
  - Prévision à 5 jours
  - Données disponibles depuis le 21/10/2009
- Modèle MARS3D
  - Données de niveau d'eau
  - Données de courant (intensité et direction)
  - Emprise : « Golfe du Lion »
  - Taille des mailles : environ 1.2km
  - Données toutes les 3 heures
  - Prévision à 4 jours
  - Données disponibles depuis le 06/01/2007

Pour les événements anciens (tempêtes de 1982 et de 1997 - cf. *4.4 Evénements de calage*) que nous envisageons de prendre en compte et de simuler pour le calage des modèles, les données aux limites ne sont pas disponibles en utilisant ces modèles. Les conditions aux limites seront donc ajustées de manière à retrouver les conditions observées aux bouées de houles et/ou aux marégraphes lors de ces événements.

A la frontière du modèle maritime, les données WW3 et MARS3D seront interpolées sur les points de calcul à la frontière. La figure suivante illustre la position des données de ces modèles par rapport à l'emprise du modèle maritime envisagée.

Figure 26 : Conditions aux limites



Source : BRLi 2017



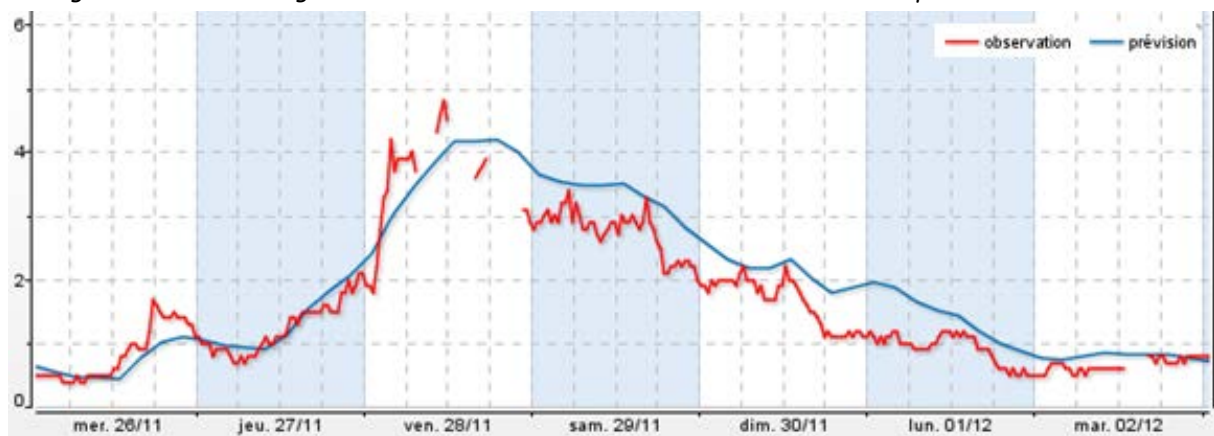
## 4.4 EVENEMENTS DE CALAGE ET DE VALIDATION

L'évènement de calage idéal pour le site d'étude devrait se baser sur un jeu de données associant à la fois :

- Des données de forçage au large : houle + niveau d'eau + courants + vent
- Des données de calage pour la houle (bouée) et pour le niveau d'eau (marégraphe) sur l'emprise du modèle maritime
- Des données de calage pour le niveau d'eau en plusieurs points (marégraphes et PHE) sur l'emprise du modèle terrestre

Au vu des données disponibles, la tempête du 28 novembre 2014 est la plus adaptée pour le calage. Pour cet évènement, nous disposons de conditions aux limites pour le modèle maritime : données WW3 et MARS3D (forçage au large complet) à la frontière du modèle issue des données MARC ainsi que des mesures de la bouée pour la houle à Sète et des enregistrements du marégraphe de Sète (station dock Richelieu). Sont également disponibles des mesures de débits dans les graus ainsi que des mesures de niveau dans l'étang de Thau à partir de capteurs de pression.

Figure 27 : Hauteur significative de la houle à la bouée de Sète lors de la tempête de novembre 2014



Source : PREVIMER, Candhis

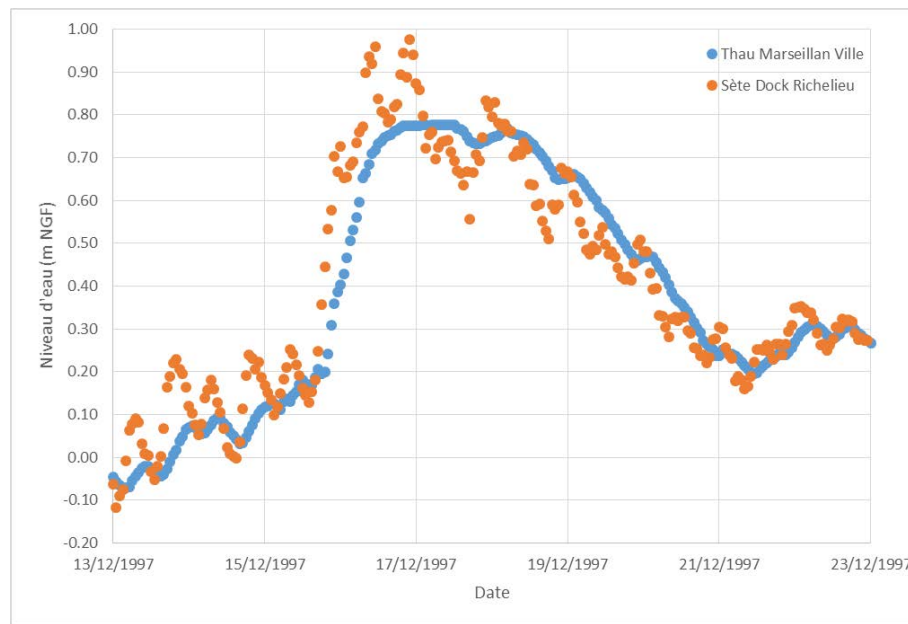
Deux tempêtes avec des données plus partielles seront utilisées pour la validation des paramétrages :

- La tempête du 16 décembre 1997
- La tempête du 7 novembre 1982

La tempête de 1997 permettra notamment de valider la partie échanges entre la mer et l'étang du modèle terrestre. Pour cet évènement, nous disposons d'enregistrements marégraphiques à Marseillan (station Thau Marseillan Ville) et à Sète côté mer (station dock Richelieu). Le paramétrage du modèle maritime défini lors du calage sera repris. Les conditions aux limites pour les niveaux d'eau du modèle maritime seront adaptées de manière à retrouver le niveau d'eau au marégraphe de Sète (station dock Richelieu). Le jeu de données de houle reconstitué par le BRGM sera aussi utilisé comme condition aux limites avec une validation sur la houle à la bouée Sète Marseillan.



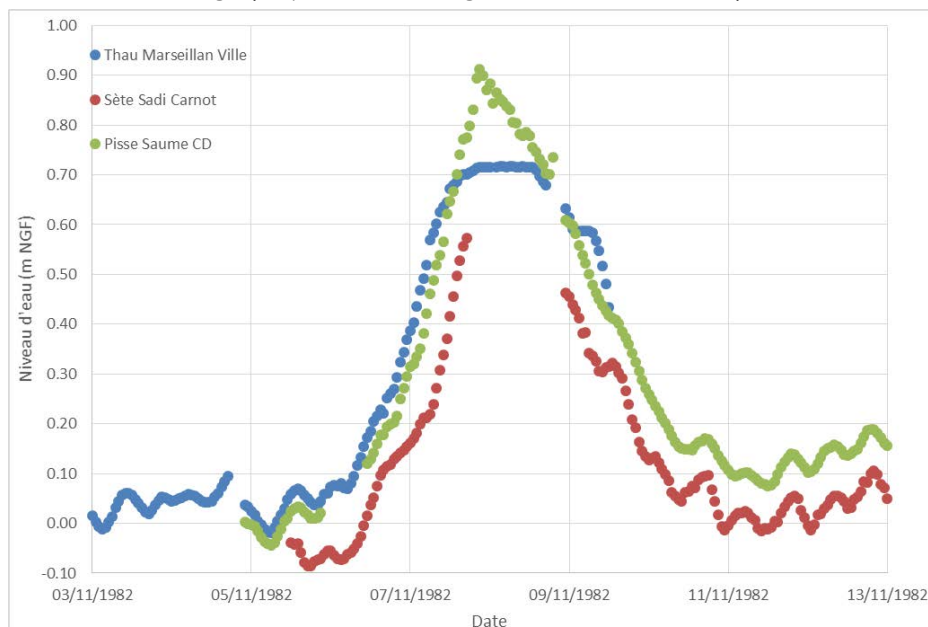
Figure 28 : Séries marégraphiques à Marseillan et Sète lors de la tempête de novembre 1982



Source : DREAL, SHOM, BRLi

Les données de la tempête de 1982 permettront notamment de valider la partie lagunaire et les zones de submersion du modèle terrestre. Pour cet événement, nous disposons de nombreuses PHE ainsi que d'enregistrements marégraphiques à Marseillan (station Thau Marseillan Ville et Pisse Saume CD) et à Sète côté étang (station Sadi Carnot). Le paramétrage du modèle maritime défini lors du calage sera repris. Les conditions aux limites pour les niveaux d'eau du modèle maritime seront adaptées de manière à retrouver le niveau d'eau maximum historique à Sète. Le jeu de données de houle reconstitué par le BRGM sera aussi utilisé comme condition aux limites avec une validation sur la houle maximale historique à Sète.

Figure 29 : Séries marégraphiques dans l'étang de Thau lors de la tempête de novembre 1982



Source : DREAL, BRLi

L'ensemble des données utilisées pour le calage et la validation du modèle sont récapitulées sur le tableau page suivante.

Tableau 17 : Récapitulatif des éléments de calage et de validation

Tempêtes	Modèle maritime				Modèle terrestre		
	conditions aux limites		calage		calage		
	houle	niveau d'eau	houle	niveau d'eau en mer	niveau d'eau étang	débits	submersion
2014	WW3	MARS3D	Sète	Sète dock Richelieu	capteurs pression	graus	
1997	re-jeux BRGM	adaptation BRLi	Sète Marseillan	Sète dock Richelieu	Thau Marseillan ville	-	-
1982	re-jeux BRGM	adaptation BRLi	Sète max historique	Sète max historique	Sète Sadi Carnot Thau Marseillan Ville Pisse Saume CD	-	PHE

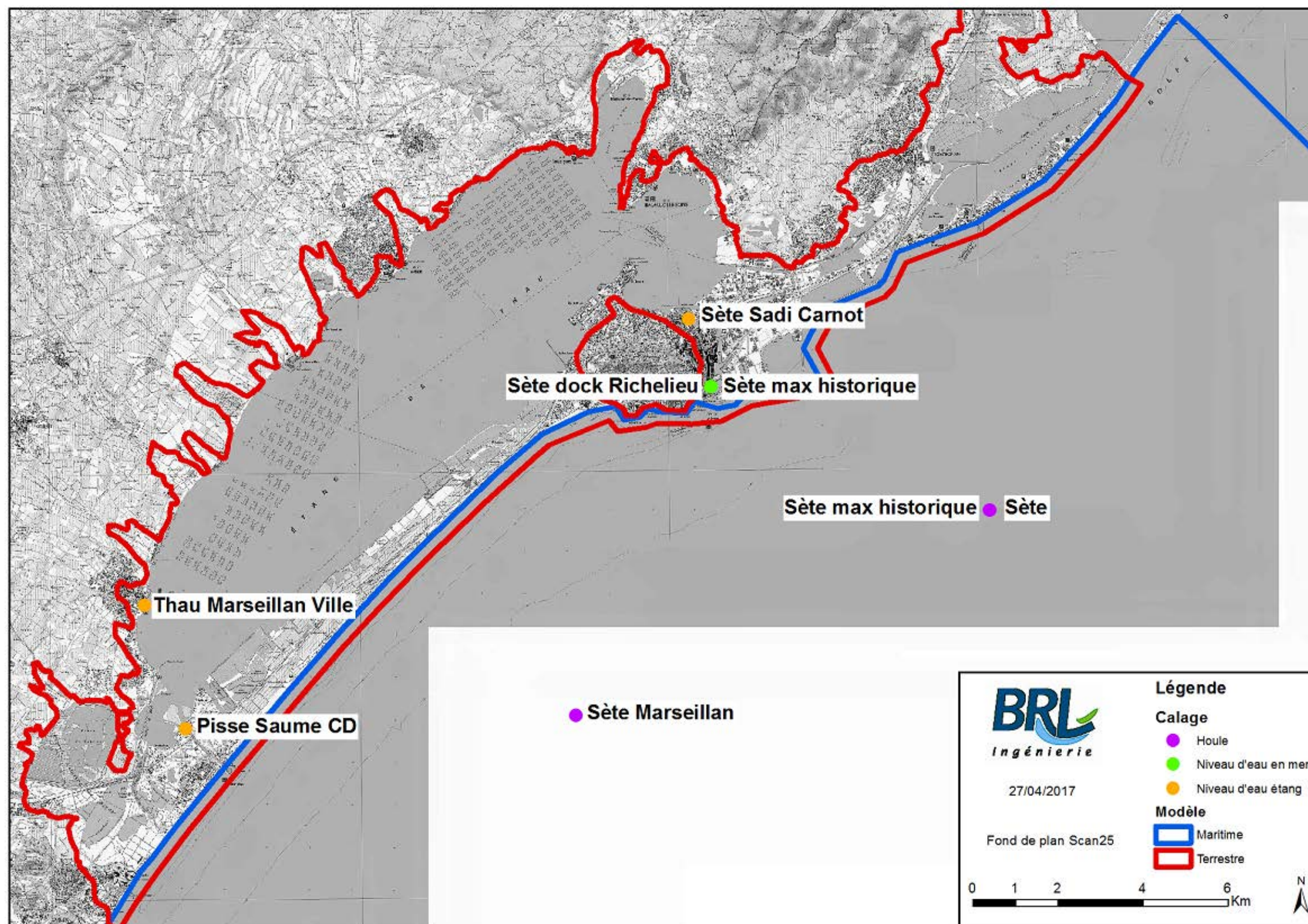
Source : BRLi 2017

Les éléments de calage sont localisés sur la carte page suivante.

Les conditions aux limites du modèle maritime ne sont pas représentées, elles seront imposées sur toutes les frontières ouvertes de ce modèle quel que soit le type de données utilisées. Les données de calages référencées « capteur pression » et « graus » ne sont pas localisées car ces données ne sont pas encore à disposition de BRLi et donc leur position non connue. Enfin, les données de PHE ne sont pas présentées pour une meilleure lisibilité de la carte, celles-ci ayant déjà fait l'objet de cartes spécifiques (cf. *Figure 14 : PHE – Ouest* ; *Figure 15 : PHE – centre* ; *Figure 16 : PHE – Est*).



Figure 30 : Localisation des éléments de calage et de validation



Source : BRLi 2017



## 4.5 ELEMENTS DE CHOIX POUR LA DEFINITION DES ALEAS

### 4.5.1 Options pour la définition des scénarii

Pour rappel, il est prévu de modéliser six scénarii durant la phase I 3 du projet pour définir les aléas sur la zone d'étude.

Deux options sont envisageables pour la définition de ces scénarii :

- Adapter les paramètres de forçage du modèle maritime pour obtenir des valeurs à la côte (houle et niveau d'eau) les plus proches possibles des études existantes (cf. paragraphe [3.3.5 Comparatif](#))
- Définir les scénarii de manière indépendante par rapport aux autres études déjà réalisées concernant les aléas.

### 4.5.2 Paramètres à prendre en compte

Les paramètres à prendre en compte sont à minima la hauteur significative de la houle et le niveau d'eau. Au regard de l'analyse menée sur le secteur d'étude, il serait intéressant de mettre l'accent sur le niveau d'eau car la houle n'a que peu d'influence sur la partie lagunaire notamment.

Le paramètre durée de la tempête sera différent entre les différents scénarii à modéliser. Comme récapitulé dans le *Tableau 5 : Paramètres physiques associés aux événements extrêmes*, ce paramètre est très différents entre les tempêtes historiques, que ce soit pour la houle ou pour le niveau d'eau. Il est envisagé de modéliser deux durées de tempêtes différentes. Une influence non négligeable sur le niveau d'eau est attendu, car la durée du niveau haut atteint joue sur le remplissage de l'étang.

Au regard des tempêtes historiques, il ne paraît pas forcément pertinent de faire varier la direction de la houle, une seule direction Sud Sud-Est peut être retenue. Il en est de même pour la direction du vent. Concernant l'intensité du vent, elle a surtout une importance sur la génération des conditions aux limites. Son importance sur le modèle maritime sera certainement limitée et il ne paraît pas opportun de faire varier cette variable dans les six scénarii à établir.

A noter que le long du littoral de la zone d'étude, la bathymétrie est globalement en pente très douce près du trait de côte, exception faite des abords de Sète. Il est donc possible que la houle soit rapidement limitée par la hauteur d'eau au niveau du trait de côte. En d'autres termes, des houles importantes mais avec des valeurs significativement différentes pourraient donner les mêmes résultats, en terme de hauteur significative, très proche du trait de côte. Les premiers tests de modélisation pourront confirmer ou infirmer cette hypothèse.

En revanche, la période de la houle pourrait avoir une influence près du trait de côte. La période de la houle traduit notamment l'aspect énergétique de la houle et celle-ci devra être prise en compte dans les formules « hydrauliques » utilisées à la côte dans le module ouvrage. Pour une houle de même hauteur significative mais de période différente, la houle la plus longue sera la plus énergétique et aura plus d'impact en terme d'érosion. La houle la plus longue générera également plus de franchissements.

Ce choix des scénarii sera à discuter avec le SMBT lors des phases suivantes d'étude.

## 5. Conclusion

Les données topographiques et bathymétriques récoltées et provenant de sources multiples sur le site d'étude sont assez complètes. Elles sont compatibles et certainement suffisantes pour la modélisation. Les premiers essais de modélisation permettront éventuellement de définir quelques secteurs ou des relevés précis (ouvrages en particuliers) seraient utiles.

Les données sur les ouvrages sont issues d'une base de donnée de la DREAL. Ces données sont assez complètes et générales. Elles pourront servir de cadre, en complément des données spécifiques sur les ouvrages, lors des phases ultérieures de l'étude. Elles pourraient également servir de socle pour définir des outils futurs de suivi et gestion de ces ouvrages dans le cadre de la future compétence GEMAPI. De nombreux paramètres « géométriques » relatifs aux ouvrages seront également calculés et renseignés à partir des données topographiques et bathymétriques.

Les données de houle, avec deux bouées au large de Sète, un re-jeu du BRGM, de nombreuses valeurs historiques et le projet MARC (suite de PREVIMER) de l'IFREMER, sont également bien renseignées. Elles seront bien adaptées pour le calage, la calibration et les conditions aux limites du modèle.

Les données de niveau d'eau récupérées à Sète côté mer, en différents marégraphes historiques de l'étang de Thau et le projet MARC de l'IFREMER sont aussi bien fournies. Ces données sont compatibles avec le calage, la calibration et les conditions aux limites du modèle.

Les relevés de PHE sont assez rares et anciens mais c'est assez logique au vu de l'absence de submersion de grande ampleur. Les données historiques de débits dans les graus seront également utiles pour le calage.

Au vu de ce recensement de la bibliographie et des données disponibles on peut donc conclure que les éléments récoltés sont riches et suffisants (après quelques compléments relatifs par exemple à des relevés d'ouvrages) pour mettre en œuvre la stratégie de modélisation telle que décrite dans ce rapport et développer des outils de prévision des submersions marines sur le secteur d'étude. C'est tout l'enjeu des phases suivantes.

# ANNEXES



## **Annexe 1 : Estimations de l'aléa surcote, Traitements statistiques des données du marégraphe de Sète réalisée par le SMBT**

## PRESENTATION DES DONNEES

Les données au marégraphe de Sète ont été récupérées auprès du SHOM pour les années de 1986 à 2015. Ces données sont acquises à une fréquence horaire. De 1986 à 1999, les données sont issues d'une numérisation des tracés papiers, les imprécisions liées à la numérisation impliquent l'existence d'une estimation moyenne de niveau et d'un niveau maximum probable. Pour cette période, les traitements statistiques réalisés vont ainsi considérer la série comprenant la moyenne issue de la méthodologie de numérisation ainsi que le maximum afin de couvrir l'ensemble de la fenêtre d'incertitude liée à la numérisation des données. Pour les données acquises en hautes fréquences (1 à 10mn), les données accessibles sur le site de distribution du SHOM sont uniquement disponibles pour les années de septembre 2004 à aujourd'hui.

Sur la période échantillonnée, dans le cas de la prise en compte des moyennes de la numérisation (1986-1999), la surcote maximale atteinte est de 103.3cm le 28 novembre 2014. Le niveau moyen sur la période est de 11.56 cm.

Dans le cas de la prise en compte des maximum de la numérisation (1986-1999), la surcote maximale atteinte est cette fois ci de 131.3cm atteinte le 16 décembre 1997. Le niveau moyen sur la période est de 13.89 cm.

Figure 31 : Signal horaire du marégraphe de Sète en cm par rapport au zéro géographique (IGN-69) sur la période de 1986 à 2015 en considérant les niveaux moyens estimés (1986-1999) par la numérisation des tracés papiers

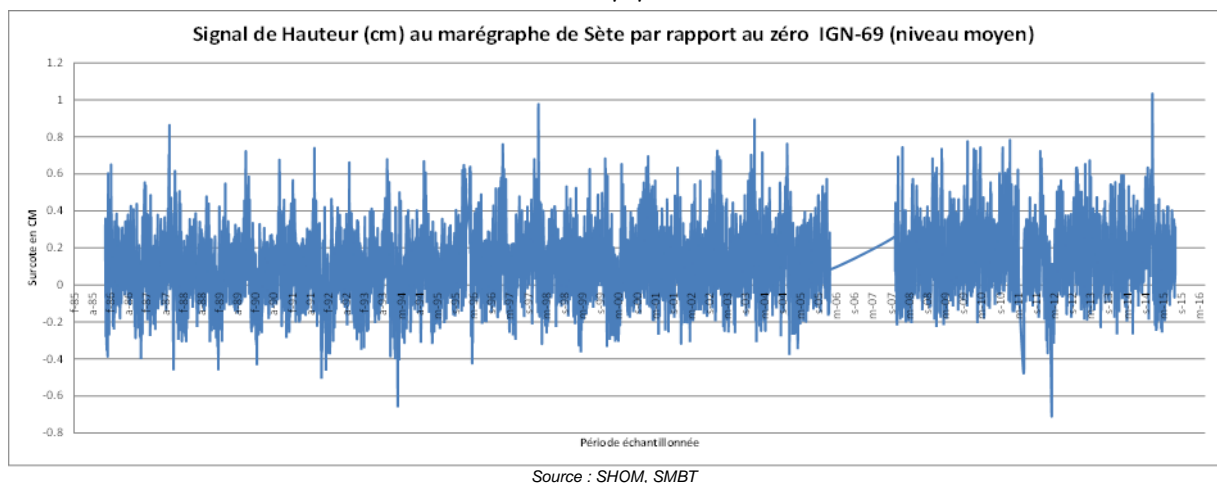
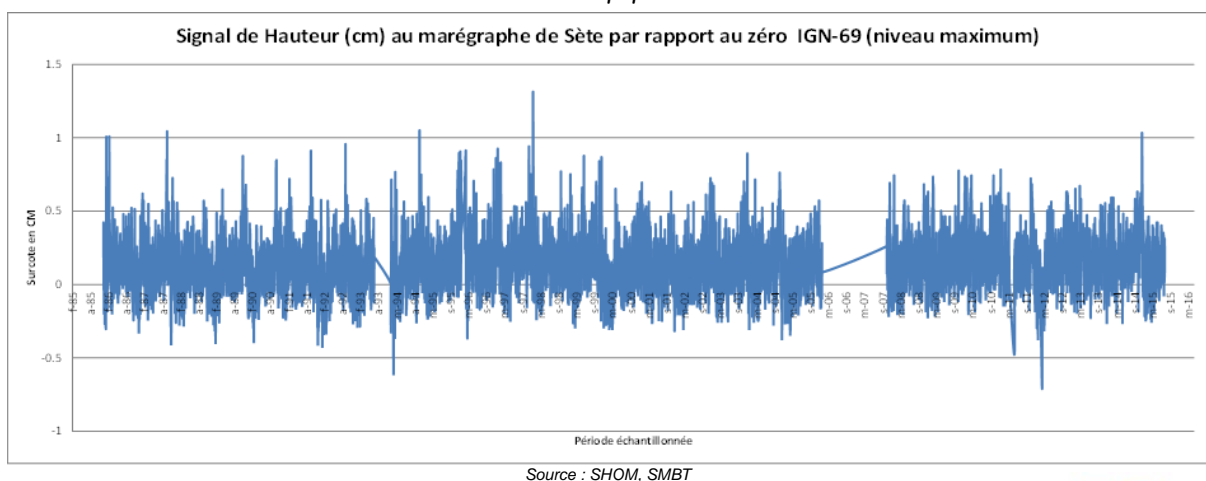


Figure 32 : Signal horaire du marégraphe de Sète en cm par rapport au zéro géographique (IGN-69) sur la période de 1986 à 2015 en considérant les niveaux maximum estimés (1986-1999) par la numérisation des tracés papiers



## AJUSTEMENT STATISTIQUES DE GUMBEL ET METHODE DE CONSTRUCTION DE COURBES SURCOTE-DUREE- FREQUENCE

Une analyse fréquentielle est réalisée sur l'ensemble des séries (horaire, 10mn, max, moyenne..). La distribution de Gumbel est utilisée et ajustée sur les données maximales trimestrielles retenues ( $x_q$ ) des signaux. Pour cela, les maximums trimestriels sont classés par rangs croissant puis est appliquée ensuite la distribution rang/fréquence de Hazen pour estimer les fréquences ( $F(x)$ ) des observations de l'échantillon. Ensuite une transformation  $-\ln(-\ln(F(x)))$  des fréquences est réalisée, l'avantage de travailler avec cette variable réduite  $u_q = -\ln(-\ln(F_q(x)))$  est que l'expression d'un quantile est alors linéaire  $x_q = a + b \cdot u_q$ . Pour estimer les paramètres de la droite, 2 méthodes (régression linéaire et méthode des moments) ont été testées pour estimer les paramètres de la droite et présentent des résultats très proches. Il a été choisi de retenir la méthode des moments qui permet par la suite d'estimer d'utiliser une méthode propre à l'estimation des intervalles de confiances des valeurs estimées à différentes période de retour du modèle statistique, méthode de Dick et Darwin.

Nous appliquons l'ensemble de cette méthode au signal de base, ce qui nous permet d'évaluer le niveau des surcotes (de durée 1h pour le signal horaire) des périodes de retour voulues. Le signal brutes a été lissé à plusieurs fenêtre temporelle (de 1h à 24h) afin d'évaluer les niveaux de surcotes pour différentes période de retour mais également en prenant en compte la durée des événements. Ainsi il a été possible de construire avec ces traitements, des courbes d'intensité de Surcote /Fréquence d'apparition /durée de la surcotes.

Enfin sur l'ensemble des ajustements réalisés avec le modèle de Gumbel, l'intervalle de confiance par la méthode de Dick et Darwin a été évalué pour chacune des durées testées et des périodes de retour choisies. Lorsque les paramètres  $a$  et  $b$  de la loi de Gumbel ont été estimé à partir de la méthode des moments un quantile peut s'écrire directement en fonction de la moyenne ( $\mu$ ) et l'écart type ( $\sigma$ ) de l'échantillon :

$$\hat{x}_q = \hat{\mu} + 0,7797 \hat{\sigma} (u_q - 0,5772) = \hat{\mu} + K_q \hat{\sigma}$$

L'écart type de l'intervalle de confiance pour le quantile  $q$  est estimé par la méthode de Dick et Darwin par :

$$\sigma_{x_q} = \frac{s}{\sqrt{n-1}} \sqrt{0.709923 + .11657 \cdot u_q + 0.668725 \cdot u_q^2}.$$

Les valeurs utilisées de la table de Dick et Darwin permettent d'évaluer la quantité sous la racine de la formule ou dessus pour un quantile  $q$  de période de retour ( $s = \sigma$ , l'écart type de l'échantillon):

Tableau 18 : Valeurs pour le calcul de l'intervalle de confiance selon Dick et Darwin

Valeurs pour le calcul de l'intervalle de confiance selon DICK ET DARWIN

Temps de retour	1.50	1.58	2.0	2.33	5	10	15	20
$F(x_q)$	0.3333	0.3679	0.5000	0.5704	0.8000	0.9000	0.9333	0.9500
$u_q$	-0.0940	0.0000	0.3665	0.5772	1.4999	2.2504	2.6738	2.9702
$\sqrt{D \& D}$	0.8396	0.8426	0.9179	1.0000	1.5457	2.0878	2.4088	2.6364
Temps de retour	30	50	100	200	300	500	1000	2000
$F(x_q)$	0.9667	0.9800	0.9900	0.9950	0.9967	0.9980	0.9990	0.9995
$u_q$	3.3843	3.9019	4.6001	5.2958	5.7021	6.2136	6.9073	7.6006
$\sqrt{D \& D}$	2.9603	3.3684	3.9239	4.4813	4.8081	5.2204	5.7810	6.3428

Source : ?



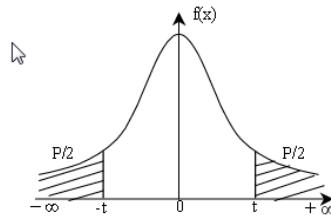
On applique ensuite la relation classique d'un intervalle de confiance d'ordre  $(1-\alpha)$  où  $(1-\alpha)$  est la probabilité de réalisation par exemple 95% pour  $\alpha=0.025$ . On lit dans une table de Student le paramètre  $z_{1-\frac{\alpha}{2}}$

selon  $\alpha$  et le nombre total de l'échantillon (pour 95% lire la colonne 5% dans la table de Student et à la ligne du nombre d'observations ayant été servies à l'estimateur de la loi de Gumbel.

$$P\left(\hat{x}_q - z_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \sigma_{x_q} < X_q < \hat{x}_q + z_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \sigma_{x_q}\right) = 1 - \alpha$$

Tableau 19 : Table de Student

Valeurs de t ayant la probabilité P d'être dépassées en valeur absolue.



v \ P	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	5%	1%
1	0,1584	0,3249	0,5095	0,7265	1,0000	1,3764	1,9626	3,0777	6,3137	12,7062	63,6559
2	0,1064	0,2607	0,4447	0,6172	0,8165	1,0607	1,3858	2,0539	2,9200	4,3027	9,9250
3	0,1000	0,2567	0,4348	0,6064	0,7899	1,0261	1,3450	1,9846	2,7478	3,7469	5,8408
4	0,0938	0,2537	0,4308	0,6013	0,7833	1,0201	1,3368	1,9733	2,7168	3,6841	5,7551
5	0,0885	0,2508	0,4272	0,5978	0,7794	1,0162	1,3308	1,9671	2,7061	3,6718	5,7151
6	0,0839	0,2480	0,4239	0,5945	0,7759	1,0125	1,3259	1,9600	2,6969	3,6601	5,6829
7	0,0798	0,2453	0,4208	0,5914	0,7726	1,0091	1,3218	1,9533	2,6881	3,6486	5,6576
8	0,0762	0,2428	0,4179	0,5885	0,7694	1,0060	1,3184	1,9471	2,6800	3,6374	5,6388
9	0,0729	0,2404	0,4152	0,5858	0,7664	1,0032	1,3153	1,9413	2,6722	3,6264	5,6259
10	0,0700	0,2381	0,4127	0,5832	0,7636	1,0005	1,3124	1,9358	2,6652	3,6156	5,6187
11	0,0674	0,2359	0,4103	0,5807	0,7609	0,9979	1,3096	1,9306	2,6589	3,6050	5,6161
12	0,0650	0,2338	0,4080	0,5783	0,7583	0,9954	1,3067	1,9256	2,6529	3,5946	5,6132
13	0,0628	0,2318	0,4058	0,5759	0,7558	0,9930	1,3039	1,9208	2,6470	3,5843	5,6103
14	0,0607	0,2298	0,4036	0,5736	0,7534	0,9906	1,3012	1,9161	2,6413	3,5741	5,6075
15	0,0588	0,2279	0,4015	0,5713	0,7511	0,9882	1,2986	1,9115	2,6357	3,5640	5,6047
16	0,0570	0,2260	0,3994	0,5691	0,7488	0,9859	1,2961	1,9070	2,6304	3,5540	5,6020
17	0,0553	0,2242	0,3974	0,5669	0,7466	0,9836	1,2936	1,9026	2,6252	3,5440	5,5993
18	0,0537	0,2224	0,3954	0,5647	0,7444	0,9813	1,2912	1,8982	2,6201	3,5341	5,5966
19	0,0521	0,2206	0,3934	0,5625	0,7422	0,9790	1,2888	1,8939	2,6150	3,5242	5,5940
20	0,0506	0,2188	0,3914	0,5603	0,7400	0,9768	1,2864	1,8896	2,6100	3,5143	5,5913
21	0,0491	0,2170	0,3894	0,5581	0,7378	0,9746	1,2841	1,8854	2,6050	3,5044	5,5887
22	0,0476	0,2152	0,3874	0,5559	0,7356	0,9724	1,2817	1,8812	2,6000	3,4945	5,5860
23	0,0462	0,2134	0,3854	0,5537	0,7334	0,9702	1,2794	1,8770	2,5950	3,4846	5,5834
24	0,0448	0,2116	0,3834	0,5515	0,7312	0,9680	1,2771	1,8728	2,5900	3,4747	5,5807
25	0,0434	0,2098	0,3814	0,5493	0,7290	0,9658	1,2748	1,8686	2,5850	3,4648	5,5781
26	0,0420	0,2080	0,3794	0,5471	0,7268	0,9636	1,2725	1,8644	2,5800	3,4549	5,5754
27	0,0406	0,2062	0,3774	0,5449	0,7246	0,9614	1,2702	1,8602	2,5750	3,4450	5,5728
28	0,0392	0,2044	0,3754	0,5427	0,7224	0,9592	1,2679	1,8560	2,5700	3,4351	5,5701
29	0,0378	0,2026	0,3734	0,5405	0,7202	0,9570	1,2656	1,8518	2,5650	3,4252	5,5675
30	0,0364	0,2008	0,3714	0,5383	0,7180	0,9548	1,2633	1,8476	2,5600	3,4153	5,5648
40	0,0320	0,1960	0,3666	0,5326	0,7125	0,9491	1,2577	1,8399	2,5421	3,3984	5,5559
50	0,0286	0,1912	0,3618	0,5270	0,7069	0,9435	1,2521	1,8343	2,5265	3,3830	5,5479
60	0,0259	0,1864	0,3570	0,5214	0,7013	0,9379	1,2465	1,8287	2,5109	3,3676	5,5399
80	0,0224	0,1808	0,3504	0,5138	0,6938	0,9298	1,2384	1,8199	2,4841	3,3421	5,5259
100	0,0193	0,1752	0,3438	0,5062	0,6877	0,9237	1,2328	1,8143	2,4685	3,3265	5,5179
120	0,0178	0,1716	0,3392	0,5016	0,6831	0,9191	1,2282	1,8097	2,4529	3,3109	5,5133
140	0,0164	0,1680	0,3346	0,4970	0,6785	0,9145	1,2236	1,8051	2,4373	3,2953	5,5087
160	0,0151	0,1644	0,3300	0,4924	0,6739	0,9099	1,2190	1,8005	2,4217	3,2797	5,5041
180	0,0139	0,1608	0,3254	0,4878	0,6693	0,9053	1,2144	1,7959	2,4061	3,2641	5,4995
200	0,0128	0,1572	0,3208	0,4832	0,6647	0,9007	1,2098	1,7913	2,3905	3,2485	5,4949
∞	0,0125	0,1560	0,3200	0,4820	0,6640	0,9000	1,2090	1,7900	2,3890	3,2470	5,4940

Source : ?

## RESULTATS D'ANALYSES DE SURCOTES HORAIRE (1986-2015) AU MAREGRAPHE DE SETE-DONNEES NUMERISEES « MOYENNES ET MAXIMALES »

La surcote centennale horaire que nous avons estimées sur les valeurs moyenne de numérisation est de 1.13 m NGF et comparable au 1.07m estimé par le CEREMA en 2010. Notre échantillon était plus restreint (30 ans) mais nous avons des données plus récentes avec notamment l'évènement du 28 novembre 2014 qui augmente les estimations du modèle statistique de Gumbel. L'intervalle de confiance à 95% est légèrement plus réduit avec la méthode de Dick et Darwin que nous avons utilisée. Cependant, lorsqu'on prend les estimations horaires « maximale de numérisation » de surcote entre 1986 et 1999, les valeurs estimées sont sensiblement différentes avec par exemple pour une centennale horaire 1.34 m, soit 21 cm de plus. La qualité et hypothèse de numérisation des tracés papiers des relevés avant les années 2000 entraînent une importante incertitude. C'est pourquoi nous présentons ci en dessous l'ensemble des résultats et des analyses sur les 2 séries « moyenne » et « maximale » de numérisation.

L'apport important supplémentaire de notre analyse est surtout de pouvoir associer un niveau de surcote à une période de retour mais surtout à une durée de cette surcote. Les surcotes sur les masses d'eau lagunaire dépendent fortement de la durée de la surcote en plus du niveau de la surcote. En effet l'amplitude de l'onde de surcote est d'autant moins amortie par le filtre des graus, sections d'échanges entre les lagunes et la mer, que la durée de la surcote est longue.

Tableau 20 : Estimations des surcotes horaires au marégraphe de Sète par le CEREMA sur 31 années de données de 1953 à 2007.

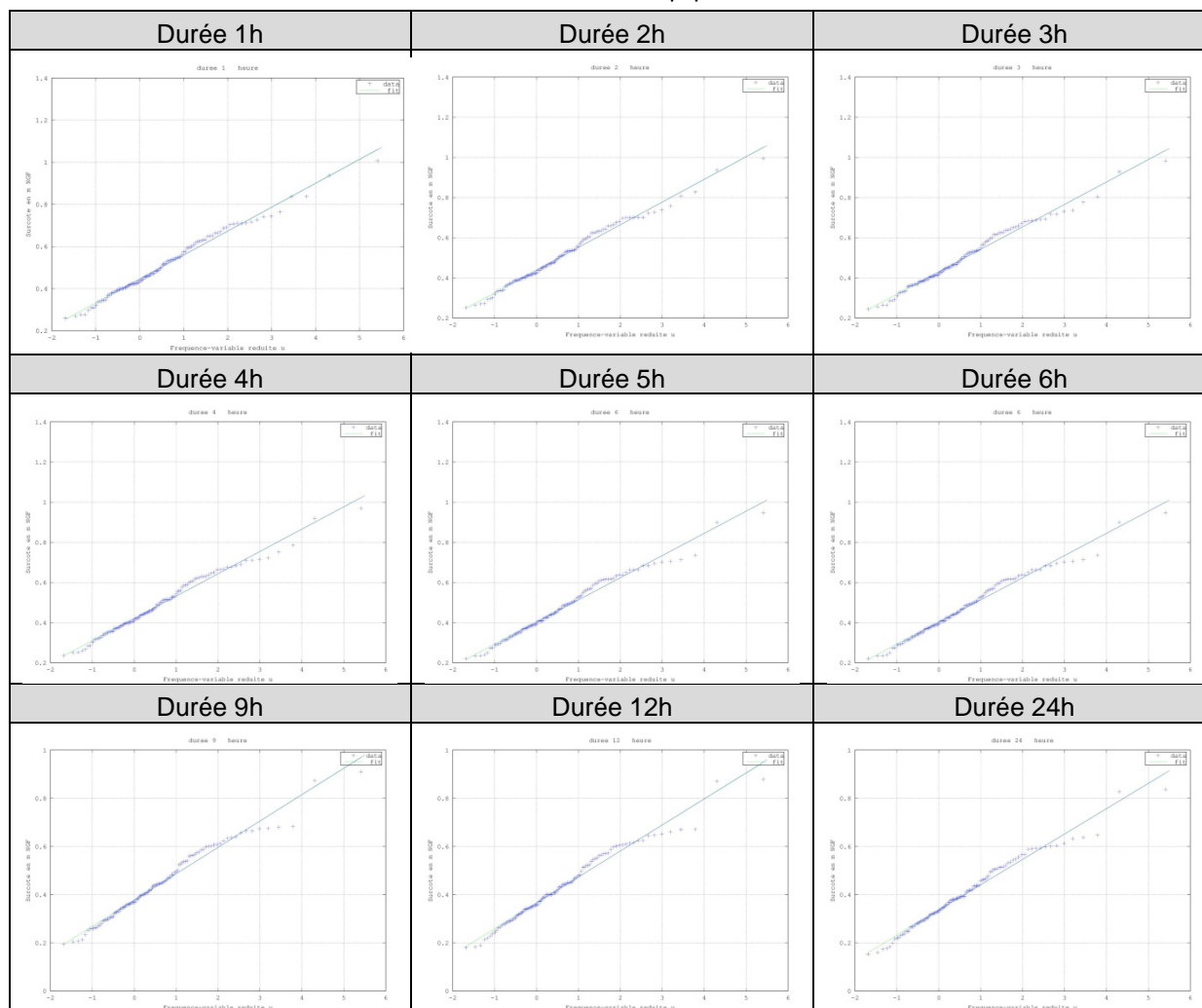
**Sete2 (Niveau horaire)**  
Echantillonnage : Max annuel calendaire - Nombre d'années = 37 ans  
Max mesuré = 98 cm IGN 69 le 17/12/1997 (Période de retour théorique : 37 ans)

Période de retour Ts (ans)	1	5	10	20	50	100
Niveau horaire (cm IGN69)	66	80	86	92	101	107
Intervalle de confiance à 95%	63 - 70	76 - 89	80 - 98	85 - 107	91 - 119	96 - 128
Intervalle de confiance à 70 %	64 - 68	78 - 84	83 - 91	88 - 99	95 - 108	100 - 116

Tableau 2.4 : Tableau des extrêmes  
Source : CEREMA

L'ajustement des lois de Gumbel pour les surcotes de durée 1h, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 12, 24heures sont présentés ci-dessous.

Figure 33 : Ajustement par la méthode moments de la loi de Gumbel sur les surcotes maximum trimestrielle atteintes pour plusieurs durée de l'évènement de surcote sur les données du marégraphe (valeurs moyennes de la numérisation des tracés papiers 1986-1999)



Source : SMBT

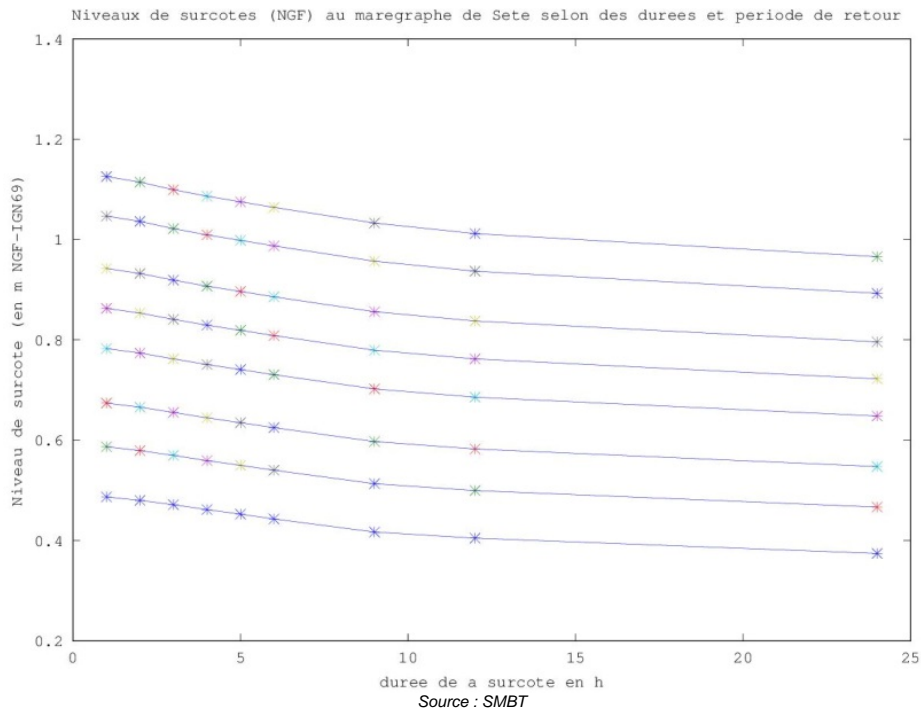
Tableau 21 : Paramètres ajustés par la méthode des moments ainsi que moyenne ( $\mu$ ) et écart type de l'échantillon pour les différentes durées de surcote analysées

Durée/ paramètre	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	7h	24h
<b>amoy</b>	0.4455	0.43875	0.43064	0.42102	0.41212	0.40272	0.37683	0.36524	0.33585
<b>b moy</b>	0.1135	0.11281	0.11162	0.11109	0.1107	0.11041	0.10955	0.10796	0.10517
<b><math>\mu</math></b>	0.511	0.50386	0.49507	0.48514	0.47602	0.46645	0.44006	0.42755	0.39655
<b><math>\sigma</math></b>	0.1456	0.14469	0.14316	0.14248	0.14198	0.14161	0.1405	0.13846	0.13488

Source : SMBT



**Tableau 22 : Courbes Intensité de surcote (en mNGF) au marégraphe de Sète (valeur moyenne numérisée) en fonction de la durée de la surcote pour différentes période de retour de la plus forte (en haut) à la plus basse (en bas) respectivement (retour 100ans, 50 ans, 20 ans, 10 ans, 5 ans, 2 ans, 1 an, 6 mois)**



**Tableau 23 : Estimations de la surcote (en mètre NGF) au marégraphe de Sète (valeur moyenne de numérisation) selon la durée de la surcote en heure et la période de retour de l'évènement**

Durée et Période de retour	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	12h	24h
<b>6 mois</b>	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44	0.42	0.40	0.37
<b>1 an</b>	0.59	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.51	0.50	0.47
<b>2 ans</b>	0.67	0.67	0.66	0.64	0.64	0.63	0.60	0.58	0.55
<b>5 ans</b>	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.70	0.69	0.65
<b>10 ans</b>	0.86	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81	0.78	0.76	0.72
<b>20 ans</b>	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90	0.89	0.86	0.84	0.80
<b>50 ans</b>	1.05	1.04	1.02	1.01	1.00	0.99	0.96	0.94	0.89
<b>100 ans</b>	1.13	1.11	1.10	1.09	1.08	1.06	1.03	1.01	0.97
<b>1000 ans</b>	1.39	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32	1.29	1.26	1.21

Source : SMBT

Tableau 24 : Estimations de la surcote (en mètre NGF) borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %, au marégraphe de Sète (valeur moyenne de numérisation) selon la durée de la surcote en heure et la période de retour de l'évènement

Durée et Période de retour	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	12h	24h
6 mois	0.51	0.50	0.50	0.49	0.48	0.47	0.44	0.43	0.40
1 an	0.62	0.62	0.61	0.59	0.59	0.58	0.55	0.53	0.50
2 ans	0.72	0.72	0.70	0.69	0.68	0.67	0.65	0.63	0.59
5 ans	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81	0.80	0.77	0.75	0.71
10 ans	0.95	0.94	0.92	0.91	0.90	0.89	0.86	0.84	0.80
20 ans	1.04	1.03	1.02	1.00	0.99	0.98	0.95	0.93	0.89
50 ans	1.17	1.16	1.14	1.13	1.12	1.10	1.07	1.05	1.00
100 ans	1.26	1.25	1.23	1.22	1.21	1.20	1.16	1.14	1.09
1000 ans	1.57	1.55	1.53	1.52	1.50	1.49	1.46	1.43	1.37

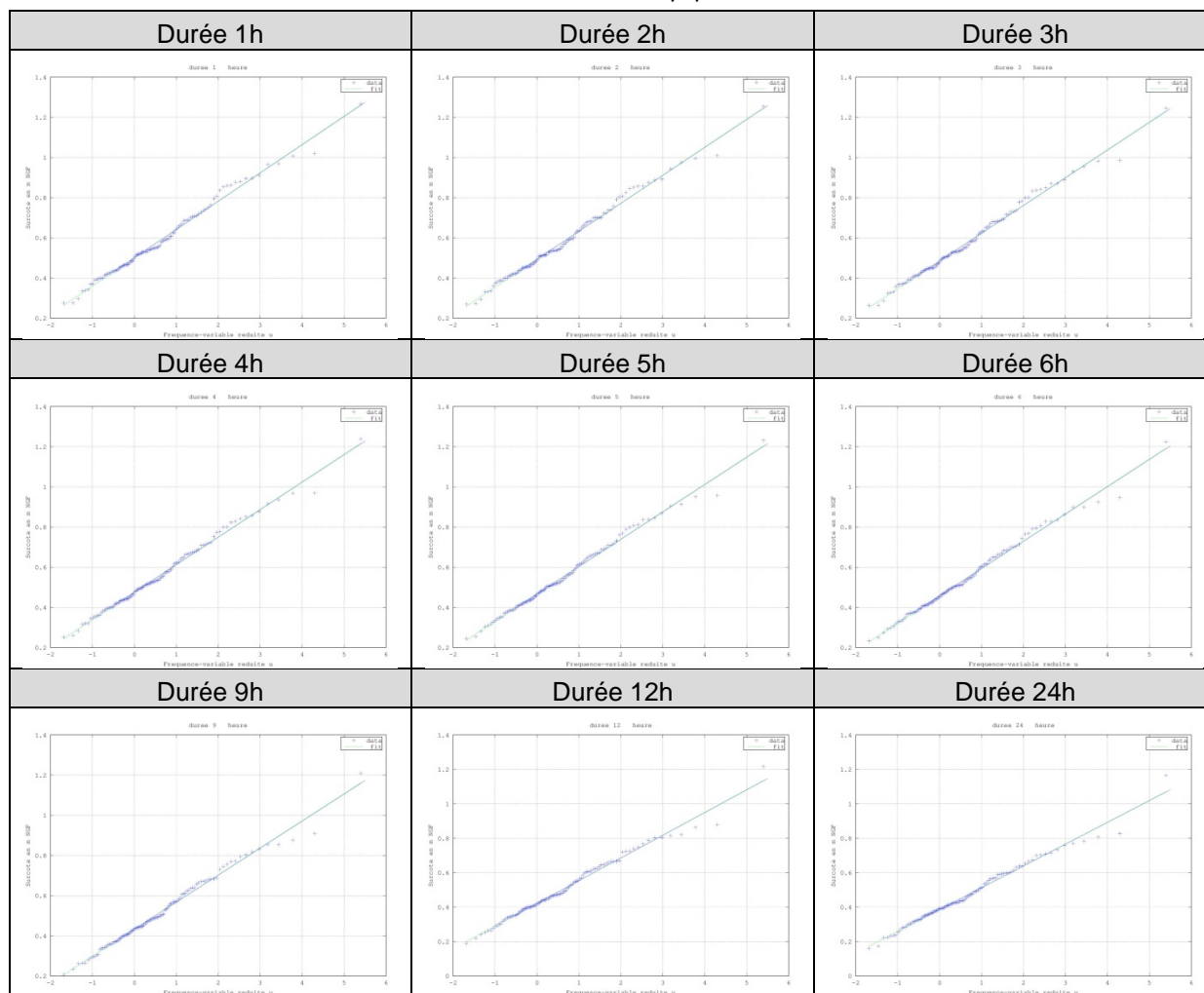
Source : SMBT

Tableau 25 : Estimations de la surcote (en mètre NGF) borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95 %, au marégraphe de Sète (valeur moyenne de numérisation) selon la durée de la surcote en heure et la période de retour de l'évènement

Durée et Période de retour	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	12h	24h
6 mois	0.46	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.39	0.38	0.35
1 an	0.55	0.54	0.53	0.52	0.51	0.51	0.48	0.47	0.43
2 ans	0.62	0.62	0.61	0.60	0.59	0.58	0.55	0.53	0.50
5 ans	0.71	0.70	0.69	0.68	0.67	0.66	0.63	0.62	0.58
10 ans	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.70	0.68	0.64
20 ans	0.84	0.83	0.82	0.81	0.80	0.79	0.76	0.74	0.70
50 ans	0.93	0.92	0.90	0.89	0.88	0.87	0.84	0.82	0.78
100 ans	0.99	0.98	0.97	0.95	0.94	0.93	0.90	0.88	0.84
1000 ans	1.21	1.20	1.18	1.17	1.16	1.15	1.11	1.09	1.04

Source : SMBT

Figure 34 : Ajustement par la méthode moments de la loi de Gumbel sur les surcotes maximum trimestrielle atteintes pour plusieurs durée de l'évènement de surcote sur les données du marégraphe (valeurs maximales de la numérisation des tracés papiers 1986-1999)



Source : SMBT

Tableau 26 : Paramètres ajustés par la méthode des moments ainsi que moyenne ( $\mu$ ) et écart type de l'échantillon pour les différentes durées de surcote analysées

Durée/ paramètre	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	7h	24h
<b>amoy</b>	0.5009	0.4939	0.4856	0.4761	0.4671	0.4579	0.4329	0.4214	0.3861
<b>b moy</b>	0.1405	0.1389	0.1376	0.1366	0.1359	0.1355	0.1344	0.1318	0.1264
<b><math>\mu</math></b>	0.5820	0.5741	0.5650	0.5549	0.5455	0.5361	0.5105	0.4975	0.4591
<b>sig</b>	0.1802	0.1782	0.1765	0.1752	0.1743	0.1738	0.1724	0.1691	0.1621

Source : SMBT



Figure 35 : Courbes Intensité de surcote (en mNGF) au marégraphe de Sète (valeur maximale numérisée) en fonction de la durée de la surcote pour différentes période de retour de la plus forte (en haut) à la plus basse (en bas) respectivement (retour 100ans, 50 ans, 20 ans, 10 ans, 5 ans, 2 ans, 1 an, 6 mois)

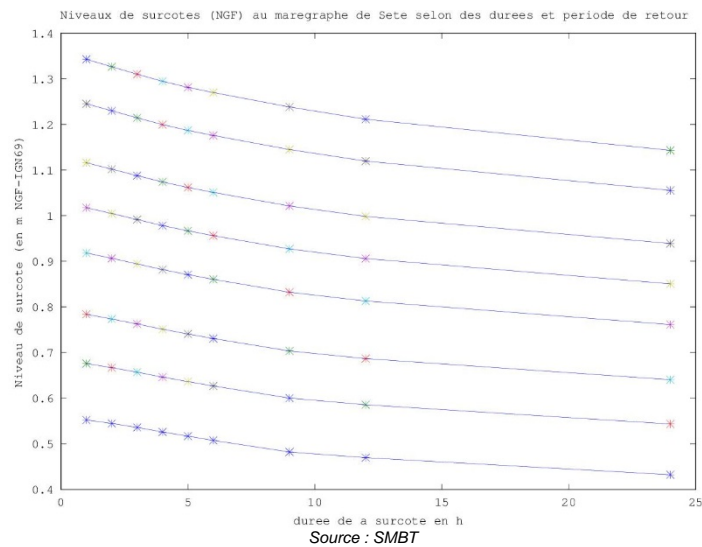


Figure 36 : Ajustement par la méthode moments de la loi de Gumbel sur les surcotes maximum trimestrielle atteintes pour plusieurs durée de l'évènement de surcote sur les données du marégraphe (valeurs maximales de la numérisation des tracés papiers 1986-1999)

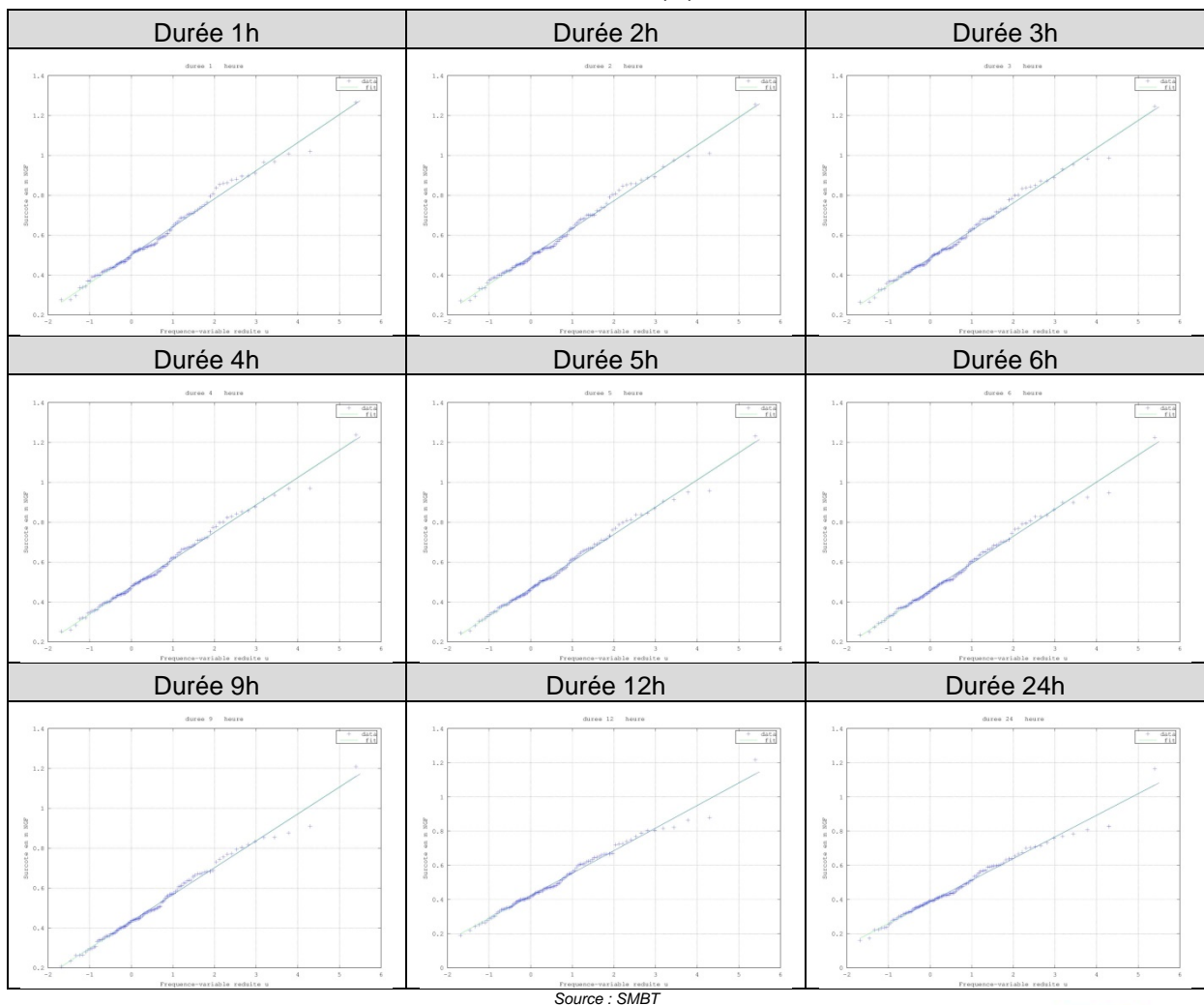


Tableau 27 : Paramètres ajustés par la méthode des moments ainsi que moyenne ( $\mu$ ) et écart type de l'échantillon pour les différentes durées de surcote analysées

Durée/ paramètre	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	7h	24h
<b>amoy</b>	0.5009	0.4939	0.4856	0.4761	0.4671	0.4579	0.4329	0.4214	0.3861
<b>b moy</b>	0.1405	0.1389	0.1376	0.1366	0.1359	0.1355	0.1344	0.1318	0.1264
<b><math>\mu</math></b>	0.5820	0.5741	0.5650	0.5549	0.5455	0.5361	0.5105	0.4975	0.4591
<b>sig</b>	0.1802	0.1782	0.1765	0.1752	0.1743	0.1738	0.1724	0.1691	0.1621

Source : SMBT

Tableau 28 : Estimations de la surcote (en mètre NGF) au marégraphe de Sète (valeur maximale de numérisation) selon la durée de la surcote en heure et la période de retour de l'évènement

Durée et Période de retour	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	12h	24h
<b>6 mois</b>	0.55	0.54	0.54	0.53	0.52	0.51	0.48	0.47	0.43
<b>1 an</b>	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63	0.60	0.59	0.54
<b>2 ans</b>	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.70	0.69	0.64
<b>5 ans</b>	0.92	0.91	0.89	0.88	0.87	0.86	0.83	0.81	0.76
<b>10 ans</b>	1.02	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.93	0.91	0.85
<b>2 ans</b>	1.12	1.10	1.09	1.07	1.06	1.05	1.02	1.00	0.94
<b>50 ans</b>	1.25	1.23	1.21	1.20	1.19	1.18	1.14	1.12	1.06
<b>100 ans</b>	1.34	1.33	1.31	1.29	1.28	1.27	1.24	1.21	1.14
<b>1000 ans</b>	1.67	1.65	1.63	1.61	1.59	1.58	1.55	1.51	1.43

Source : SMBT

Tableau 29 : Estimations de la surcote (en mètre NGF) borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %, au marégraphe de Sète (valeur maximale de numérisation) selon la durée de la surcote en heure et la période de retour de l'évènement

Durée et Période de retour	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	12h	24h
<b>6 mois</b>	0.58	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.51	0.50	0.46
<b>1 an</b>	0.72	0.71	0.70	0.69	0.68	0.67	0.64	0.63	0.58
<b>2 ans</b>	0.85	0.84	0.82	0.81	0.80	0.79	0.76	0.75	0.70
<b>5 ans</b>	1.01	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.92	0.90	0.84
<b>10 ans</b>	1.12	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.03	1.01	0.95
<b>2 ans</b>	1.24	1.22	1.21	1.19	1.18	1.17	1.14	1.11	1.05
<b>50 ans</b>	1.39	1.38	1.36	1.34	1.33	1.32	1.29	1.26	1.19
<b>100 ans</b>	1.51	1.49	1.47	1.46	1.44	1.43	1.40	1.37	1.29
<b>1000 ans</b>	1.89	1.86	1.84	1.82	1.81	1.79	1.76	1.72	1.63

Source : SMBT

**Tableau 30 : Estimations de la surcote (en mètre NGF) borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95 %, au marégraphe de Sète (valeur maximale de numérisation) selon la durée de la surcote en heure et la période de retour de l'évènement**

<b>Durée et Période de retour</b>	<b>1h</b>	<b>2h</b>	<b>3h</b>	<b>4h</b>	<b>5h</b>	<b>6h</b>	<b>9h</b>	<b>12h</b>	<b>24h</b>
<b>6 mois</b>	0.52	0.51	0.51	0.50	0.49	0.48	0.45	0.44	0.40
<b>1 an</b>	0.63	0.62	0.61	0.60	0.59	0.58	0.56	0.54	0.50
<b>2 ans</b>	0.72	0.71	0.70	0.69	0.68	0.67	0.64	0.63	0.58
<b>5 ans</b>	0.83	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78	0.75	0.73	0.68
<b>10 ans</b>	0.91	0.90	0.89	0.88	0.86	0.85	0.83	0.81	0.76
<b>2 ans</b>	0.99	0.98	0.97	0.95	0.94	0.93	0.90	0.88	0.83
<b>50 ans</b>	1.10	1.08	1.07	1.05	1.04	1.03	1.00	0.98	0.92
<b>100 ans</b>	1.18	1.16	1.15	1.13	1.12	1.11	1.08	1.05	0.99
<b>1000 ans</b>	1.45	1.43	1.41	1.39	1.38	1.37	1.34	1.31	1.24

Source : SMBT

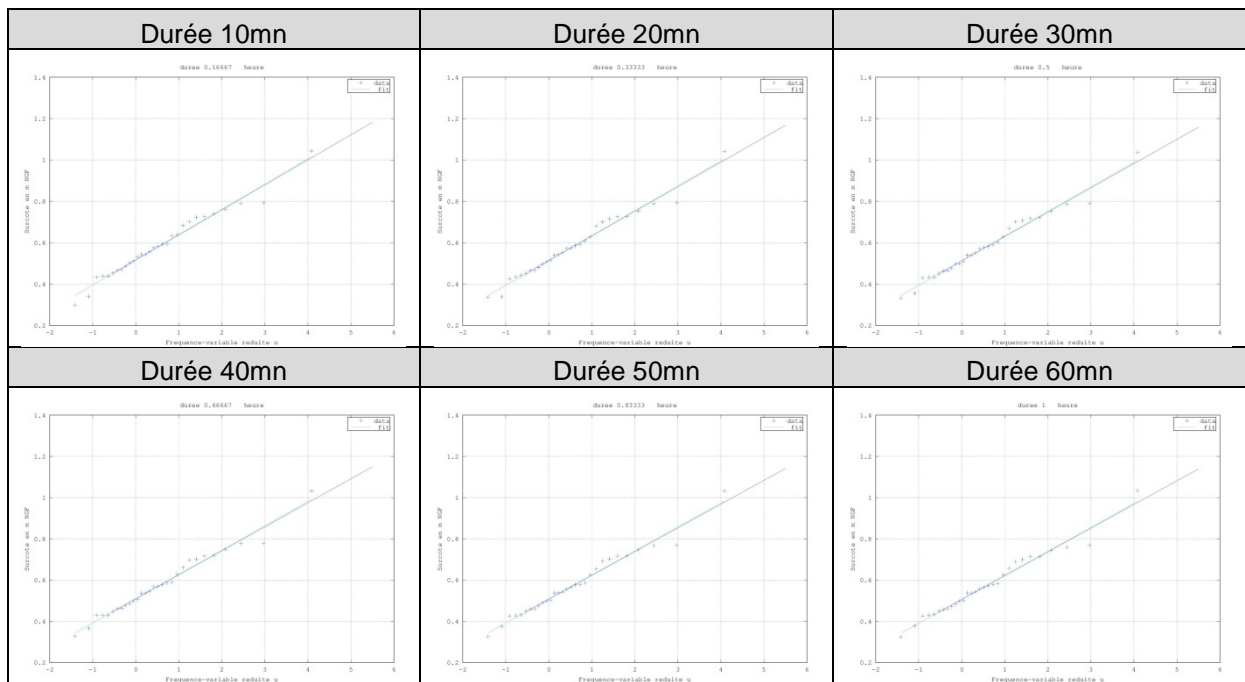


## RESULTATS D'ANALYSES DE SURCOTES A 10 MN (2004-2015)

Le maximum mesuré en surcote de 10 mn est de 1.103m NGF le 28 novembre 2014 à 12h10. A noter que 10 minutes avant et après, la surcote 10mn était proche de 10 cm en dessous. Un effet local, ou une onde infra gravitaire telle qu'une seiche peut éventuellement expliquer cette brutale surcote de 10 cm en moins de 10 minutes.

L'analyse porte sur un peu plus de 10 années de données, nous retiendrons les maximums trimestriels pour l'estimation de la loi de Gumbel.

Figure 37 : Ajustement par la méthode moments de la loi de Gumbel sur les surcotes maximum trimestrielle atteintes pour plusieurs durée de l'évènement de surcote sur les données du marégraphe à 10 mn de 2004 à 2015



Source : SMBT

Tableau 31 : Paramètres ajustés par la méthode des moments ainsi que moyenne ( $\mu$ ) et écart type de l'échantillon pour les différentes durées de surcote analysées

Durée/ paramètre	10mn	20mn	30mn	40mn	50mn	1h
<b>amoy</b>	0.5167466	0.514	0.51265	0.50936	0.50769	0.5065
<b>bmy</b>	0.1209441	0.11883	0.11738	0.11633	0.1152	0.11499
<b><math>\mu</math></b>	0.5865556	0.58258	0.5804	0.5765	0.57419	0.57288
<b>sig</b>	0.1551169	0.1524	0.15054	0.1492	0.14775	0.14748

Source : SMBT

Tableau 32 : Estimations de la surcote (en mètre NGF) au marégraphe de Sète à 10 mn, selon la durée de la surcote en minute et la période de retour de l'évènement

Durée et Période de retour	10mn	20mn	30mn	40mn	50mn	60mn
6 mois	0.56	0.56	0.56	0.55	0.55	0.55
1 an	0.67	0.66	0.66	0.65	0.65	0.65
2 ans	0.76	0.75	0.75	0.74	0.74	0.74
5 ans	0.88	0.87	0.86	0.85	0.85	0.85
10 ans	0.96	0.95	0.94	0.94	0.93	0.93
2 ans	1.05	1.03	1.03	1.02	1.01	1.01
50 ans	1.16	1.14	1.13	1.13	1.12	1.12
100 ans	1.24	1.23	1.22	1.21	1.20	1.20
1000 ans	1.52	1.50	1.49	1.47	1.46	1.46

Source : SMBT

Tableau 33 : Estimations de la surcote (en mètre NGF) borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %, au marégraphe de Sète à 10 mn, selon la durée de la surcote en minute et la période de retour de l'évènement

Durée et Période de retour	10mn	20mn	30mn	40mn	50mn	60mn
6 mois	0.59	0.58	0.58	0.58	0.58	0.57
1 an	0.71	0.70	0.70	0.69	0.69	0.69
2 ans	0.81	0.81	0.80	0.80	0.79	0.79
5 ans	0.95	0.94	0.93	0.93	0.92	0.92
10 ans	1.05	1.04	1.03	1.02	1.02	1.02
2 ans	1.15	1.14	1.13	1.12	1.11	1.11
50 ans	1.29	1.27	1.26	1.25	1.24	1.24
100 ans	1.39	1.37	1.36	1.34	1.34	1.33
1000 ans	1.71	1.69	1.67	1.66	1.64	1.64

Source : SMBT

Tableau 34 : Estimations de la surcote (en mètre NGF) borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95 au marégraphe de Sète à 10 mn, selon la durée de la surcote en minute et la période de retour de l'évènement

Durée et Période de retour	10mn	20mn	30mn	40mn	50mn	60mn
6 mois	0.53	0.53	0.53	0.53	0.52	0.52
1 an	0.63	0.62	0.62	0.62	0.61	0.61
2 ans	0.71	0.70	0.70	0.69	0.69	0.69
5 ans	0.80	0.79	0.79	0.78	0.78	0.78
10 ans	0.87	0.86	0.86	0.85	0.84	0.84
2 ans	0.94	0.93	0.92	0.92	0.91	0.91
50 ans	1.03	1.02	1.01	1.00	1.00	0.99
100 ans	1.10	1.08	1.08	1.07	1.06	1.06
1000 ans	1.33	1.31	1.30	1.29	1.28	1.28

Source : SMBT

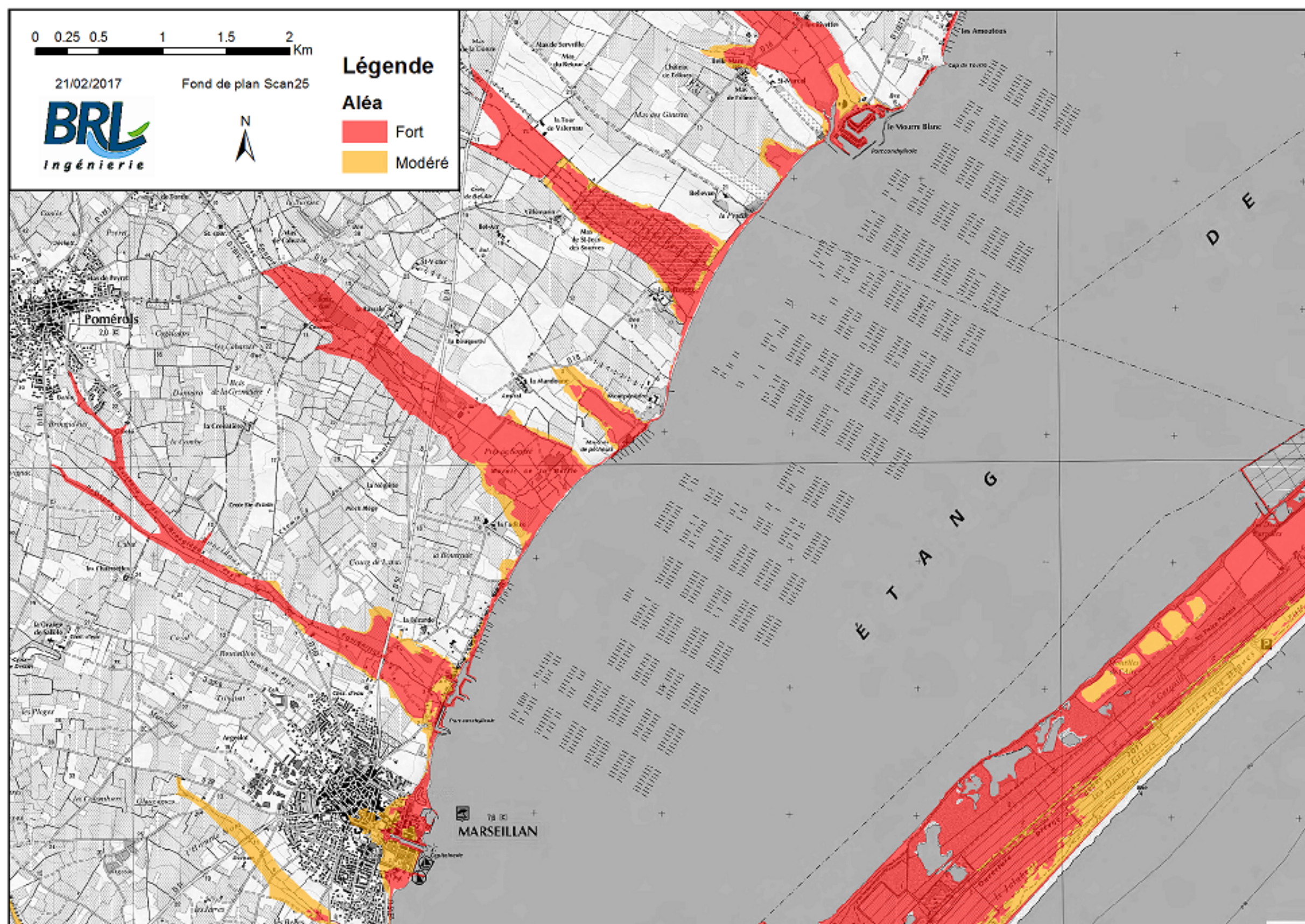
## Annexe 2 : Aléas PPRI







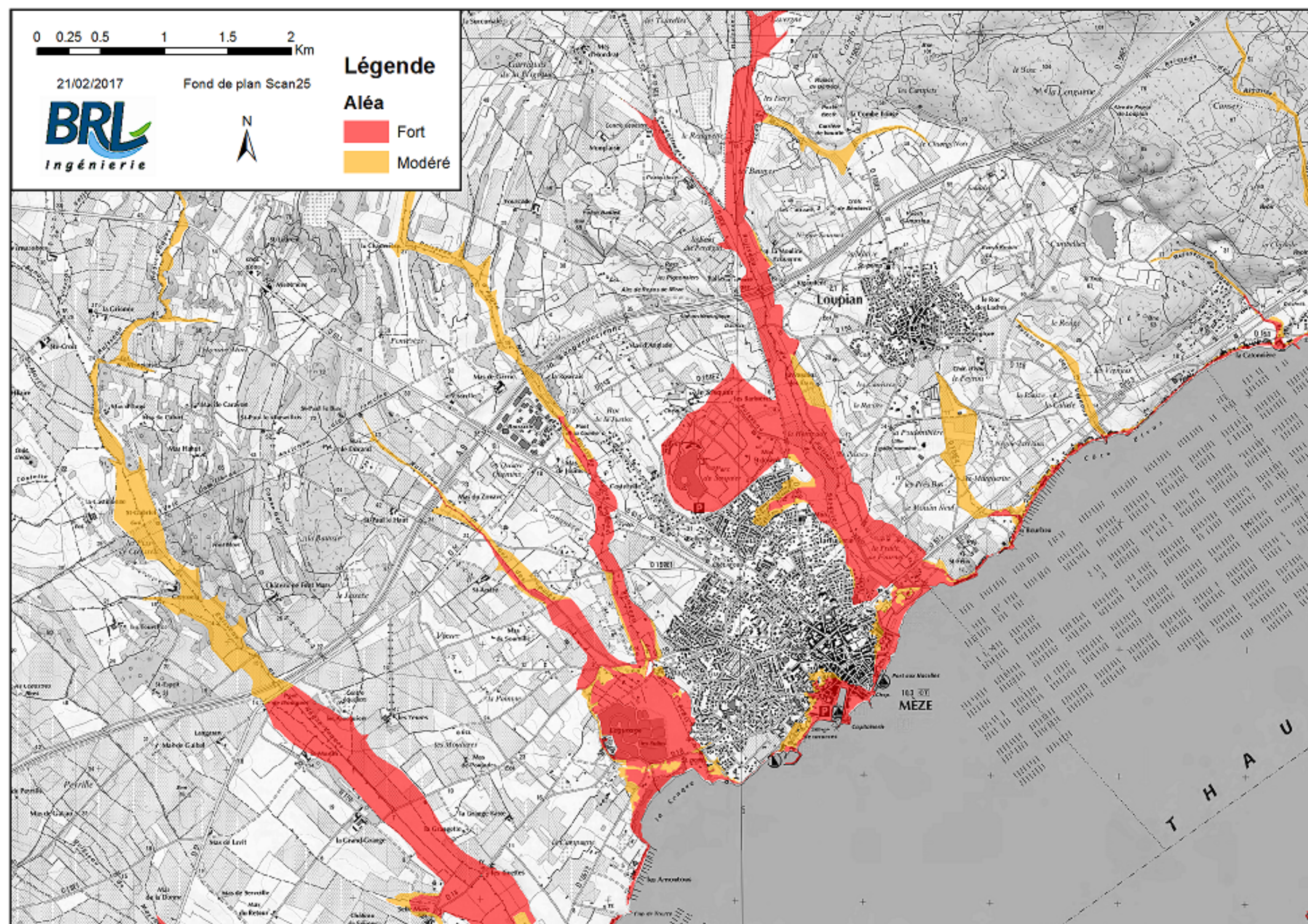
Figure 39 : Aléas PPRI 2/7



Source : DDTM, BRL



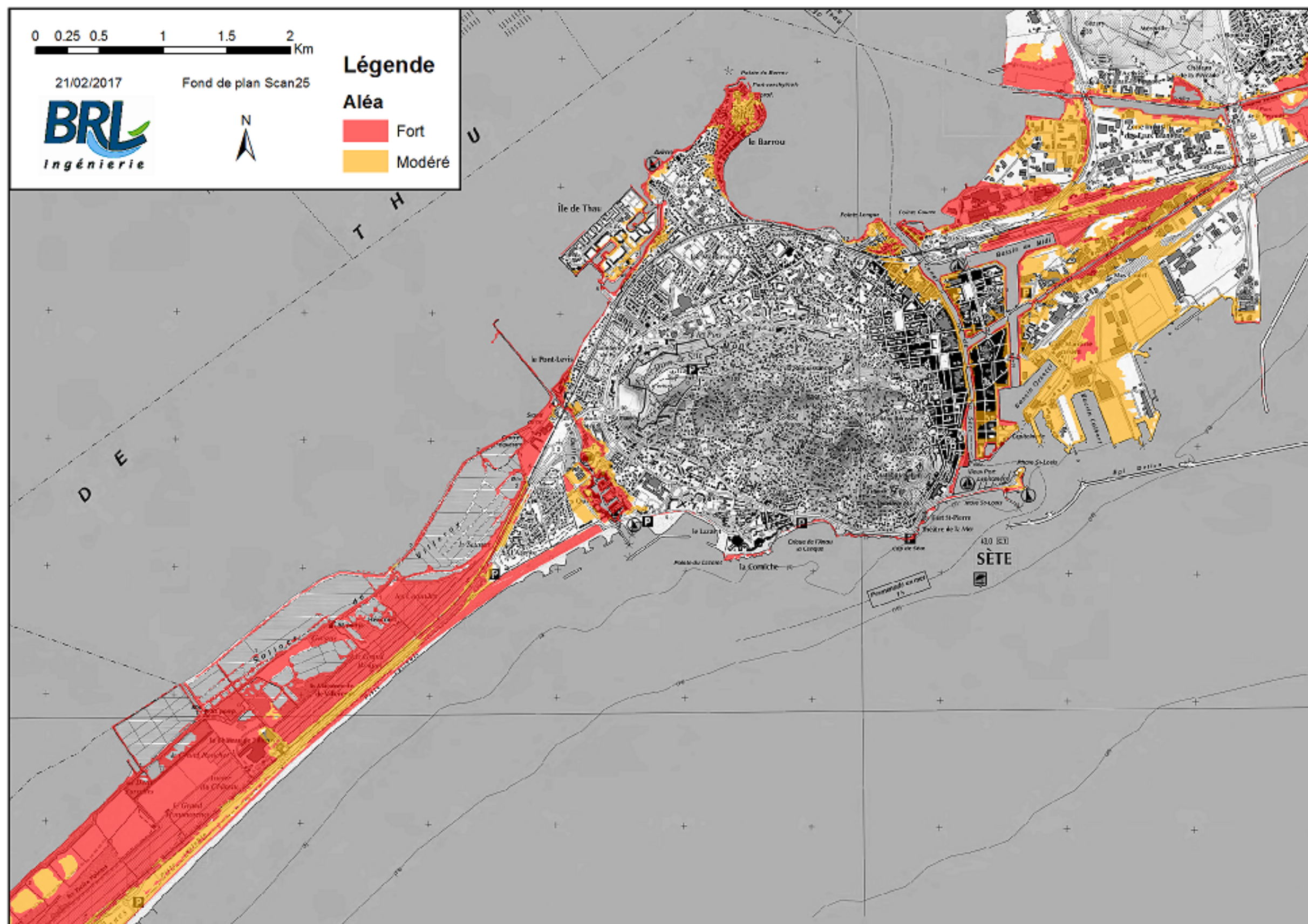
Figure 40 : Aléas PPRI 3/7



Source : DDTM, BRLi



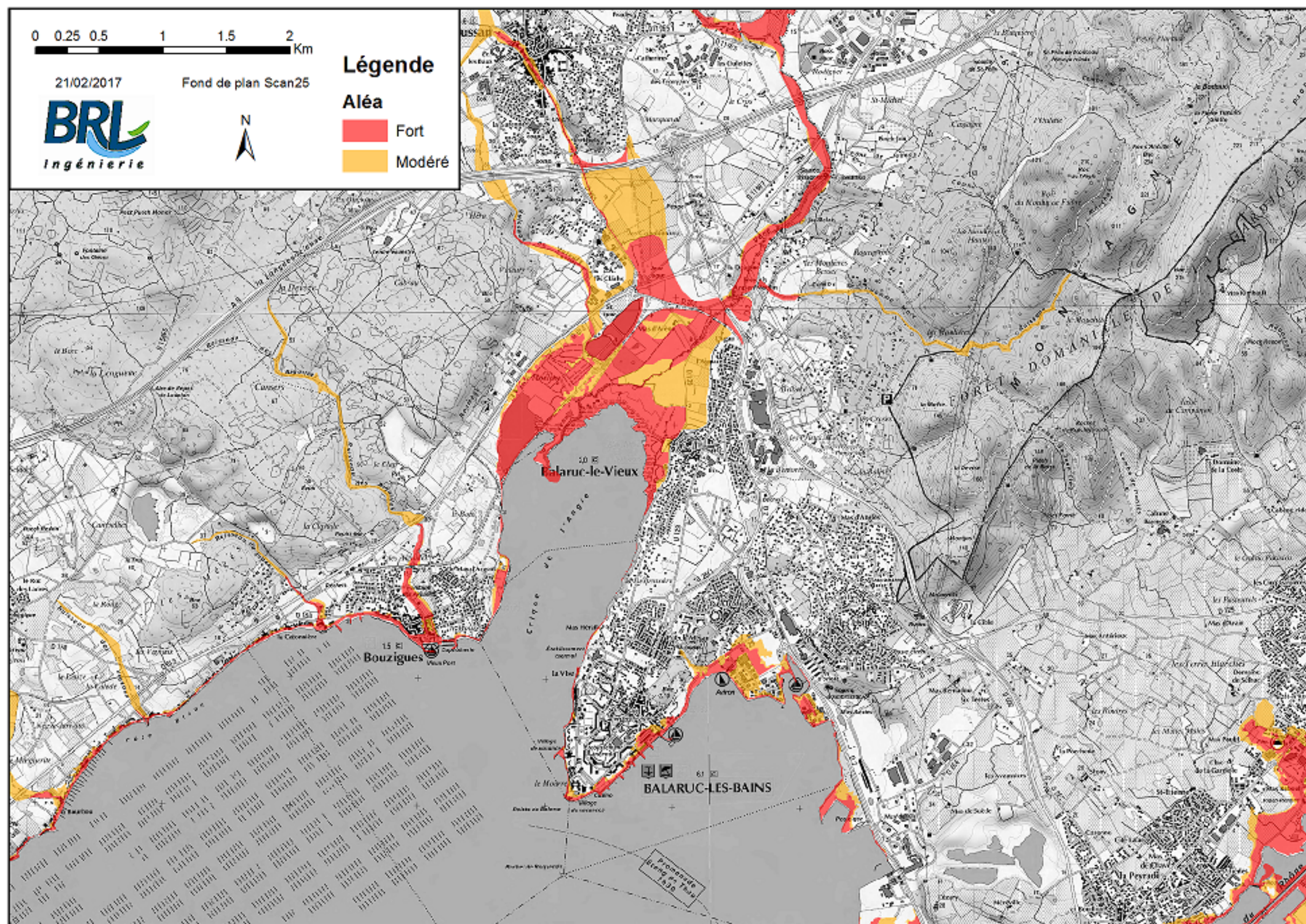
Figure 41 : Aléas PPRI 4/7



Source : DDTM, BRLi



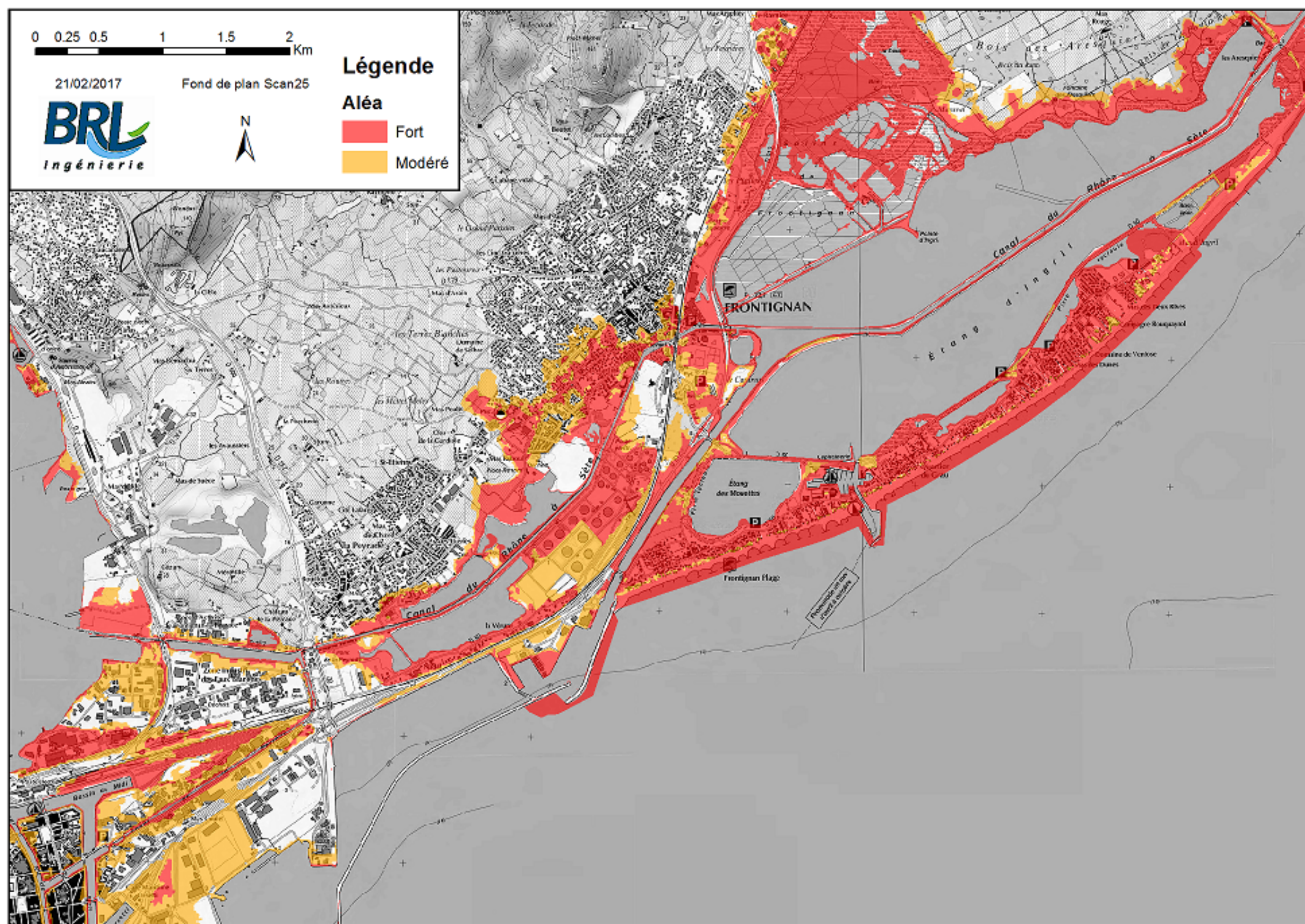
Figure 42 : Aléas PPRI 5/7



Source : DDTM, BRLi



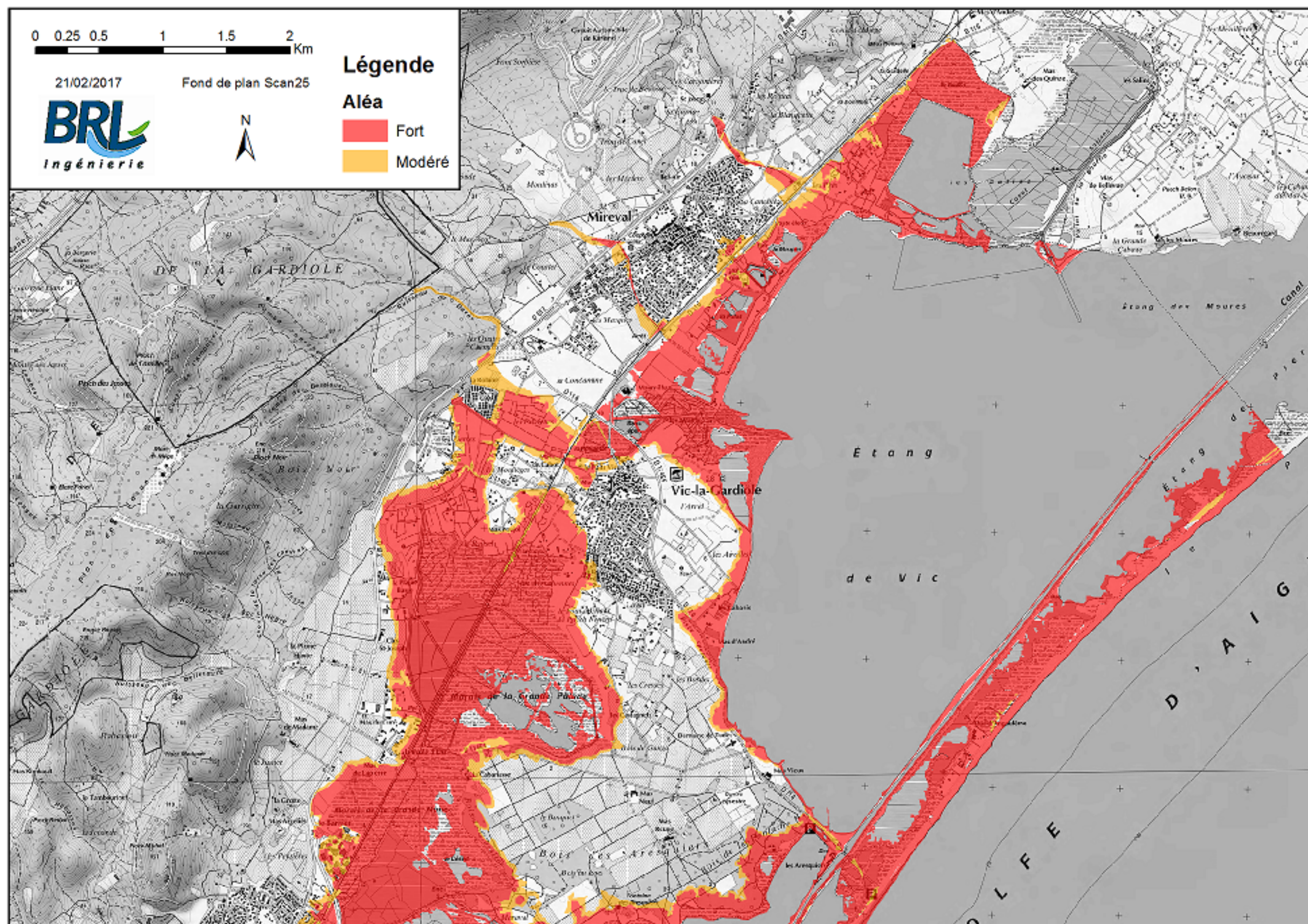
Figure 43 : Aléas PPRI 6/7



Source : DDTM, BRLi



Figure 44 : Aléas PPRI 7/7



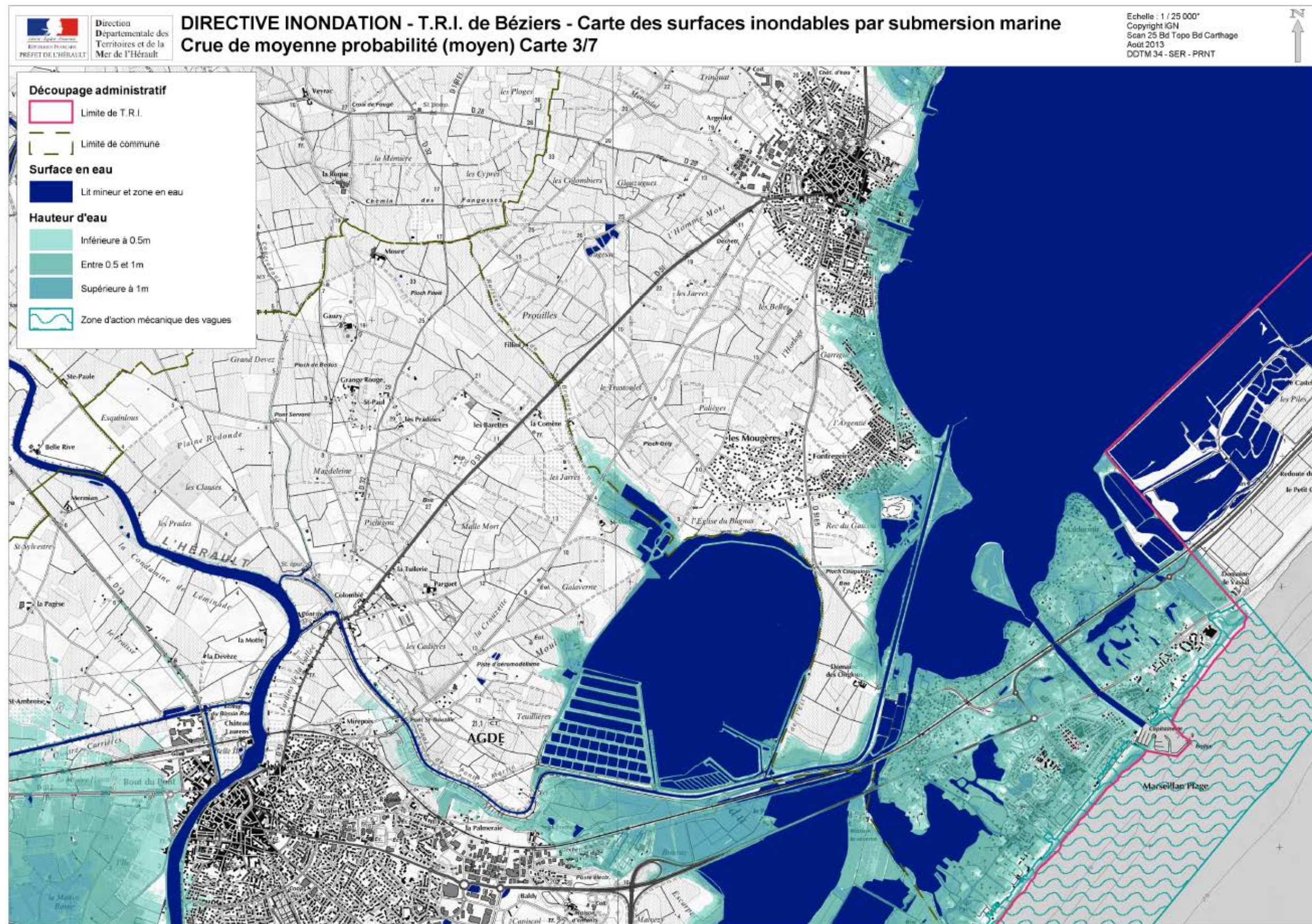
Source : DDTM, BRLi



## Annexe 3 : TRI scénario moyen



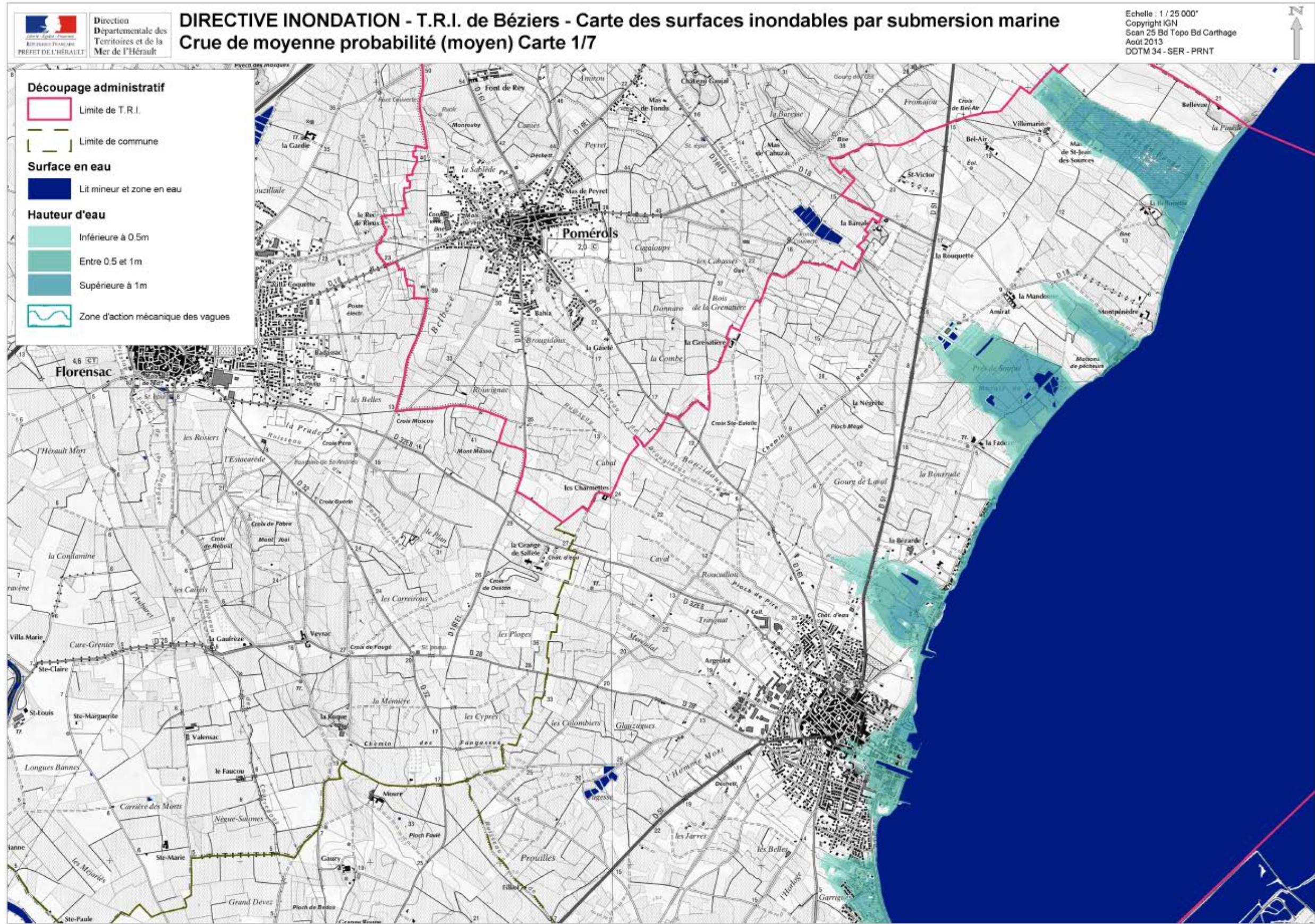
Figure 45 : TRI scénario moyen 1/8



Source : TRI Béziers



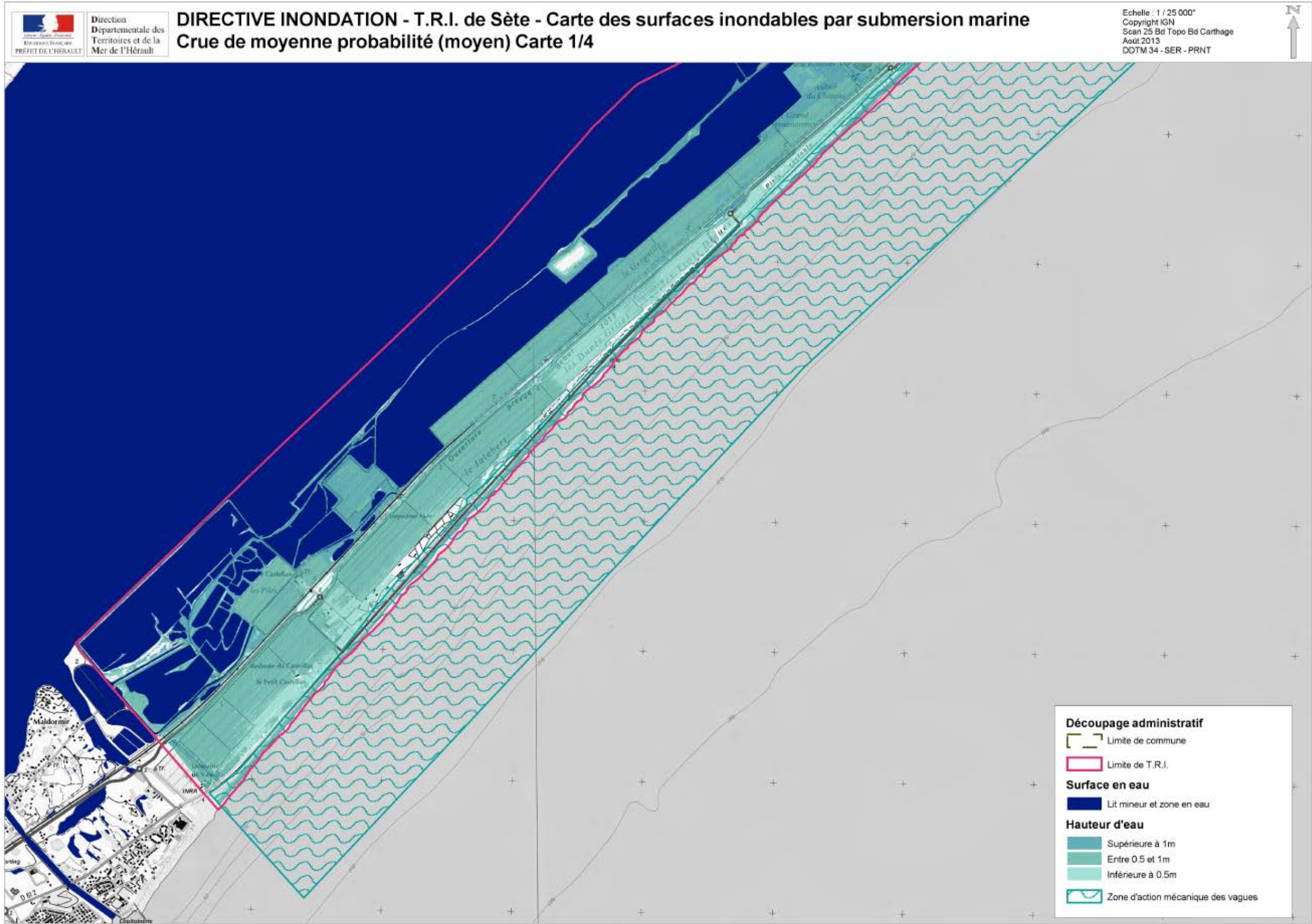
Figure 46 : TRI scénario moyen 2/8



Source : TRI Béziers



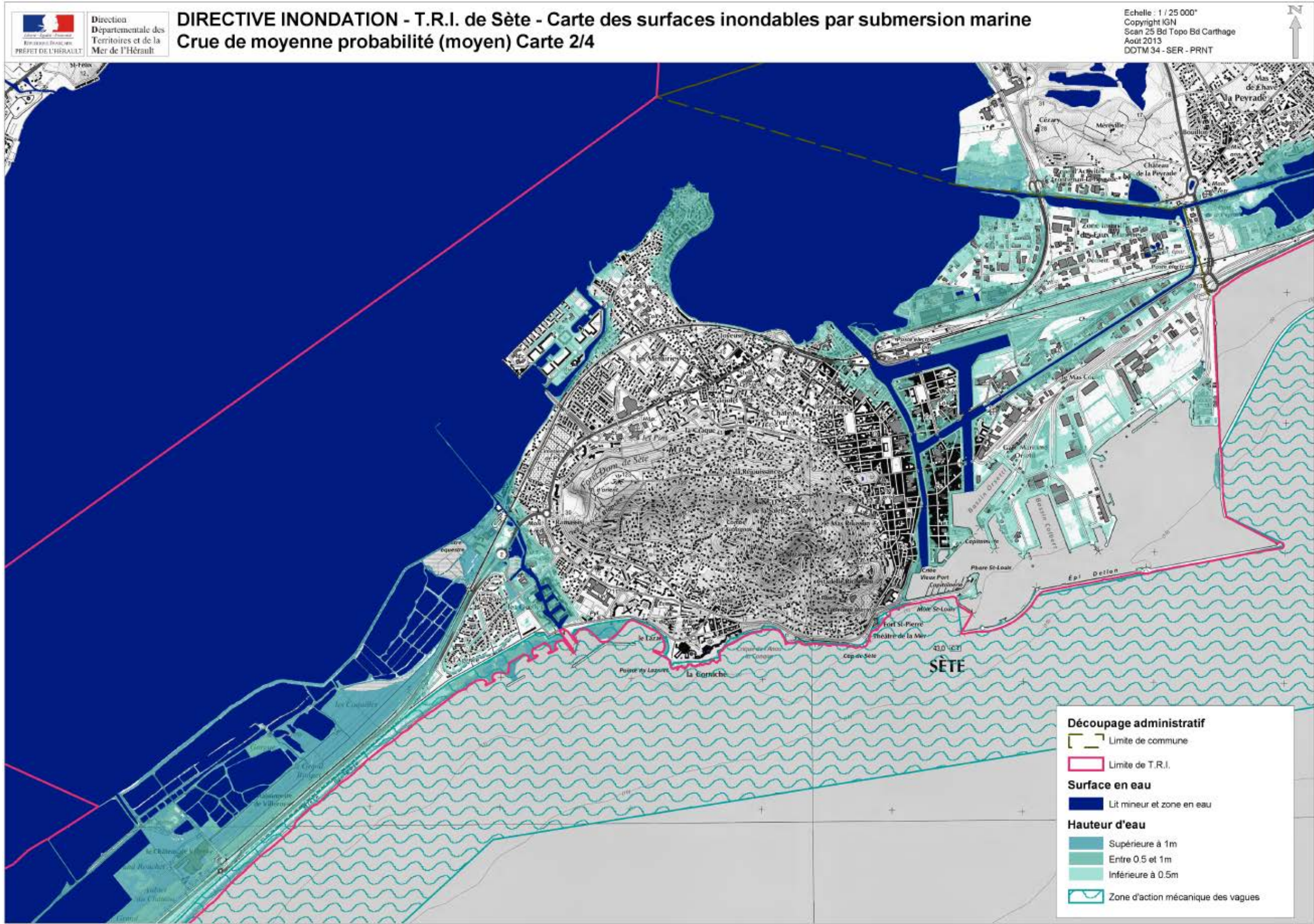
Figure 47 : TRI scénario moyen 3/8



Source : TRI Sète



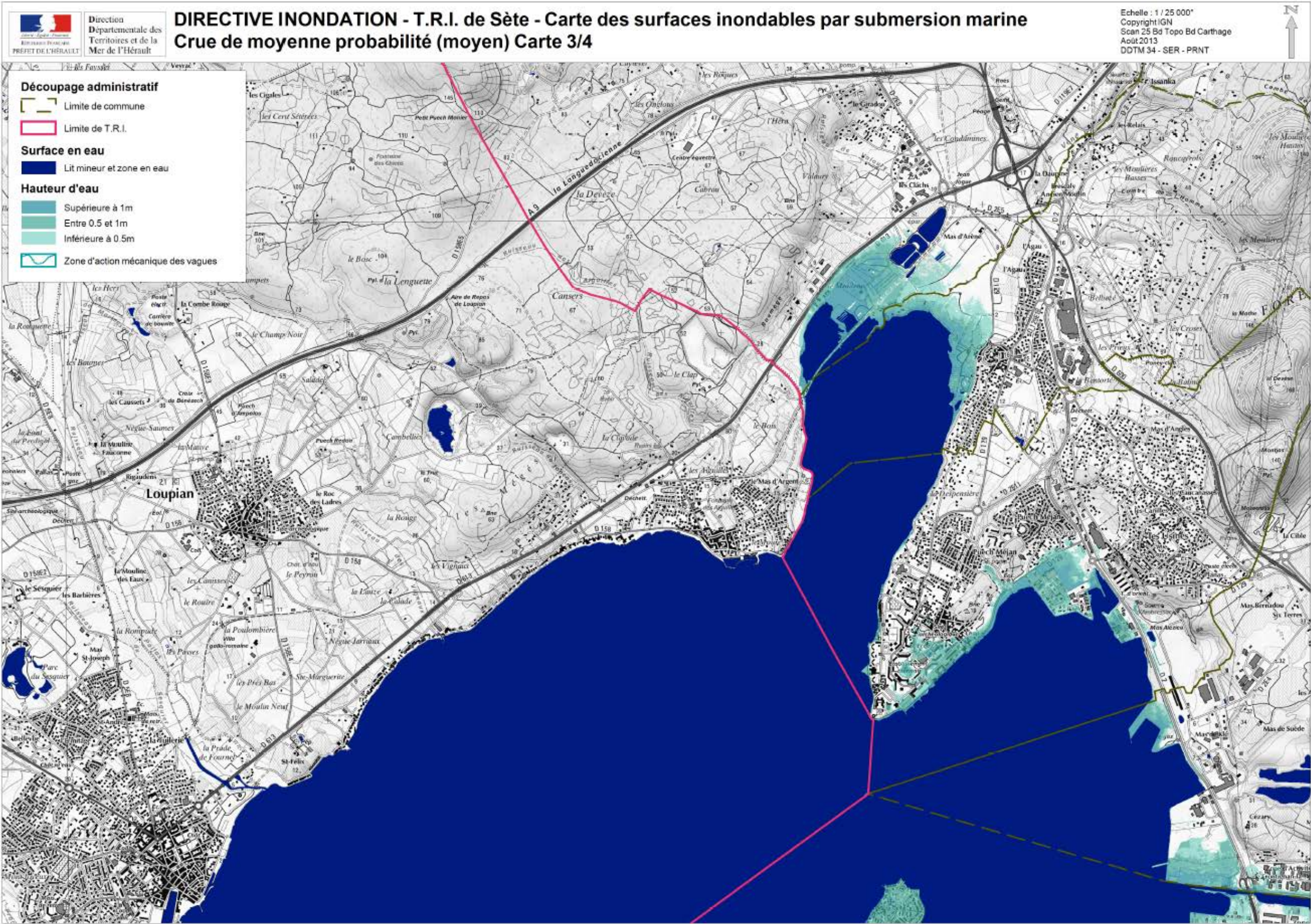
Figure 48 : TRI scénario moyen 4/8



Source : TRI Sète



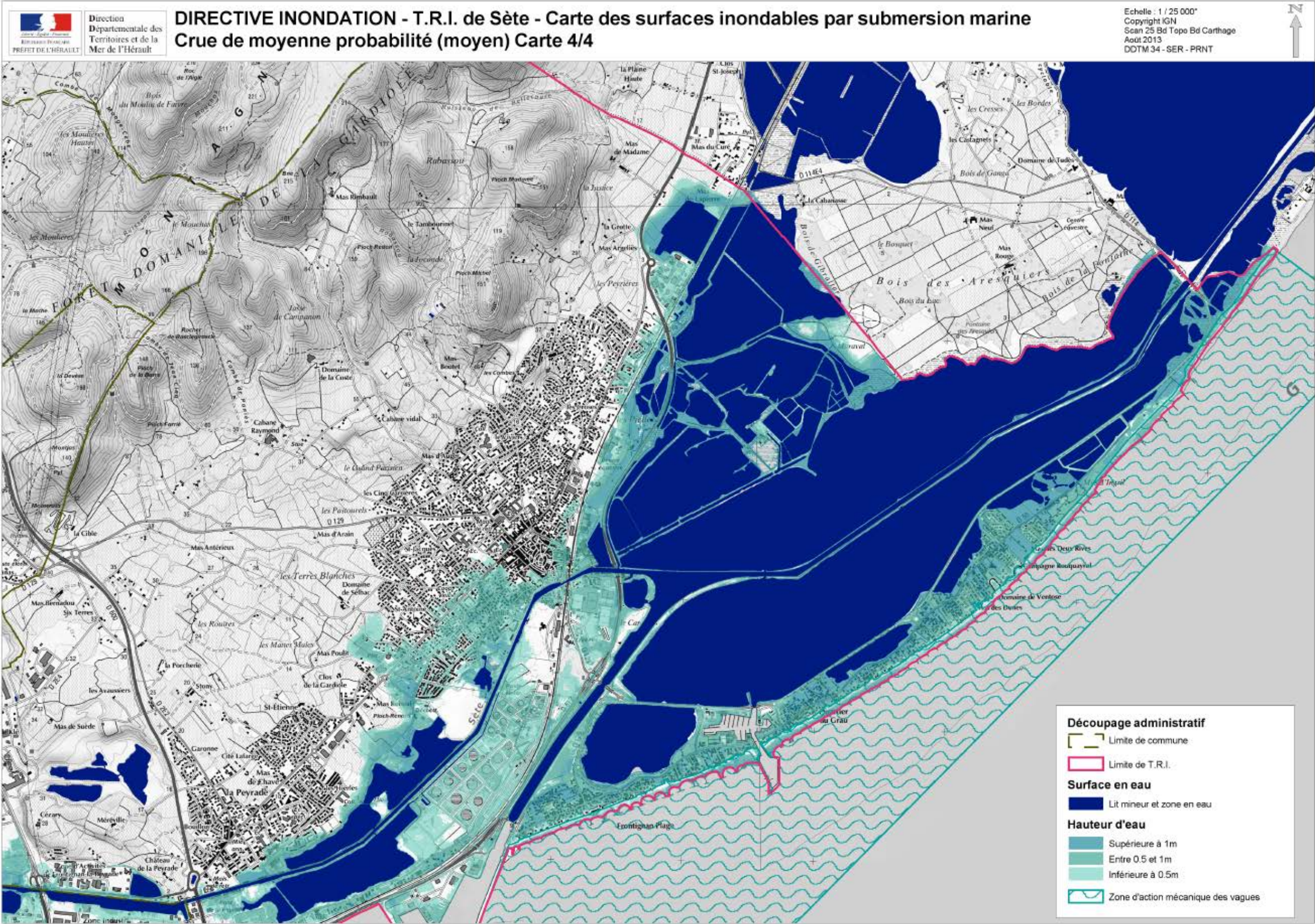
Figure 49 : TRI scénario moyen 5/8



Source : TRI Sète



Figure 50 : TRI scénario moyen 6/8



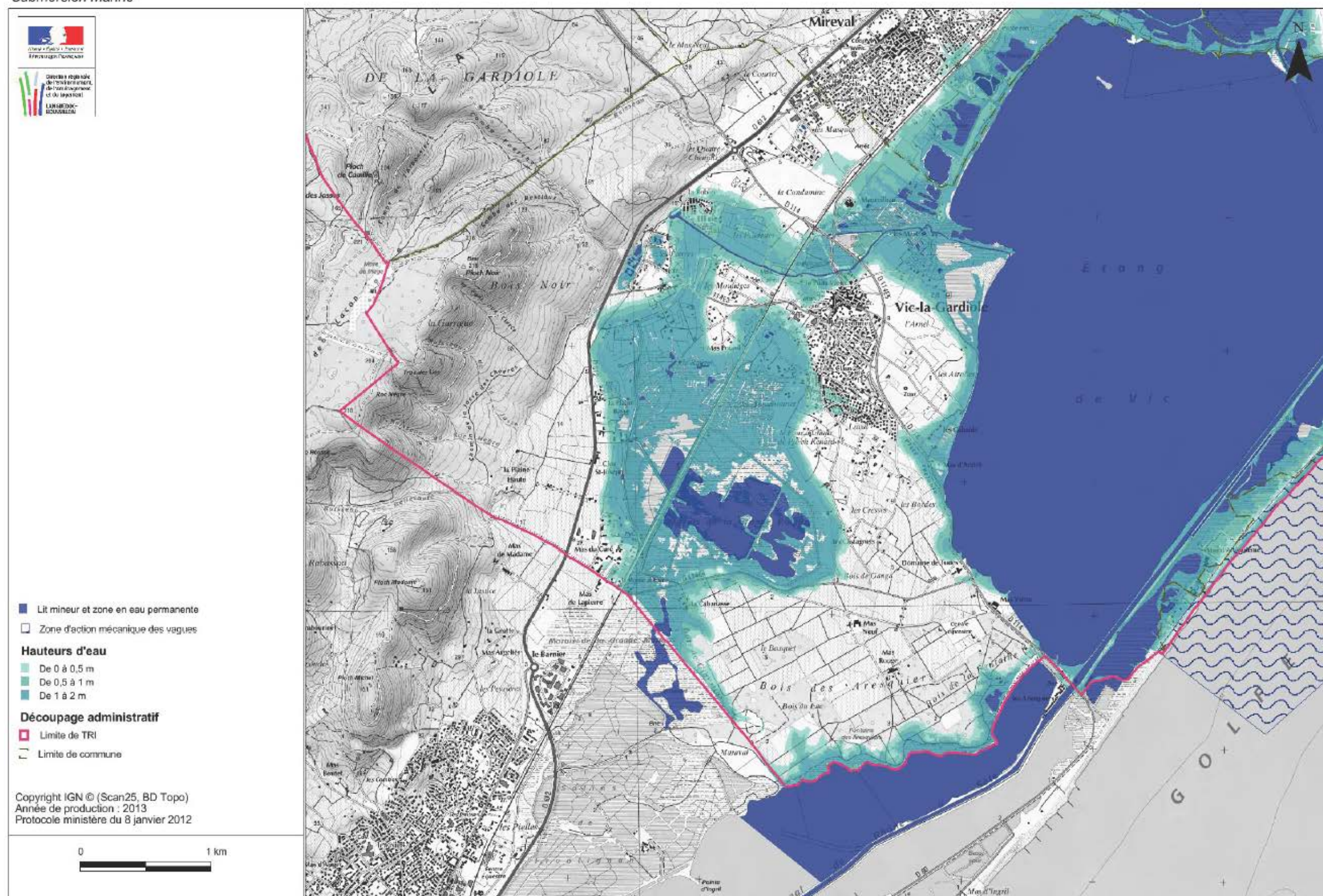
Source : TRI Sète



Figure 51 : TRI scénario moyen 7/8

**CARTE DES SURFACES INONDABLES**

Submersion marine

**TRI de MONTPELLIER - Secteur 1****SCENARIO MOYEN**

Source : TRI Montpellier

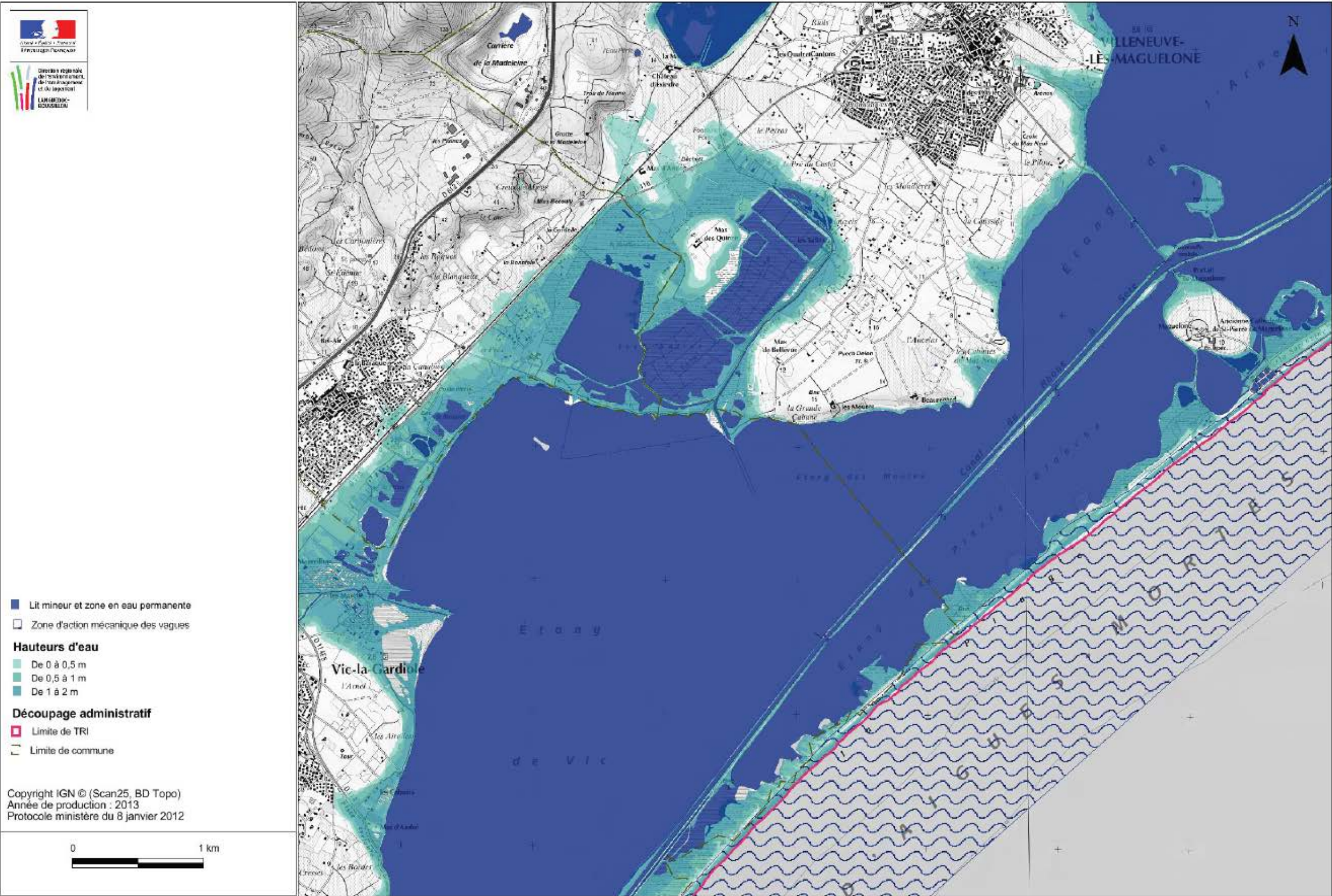


Figure 52 : TRI scénario moyen 8/8

CARTE DES SURFACES INONDABLES  
Submersion marine

TRI de MONTPELLIER - Secteur 2

SCENARIO MOYEN

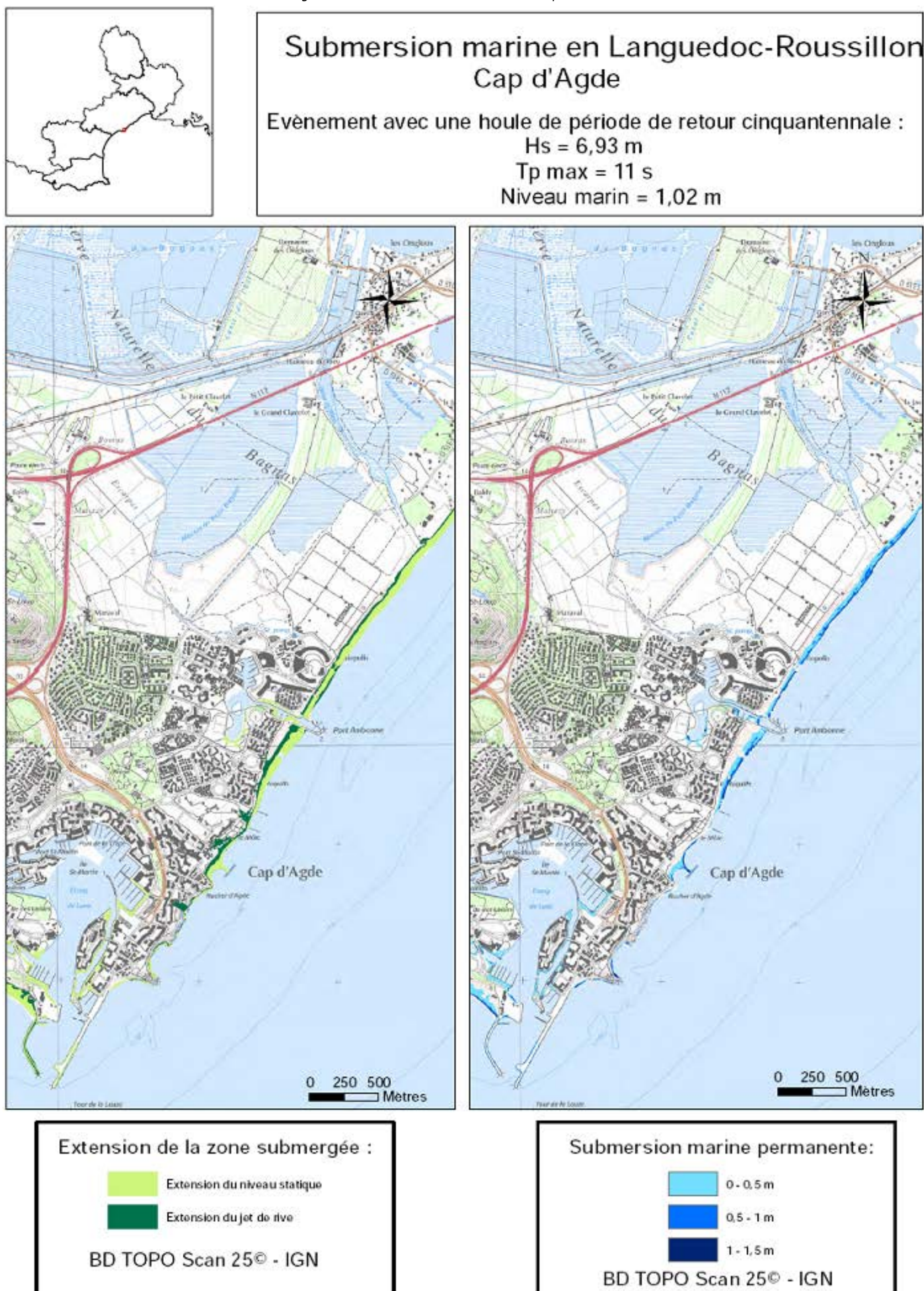


Source : TRI Montpellier

## **Annexe 4 : Atlas BRGM évènement cinquantennale**



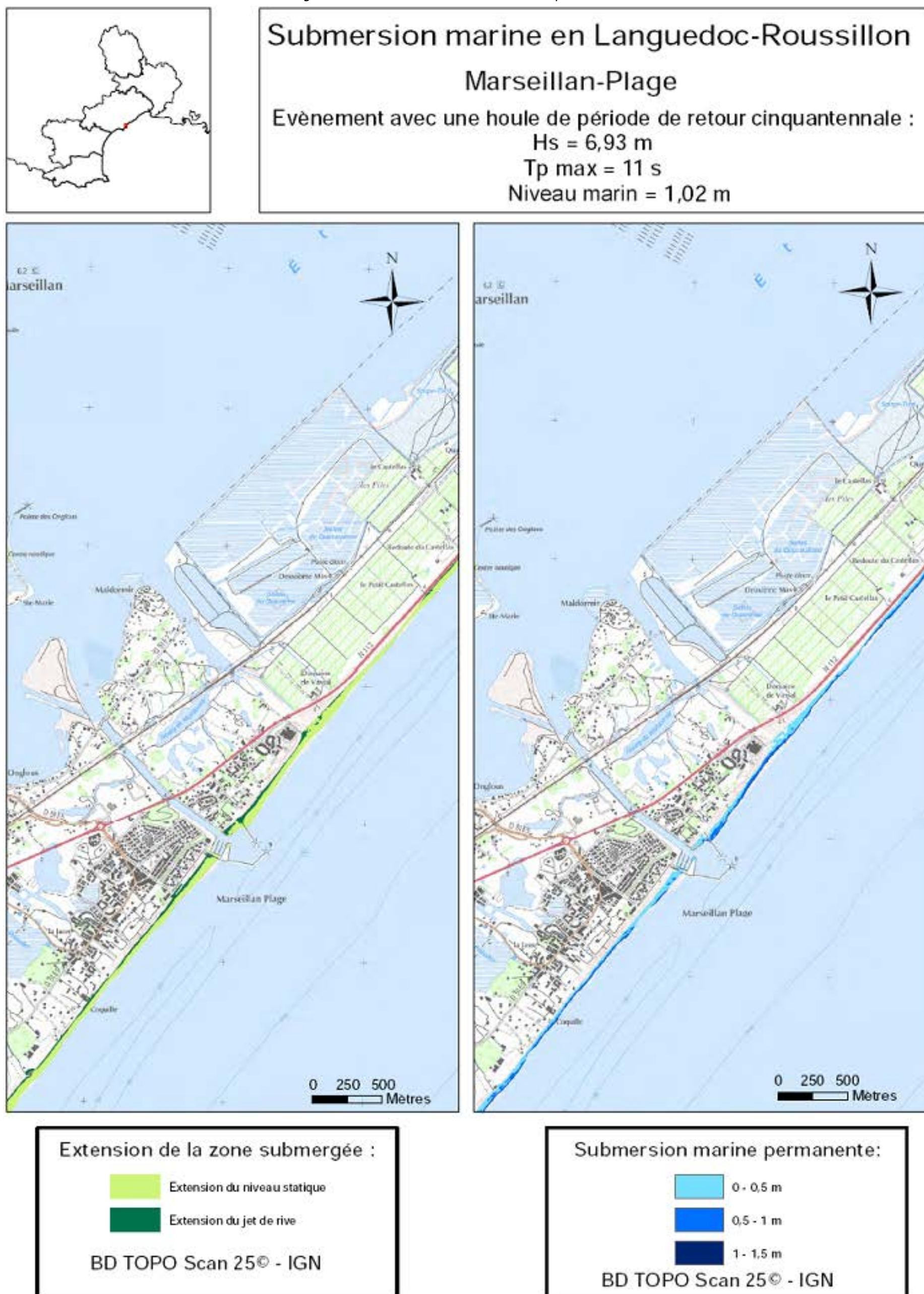
Figure 53 : Planche atlas BRGM évènement cinquantennale 1/7



Source : BRGM



Figure 54 : Planche atlas BRGM évènement cinquantennale 2/7



Source : BRGM





Figure 55 : Planche atlas BRGM évènement cinquantennale 3/7





Figure 56 : Planche atlas BRGM événement cinquantennale 4/7

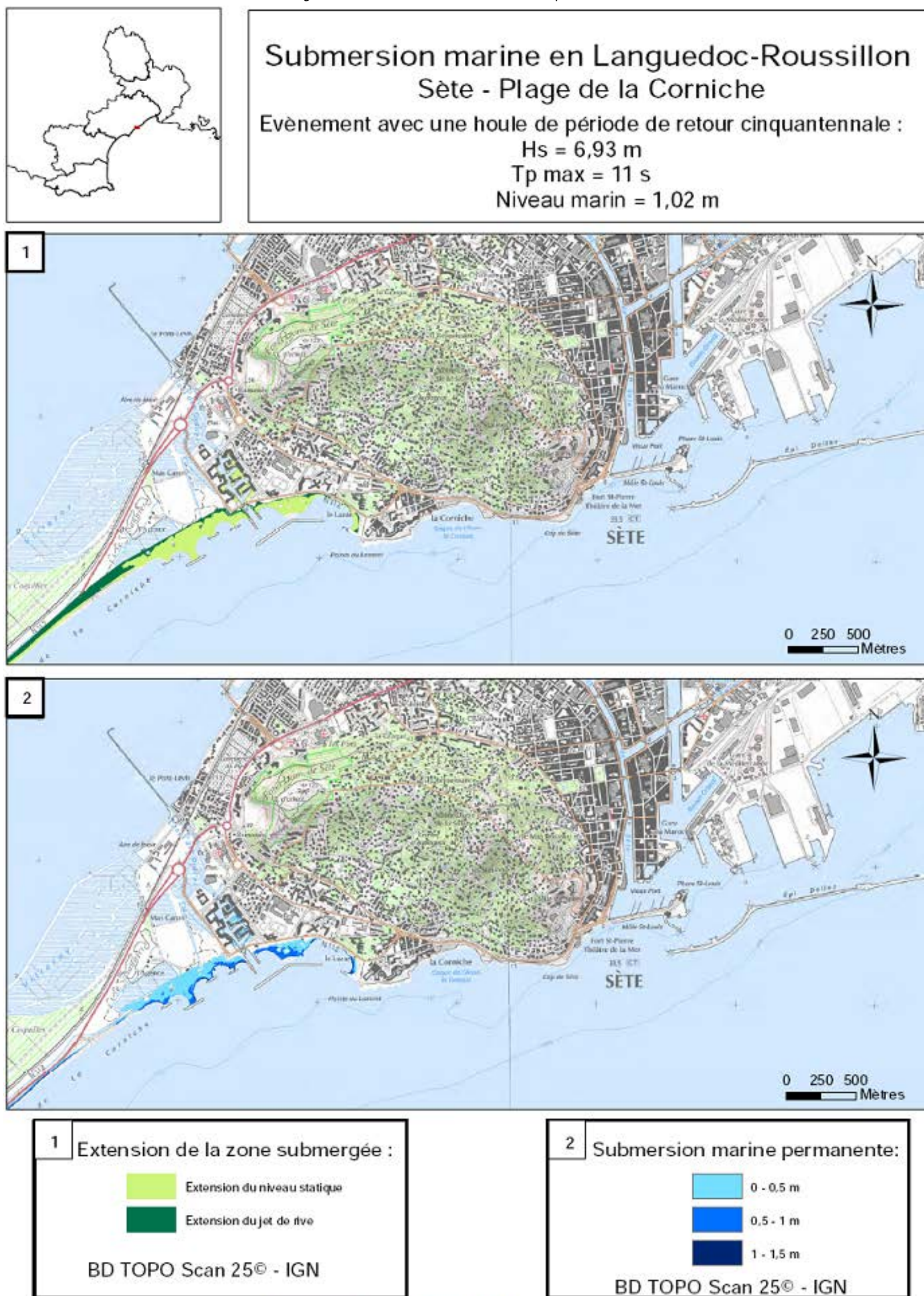


Source : BRGM





Figure 57 : Planche atlas BRGM évènement cinquantennale 5/7



Source : BRGM



Figure 58 : Planche atlas BRGM évènement cinquantennale 6/7

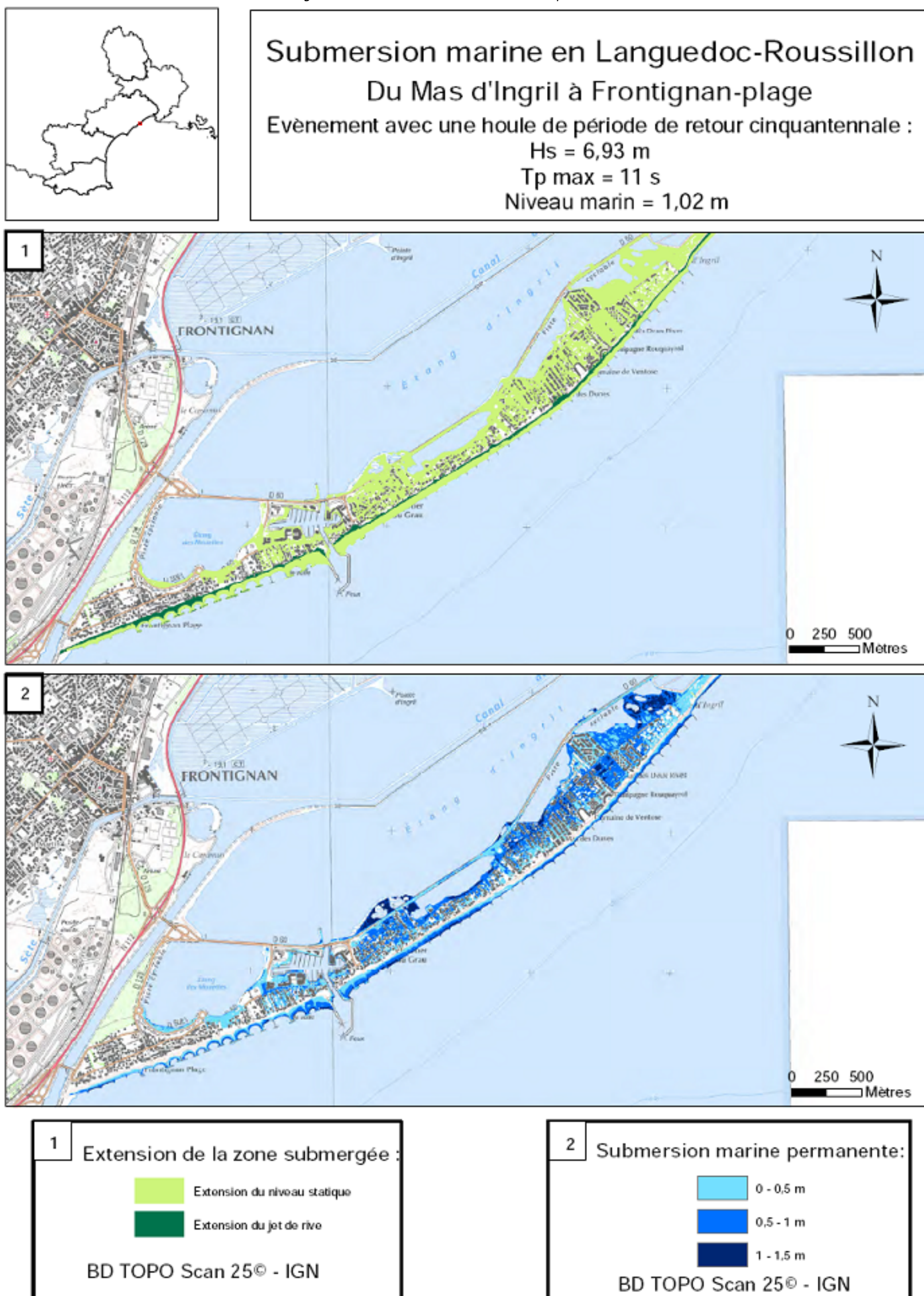
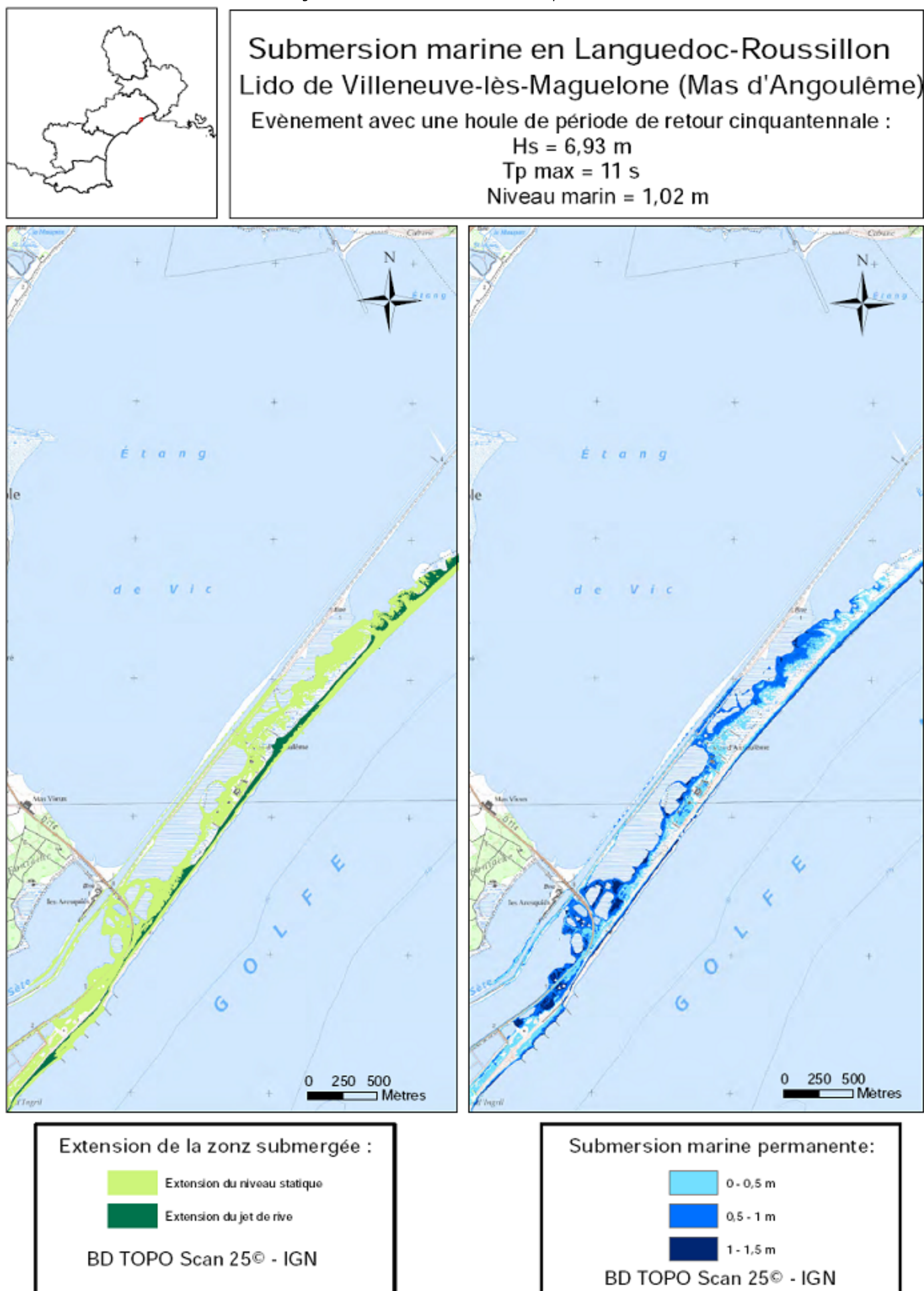




Figure 59 : Planche atlas BRGM évènement cinquantennale 7/7



Source : BRGM