

Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL du Bassin d'Arcachon (Gironde)

Approche « statique » à titre informatif pour la cartographie des aléas « actuel » et « 2100 » sans ouvrage

Rapport final

BRGM/RP-62187-FR

Février 2014

Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL du Bassin d'Arcachon (Gironde)

Approche « statique » à titre informatif pour la cartographie des aléas « actuel » et « 2100 » sans ouvrage

Rapport final

BRGM/RP-62187-FR
Février 2014

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM PSP11AQI24

J. Mugica, R. Pedreros, F. Paris, M. Garcin
avec la collaboration de C. Oliveros

Vérificateur :

Nom : C. OLIVEROS

Date : 14/03/2014



Approbateur :

Nom : N. PEDRON

Date : 18/03/2014



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Avertissement

Le tirage initial de ce rapport, en nombre fixé par convention, est diffusé à son commanditaire. Sa communicabilité ultérieure à des tiers est liée à la prise d'une décision administrative formelle à laquelle il concourt, conformément à la loi n°78-753 du 17 Juillet 1978. Passé ce délai, ce rapport devient communicable à tout tiers extérieur qui en ferait la demande ; le BRGM ne peut plus être tenu comme responsable de l'usage qui pourrait en être fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Mots-clés : PPRL, Submersion marine, cartographie, aléas, évènement de référence, Bassin d'Arcachon

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Mugica J., Pedreros R., Paris F., Garcin M. avec la collaboration de Oliveros C. (2014) - Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL du Bassin d'Arcachon (Gironde). Approche « statique » à titre informatif pour la cartographie des aléas « actuel » et « 2100 » sans ouvrage. Rapport final. BRGM/RP-62187-FR, 70 p., 53 fig., 4 tab., 6 ann., 1 CD.

Synthèse

Comme suite à la prescription des Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) entre novembre 2010 et février 2011 en Aquitaine, le BRGM a été chargé par la DREAL Aquitaine et les DDTM de la Gironde, des Landes et des Pyrénées Atlantiques de caractériser l'aléa submersion marine sur les secteurs concernés. Dans ce présent rapport réalisé dans le cadre de la convention de recherche et développement partagés signée par le BRGM et la DDTM de la Gironde le 14/11/2011 (projet BRGM PSP11AQI24), les secteurs de la Gironde sont traités conformément aux recommandations méthodologiques (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011). Il s'agit des 11 communes du Bassin d'Arcachon : Andernos-Les-Bains, Arcachon, Arès, Audenge, Biganos, Gujan-Mestras, Lanton, La-Teste-de-Buch, Lège-Cap-Ferret, Le Teich, Mios. Les autres secteurs en Aquitaine sont traités séparément (un rapport par département).

Cette étude a fait l'objet d'une première phase dans laquelle les niveaux marins de référence au rivage ont été déterminés sur tout le pourtour du Bassin d'Arcachon (rapport BRGM/RP-61 408-FR). Conformément aux recommandations méthodologiques (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011), ils intègrent une surcote de 20 cm rajoutée au large pour une première prise en compte de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique ainsi qu'une marge liée à l'incertitude de la méthode estimée à 15 cm. Les valeurs des niveaux marins de référence sont comprises entre 3,62 m/NGF et 3,98 m/NGF.

Ce rapport présente la deuxième phase de l'étude qui concerne la cartographie des aléas submersion marine suivants :

- **l'aléa dit « actuel sans ouvrage » caractérisé pour un « scénario en l'absence d'ouvrage »**, c'est-à-dire avec arasement des ouvrages de protection côtière.
- **l'aléa « 2100 sans ouvrage » caractérisé pour un « scénario à échéance 100 ans »**. Pour cet aléa, le niveau marin correspond au niveau marin de référence auquel une surcote de 40 cm est ajoutée au large afin de prendre en compte l'élévation du niveau marin liée au changement climatique. Les valeurs sont comprises entre 4,02 m/NGF et 4,38 m/NGF.

Pour cette deuxième phase dans laquelle les aléas dits « naturels » sont caractérisés, une approche « statique » est mise en œuvre conformément aux recommandations méthodologiques (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011). Cette approche consiste à projeter sur la topographie (issue des levés Lidar de 2005 du SIBA) :

- Soit, selon la méthode « topo/niveau », le niveau marin au rivage (altitude NGF) de l'évènement naturel de référence. Cette méthode a été appliquée sur l'ensemble des communes du Bassin d'Arcachon, à l'exception des secteurs de « La Chapelle » (commune d'Arcachon) et de « Bélisaire-Morava » (commune Lège-Cap-Ferret) ;
- Soit, selon la méthode « topo/volume », le niveau (altitude NGF) d'eau atteint par les volumes d'eau pénétrants à terre calculés pour l'évènement naturel de référence. Cette méthode a été appliquée sur le secteur de « La Chapelle » (commune d'Arcachon) et le secteur de « Bélisaire-Morava » (commune Lège-Cap-Ferret).

Sur le Bassin d'Arcachon, 3 niveaux d'aléa (faible, modéré et fort) ont été définis en fonction de la hauteur d'eau à terre produite par la submersion et de la dynamique de submersion estimée à dire d'expert.

Les résultats de la cartographie ont été affinés, corrigés et vérifiés par une analyse d'expert sur la base d'une visite de terrain (5 au 8 novembre 2012) et de la connaissance des événements historiques (étude du CETE SO de novembre 2012 et rapport BRGM/RP-58723-FR) ainsi que de l'analyse critique des outils et données utilisées.

La totalité des communes du pourtour du Bassin d'Arcachon (excepté la commune de Mios) sont soumises à des degrés divers, à l'aléa submersion marine.

Conformément aux recommandations méthodologiques (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011), la cartographie de l'aléa submersion marine a été réalisée à une échelle au 1/25 000.

La cartographie ainsi produite à titre informatif par une approche « statique » pourra être affinée dans une troisième phase de l'étude par une approche plus précise (« dynamique » par exemple) pour caractériser l'aléa de référence en prenant en compte des hypothèses sur les structures de protection. Elle fera l'objet d'un rapport séparé.

Sommaire

1. Contexte et objectifs de l'étude.....	11
1.1. CADRE DE L'ETUDE.....	11
1.2. CONTEXTE REGLEMENTAIRE	11
1.3. PRINCIPE DE LA METHODOLOGIE GLOBALE	12
1.4. DEROULEMENT ET SUIVI DE L'ETUDE	13
2. Evènements historiques	15
2.1. ENREGISTREMENT DES NIVEAUX MARINS LORS DES EVENEMENTS HISTORIQUES	15
2.2. INFORMATIONS SUR LES SUBMERSIONS MARINES PASSEES	15
3. Données topographiques utilisées : LIDAR 2005 (SIBA).....	19
4. Présentation des scénarios étudiés.....	23
4.1. DEFINITION DES NIVEAUX MARINS DE REFERENCE POUR L'ALEA « ACTUEL SANS OUVRAGE » ET DE L'ALEA « 2100 SANS OUVRAGE »	23
4.2. DETERMINATION DE L'EVENEMENT NATUREL DE REFERENCE : RAPPELS DE LA PREMIERE PHASE DE L'ETUDE.....	23
4.3. PRISE EN COMPTE DES OUVRAGES DE PROTECTION CONTRE LA SUBMERSION MARINE.....	26
5. Description de la méthode de cartographie	29
5.1. PRINCIPE GENERAL	29
5.2. METHODE « TOPO/NIVEAU » : CALCUL DE LA SUBMERSION PAR SUPERPOSITION DU NIVEAU MARIN DE REFERENCE A LA TOPOGRAPHIE	30
5.3. METHODE « TOPO/VOLUME » : CALCUL DE LA SUBMERSION PAR LA METHODE DES VOLUMES PENETRANT A TERRE	30
5.3.1. Calcul des volumes d'eau pénétrant à terre	31
5.3.2. Calcul de l'altitude du plan d'eau correspondante aux volumes pénétrant à terre	35
5.4. LES DIFFERENTES ETAPES DE LA CARTOGRAPHIE	36
5.5. MODALITES DE PRISE EN COMPTE DES PARTICULARITES LOCALES	40
5.5.1. Seuils topographiques	40
5.5.2. Remblais et Connexions hydrauliques	43
5.5.3. Effet des vagues	47

5.5.4. Zones hautes isolées.....	48
6. Cartographie des aléas.....	51
6.1. QUALIFICATION DE L'ALEA	51
6.2. SECTEURS SOUMIS AU DEBORDEMENT.....	52
6.2.1. La méthode « topo/volume »	53
6.2.2. La méthode « topo/niveau »	60
6.3. ZONAGE DE L'ALEA CLAPOT ET VAGUES	61
6.4. COMPARAISON AUX EVENEMENTS HISTORIQUES.....	61
6.5. CARTOGRAPHIE DES ZONES HAUTES ISOLEES, REMBLAIS ET SEUILS TOPOGRAPHIQUES.....	63
7. Conclusion	69
8. Références bibliographiques	71

Liste des figures

Figure 1 : Recensement des zones inondées lors d'évènements de tempête passés 1882 - 2008.....	16
Figure 2 : Hauteurs d'eau mesurés à partir des laisses de mer et des traces sur les murs (Xynthia 28/02/2010).....	17
Figure 3 : Zones encore immergées 2 jours après la tempête Xynthia (28/02/2010), Claouey à gauche, Gujan-Mestras à droite en exemple.	17
Figure 4 : Dépôts de sables et de vase	17
Figure 5 : Emprise géographique des données Lidar de 2005 du SIBA.	20
Figure 6 : Coupe topographique longitudinale du Lidar de résolution 2 m sur un tronçon de voirie.	21
Figure 7 : Carte présentant l'isocontour 3,95 m/IGN69 (ligne rouge) extrait du Lidar à 2 m (rouge) sur le secteur de la Hume.....	21
Figure 8 : Niveaux marins à prendre en compte pour la caractérisation des aléas submersion marine (Rapport MEDDTL, v11, novembre 2011).....	23
Figure 9 : Niveau marin de référence (m/NGF) pour l'aléa « actuel sans ouvrage » dans le Bassin d'Arcachon et localisation des 38 points.	26
Figure 10 : Exemple d'ouvrage de fixation du trait de côte (commune d'Arès à gauche, commune de Lège-Cap-Ferret à droite).	26
Figure 11 : Ouvrage de fixation du trait de côte (perré) rehaussé d'un muret (commune d'Andernos-les-Bains en exemple). Ligne en pointillés rouge : niveau du terrain naturel.....	27
Figure 12 : Ouvrages de protection contre la submersion marine de type digue (commune de La Teste-de-Buch en exemple). Ligne en pointillés rouge : niveau du terrain naturel.	27
Figure 13 : Schéma d'un site où la topographie présente une forte pente et où l'étendue de la zone basse est restreinte	30

Figure 14 : Schéma d'un site où la topographie présente une faible pente avec une grande étendue de la zone basse. (A) cas d'un site pour lequel la méthode « topo/volume » est adaptée ; (B) cas d'un site pour lequel l'étendue de la zone basse est trop importante ou complexe pour lequel la méthode « topo/niveau » sera utilisée par défaut.	31
Figure 15 : Sélection des zones pour l'utilisation de la méthode « topo/volume ».	32
Figure 16 : Zone basse de « La Chapelle » sur la commune d'Arcachon concernée par la méthode « topo/volume ».	33
Figure 17 : Zone basse de « Morava » sur la commune de Lège-Cap-Ferret concernée par la méthode « topo/volume ».	33
Figure 18 : Exemple de profils topographiques transversal et longitudinal (le long de la digue) au niveau des prés salés de La-Teste-de-Buch.	34
Figure 19 : Signal de niveau d'eau pour un événement de référence suivant 3 pleines mers (par exemple maximum de 3.8m/IGN69 en rouge) ; altitude de la ligne de débordement (par exemple 3.2 m/IGN69 en vert) ; la double flèche noire représente la durée de franchissement (en abscisse le temps en minutes).	34
Figure 20 : Abaque-type volume/altitude.	35
Figure 21 : Etape 1 - Tronçons de niveaux marins de référence (respectivement actuel et 2100) au rivage par classe de 5 cm sur le pourtour du Bassin d'Arcachon.	37
Figure 22 : Etape 2 - Isoligne brute 3,95 m/NGF extraite des données Lidar de 2005 sur la commune d'Arès en exemple (échelle approximative = 1/10 000).	38
Figure 23 : Etape 3 - Lissage de l'isoligne (exemple ici avec l'isoligne 3,95 m/NGF) manuellement avec analyse d'expert, sur la commune d'Arès (échelle approximative = 1/10 000).	39
Figure 24 : Etape 4 - Ajustement de la limite de submersion par recoupement avec les événements historiques (ici : submersion Xynthia), sur la commune d'Andernos-les-Bains en exemple (échelle approximative 1/10 000).	40
Figure 25 : Seuils topographiques de La Pointe, La Vigne, l'Herbe et Piraillan (commune de Lège-Cap-Ferret).	41
Figure 26 : Exemple de seuil topographique à la Pointe avec une zone basse en arrière sur le secteur des 44 hectares (commune de Lège-Cap-Ferret).	41
Figure 27 : Seuils topographiques à la Pointe (à gauche) et à La Vigne (à droite) considérés submersibles avec des zones basses en arrière (commune de Lège-Cap-Ferret).	42
Figure 28 : Seuils topographiques de L'Herbe (à gauche) et de Piraillan (à droite) avec des zones basses en arrière (commune de Lège-Cap-Ferret).	42
Figure 29 : Exemples de connexions hydrauliques (fossés, drains, etc.) au niveau de remblais (route, voie ferrée).	43
Figure 30 : Remblais présentant des connexions hydrauliques sur les secteurs de l'Aiguillon à Arcachon, de la zone commerciale de La-Teste-de-Buch, de la Hume (commune de Gujan-Mestras).	44
Figure 31 : Remblais présentant des connexions hydrauliques sur le secteur du Canal des Etangs et de l'Anse du Sangla (commune de Lège-Cap-Ferret).	44
Figure 32 : Remblais présentant des connexions hydrauliques entre les communes du Teich et de Biganos.	45
Figure 33 : Remblais présentant des connexions hydrauliques à l'Herbe sur la commune de Lège-Cap-Ferret.	45
Figure 34 : Remblais présentant des connexions hydrauliques sur la commune d'Andernos-les-Bains.	46
Figure 35 : Remblais présentant des connexions hydrauliques sur les communes d'Andernos-les-Bains, Audenge et Lanton.	46

Figure 36 : Zones exposées aux vagues au niveau de la Pointe du Cap-Ferret, sur le front de mer à Andernos-les-Bains et sur le secteur compris entre le quartier de La Chapelle (commune d'Arcachon) et Pyla-Plage (commune de La-Teste-de-Buch).	48
Figure 37 : Surface potentiellement inondable sur le secteur de « La Chapelle » (terrains situés sous la cote 3,90 m/NGF). Le trait noir (A-B) correspond à la « ligne de franchissement ».	53
Figure 38 : Abaque volume/altitude sur le secteur de «La Chapelle» concerné par le débordement (d'après données Lidar 2005, SIBA).	54
Figure 39 : Secteur de « La Chapelle » : (1) Tableau illustrant la chronologie du volume débordant, le niveau de la mer et la cote altimétrique associé. (2) Profil topographique d'Est en Ouest (A vers B) de la ligne de franchissement (noir) (distance en mètre) ; Niveau marin de référence (ici Ntot = 3,90 m/NGF en rouge).	54
Figure 40 : Cartographie de l'aléa « actuel sans ouvrage » sur le secteur de « La Chapelle » (commune d'Arcachon). Echelle 1/10 000.	55
Figure 41 : Surfaces potentiellement inondables sur le secteur de « Bélisaire - Morava » (terrains situés sous la cote 3,80 m/NGF). La ligne (A-B) correspond à la ligne de débordement. Les zones 1 et 2 sont séparées par un seuil topographique (C-D).	57
Figure 42 : Abaques volume/altitude sur le secteur de «Bélisaire-Morava» concerné par le débordement (d'après Lidar 2005, SIBA). En rouge, l'abaque pour la zone 1 ; en bleu, la zone 2.	58
Figure 43 : Profil topographique (A-B) Nord-Sud de la ligne de submersion (noir) de la zone1 ; niveau marin de référence aléa « actuel sans ouvrage » (ici 3,80m/NGF).	58
Figure 44 : Profil topographique d'Ouest en Est (C-D) du seuil topographique entre les zones 1 et 2 extrait du Lidar 2005.	58
Figure 45 : Profil topographique « simplifié » d'Ouest en Est (C-D) du seuil topographique entre les zones 1 et 2 extrait du Lidar.	59
Figure 46 : Secteur de « Bélisaire-Morava » : Tableau illustrant la chronologie des volumes débordants pour la zone 1 (rouge) et la zone 2 (bleu) ; le niveau de la mer et la cote altimétrique associé sont renseignés (noir).	59
Figure 47 : Cartographie de l'aléa « actuel sans ouvrage » sur le secteur de « Bélisaire - Morava » (commune de Lège-Cap-Ferret). Echelle 1/20 000.	60
Figure 48 : Bande de sécurité sur les secteurs exposés aux vagues, exemple de Pyla-Plage (commune de la Teste-de-Buch). Echelle 1/10 000.	61
Figure 49 : Comparaison de l'aléa « actuel sans ouvrage » avec la submersion générée par la tempête Xynthia (28/02/10) sur la commune d'Andernos-les-Bains. Echelle 1/30 000.	62
Figure 50 : Comparaison de l'aléa « actuel sans ouvrage » avec la submersion générée par la tempête Klaus (24/01/09) sur la commune d'Andernos-les-Bains. Echelle 1/30 000.	63
Figure 51 : Exemple A/ de zones hautes isolées au sein de la surface inondable pour l'aléa « actuel sans ouvrage » et B/ des modalités de cartographie (commune d'Andernos-Les-Bains).	64
Figure 52 : Exemple A/ de zones hautes isolées non considérée car situées en zones ayant fait l'objet de réaménagement et dont la donnée topographique n'est pas considérée pérenne et B/ des modalités de cartographie (cas des bassins de décantation de La Molle, commune de Gujan-Mestras).	66
Figure 53 : Exemple A/ de zones hautes isolées correspondant à un remblais et B/ des modalités de cartographie (route sur la commune de La-Teste-de-Buch).	67

Liste des tableaux

Tableau 1 : Niveau marin de référence (m/NGF) au rivage sur 38 points du Bassin d'Arcachon pour cartographier l'aléa « actuel sans ouvrage » (colonne C) et l'aléa « 2100 sans ouvrage » (colonne D).....	25
Tableau 2 : Etape 1 - Affectation, par tronçons, du niveau marin au rivage par classe de 5 cm pour l'aléa actuel et l'aléa 2100.	36
Tableau 3 : Niveaux d'aléas.	51
Tableau 4 : Synthèse des méthodes de cartographie employée sur chaque commune du Bassin d'Arcachon.	52

Liste des annexes

Annexe 1 Compte rendu de la première réunion du comité scientifique	73
Annexe 2 Compte rendu de la réunion intermédiaire du comité scientifique	79
Annexe 3 Cartes des surfaces inondées par submersion marine lors de la tempête Xynthia (28/02/2010).....	85
Annexe 4 Cartographie de l'aléa submersion marine « actuel sans ouvrage », échelle 1 / 25 000	91
Annexe 5 Cartographie de l'aléa submersion marine « 2100 sans ouvrage », échelle 1 / 25 000	107
Annexe 6 Identification des zones hautes isolées au sein de la surface inondable de l'aléa actuel sans ouvrage et modalités de leur prise en compte.....	123

1. Contexte et objectifs de l'étude

1.1. CADRE DE L'ETUDE

Comme suite à la prescription des Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) entre novembre 2010 et février 2011 en Aquitaine, le BRGM a été chargé par la DREAL Aquitaine et les DDTM de la Gironde, des Landes et des Pyrénées Atlantiques de caractériser l'aléa submersion marine sur les secteurs concernés. Les conditions de réalisation de cette étude font l'objet d'une convention cadre entre le BRGM et la DREAL Aquitaine signée le 19 octobre 2011 ainsi que de 3 conventions d'application entre le BRGM et les DDTM signées le 14 novembre 2011 pour la Gironde, le 29 mars 2012 pour les Landes et le 5 avril 2012 pour les Pyrénées Atlantiques.

Les secteurs faisant l'objet d'un PPRL et sur lesquels l'aléa submersion marine doit être caractérisé sont les suivants :

- En Gironde :
 - o les 10 communes bordant le Bassin d'Arcachon ainsi que la commune de Mios ;
- Dans les Landes :
 - o Secteur de Mimizan ;
 - o Secteur du courant de Soustons dont les communes de Vieux Boucau, Messanges, Azur, Soustons ;
 - o Secteur du Bourret Boudigau comprenant les communes de Capbreton, Soorts, Angresse, Hossegor ;
 - o A la demande de la DDTM des Landes, il sera également caractérisé l'aléa submersion marine sur le secteur de Contis (bien que ne faisant pas l'objet d'un PPRL) ainsi que l'aléa recul du trait de côte sur Contis et sur l'ensemble des secteurs concernés par un PPRL dans ce département.
- Dans les Pyrénées Atlantiques :
 - o Secteur de Saint-Jean-de-Luz dont les communes de Ciboure et d'Urrugne ;
 - o Secteur d'Hendaye dont la commune d'Urrugne.

Dans le présent rapport réalisé dans le cadre de la convention de recherche et développement partagés signée par le BRGM et la DDTM de la Gironde le 14/11/2011 (projet BRGM PSP11AQI24), seuls les secteurs de la Gironde (c'est-à-dire les communes du Bassin d'Arcachon) sont traités. Les autres secteurs sont traités séparément (un rapport par département).

1.2. CONTEXTE REGLEMENTAIRE

La méthodologie mise en œuvre dans le cadre de cette présente étude s'appuie sur les documents de référence diffusés par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL) :

- la « **Circulaire du 27 juillet 2011** » relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux (NOR : DEVP1119962C) ;
- le rapport provisoire « **Premiers éléments méthodologiques pour l'élaboration des PPRL** », version 11 de novembre 2011 qui correspond à une révision du guide

méthodologique pour l'élaboration des PPRL datant de 1997 (Garry et *al.*, 1997) recommandée par le Grenelle de la Mer.

Les principales nouveautés de ces documents par rapport au guide méthodologique de 1997 (Garry et *al.*, 1997) concernent les modalités de définition de l'évènement naturel de référence à retenir pour caractériser l'aléa de référence. Sur un secteur homogène, il doit correspondre à « *un évènement centennal ou à un évènement historique si celui-ci est supérieur* » (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011).

La notion de bassin de risque impliquant « *la sélection de plusieurs évènements naturels de référence* » pour caractériser l'aléa de référence est introduite (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011).

Les documents précités précisent les modalités de la prise en compte :

- de plusieurs processus pour décrire les différents phénomènes météo-marins (niveau marin, hauteur de houle, intensité du vent, etc.) : l'évènement marin « *est caractérisé par deux paramètres au minimum, le niveau marin à la côte et la hauteur significative de la houle, conditionnant les volumes d'eau entrants. ...* » (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011) ;
- du rôle des ouvrages de protection côtière sur les phénomènes naturels : « *l'aléa submersion marine doit être déterminé de manière la plus réaliste possible et prendre en compte dans une certaine mesure le rôle de ces ouvrages de protection sans pour autant les considérer comme infaillibles* » (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011) ;
- du changement climatique à l'horizon 2100 se manifestant en particulier par une élévation du niveau marin (sur la base des estimations du GIEC) : « *L'hypothèse retenue est celle d'une augmentation du niveau marin égale à 60 cm à l'horizon 2100 ... il s'agit d'une position de base qui peut si besoin être affinée par des études plus précises permettant d'évaluer l'impact local du changement climatique* » (circulaire du 27 juillet 2011).

1.3. PRINCIPE DE LA METHODOLOGIE GLOBALE

L'aléa sera caractérisé selon les recommandations méthodologiques existantes (rapport du MEDDTL, version 11, novembre 2011) et avec les outils opérationnels et données existantes. La DREAL Aquitaine ainsi que les DDTM de la Gironde, des Landes et des Pyrénées Atlantiques ont souhaité que la méthodologie mise en œuvre soit homogène à l'échelle régionale.

Avec pour objectif la réalisation de cartes d'aléas submersion marine à une échelle au 1/25 000 (1/10 000 en zone urbaine) nécessaires à l'élaboration des PPRL, les 4 principales étapes de la méthodologie mise en œuvre sont les suivantes :

1. **L'identification des données nécessaires à l'étude** est une étape préliminaire sur laquelle repose le choix de la méthodologie à mettre en œuvre ainsi que la précision des résultats. Un important travail de préparation dont dépendent les étapes 3 et 4 est nécessaire.
2. **Une étude historique** des évènements de tempête ayant généré une submersion marine afin d'approfondir la connaissance locale des sites et des phénomènes auxquels il est soumis. Pour les PPRL de la Gironde, cette étude a été réalisée par le CETE SO :

« Submersions marines sur le Bassin d'Arcachon, Etude historique » rapport de novembre 2012 (version 2).

3. **La détermination de l'évènement naturel de référence au rivage** issu de la comparaison entre l'évènement historique et l'évènement centennal obtenu à partir d'analyses statistiques et de modélisation numérique. L'évènement naturel retenu intègre l'influence combinée des processus locaux résultants des conditions de vagues, de vent, de niveau marin, etc.
4. **La propagation à terre et la cartographie de la submersion marine pour le niveau marin de référence au rivage** retenu et pour différents scénarios de prise en compte d'hypothèses sur les structures de protection côtière et du changement climatique. La cartographie sera complétée, vérifiée et affinée par une analyse à dire d'expert qui repose sur des observations et analyses de terrain, la connaissance historique des évènements passés et l'analyse critique des outils et données utilisés.

Les étapes 1 et 3 qui conduisent à la détermination de l'évènement naturel de référence au rivage ont été réalisées dans une première phase de l'étude et font l'objet d'un précédent **rapport BRGM/RP-61408-FR** (Mugica et al., 2013).

L'étape 4 qui conduit aux cartes d'aléas fait l'objet de ce présent rapport. Il s'agit d'un rapport technique dans lequel sont notamment présentées les données utilisées, les principales informations de l'étude historique, la méthodologie mise en œuvre, les résultats ainsi que leur validation par des visites de terrain.

Conformément aux consignes ministérielles, cette étape 4 est réalisée pour un scénario en l'absence d'ouvrage : « *Le PPR affichera ainsi systématiquement la cartographie de la zone de submersion en l'absence d'ouvrage. Cette carte, annexée au PPR, dont le rôle est uniquement pédagogique, permettra de rappeler l'histoire du territoire, notamment son exposition « naturelle » aux inondations en l'absence d'ouvrages construits par l'homme.* » (Circulaire du 27 juillet 2011). **La cartographie sera donc produite pour un aléa dit « actuel sans ouvrage »** pour lequel les ouvrages de type digue ou murets rehaussant les perrés sont « transparents ». Ce scénario revient donc à araser (virtuellement) les ouvrages côtiers au niveau du terrain naturel.

Cette étape 4 est également réalisée pour un scénario à échéance 100 ans, c'est-à-dire en prenant en compte l'élévation de la mer liée au changement climatique. **La cartographie sera également produite pour un aléa dit « 2100 sans ouvrage ».**

La caractérisation de l'aléa dit « de référence » prenant en compte des hypothèses sur les structures de protection sera réalisée dans une troisième phase et fera l'objet d'un rapport séparé.

1.4. DEROULEMENT ET SUIVI DE L'ETUDE

L'étude a bénéficié de l'expertise d'un comité scientifique réunissant des experts du CETMEF¹, CETE SO², BRGM, RRLA³, CASAGEC, SOGREAH et ONF⁴.

¹ CETMEF : Centre d'Etudes Maritimes Et Fluviales

² CETE SO : Centre d'Etudes TEchniques du Sud-Ouest

³ RRLA : Réseau de Recherche du Littoral Aquitaine

Préalablement à sa mise en œuvre, la méthodologie de caractérisation ⁽⁵⁾ de l'aléa a été proposée au comité scientifique de l'étude relative aux PPRL en Aquitaine et acceptée (réunion du 26/05/2011, cf. compte-rendu annexe 1).

Les résultats de la première phase de l'étude (détermination de l'évènement naturel de référence au rivage) ont également été présentés et validés en comité scientifique (réunion du 20/09/2012, cf. compte-rendu annexe 2).

⁴ ONF : Office National des Forêts

⁵ La méthodologie a également fait l'objet d'une publication scientifique (Bulteau et *al.*, 2012) et d'une présentation aux XII^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil de Cherbourg (2012).

2. Evènements historiques

2.1. ENREGISTREMENT DES NIVEAUX MARINS LORS DES EVENEMENTS HISTORIQUES

Dans le Bassin d'Arcachon, le niveau marin est mesuré par le marégraphe d'Arcachon, positionné au bout de la jetée d'Eyrac, depuis le 28 Novembre 1967. La durée des observations disponibles (mesures horaires) est de 10,8 ans, ce qui représente 74,4% de lacunes (SHOM-CETMEF, 2012).

Les niveaux marins générés par les évènements de tempête les plus marquants de ces dernières années, Klaus (24/01/2009) et Xynthia (28/02/2010) ont pu être enregistrés par le marégraphe.

Au plus fort de la tempête Klaus, le niveau marin est de 2,90 m/NGF avec une surcote totale de 1,15 m sur la base d'un niveau de marée prédite par le SHOM de 1,75 m/NGF. Il est à noter que la surcote maximale enregistrée de 1,67 m ne s'est pas produite lors de la pleine mer, ce qui a limité le niveau marin maximal.

En revanche, lors de la tempête Xynthia, la surcote de 89 cm s'étant produite lors de la pleine mer avec un coefficient de 102, un niveau marin de 3,48 m/NGF a été atteint au marégraphe (le niveau de marée prédite par le SHOM était de 2,57 m).

2.2. INFORMATIONS SUR LES SUBMERSIONS MARINES PASSEES

Des informations sur les impacts des tempêtes passées ayant généré des submersions marines ont été recensées dans l'étude du CETE SO réalisée à la demande de la DDTM 33 dans le cadre des PPRL submersion marine (CETE SO, novembre 2012).

Ces informations collectées à partir de questionnaires (Etat, associations, communes, etc.), du fichier CAT-NAT et de recherches bibliographiques (archives, presses, etc.) sont essentiellement qualitatives. La Figure 1 localise par des étoiles les secteurs ayant fait l'objet de submersions marines passées à partir des informations de l'étude du CETE SO (novembre 2012) mais il est probable que ce recensement ne soit pas exhaustif. Certains secteurs non identifiés par absence d'information dans les archives, la presse, ou autre ont également pu faire l'objet de submersion marine (Pointe du Cap Ferret, delta de L'Eyre par exemple). En revanche, il est mis en évidence les nombreuses informations sur les secteurs d'Arcachon, Andernos-les-Bains et Gujan-Mestras.

Excepté pour les évènements de Klaus (24 janvier 2009) et Xynthia (28 février 2010) pour lesquels une cartographie des surfaces inondées ainsi que des mesures de hauteurs d'eau ont été réalisées par le BRGM en association avec le SIBA, aucune information quantitative précise n'est disponible sur les submersions marines passées (Figure 1).

La cartographie des surfaces inondées par submersion marine lors de la tempête Xynthia est présentée en Annexe 3. Elle a été obtenue à partir d'observations et de levés sur le terrain réalisés les jours suivants la tempête par le BRGM et le SIBA : des laisses de mer et de traces sur les murs (Figure 2), des zones encore immergées quelques jours après la tempête (Figure 3) ainsi que des dépôts de sables et de vases avec des figures sédimentaires donnant des informations sur la direction et la vitesse de l'écoulement (Figure 4).

Bien que Xynthia n'atteigne pas l'intensité des tempêtes Martin et Lothar de décembre 1999 ou de Klaus en termes de vitesses maximales instantanées de vent, la submersion marine qu'elle a engendrée a touché tout le pourtour du Bassin d'Arcachon (Figure 1).

En complément de la visite de terrain qui a eu lieu du 5 au 8 novembre 2012, ces informations qualitatives permettent d'avoir une meilleure connaissance des événements passés et des processus locaux nécessaire à l'analyse à dire d'expert⁶.

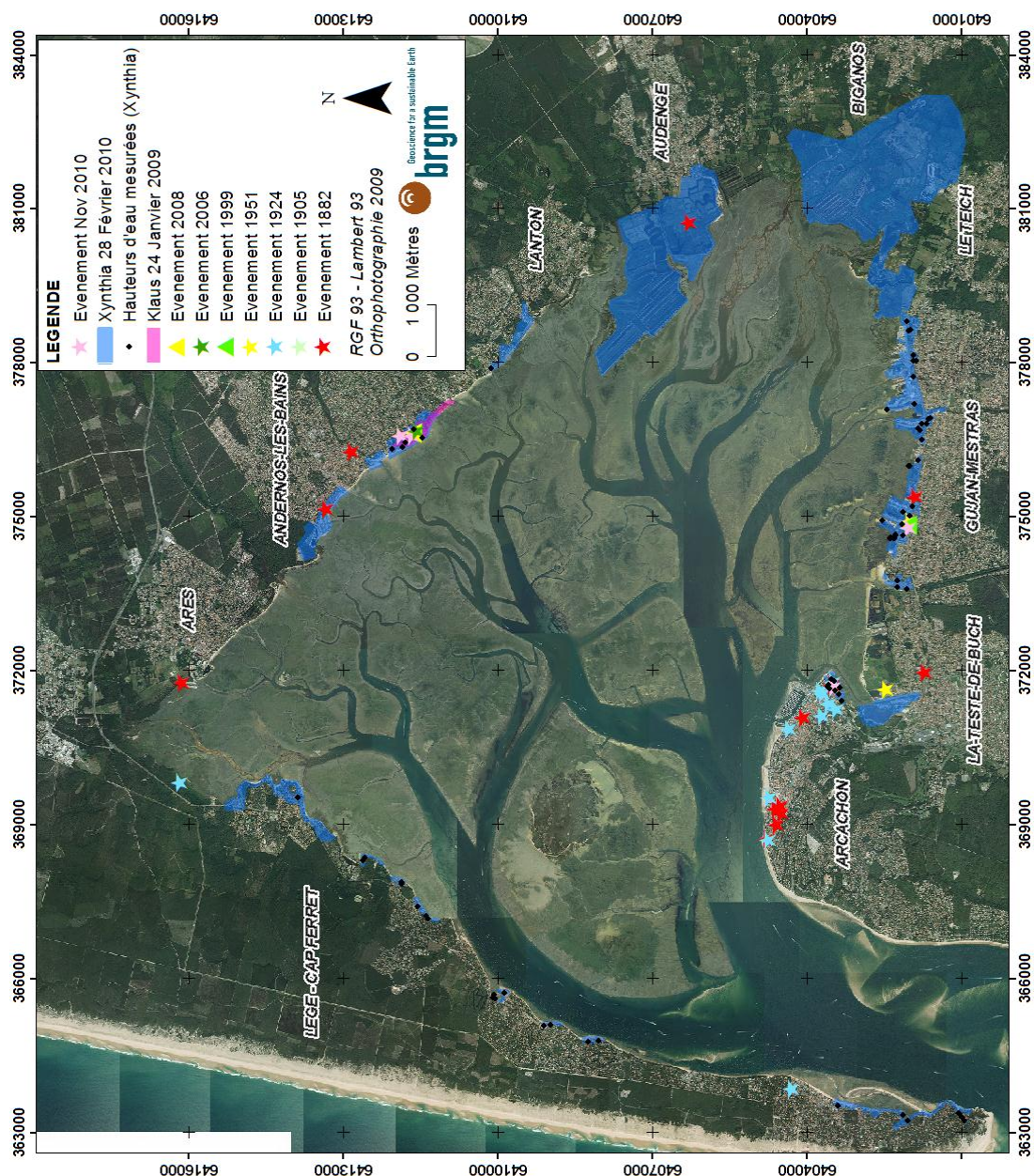


Figure 1 : Recensement des zones inondées lors d'événements de tempête passés 1882 - 2008. (Informations issues de l'étude du CETE SO, novembre 2012). Pour les tempêtes Klaus et Xynthia, les surfaces inondées ont été cartographiées à partir de visites de terrain du BRGM (Mugica et al., 2010, Rapport BRGM/RP-58723-FR)

⁶ L'analyse à dire d'expert repose notamment sur les observations de terrain, la connaissance historique des événements passés ainsi que l'analyse critique des outils et données utilisées.



Figure 2 : Hauteurs d'eau mesurés à partir des laisses de mer et des traces sur les murs (Xynthia 28/02/2010).



Figure 3 : Zones encore immergées 2 jours après la tempête Xynthia (28/02/2010), Claouey à gauche, Gujan-Mestras à droite en exemple.



Figure 4 : Dépôts de sables et de vase

3. Données topographiques utilisées : LIDAR 2005 (SIBA)

Compte-tenu du rôle de la topographie dans la propagation de la submersion marine à terre, des données fines sont requises pour caractériser l'aléa. Conformément aux recommandations méthodologiques (rapport du MEDDTL, v11, novembre 2011) « *il convient de privilégier les données de type Lidar (laser aéroporté) lorsqu'elles existent* ». En effet, les données topographiques à grande échelle de l'Institut Géographique National (IGN, « BD ALTI » et « BD TOPO ») sont insuffisantes pour caractériser les aléas car leur résolution est de 50 m et la précision en altitude de 2 à 3 m.

Sur le Bassin d'Arcachon, des levés Lidar ont été réalisés en 2005 (juillet, août et septembre) à la demande du Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon (SIBA) par la société Terra Imaging. L'association d'un système de scannographie laser aéroporté à balayage (ALTM 2050 développé par la société canadienne Optech Inc.) à une caméra numérique matricielle (système Laser@Camera) a permis de produire un MNT (Modèle Numérique de Terrain).

Dans le cadre de l'Observatoire de la Côte Aquitaine, le SIBA a confié ces données altimétriques au BRGM pour qu'il en assure la diffusion. Avant d'utiliser ce MNT pour l'étude PPRL, un travail d'analyse de sa qualité a été réalisé en le comparant à des données topographiques levées au DGPS (précision centimétrique) et disponibles sur le Bassin d'Arcachon (rapport BRGM/RP-62369-FR en cours).

Il a été conclu que ces données Lidar de 2005 sont globalement fidèles à la précision annoncée de moins de 25 cm et qu'elles peuvent donc être utilisées pour l'étude PPRL.

Cependant des précautions d'utilisation telles que précisées dans le paragraphe 5.4 doivent être prises en raison de certaines limites constatées :

- la topographie des zones mobiles (plages par exemple) est susceptible d'avoir évolué depuis 2005 ce qui induit de forts écarts entre la topographie mesurée sur le terrain et celle issue du Lidar sur ces zones. Ces écarts peuvent être supérieurs à 1 m en altitude.
- le maillage du Lidar correspondant à un pas de 2 m, certains objets de largeur inférieure à 2 m (muret rehaussant les perrés par exemple) peuvent ne pas apparaître sur le MNT.
- le MNT présente une mauvaise précision à la base des digues, qui peut être supérieure à 1 m, en raison probablement d'une mauvaise pénétration du laser aéroporté dans ces zones de végétation qui peuvent être denses. En revanche, il est à souligner que le sommet des digues est bien représenté sur le MNT avec une erreur généralement inférieure à 25 cm.
- le MNT de 2005 est très « bruité », c'est-à-dire qu'il présente des variations d'altitude artificielles pluri-décimétriques d'une maille à l'autre. Ces variations verticales de la dizaine de centimètres sont mises en évidence sur une coupe topographique d'une route au niveau d'un tronçon longitudinal de 10 m (Figure 6). Elles sont considérées anormales car sur une aussi courte distance qu'un tronçon de 10 m, une route est relativement lisse et ne présente pas de creux ni de bosse (« tôle ondulée »). Du fait de ce « bruitage » du MNT, le tracé des iso-contours est extrêmement découpé comme le montre la Figure 7 (ligne rouge

correspondant à l'isocontour 3,95 m/IGN69). Il est alors délicat de placer avec précision la cote voulue sur le Lidar.

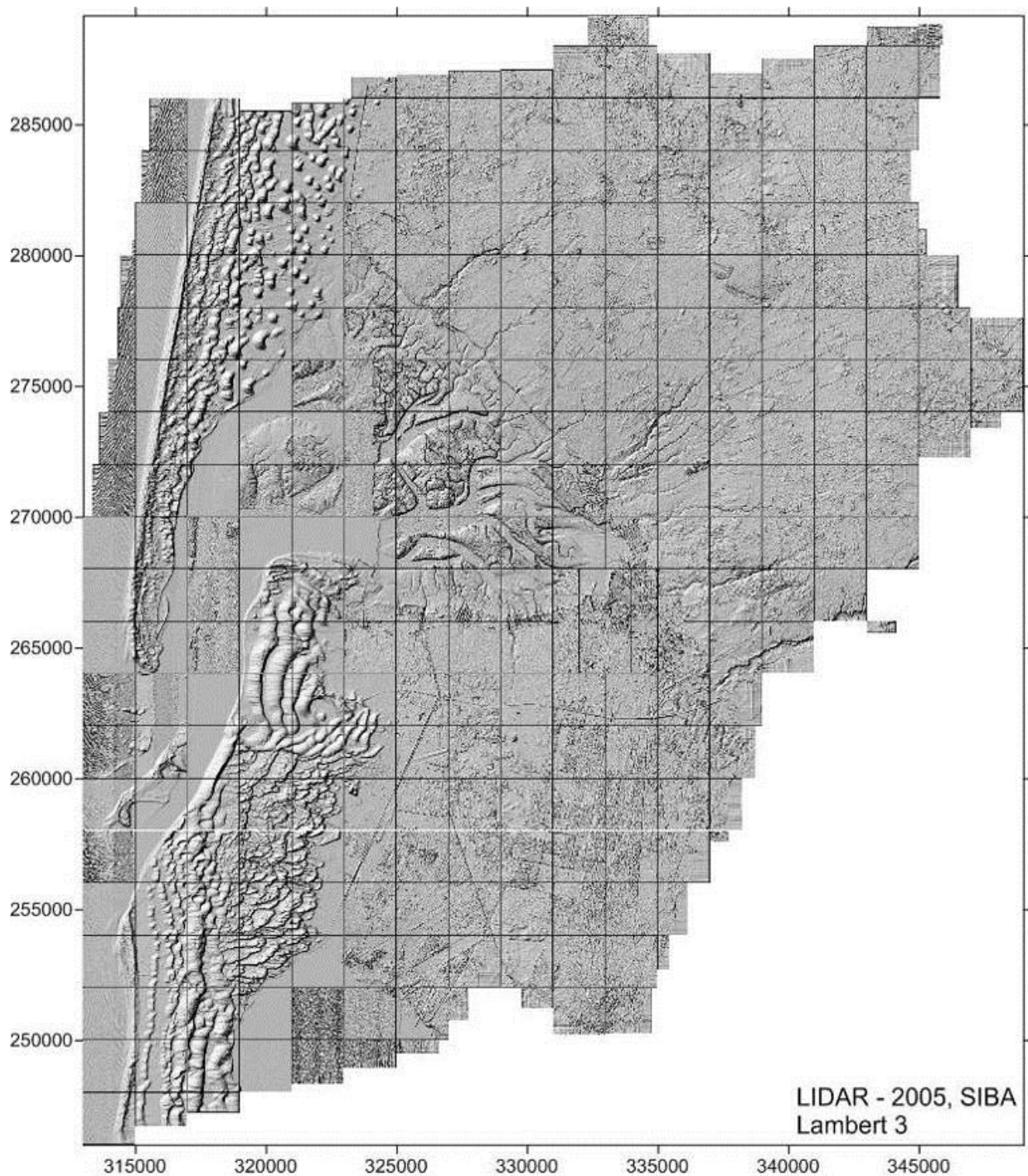


Figure 5 : Emprise géographique des données Lidar de 2005 du SIBA.

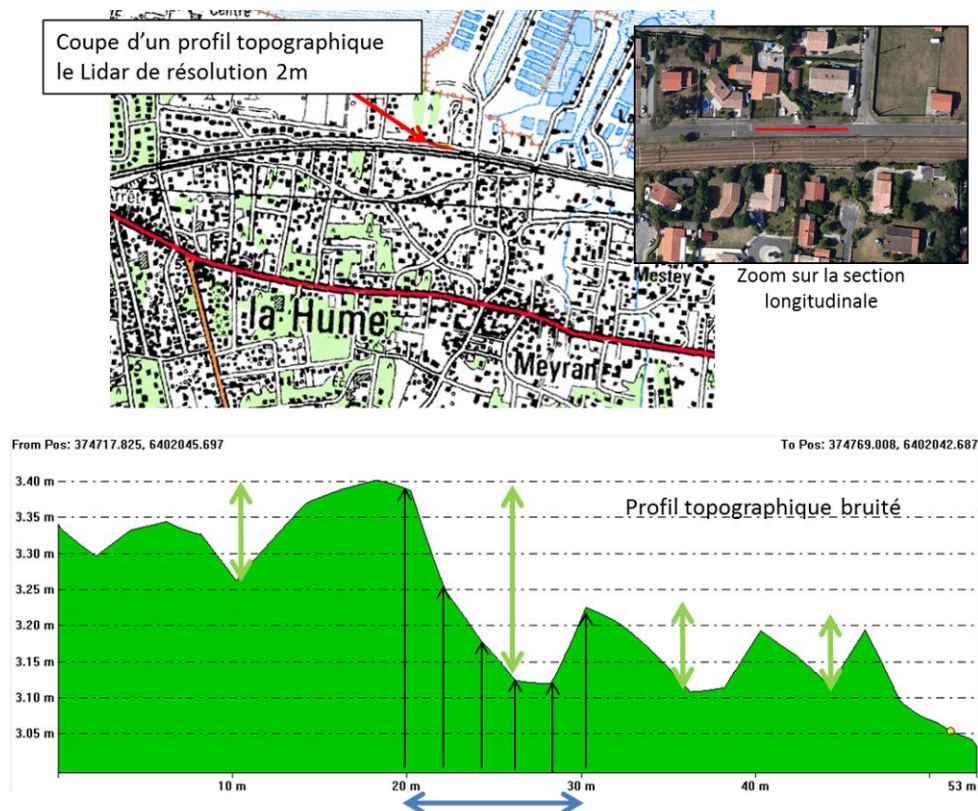


Figure 6 : Coupe topographique longitudinale du Lidar de résolution 2 m sur un tronçon de voirie. Les flèches permettent de visualiser que des variations d'altitude de 10 à 30 cm (flèches vertes) se produisent sur des distances de 10 m (flèche bleu).

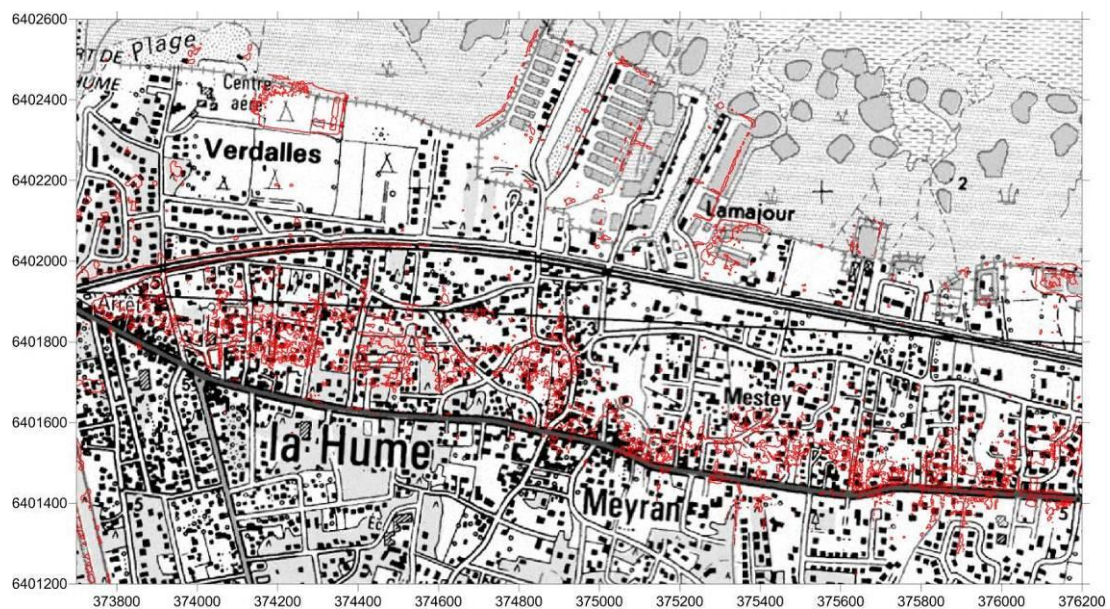


Figure 7 : Carte présentant l'isocontour 3,95 m/IGN69 (ligne rouge) extrait du Lidar à 2 m (rouge) sur le secteur de la Hume.

4. Présentation des scénarios étudiés

4.1. DEFINITION DES NIVEAUX MARINS DE REFERENCE POUR L'ALEA « ACTUEL SANS OUVRAGE » ET DE L'ALEA « 2100 SANS OUVRAGE »

Le niveau marin de référence pour cartographier l'aléa « actuel sans ouvrage » est celui correspondant au plus fort du niveau centennal (obtenu par des méthodes statistiques + incertitudes) et du niveau historique le plus haut connu (+ incertitudes), auquel on rajoute 20 cm au titre d'une première prise en compte de l'élévation du niveau de la mer du fait du changement climatique en cours (Figure 8).

Pour cartographier l'aléa « 2100 sans ouvrage » ou à échéance 100 ans, le niveau marin de référence est obtenu en ajoutant 40 cm au niveau marin de référence aléa « actuel sans ouvrage », conformément au scénario pessimiste de l'ONERC (Figure 8, ONERC, 2010 et rapport MEDDTL, v11, novembre 2011).

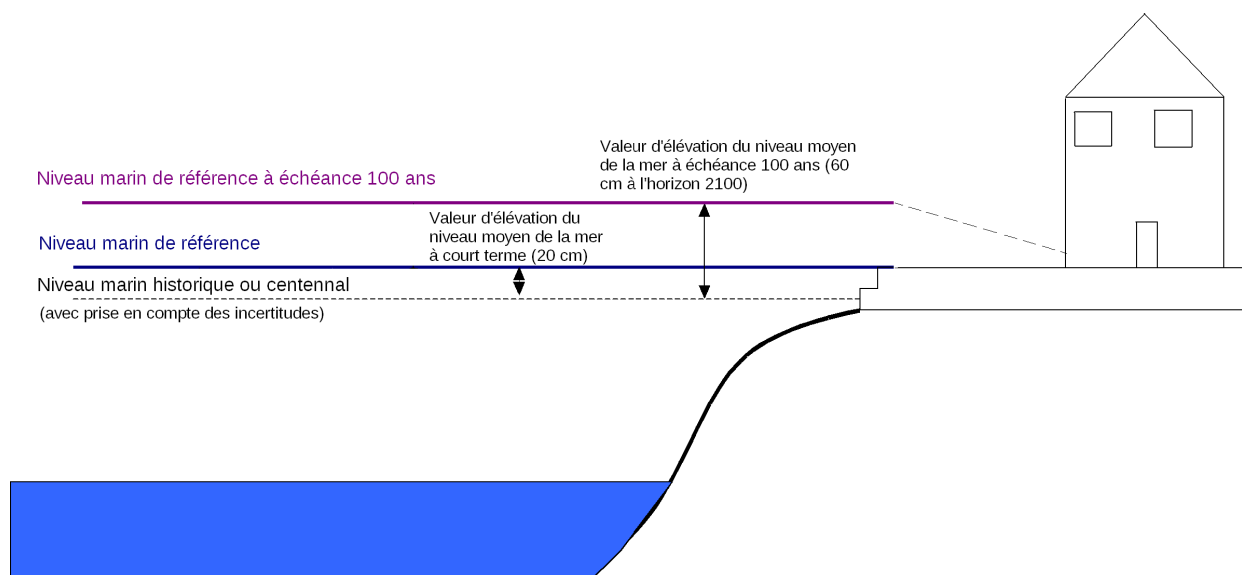


Figure 8 : Niveaux marins à prendre en compte pour la caractérisation des aléas submersion marine (Rapport MEDDTL, v11, novembre 2011).

4.2. DETERMINATION DE L'EVENEMENT NATUREL DE REFERENCE : RAPPELS DE LA PREMIERE PHASE DE L'ETUDE

Dans le cas du Bassin d'Arcachon, les résultats de modélisations et les observations de terrain réalisés dans le cadre de travaux antérieurs (Mallet et al., 2009, rapport BRGM/RP-57462-FR ; Mugica et Mallet, 2009, BRGM/RP-57902-FR ; Mugica et al., 2010, BRGM/RP-58723-FR ; Mugica et al., 2013, BRGM/RP-61408-FR) ont mis en évidence l'hétérogénéité de l'altitude du plan d'eau à l'intérieur de la lagune lors d'événements extrêmes sous l'effet des vents et de la circulation marine. C'est pourquoi la spécificité de la lagune a été prise en compte pour identifier un événement naturel de référence par secteurs, conformément aux recommandations méthodologiques (MEDDTL, version 11, novembre 2011) : « Dans certains cas particuliers, plusieurs événements naturels de référence peuvent être retenus à l'échelle du bassin de risque ».

Grâce aux données météo-marines disponibles et à celles spécifiquement générées pour cette étude, la méthode complète du BRGM (Bulteau et al., 2012) recommandée dans le rapport du MEDDTL (V11, novembre 2011) a pu être mise en œuvre pour calculer l'évènement centennal. Cette méthode consiste à réaliser des analyses statistiques sur les données météo-marines à partir du logiciel JOIN-SEA (Hawkes et al., 2002) afin de déterminer des couples Hs (hauteur significative des vagues) et SWL (niveaux d'eau) de période de retour conjointe centennale ainsi que Tp et Dp (période et direction pic des vagues) puis Uv et Dv (intensité et direction du vent) associées. L'évènement centennal est ainsi caractérisé par les effets combinés, dont la période de retour est centennale, de la surcote atmosphérique, du niveau de marée et de la surcote liée à la houle lors de son déferlement au niveau des passes du Bassin. Le niveau d'eau calculé (niveau marin total intégrant toutes les surcotes) est donné dans le Bassin et à proximité du rivage sur 38 points.

Dans la première phase de l'étude (Mugica et al., 2013, rapport BRGM/RP-61408-FR), après comparaison à l'évènement historique le plus fort connu (tempête Xynthia, 28/02/2010), l'évènement centennal calculé par le BRGM a été retenu comme l'évènement naturel de référence.

Le Tableau 1 colonne (A) présente les valeurs du niveau marin résultant de la propagation de l'évènement centennal depuis le large vers le rivage et retenu sur tout le pourtour du Bassin en 38 points (Mugica et al., 2013, rapport BRGM/RP-61408-FR).

Conformément aux recommandations méthodologiques (Rapport du MEDDTL, v11, novembre 2011), le niveau marin de référence pour l'aléa « **actuel sans ouvrages** » (**Tableau 1 colonne C**) est obtenu en ajoutant une « surcote » de 20 cm pour une première prise en compte de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique ainsi qu'une marge de sécurité⁷. La valeur de cette marge à 15 cm a été proposée par le BRGM suite à l'estimation des incertitudes de chaque étape de la méthode mise en œuvre. Sa prise en compte a été validée par la DDTM 33 en remplacement de la marge forfaitaire de 25 cm préconisée dans le rapport du MEDDTL (novembre 2011, v.11) en cas d'impossibilité d'estimer les incertitudes liées à la méthode.

*Il est vérifié qu'à proximité du port d'Arcachon-Eyrac, le niveau marin de référence à **3,95 m/NGF** est supérieur de **2 cm** à **3,93m/NGF**, obtenu en faisant la somme suivante :*

- *niveau enregistré au marégraphe d'Arcachon-Eyrac lors de la tempête Xynthia (3,48 m/NGF) ;*
- *et la « surcote » de 20 cm + la marge de sécurité de 25 cm.*

Les surcotes de 20 et 60 cm (pour l'aléa actuel et l'aléa 2100 respectivement) sont rajoutées au large pour la modélisation numérique de la propagation de l'évènement de référence depuis le large vers le rivage. La marge d'incertitude de la méthode est rajoutée à l'issue de la modélisation numérique de manière uniforme sur l'ensemble du Bassin.

Le **Tableau 1 colonne (D)** fournit sur les 38 points retenus le niveau marin de référence à échéance 100 ans (ou de l'aléa « **2100 sans ouvrage** »).

⁷ Conformément aux recommandations du MEDDTL (rapport de novembre 2011, v.1) la marge de sécurité de 25 cm est rajoutée au niveau marin mesuré lors de Xynthia car l'incertitude sur la mesure du marégraphe n'est pas estimée : « Dans le cas où cette estimation n'est pas possible, une marge de 25 cm pourra être rajoutée au niveau marin de référence (pour un événement théorique centennal de même que pour un événement historique) ».

La Figure 9 fournit la carte de localisation des 38 points retenus et la répartition des niveaux marins de référence (aléa « actuel sans ouvrage ») dans le Bassin d'Arcachon.

	(A) Niveau marin d'un événement centennal avec surcote de 20 cm (sans incertitude)	(B) Niveau marin d'un événement centennal avec surcote de 60 cm (sans incertitude)	(C) =(A) + 0,15 m Niveau marin de référence "aléa actuel" (avec prise en compte des incertitudes)	(D) = (B) + 0,15m Niveau marin de référence "aléa 2100" (avec prise en compte des incertitudes)
Passe Nord	3,47	3,87	3,62	4,02
Mimbeau-sud	3,54	3,94	3,69	4,09
Mimbeau-centre	3,56	3,96	3,71	4,11
Mimbeau-nord	3,58	3,98	3,73	4,13
Cap Ferret	3,60	4,00	3,75	4,15
La Vigne	3,65	4,05	3,80	4,20
L'Herbe	3,68	4,08	3,83	4,23
Le Canon	3,69	4,09	3,84	4,24
Pirailan	3,70	4,10	3,85	4,25
Petit Piquey	3,74	4,14	3,89	4,29
Piclaouey	3,74	4,14	3,89	4,29
Claouey	3,77	4,17	3,92	4,32
Port d'Arès	3,81	4,21	3,96	4,36
Arès	3,81	4,21	3,96	4,36
Port d'Andernos	3,80	4,20	3,95	4,35
Andernos	3,79	4,19	3,94	4,34
Le Mauret	3,79	4,19	3,94	4,34
Fontainevielle	3,80	4,20	3,95	4,35
Taussat	3,80	4,20	3,95	4,35
Cassy	3,80	4,20	3,95	4,35
Lanton	3,83	4,23	3,98	4,38
Certes	3,80	4,20	3,95	4,35
Audenge	3,82	4,22	3,97	4,37
Biganos	3,83	4,23	3,98	4,38
Le Teich	3,81	4,21	3,96	4,36
Mestras	3,80	4,20	3,95	4,35
Gujan-Mestras	3,79	4,19	3,94	4,34
Meyran	3,79	4,19	3,94	4,34
La Hume	3,80	4,20	3,95	4,35
Port du Rocher	3,82	4,22	3,97	4,37
La-Teste-de-Buch	3,79	4,19	3,94	4,34
Arcachon	3,80	4,20	3,95	4,35
Perreire	3,68	4,08	3,83	4,23
Pyla-sur-mer	3,61	4,01	3,76	4,16
Pyla-plage	3,56	3,96	3,71	4,11
Passe Sud	3,47	3,87	3,62	4,02
L'île sud	3,76	4,16	3,91	4,31
L'île nord	3,78	4,18	3,93	4,33

Tableau 1 : Niveau marin de référence (m/NGF) au rivage sur 38 points du Bassin d'Arcachon pour cartographier l'aléa « actuel sans ouvrage » (colonne C) et l'aléa « 2100 sans ouvrage » (colonne D).

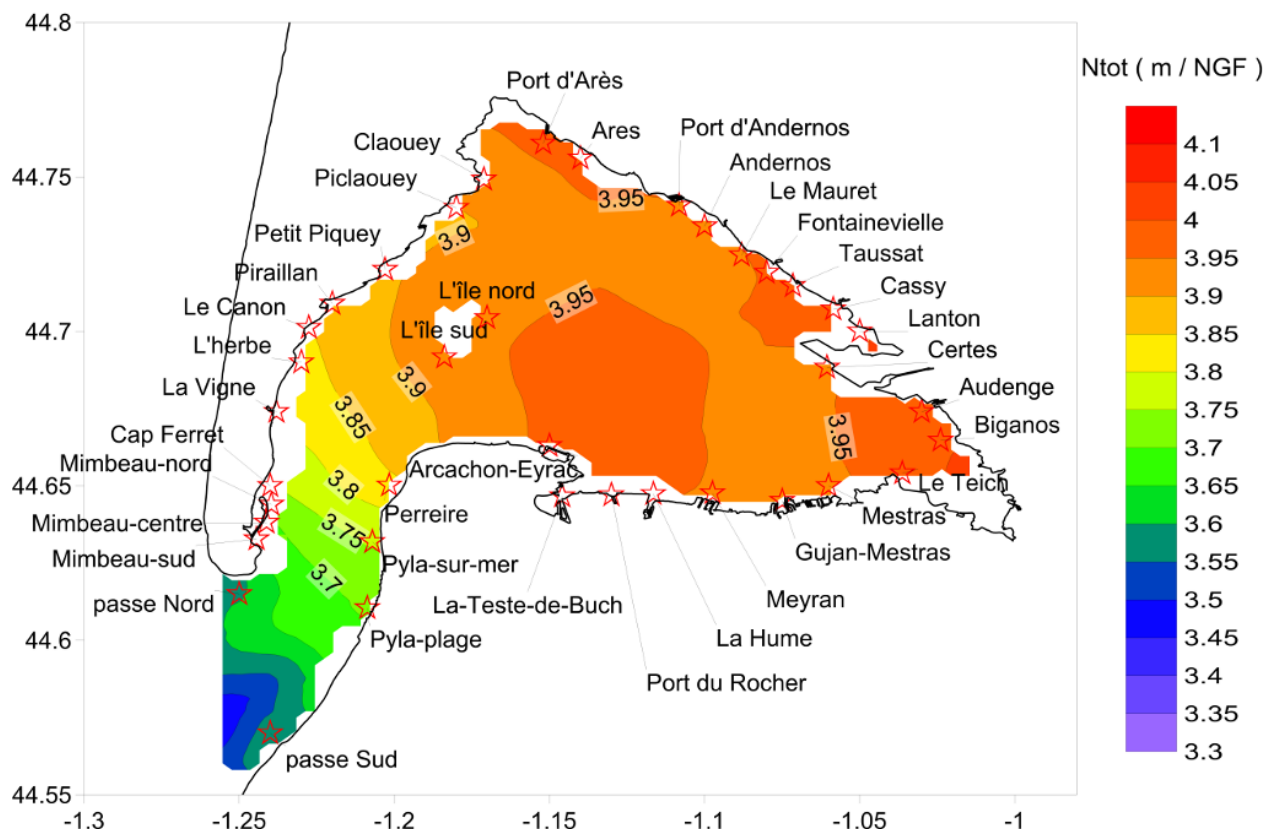


Figure 9 : Niveau marin de référence (m/NGF) pour l'aléa « actuel sans ouvrage » dans le Bassin d'Arcachon et localisation des 38 points.

4.3. PRISE EN COMPTE DES OUVRAGES DE PROTECTION CONTRE LA SUBMERSION MARINE

Les ouvrages de protection côtière à prendre en compte pour caractériser l'aléa submersion marine sont les ouvrages de type digue dont la vocation initiale est de faire obstacle à l'écoulement de l'eau et qui sont surélevés par rapport au terrain naturel. Les ouvrages de fixation du trait de côte non surélevés par rapport au terrain naturel situé en arrière (perrés et certains enrochements, ouvrages portuaires par exemple) ne sont donc pas considérés dans cette présente étude (Figure 10).



Figure 10 : Exemple d'ouvrage de fixation du trait de côte (commune d'Arès à gauche, commune de Lège-Cap-Ferret à droite).

En accord avec la DDTM 33 et conformément aux recommandations méthodologiques (rapport du MEDDTL, v11, novembre 2011), les aléas « actuel sans ouvrage » et « 2100 sans ouvrage » seront caractérisés pour un scénario en l'absence d'ouvrage dans cette phase de l'étude. **C'est-à-dire qu'une hypothèse de ruine généralisée est prise en « arasant » les ouvrages de protection côtière au niveau du terrain naturel.** Les Figure 11 et Figure 12 illustrent les types d'ouvrages concernés par cette hypothèse.



Figure 11 : Ouvrage de fixation du trait de côte (perré) rehaussé d'un muret (commune d'Andernos-les-Bains en exemple). Ligne en pointillés rouge : niveau du terrain naturel.



Figure 12 : Ouvrages de protection contre la submersion marine de type digue (commune de La Teste-de-Buch en exemple). Ligne en pointillés rouge : niveau du terrain naturel.

5. Description de la méthode de cartographie

5.1. PRINCIPE GENERAL

Pour caractériser l'aléa submersion marine, la cartographie peut s'effectuer de plusieurs manières :

- par des méthodes empiriques dites « statiques » consistant :
 - o soit à confronter la topographie des zones littorales avec un niveau de référence (toute zone dont l'altitude est inférieure au niveau de la mer est considérée comme submersible),
 - o soit à calculer les volumes d'eau pénétrants à terre pour l'évènement naturel de référence puis de les répandre uniformément sur les zones littorales ;
- par des méthodes dites « dynamiques » reposant sur l'utilisation de modèle hydrodynamiques permettant d'estimer les hauteurs d'eau, les vitesses d'écoulement de l'eau, la durée de la submersion, les zones d'entrée d'eau.

Le choix de l'une ou de l'autre méthode est dicté par les caractéristiques du site et par les données disponibles.

Conformément aux recommandations méthodologiques (rapport du MEDDTL, v11. Novembre 2011), une approche « statique » est dans un premier temps utilisée sur le Bassin d'Arcachon car :

- elle est « *suffisante pour approcher la zone soumise à l'aléa submersion marine* » ;
- elle « *doit systématiquement être mise en œuvre* » ;
- elle permet de « *déterminer si des études plus détaillées doivent être mises en œuvre pour prendre en compte certaines caractéristiques du site* ».

La méthode consistant à confronter le niveau marin de référence à la topographie sera nommée dans la suite de l'étude par **méthode « topo/niveau »**.

La méthode consistant à calculer les volumes d'eau pénétrants à terre et à les répandre uniformément sur la topographie à l'arrière de la ligne de débordement jusqu'à obtenir une altitude du plan d'eau de submersion sera nommée dans la suite de l'étude par **méthode « topo/volume »**. Avec cette méthode, l'altitude du plan d'eau de submersion peut être inférieur (ou au maximum égal) au niveau marin de référence.

Cette approche « statique » ne prend pas en compte le bâti.

L'aléa « actuel sans ouvrage » a été cartographié soit par la méthode « topo/niveau » soit par la méthode « topo/volume » en fonction des caractéristiques géomorphologiques des secteurs. L'aléa « 2100 sans ouvrage » a été cartographié uniquement par la méthode « topo/niveau ».

5.2. METHODE « TOPO/NIVEAU » : CALCUL DE LA SUBMERSION PAR SUPERPOSITION DU NIVEAU MARIN DE REFERENCE A LA TOPOGRAPHIE

La méthode « statique » consistant à superposer le niveau marin au rivage à la topographie permet de déterminer la surface potentiellement inondable sans risque de surestimation si elle est appliquée sur les secteurs du pourtour du Bassin où :

- la pente est relativement forte ;
- l'étendue des zones basses est suffisamment restreinte pour que la durée de la surélévation du niveau marin n'influence pas la propagation de la submersion à terre (Figure 13).

Cette méthode est également utilisée par défaut lorsque la complexité topographique des terrains (succession de digues, casiers, connexions hydrauliques multiples, franchissement de voies de communication...) ou lorsque les caractéristiques de la (ou des) ligne(s) de débordement côté mer (longueurs, manque d'homogénéité topographique...) ne permettent pas d'utiliser une formule simplifiée de seuil pour le calcul des volumes d'eau débordant (cf. 5.3).

La méthode « topo/niveau » fournit de manière approximative une estimation des surfaces inondables qui pourra être précisée par une étude plus détaillée et une méthode plus complète (approche dynamique par exemple qui permet d'estimer les vitesses de l'écoulement de l'eau, la durée de la submersion, l'influence du bâti, etc.).

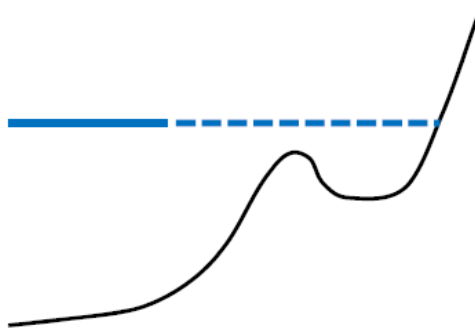


Figure 13 : Schéma d'un site où la topographie présente une forte pente et où l'étendue de la zone basse est restreinte

5.3. METHODE « TOPO/VOLUME » : CALCUL DE LA SUBMERSION PAR LA METHODE DES VOLUMES PENETRANT A TERRE

Sur les secteurs du Bassin où la pente est faible et où la topographie se caractérise par une plus grande étendue des zones basses, le croisement de la topographie avec les volumes d'eau pénétrants à terre, calculés sur la durée pendant laquelle le niveau marin reste supérieur à la cote du rivage, est préférable (Figure 14, a). Pour des configurations complexes ou une étendue de la zone basse trop importante (Figure 14, B), la méthode topo/niveau sera utilisée par défaut (cf. 5.2).

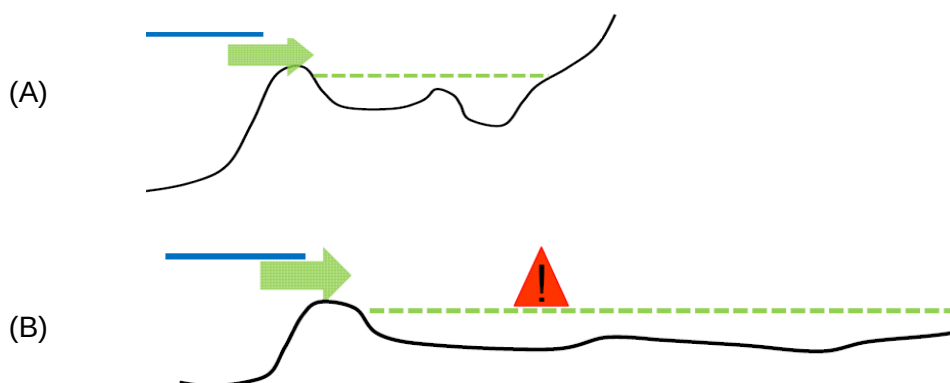


Figure 14 : Schéma d'un site où la topographie présente une faible pente avec une grande étendue de la zone basse. (A) cas d'un site pour lequel la méthode « topo/volume » est adaptée ; (B) cas d'un site pour lequel l'étendue de la zone basse est trop importante ou complexe pour lequel la méthode « topo/niveau » sera utilisée par défaut.

5.3.1. Calcul des volumes d'eau pénétrant à terre

Le calcul des volumes d'eau pénétrant à terre s'effectue en plusieurs étapes :

Etape 1 : La sélection de tronçons en fonction de la pente topographique qui est mise en évidence grâce au tracé des isolignes de niveau 3,5 m/NGF et 5 m/NGF par exemple (Figure 15). Les secteurs où les pentes sont les plus faibles sur le Bassin d'Arcachon se situent entre les communes de La-Teste-de-Buch et de Biganos ainsi que sur quelques secteurs des communes d'Arcachon et de Lège-Cap-Ferret (Figure 16 et Figure 17).

Le secteur d'Arcachon à Biganos est écarté pour la mise en œuvre de méthode « topo/volume » compte tenu de la longueur (potentiellement près de 12 kilomètres) de la ligne de débordement et de la complexité de la topographie des terrains. La méthode « topo/niveau » est donc employée par défaut comme présenté paragraphe 5.2. Ce secteur, en particulier, devra faire l'objet d'une caractérisation de l'aléa plus détaillée à partir d'une méthode plus complète (approche dynamique par exemple qui permet d'estimer les vitesses de l'écoulement de l'eau, la durée de la submersion, l'influence du bâti, etc.). Une illustration est donnée en Figure 18.

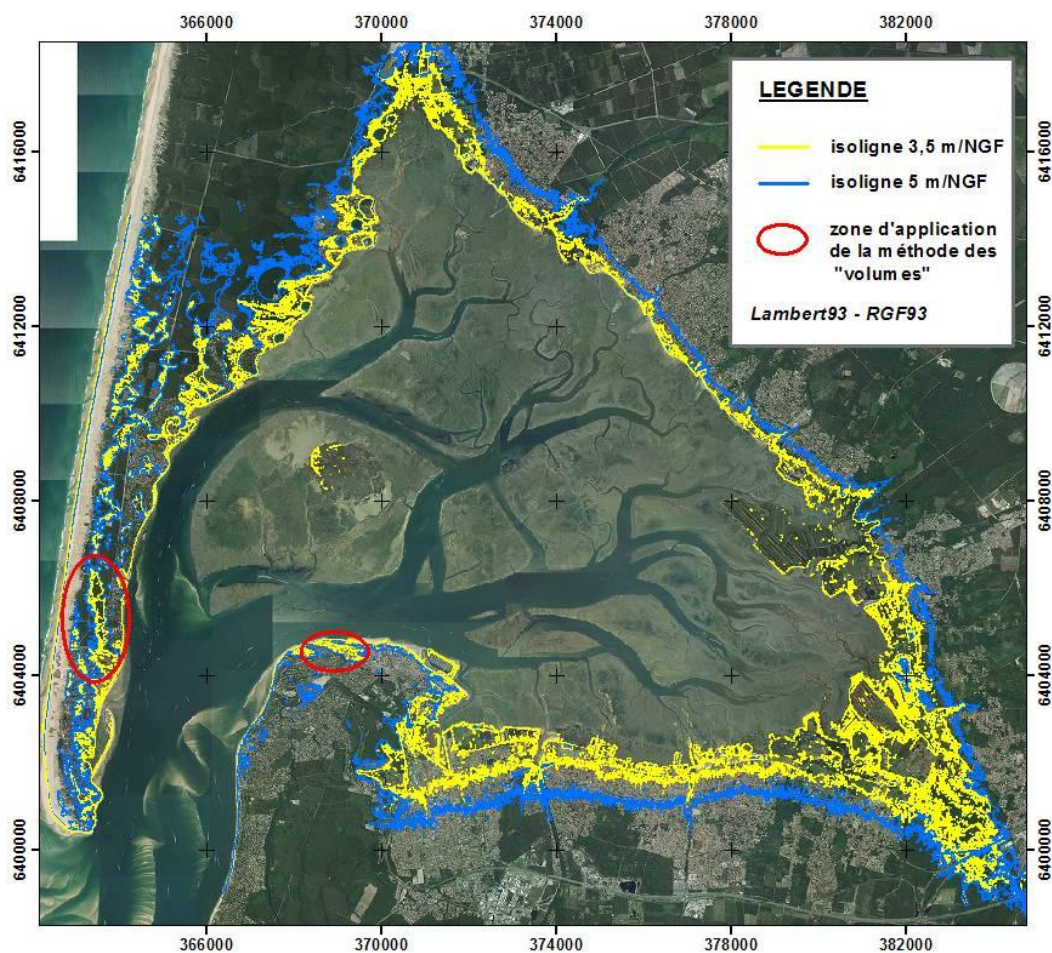


Figure 15 : Sélection des zones pour l'utilisation de la méthode « topo/volume ».

Etape 2 : Détermination de la ligne de débordement. Pour cette présente étude, la ligne de débordement a été définie comme étant une ligne de crête de haut de plage édifiée par des processus naturels, éventuellement remaniée ou aménagée (promenade de front de mer, voie de circulation...). Cette ligne est déterminée de telle sorte que les terrains situés à l'arrière soient toujours à une altitude inférieure (cuvette) de manière à ce que celle de la ligne de débordement se comporte comme un seuil hydraulique. Le profil longitudinal de cette ligne est extrait de la topographie Lidar de 2005.

Les ouvrages de protection contre la submersion marine ne rentrent pas dans la définition de ces lignes de débordement. Les modalités de prise en compte des ouvrages sont précisées dans le paragraphe 4.3.

Etape 3 : Les volumes franchissant la ligne de débordement sont calculés en appliquant une chronologie de niveau de la mer et un niveau maximum (niveau marin de référence) issus de simulation du modèle hydrodynamique MARS-2DH utilisé pour propager l'évènement centennal depuis le large vers le rivage à l'intérieur du Bassin d'Arcachon (Figure 19).

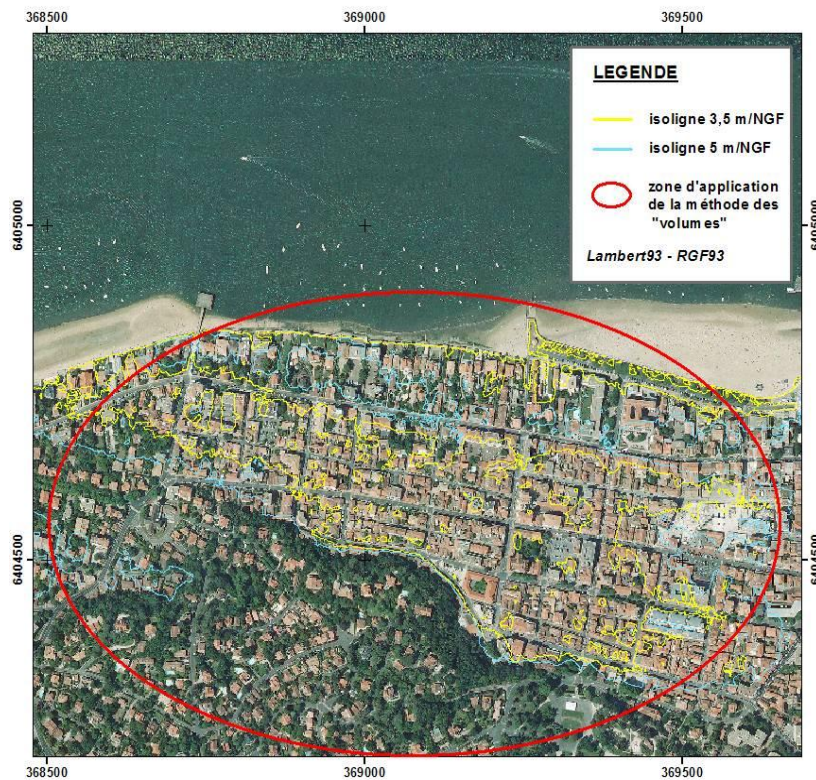


Figure 16 : Zone basse de « La Chapelle » sur la commune d'Arcachon concernée par la méthode « topo/volume ».



Figure 17 : Zone basse de « Morava » sur la commune de Lège-Cap-Ferret concernée par la méthode « topo/volume ».

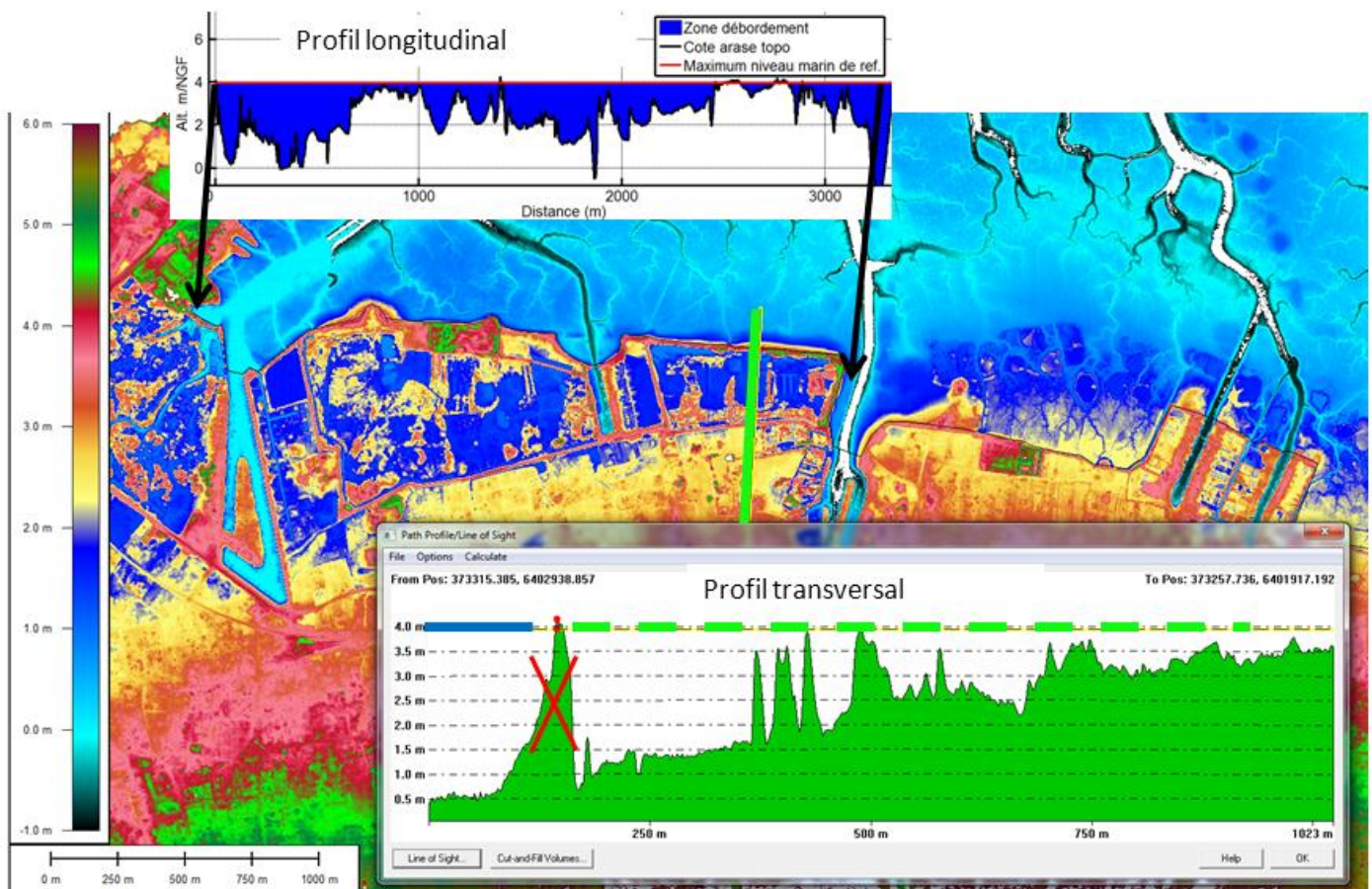


Figure 18 : Exemple de profils topographiques transversal et longitudinal (le long de la digue) au niveau des prés salés de La-Teste-de-Buch.
La croix rouge représente l'arasement de la digue.

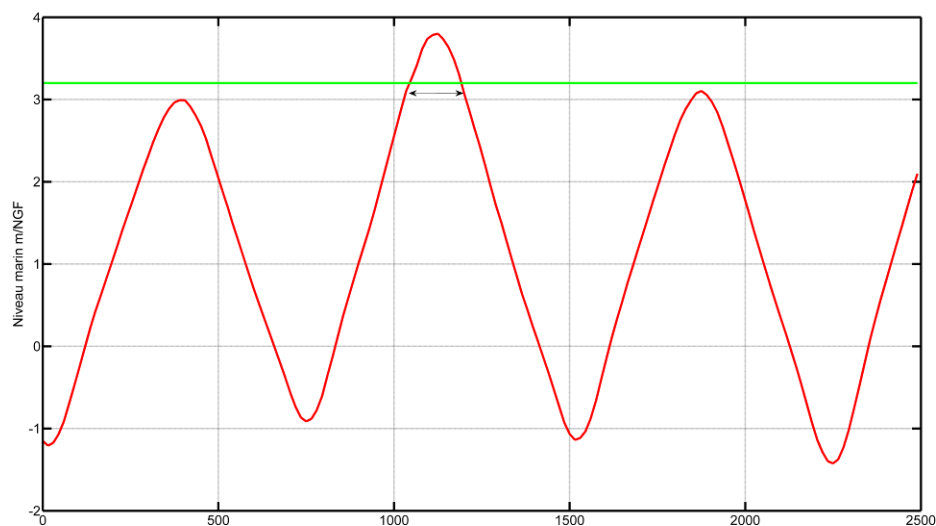


Figure 19 : Signal de niveau d'eau pour un événement de référence suivant 3 pleines mers (par exemple maximum de 3.8m/IGN69 en rouge) ; altitude de la ligne de débordement (par exemple 3.2 m/IGN69 en vert) ; la double flèche noire représente la durée de franchissement (en abscisse le temps en minutes).

Etape 4 : Les volumes déversés par-dessus la ligne de débordement sont calculés à partir de la formule de seuil classique en régime dénoyé. La formule du débit déversant est uniquement fonction de la hauteur d'eau h au-dessus la ligne de crête (différence entre l'altitude du plan d'eau et l'altitude de la ligne de crête).

$$Q(t) = \mu \cdot C_v \cdot L \cdot h^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{2g} \quad \text{si } h > 0$$
$$Q(t) = 0 \quad \text{si } h < 0$$

h = Différence entre le niveau de la mer à l'instant t et l'altitude de la ligne de débordement

L = Longueur du tronçon de débordement sur une hauteur h

μ = Coefficient de débit (valeur par défaut = 0.4)

C_v = Coefficient de vitesse (par défaut = 1)

$g = 9,81$

Pour chaque tronçon de débordement, les volumes sont obtenus par intégration du débit sur la durée du débordement.

5.3.2. Calcul de l'altitude du plan d'eau correspondante aux volumes pénétrant à terre

Etape 1 : Pour chaque site sur lequel la méthode « topo/volume » est utilisée, un abaque volume d'eau entrant / altitude du plan d'eau atteinte (Figure 20) est créé. Cette étape consiste à croiser le MNT (issu des levés Lidar de 2005) avec plusieurs valeurs d'isoligne d'altitude « z » et à calculer les volumes compris entre le terrain et le plan d'altitude « z ». Cette opération est réalisée avec le logiciel Surfer®.

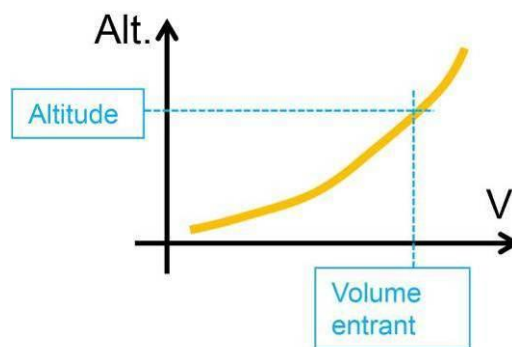


Figure 20 : Abaque-type volume/altitude.

Etape 2 : Le volume d'eau pénétrant à terre pour l'évènement de référence est ensuite reporté sur l'abaque pour en déduire l'altitude à utiliser pour cartographier la surface inondée par débordement.

Etape 3 : La cartographie de la surface inondée s'effectue ensuite selon les étapes 2 à 4 décrites paragraphe 5.4.

5.4. LES DIFFERENTES ETAPES DE LA CARTOGRAPHIE

La cartographie de la limite de l'inondation s'effectue en 4 étapes à partir d'un outil SIG (logiciel ArcGIS).

Etape 1 : Regroupement des niveaux marins de référence au rivage par tronçons sur le pourtour du Bassin d'Arcachon (Tableau 2 et Figure 21). Ces tronçons sont déterminés pour des intervalles de 5 cm à partir des valeurs de niveaux marins au rivage présentées dans le Tableau 1.

	Ntot (m/NGF) aléa actuel	Tronçons (m/NGF)	Ntot (m/NGF) aléa 2100	Tronçons (m/NGF)
Passe Nord	3,62	3,7	4,02	4,1
Mimbeau-sud	3,69	3,7	4,09	4,1
Mimbeau-centre	3,71	3,7	4,11	4,1
Mimbeau-nord	3,73	3,75	4,13	4,15
Cap Ferret	3,75	3,75	4,15	4,15
La Vigne	3,8	3,8	4,2	4,2
L'Herbe	3,83	3,85	4,23	4,25
Le Canon	3,84	3,85	4,24	4,25
Piraillan	3,85	3,85	4,25	4,25
Petit Piquey	3,89	3,9	4,29	4,3
Piclaouey	3,89	3,9	4,29	4,3
Claouey	3,92	3,9	4,32	4,3
Port d'Arès	3,96	3,95	4,36	4,35
Arès	3,96	3,95	4,36	4,35
Port d'Andernos	3,95	3,95	4,35	4,35
Andernos	3,94	3,95	4,34	4,35
Le Mauret	3,94	3,95	4,34	4,35
Fontainevielle	3,95	3,95	4,35	4,35
Taussat	3,95	3,95	4,35	4,35
Cassy	3,95	3,95	4,35	4,35
Lanton	3,98	3,95	4,38	4,35
Certes	3,95	3,95	4,35	4,35
Audenge	3,97	3,95	4,37	4,35
Biganos	3,98	3,95	4,38	4,35
Le Teich	3,96	3,95	4,36	4,35
Mestras	3,95	3,95	4,35	4,35
Gujan-Mestras	3,94	3,95	4,34	4,35
Meyran	3,94	3,95	4,34	4,35
La Hume	3,95	3,95	4,35	4,35
Port du Rocher	3,97	3,95	4,37	4,35
La-Teste-de-Buch	3,94	3,95	4,34	4,35
Arcachon	3,95	3,95	4,35	4,35
Perreire	3,83	3,85	4,23	4,25
Pyla-sur-mer	3,76	3,75	4,16	4,15
Pyla-plage	3,71	3,7	4,11	4,1
Passe Sud	3,62	3,7	4,02	4,1
L'île sud	3,91	3,95	4,31	4,35
L'île nord	3,93	3,95	4,33	4,35

Tableau 2 : Etape 1 - Affectation, par tronçons, du niveau marin au rivage par classe de 5 cm pour l'aléa actuel et l'aléa 2100.

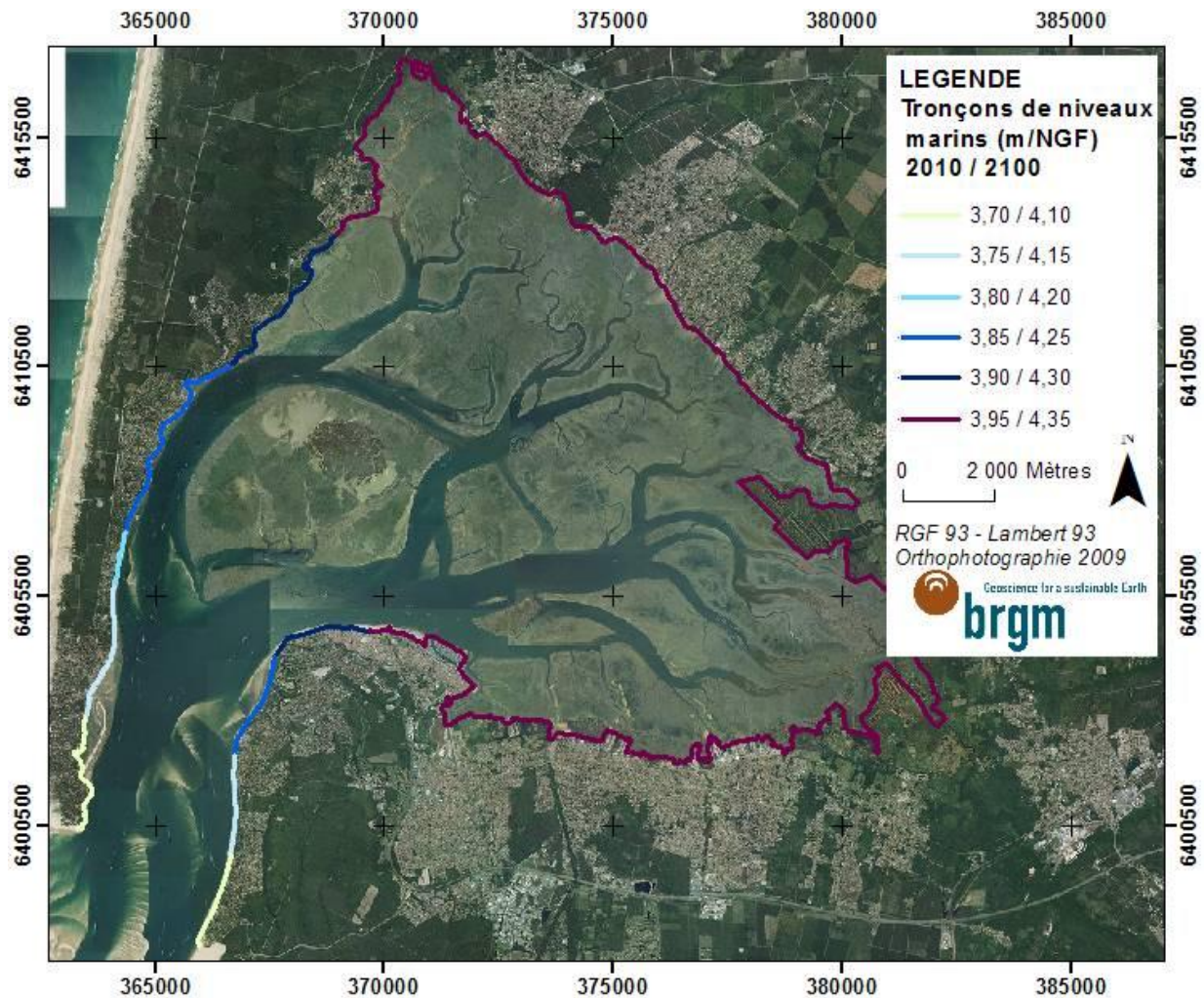


Figure 21 : Etape 1 - Tronçons de niveaux marins de référence (respectivement actuel et 2100) au rivage par classe de 5 cm sur le pourtour du Bassin d'Arcachon.

Etape 2 : Pour les secteurs où la méthode « topo/niveau » est utilisée : extraction des isolignes correspondant au niveau marin de référence de chaque tronçon (Figure 21) à partir des données topographiques, c'est-à-dire du Lidar 2005 (SIBA).

Pour les secteurs où la méthode « topo/volume » est utilisée : extraction des isolignes correspondant à l'altitude (m/NGF) du plan d'eau associé au volume d'eau débordant calculé, à partir des données topographiques Lidar 2005 (SIBA).

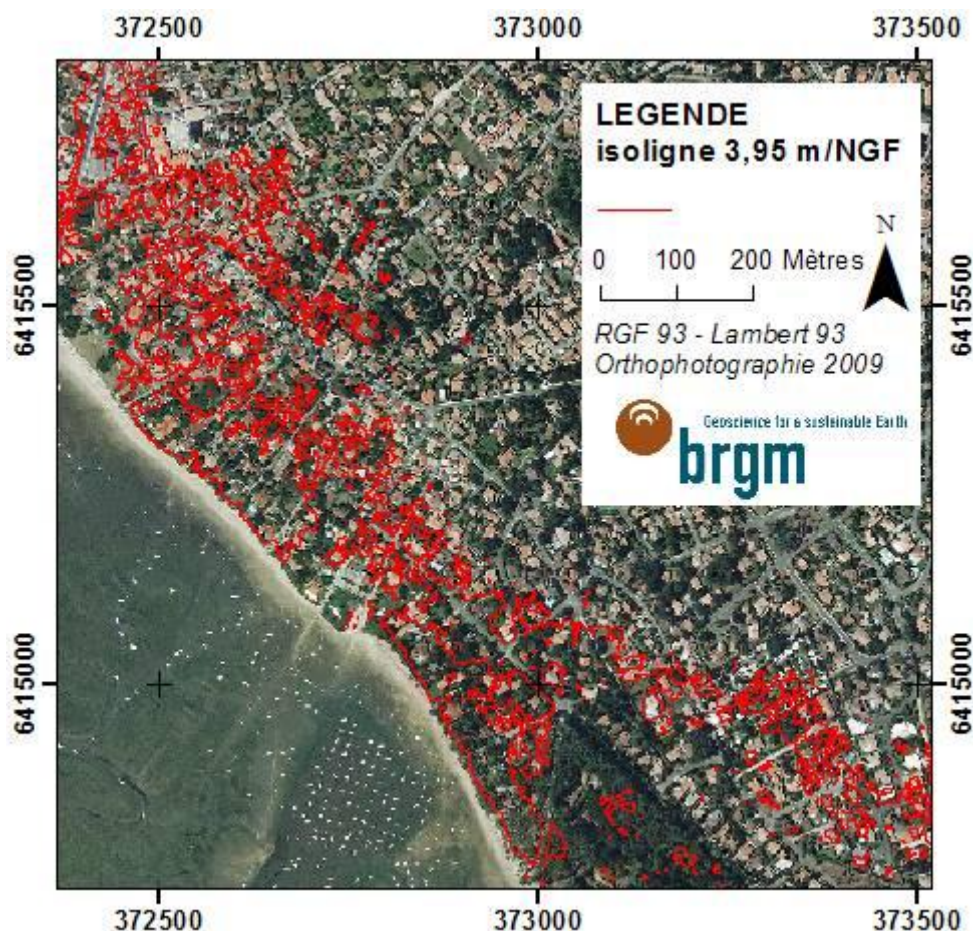


Figure 22 : Etape 2 - Isoligne brute 3,95 m/NGF extraite des données Lidar de 2005 sur la commune d'Arès en exemple (échelle approximative = 1/10 000).

Etape 3 : Lissage de l'isoligne pour chaque tronçon pour une restitution nette à l'échelle 1/25 000 (Figure 23). Il s'agit d'une interpolation « sécuritaire » entre certains points de l'isoligne réalisée manuellement par un opérateur sur l'image. Cette interpolation manuelle associée à une analyse d'expert plutôt qu'une interpolation automatique par le logiciel permet :

- d'ignorer certains détails de l'isoligne non fiables compte tenu de la précision et du bruitage de la donnée topographique utilisée et de l'échelle de restitution (1/25 000) ;
- de lisser plus ou moins finement en fonction de la pente topographique : plus la pente est faible, moins l'isoligne sera lissée. Pour cela l'opérateur analyse la sensibilité de la topographie à partir de l'extraction de plusieurs isolignes par intervalles de 5 cm (par exemple : si le niveau marin de référence est de 3,85 m, les isolignes 3,80 et 3,90 m sont extraites) ;
- d'ignorer les zones topographiquement basses isolées (cuvettes non connectées aux principales zones basses en lien avec la mer lors de la submersion) ou d'une superficie non cartographiable au 1/25 000, c'est-à-dire inférieure à 2000m². Par exemple, les zones hautes isolées (dont l'altitude est supérieure au niveau marin au rivage) au sein de la surface inondable sont négligées lorsque leur surface est inférieure à 2 000 m² (cf. paragraphe 6.5).

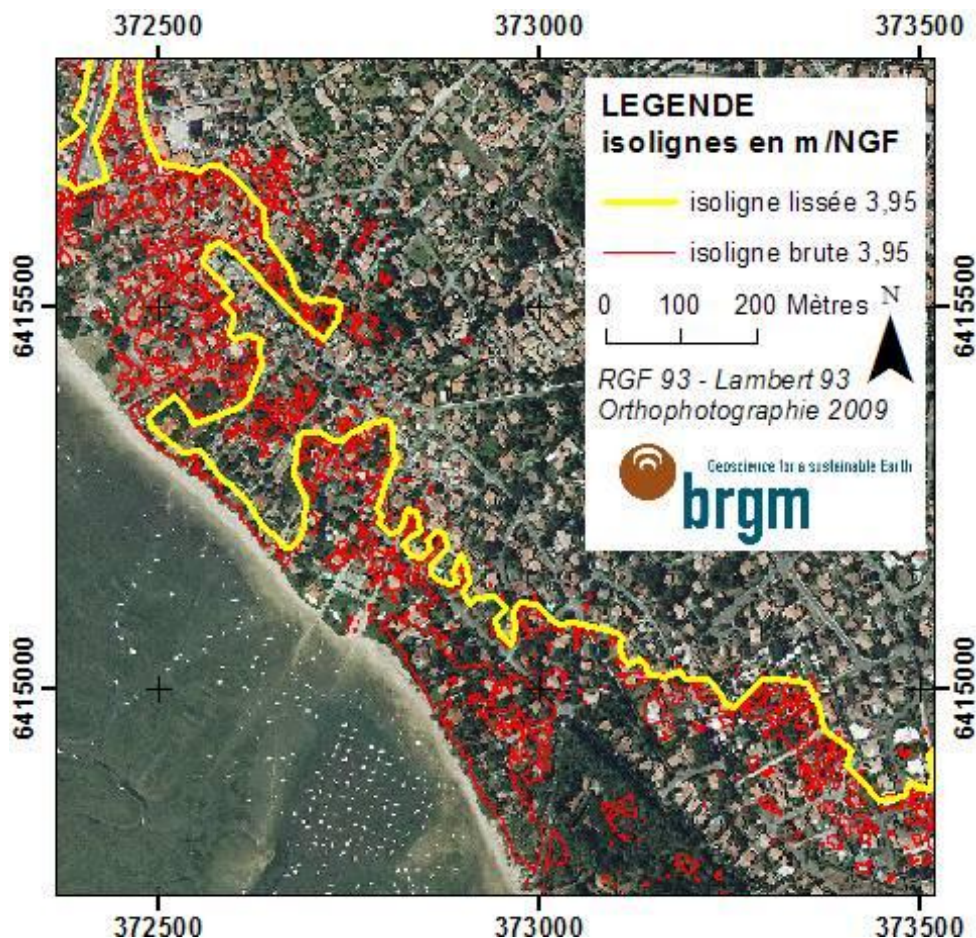


Figure 23 : Etape 3 - Lissage de l'isoligne (exemple ici avec l'isoligne 3,95 m/NGF) manuellement avec analyse d'expert, sur la commune d'Arès (échelle approximative = 1/10 000).

Etape 4 : Ajustement de la limite de submersion ainsi obtenue à partir de l'analyse de terrain et de la connaissance des événements historiques.

Les contrôles de terrain, bien que non exhaustifs, ont permis de vérifier que les zones cartographiées étaient bien inondables car soit en lien avec la mer, soit soumises aux franchissements par paquet de mer, soit par entrée d'eau via des connexions hydrauliques.

Lorsque l'étendue de la submersion historique est supérieure à la limite donnée par l'isoligne déterminée aux étapes 1 à 3, la limite de submersion retenue correspond à la limite historique. Par exemple, dans le quartier du Mauret à Andernos-les-Bains, la Figure 24 met en évidence que l'isoligne brute 3,95 m/NGF (ligne rouge) est par endroit (cercle en pointillés blanc) inférieure à la limite de la submersion générée par Xynthia (28/02/2010, polygone bleu). La ligne jaune correspond à l'ajustement de la limite de la submersion pour l'aléa « actuel sans ouvrage » à partir de l'analyse de terrain et de la connaissance des événements historiques.

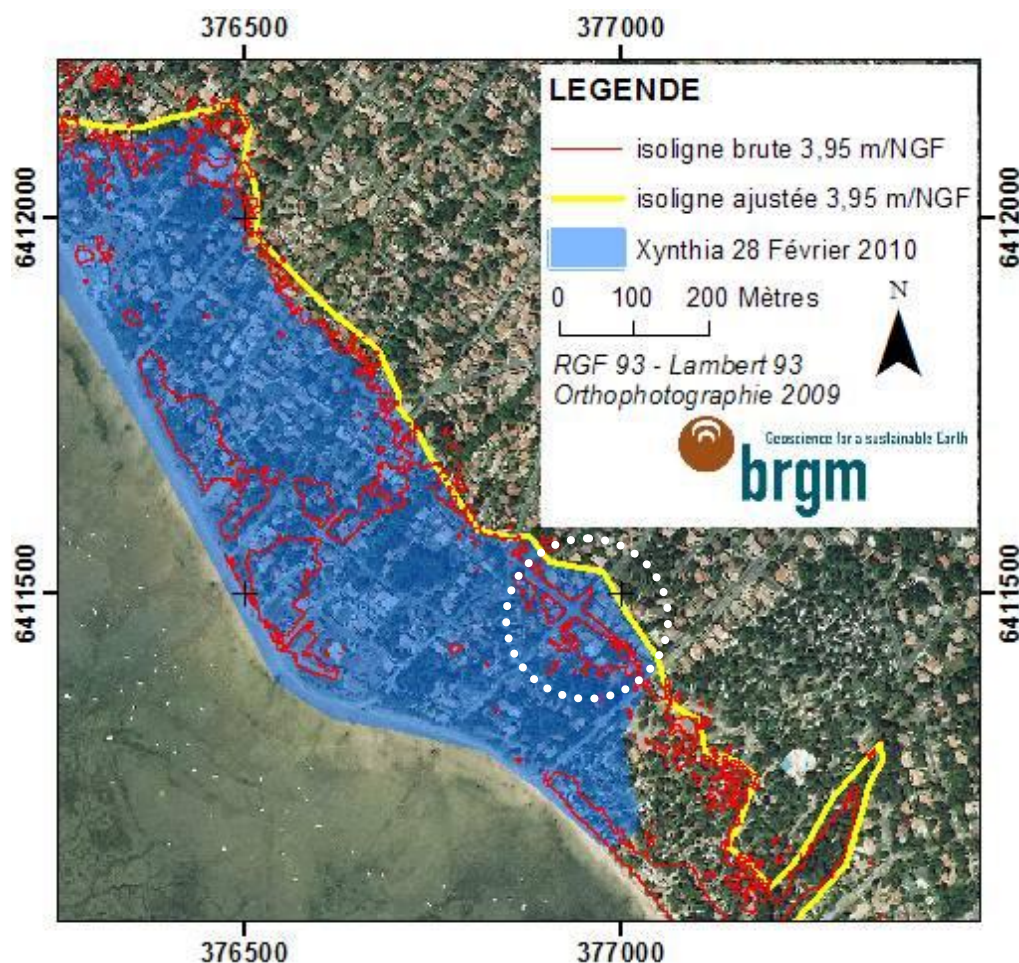


Figure 24 : Etape 4 - Ajustement de la limite de submersion par recoupement avec les événements historiques (ici : submersion Xynthia), sur la commune d'Andernos-les-Bains en exemple (échelle approximative 1/10 000).

5.5. MODALITES DE PRISE EN COMPTE DES PARTICULARITES LOCALES

Lors de visites de terrain, notamment celle réalisée entre le 5 et 8 novembre 2012 spécifiquement pour cette étude PPRL, plusieurs facteurs jouant un rôle sur la propagation de la submersion marine ont été mis en évidence. Il s'agit des seuils topographiques, des remblais et des connexions hydrauliques qui ont été identifiés de manière non exhaustive ainsi que de l'effet des vagues. Ces facteurs sont pris en compte dans la cartographie selon les modalités présentées dans les paragraphes suivants.

5.5.1. Seuils topographiques

Bien que déconnectées des zones basses du front de mer par un point haut (c'est-à-dire dont l'altitude est proche du niveau marin de référence) dit « seuil topographique » (Figure 26), certaines zones basses à l'intérieur des terres ont cependant été cartographiées en aléa.

Principalement en raison de leur proximité avec le front de mer et de leur exposition, elles ont été identifiées lors de la visite de terrain (5 au 8 novembre 2012) comme pouvant être affectées par la submersion en cas de franchissement du seuil par paquets de mer ou ruissellement (dans les conditions de l'évènement naturel de référence).

Ces seuils topographiques ont été identifiés et sont représentés ci-après : La Pointe, La Vigne, l'Herbe et Piraïllan (Figure 26, Figure 25, Figure 27 et Figure 28).



Figure 25 : Seuils topographiques de La Pointe, La Vigne, l'Herbe et Piraïllan (commune de Lège-Cap-Ferret).



Figure 26 : Exemple de seuil topographique à la Pointe avec une zone basse en arrière sur le secteur des 44 hectares (commune de Lège-Cap-Ferret).

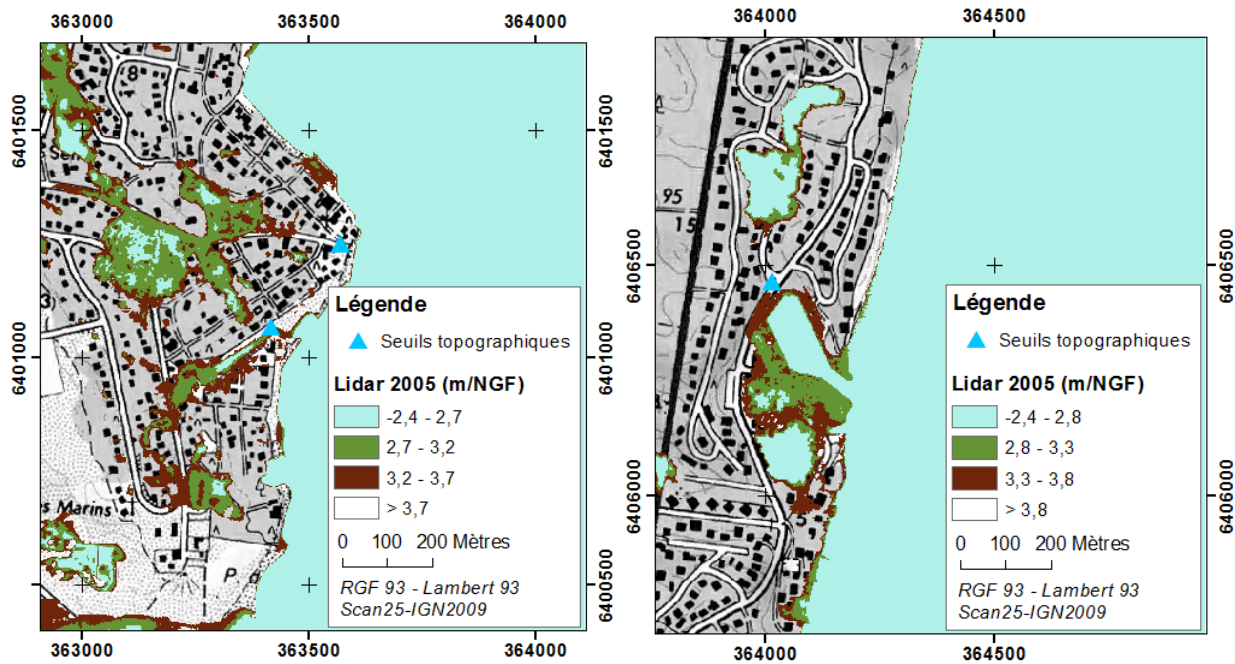


Figure 27 : Seuils topographiques à la Pointe (à gauche) et à La Vigne (à droite) considérés submersibles avec des zones basses en arrière (commune de Lège-Cap-Ferret).

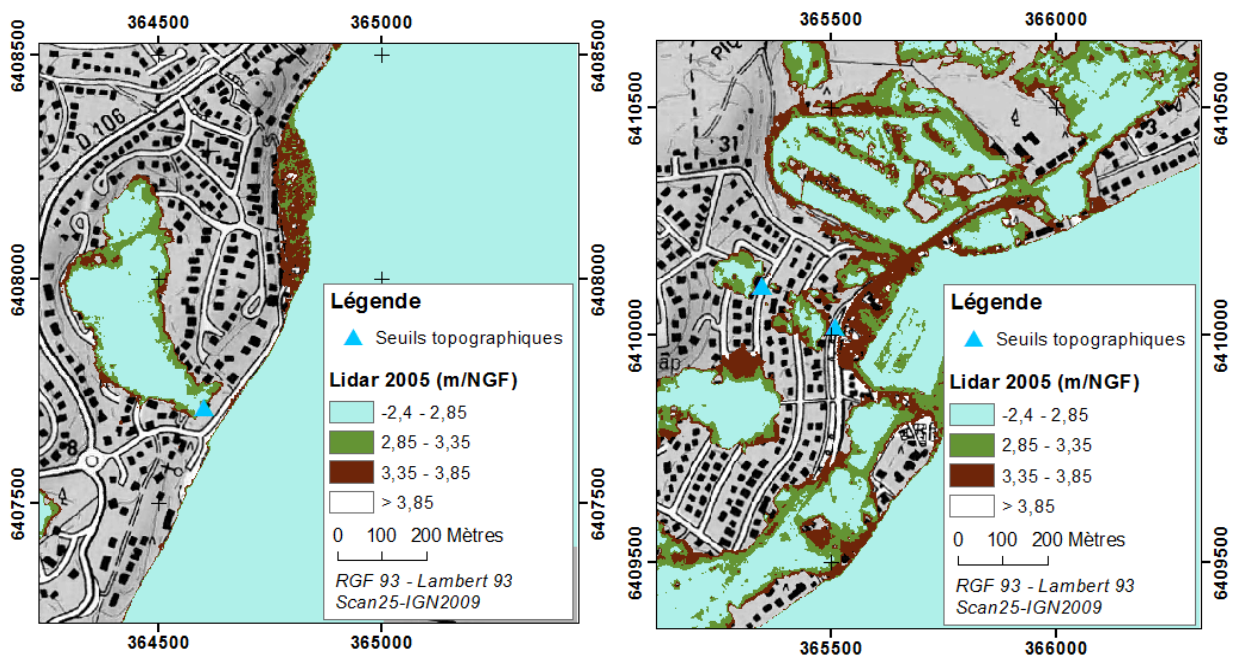


Figure 28 : Seuils topographiques de L'Herbe (à gauche) et de Piraillan (à droite) avec des zones basses en arrière (commune de Lège-Cap-Ferret).

5.5.2. Remblais et Connexions hydrauliques

Sur le MNT du Lidar 2005, certaines zones basses semblent déconnectées des zones basses inondables du front de mer par des remblais (route, voie ferrée ou autre) qui ont un effet sur l'écoulement de l'eau semblable à celui des digues.

La visite de terrain a permis de vérifier et de mettre en évidence la présence de fossés, de canalisations ou de petits cours d'eau par exemple qui induisent des connexions hydrauliques entre les 2 zones situées de part et d'autre du remblai et qui rendent possible la propagation de la submersion marine dans la zone basse située en arrière du remblai (Figure 29). Les principaux remblais considérés « perméables » car des connexions hydrauliques ont été identifiées, sont présentés de manière non exhaustive sur les Figure 30, Figure 31, Figure 32 et Figure 33.



Figure 29 : Exemples de connexions hydrauliques (fossés, drains, etc.) au niveau de remblais (route, voie ferrée).

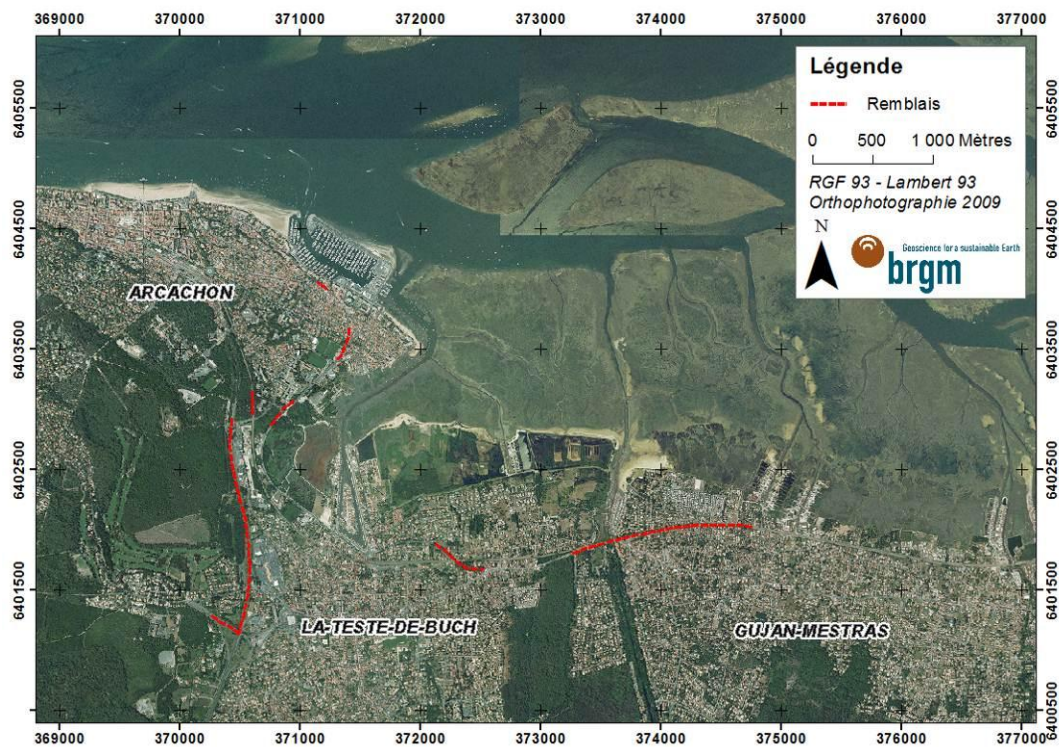


Figure 30 : Remblais présentant des connexions hydrauliques sur les secteurs de l'Aiguillon à Arcachon, de la zone commerciale de La-Teste-de-Buch, de la Hume (commune de Gujan-Mestras).

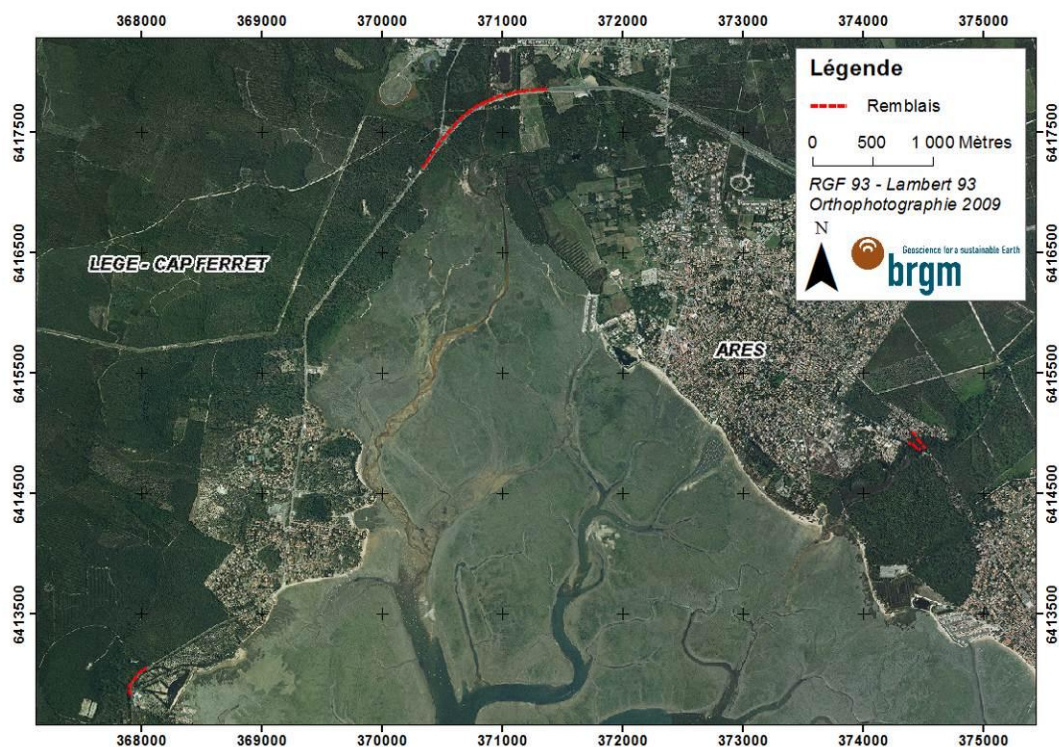


Figure 31 : Remblais présentant des connexions hydrauliques sur le secteur du Canal des Etangs et de l'Anse du Sangla (commune de Lège-Cap-Ferret).

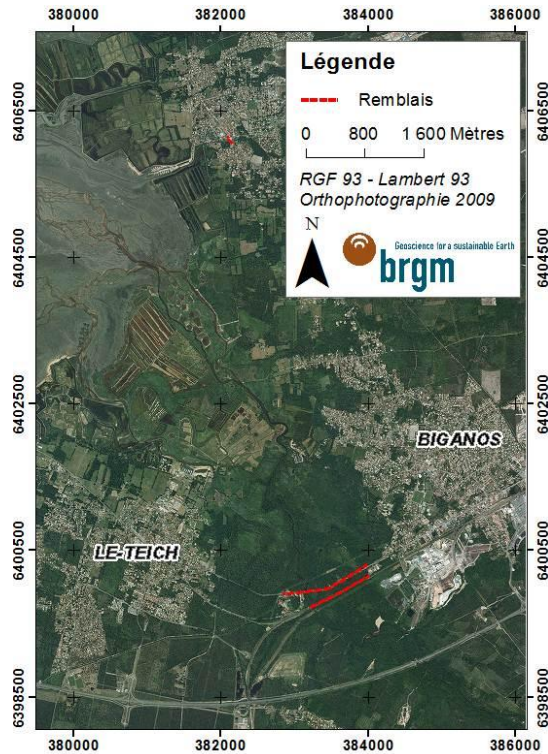


Figure 32 : Remblais présentant des connexions hydrauliques entre les communes du Teich et de Biganos.

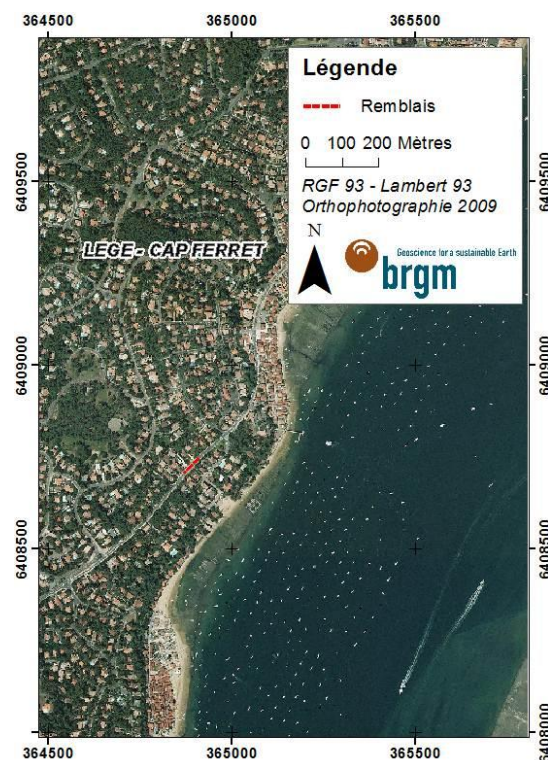


Figure 33 : Remblais présentant des connexions hydrauliques à l'Herbe sur la commune de Lège-Cap-Ferret.

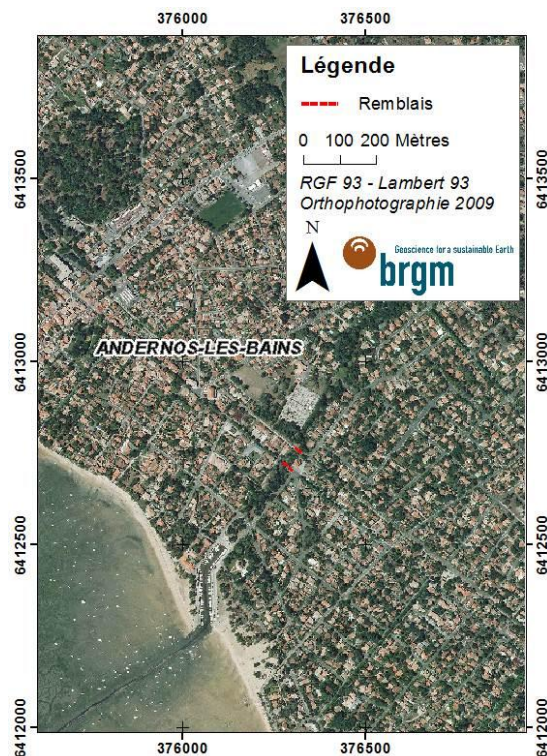


Figure 34 : Remblais présentant des connexions hydrauliques sur la commune d'Andernos-les-Bains.

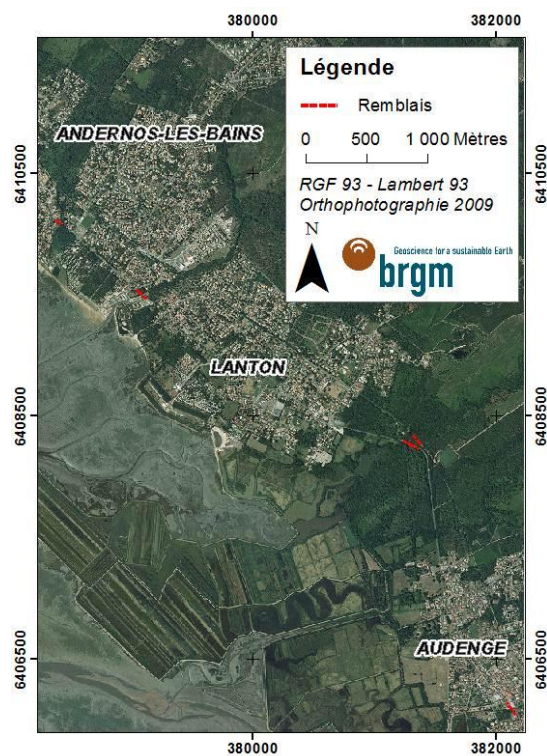


Figure 35 : Remblais présentant des connexions hydrauliques sur les communes d'Andernos-les-Bains, Audenge et Lanton.

5.5.3. Effet des vagues

Afin de mettre en évidence l'effet du déferlement des vagues (houle ou clapot) avec le risque de projections et le franchissement par paquets de mer sur le front de mer (enrochements, perrés ou autre), les zones particulièrement exposées aux vagues ont été identifiées et cartographiées (Figure 36).

Le linéaire compris entre le Pyla-Plage (commune de La-Teste-de-Buch) et le Perreire (commune d'Arcachon) est également exposé aux vagues. La géomorphologie de ce secteur du Bassin d'Arcachon se caractérise par une pente topographique relativement importante et l'absence de zone basse. L'effet des vagues qui peut être important dans le chenal qui prolonge la Passe Sud, se traduit donc essentiellement par des chocs et des projections par exemple (Figure 36).

Sur la commune d'Andernos-les-Bains (Figure 36), le clapot a joué par le passé un rôle majeur dans les phénomènes de submersion marine lors des tempêtes Klaus (24/01/2009) et Xynthia (28/02/2010). Etant donné que les niveaux marins au rivage lors de ces événements étaient inférieurs (cf. rapport BRGM/RP-58723-FR, Mugica et *al.*, 2009) à la cote d'arase des ouvrages côtiers, il n'y a pas eu de surverse continue mais la submersion des zones basses situées en arrière de la promenade du front de mer a été générée par des franchissements de paquets de mer, c'est-à-dire par le clapot. L'approche « statique » mise en œuvre pour la cartographie de l'aléa dans cette deuxième phase ne permet pas d'estimer les volumes d'eau franchissant par paquets de mer sous l'effet du clapot. Ces volumes pourront en revanche être calculés dans une phase ultérieure visant à affiner la cartographie de l'aléa. L'influence des ouvrages de protection côtière existants sur cette commune (murets rehaussant les perrés par exemple) pourra également être analysée.

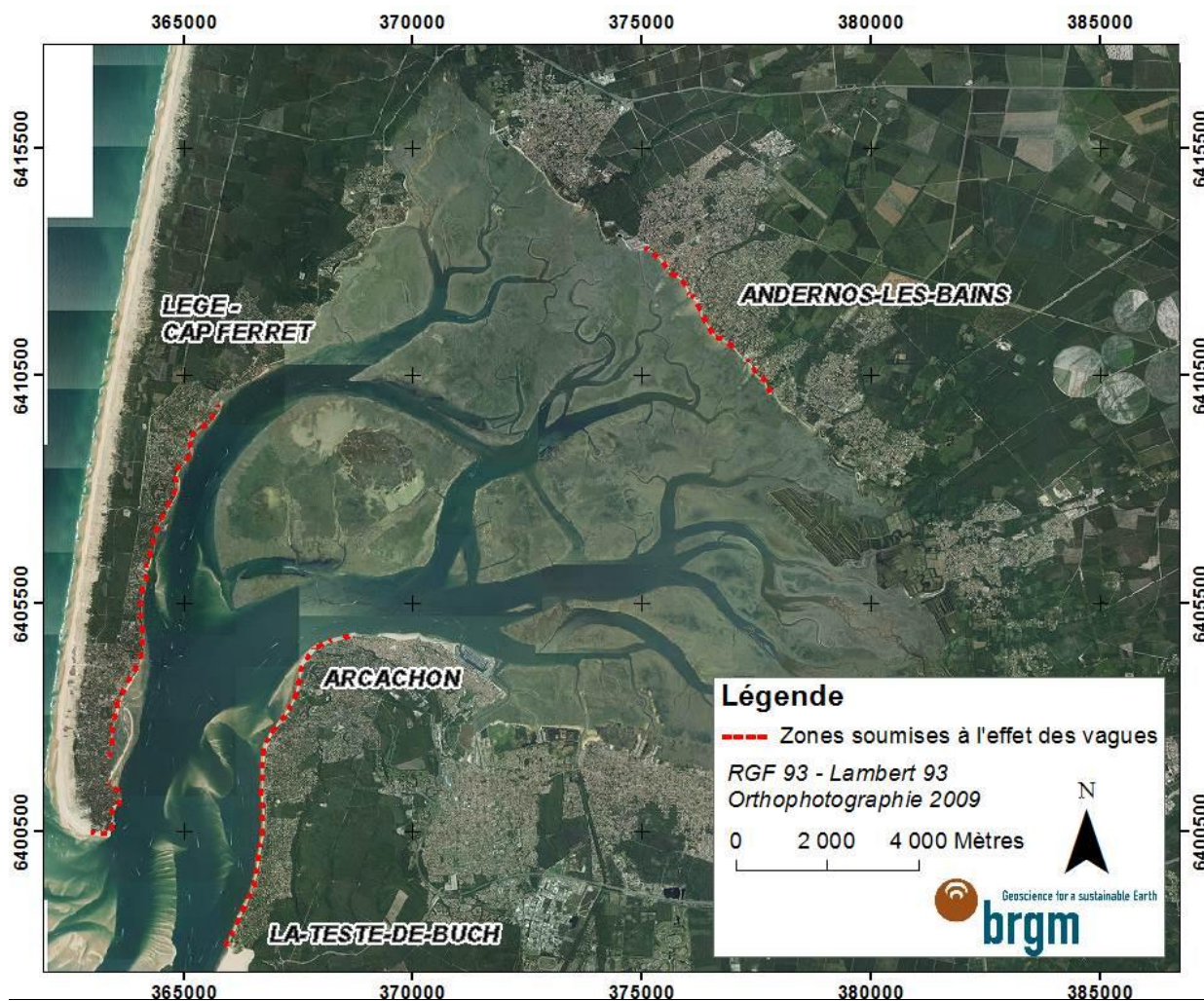


Figure 36 : Zones exposées aux vagues au niveau de la Pointe du Cap-Ferret, sur le front de mer à Andernos-les-Bains et sur le secteur compris entre le quartier de La Chapelle (commune d'Arcachon) et Pyla-Plage (commune de La-Teste-de-Buch).

5.5.4. Zones hautes isolées

Comme précisé dans le paragraphe 5.4, le lissage de l'isoligne (étape 3 de la cartographie), consiste notamment à ignorer certaines caractéristiques topographiques non cartographiables à l'échelle de restitution 1/25 000^{ème} (c'est-à-dire surface < 2000 m²) ou considérées non fiables (incertitudes locales sur la donnée topographique Lidar 2005).

Les zones hautes isolées sont définies comme étant des zones dont l'altitude est supérieure au niveau marin de référence au rivage et totalement ou partiellement entourée par une zone submersible ou à proximité du front de mer (dunes urbanisées par exemple, remblais, seuils topographiques, etc.) Ces zones hautes isolées sont cartographiées hors d'eau, lorsque leur surface était supérieure à 2 000 m².

En revanche, les zones localement hautes qui sont situées en continuité ou sur des zones humides, mobiles ou recouvertes de végétation n'ont pas été considérées comme des zones hautes isolées, car la donnée topographique n'est pas considérée fiable ou pérenne dans ces environnements. Elles peuvent donc être cartographiées comme des zones inondables, en continuité des zones basses qui les entourent.

Le paragraphe 6.5 et l'annexe 6 détaille et illustre les modalités de cartographie des zones hautes isolées au sein de la surface inondable.

6. Cartographie des aléas

6.1. QUALIFICATION DE L'ALEA

Un aléa est défini par les conséquences physiques d'un scénario d'évènements naturels et/ou technologiques. Il est caractérisé par son occurrence et son intensité. La transcription spatiale de l'aléa permet de le représenter et de le qualifier (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011). Cette présente étude PPRL porte sur la caractérisation de l'aléa submersion marine pour un évènement centennal.

Le risque résulte du croisement de l'aléa et d'un enjeu vulnérable (personnes, biens, activités, patrimoine, etc. susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011). La caractérisation du risque ne fait pas l'objet de cette présente étude.

Conformément aux recommandations méthodologiques (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011), le niveau d'aléa dépend de la hauteur d'eau à terre produite par la submersion et de la dynamique de submersion. Le Tableau 3 présente les **4 niveaux d'aléas : faible, modéré, fort et très fort** (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011).

		Dynamique de submersion	
		lente	rapide
Hauteur d'eau (m)	$H < 0,5$	ALEA FAIBLE	ALEA MODERE
	$0,5 < H < 1$	ALEA MODERE	ALEA FORT
	$H > 1$	ALEA FORT	ALEA TRES FORT

Tableau 3 : Niveaux d'aléas.

Les mêmes niveaux sont employés pour caractériser l'aléa « actuel » et l'aléa « 2100 ».

Sur les cartes d'aléas, la limite de l'aléa fort côté « mer » correspond au zéro hydrographique issu du scan25 de l'IGN. Lorsque des aménagements relativement récents, c'est-à-dire postérieurs à la production de la donnée de l'IGN (ouvrages portuaires et de protection contre l'érosion et/ou la submersion, haut de plage, etc.) ne sont pas pris en compte, cette limite a été ajustée à partir de l'orthophotographie de 2009 (SIBA). Comme la caractérisation de l'aléa n'a pas de sens sur des zones aussi mobiles que le système « plage », la cartographie s'arrête au nord et sud de l'embouchure à la frontière entre les ouvrages côtiers et le système naturel plage-dune : c'est-à-dire l'extrême pointe du Cap Ferret et le musoir de la Corniche (La-Teste-de-Buch).

Compte tenu de la méthode « statique » employée dans cette deuxième phase de l'étude PPRL du Bassin d'Arcachon, les aléas ont été caractérisés à partir des hauteurs d'eau issues du Tableau 1 avec les valeurs de la colonne (C) pour l'aléa « actuel sans ouvrage » et les valeurs de la colonne (D) pour l'aléa « 2100 sans ouvrage ».

Sur le Bassin d'Arcachon, l'approche « statique » n'a pas permis de distinguer un éventuel niveau d'aléa « très fort ». Ce résultat pourra être vérifié dans une phase ultérieure par une approche « dynamique » qui apportera une information sur la vitesse de l'écoulement de l'eau.

Le tracé de chacune des limites d'aléa a été effectué selon les étapes décrites dans le paragraphe 5.4. Ces limites ont pu être ajustées en fonction de l'existence de seuils topographiques (voir paragraphe 5.5), des remblais et des connexions hydrauliques (voir paragraphe 5.5.2), de l'effet des vagues (voir paragraphe 5.5.3) et des zones hautes isolées (voir paragraphe 5.5.4).

Les ouvrages de protection côtière ayant été considérés inexistants et arasés, les zones de sur-aléas n'ont pas été identifiées comme recommandé dans le cas de prise en compte d'hypothèse de brèche (Circulaire du 27 juillet 2011).

D'autre part, la vitesse de l'écoulement de l'eau, la durée de la submersion, la vitesse de montée de l'eau sont des paramètres de la dynamique de submersion qui n'ont pas été estimés par la méthode « statique » et par manque d'information historique.

Le Tableau 4 liste, pour rappel, le type de méthode de cartographie employée pour chaque commune du Bassin d'Arcachon.

Andernos-les-Bains	Méthode « topo/niveau »
Arcachon	Méthode « topo/niveau » + méthode « topo/volume » pour le quartier de la Chapelle
Arès	Méthode « topo/niveau »
Audenge	Méthode « topo/niveau »
Biganos	Méthode « topo/niveau »
Gujan-Mestras	Méthode « topo/niveau »
Lanton	Méthode « topo/niveau »
La-Teste-de-Buch	Méthode « topo/niveau »
Lège-Cap-Ferret	Méthode « topo/niveau » + méthode « topo/volume » pour le quartier Bélisaire – Morava
Le Teich	Méthode « topo/niveau »
Mios	-

Tableau 4 : Synthèse des méthodes de cartographie employée sur chaque commune du Bassin d'Arcachon.

6.2. SECTEURS SOUMIS AU DEBORDEMENT

La totalité des communes du pourtour du Bassin d'Arcachon (excepté la commune de Mios) sont soumises à la submersion marine par débordement de l'eau pour les conditions de l'évènement naturel de référence retenu avec arasement des ouvrages de protection côtière de type digue.

Pour rappel, en fonction de la configuration géomorphologique des secteurs l'aléa a été cartographié par croisement avec la topographie soit du niveau marin de référence (méthode

« topo/niveau ») soit du volume d'eau calculé par la méthode présentée chapitre 5.3 (méthode « topo/volume »).

Les cartes d'aléas « actuel » et « 2100 » sans ouvrage à l'échelle 1 / 25 000 sont présentées dans le dossier cartographique en annexes 4 et 5 du présent rapport. Elles sont également fournies au format numérique (MAPInfo 8.5) intégrable dans un SIG dans un CDRom.

6.2.1. La méthode « topo/volume »

Cette méthode a été appliquée sur les secteurs de « La Chapelle » (commune d'Arcachon,) de « Bélisaire-Morava » (commune de Lège-Cap-Ferret).

Secteur de « La Chapelle - Arcachon »

Sur le secteur de « La Chapelle », les volumes d'eau débordants sont calculés à partir de la ligne de débordement identifiée (Figure 37) et du niveau marin de référence de 3,90 m/NGF (Tableau 1 et Figure 9).

L'abaque exprimant la cote altimétrique en fonction du volume de la zone basse potentiellement inondable a été déterminé (Figure 38, cf. chapitre 5.3).

Le volume d'eau débordant est calculé à intervalles de temps réguliers (c'est-à-dire toutes les 15 minutes) afin de déterminer la cote altimétrique progressivement atteinte par la submersion⁸. Au bout de 2h30 (durée du débordement), le volume d'eau débordant est de 81 000 m³. Ce volume correspond, d'après l'abaque, à une altitude maximale de 3,60 m/NGF (Figure 39). C'est donc cette cote de 3,60 m/NGF qui est finalement retenue pour cartographier l'aléa « actuel sans ouvrage » sur ce secteur (Figure 40).

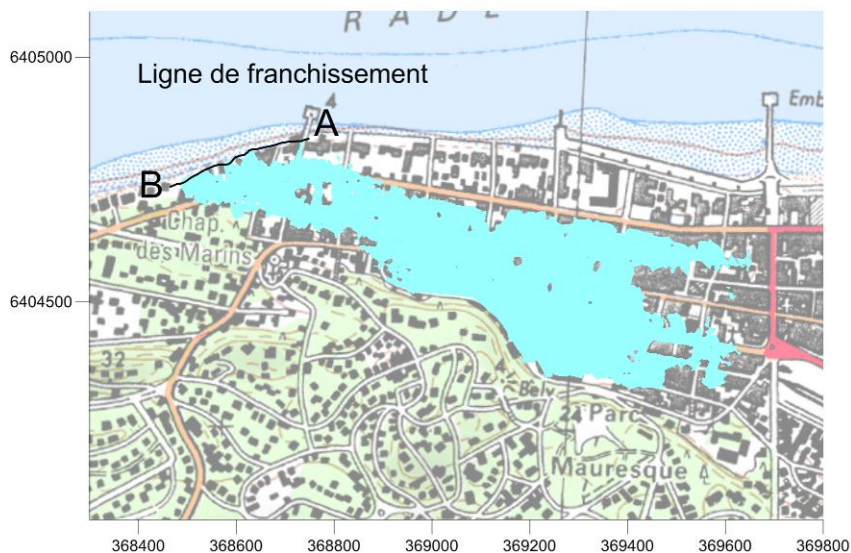


Figure 37 : Surface potentiellement inondable sur le secteur de « La Chapelle » (terrains situés sous la cote 3,90 m/NGF). Le trait noir (A-B) correspond à la « ligne de franchissement ».

⁸ Cette approche ne prend pas en compte la dynamique de submersion (vitesse de l'eau à terre, rugosité du sol, etc.)

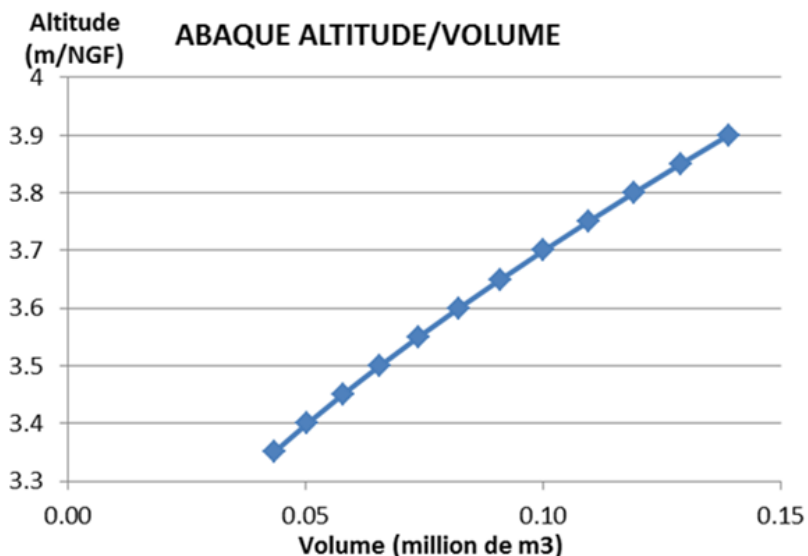


Figure 38 : Abaque volume/altitude sur le secteur de «La Chapelle» concerné par le débordement (d'après données Lidar 2005, SIBA).

Durée de débordement (minutes)	Volume d'eau débordant (m3)	Cote altimétrique (m/NGF) (abaque cote alti/volume)	Niveau de la mer atteint (m/NGF)
0	0		
15	700		3.53
30	3000		3.64
45	10000		3.77
60	23000		3.85
75	39000	3.30	3.88
90	56000	3.50	3.90
105	69000	3.50	3.84
120	76000	3.55	3.80
135	80000	3.60	3.70
150	81000	3.60	3.60

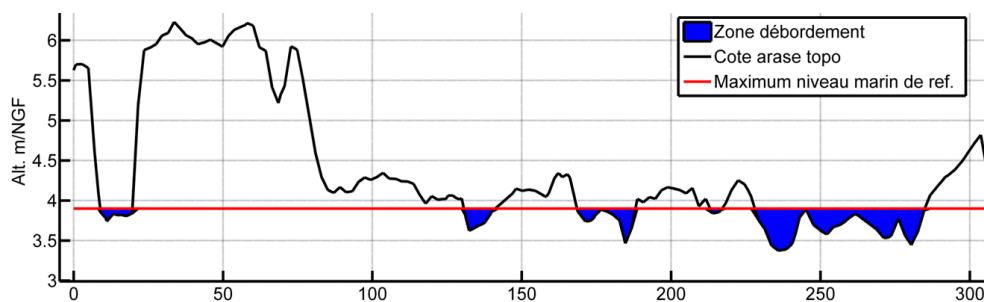


Figure 39 : Secteur de « La Chapelle » : (1) Tableau illustrant la chronologie du volume débordant, le niveau de la mer et la cote altimétrique associé. (2) Profil topographique d'Est en Ouest (A vers B) de la ligne de franchissement (noir) (distance en mètre) ; Niveau marin de référence (ici Ntot = 3,90 m/NGF en rouge).

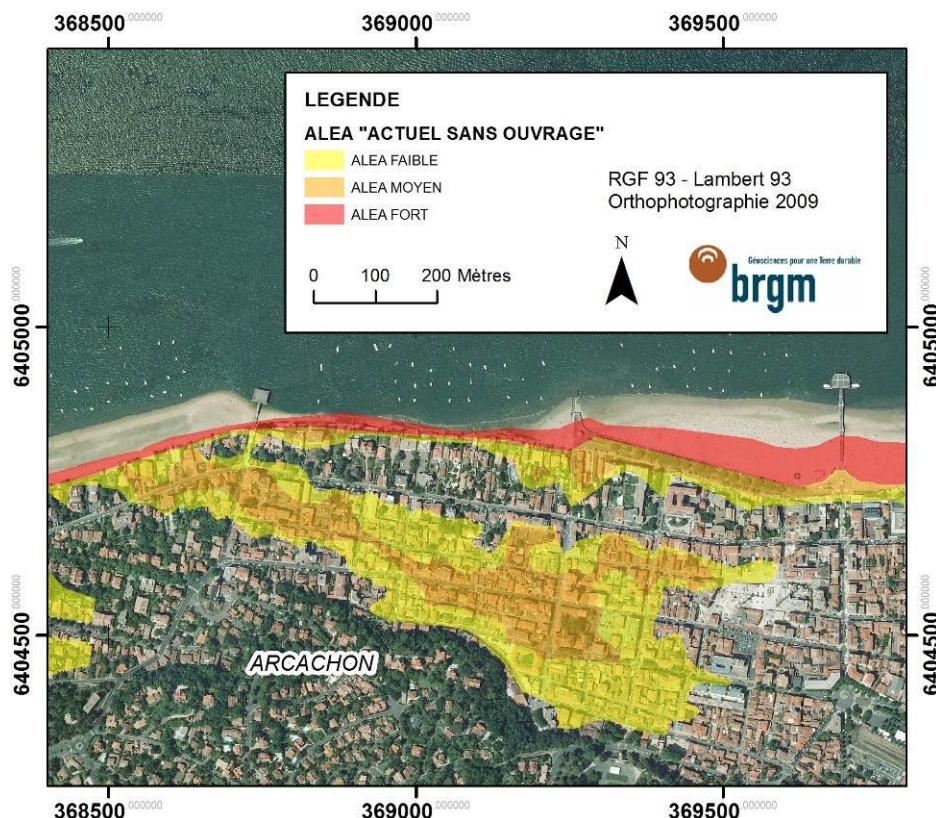


Figure 40 : Cartographie de l'aléa « actuel sans ouvrage » sur le secteur de « La Chapelle » (commune d'Arcachon). Echelle 1/10 000.

Secteur de « Bélisaire - Morava »

Un premier travail de cartographie par la méthode « topo/niveau » avec le niveau de référence de 3,80 m/NGF (Tableau 1), permet de distinguer sur ce secteur de « Bélisaire - Morava », deux zones basses distinctes (Zone 1 et Zone 2, Figure 41) reliées par un seuil topographique dont la cote topographique est autour de 3,2 – 3,5 m/NGF (d'après le Lidar 2005, Figure 43).

Pour chaque zone, un abaque associant altitude et volume est construit (Figure 42). Ces caractéristiques permettent ensuite de relier le volume à la cote qui doit être utilisée pour la cartographie.

L'expertise terrain avait soulevé la question du remplissage de la zone 2. Pour y répondre, les volumes pénétrant dans la zone 1 ont été calculés au niveau de la ligne de submersion en front de mer (ligne AB, la topographie est présentée sur la Figure 43) et à partir du niveau de référence de 3,80 m/NGF. Les volumes débordants dans la zone 2 par-delà le seuil topographique (ligne CD, la topographie est présentée sur la Figure 44) ont ensuite été estimés.

Le volume débordant dans la zone 1 est calculé à intervalles de temps réguliers (c'est-à-dire toutes les 15 minutes) afin de déterminer la cote altimétrique progressivement atteinte par la submersion⁹ (Figure 46). A noter, que le transfert des volumes, calculé toutes les 15 minutes, dans la zone inondable est considéré comme instantané.

⁹ Cette approche ne prend pas en compte la dynamique de submersion (vitesse de l'eau à terre, rugosité du sol, etc.)

Au bout d'une durée de 30 minutes, les volumes entrants dans la zone 1 permettent d'atteindre la cote altimétrique de 3,4 m/NGF. La zone 1, continue de se remplir et se déverse dans la zone 2 tant que le niveau d'eau reste supérieur à la cote de ce seuil. Une nouvelle formule de seuil est appliquée. Au bout d'une durée de 120 minutes, les volumes entrants dans la zone 1 permettent d'atteindre la cote altimétrique de 3,8 m/NGF. L'écoulement étant contraint par la largeur du seuil C-D (Figure 41) d'environ 50 m (Figure 44 et Figure 45), les volumes débordants permettent à l'inondation d'atteindre au maximum 3,1 m/NGF dans la zone 2.

Visuellement sur le terrain, le profil topographique du seuil entre les 2 zones (C-D, Figure 44) ne semble pas réaliste. Il est difficile d'imaginer sur ce tronçon de route, une variation aussi brutale (environ 1 m sur moins de 10 m) du profil topographique. Ainsi, pour tenir compte des imprécisions du Lidar 2005 et pour évaluer l'incertitude sur le calcul du volume pénétrant, une simplification géométrique du seuil a été réalisée. Une cote moyenne de 3,40 m/NGF a été prise pour la section de débordement (Figure 45). Le volume entrant est de 150 000 m³, ce qui correspond à une cote altimétrique de 3.2 m/NGF.

L'altitude 3,80 m/NGF est donc retenue pour cartographier l'aléa « actuel sans ouvrage » sur la zone 1 de ce secteur et l'altitude 3,2 m/NGF, plus sécuritaire, est retenue pour cartographier la zone 2 au-delà du seuil topographique (Figure 47).



Figure 41 : Surfaces potentiellement inondables sur le secteur de « Bélisaire - Morava » (terrains situés sous la cote 3,80 m/NGF). La ligne (A-B) correspond à la ligne de débordement. Les zones 1 et 2 sont séparées par un seuil topographique (C-D).

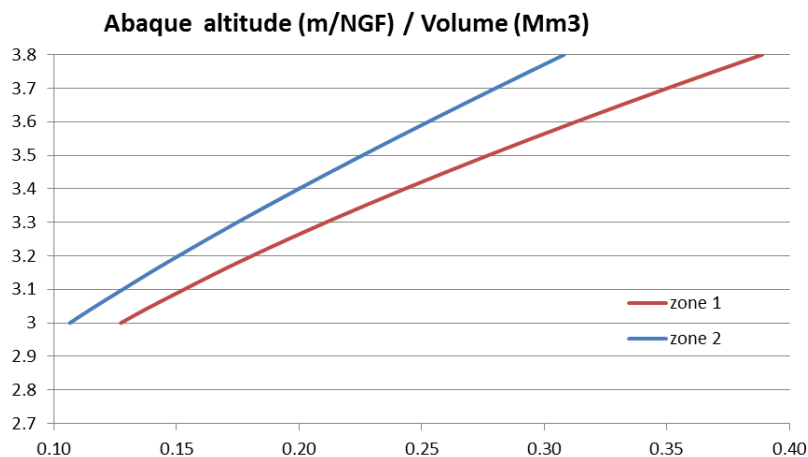


Figure 42 : Abaques volume/altitude sur le secteur de «Bélisaire-Morava» concerné par le débordement (d'après Lidar 2005, SIBA). En rouge, l'abaque pour la zone 1 ; en bleu, la zone 2.

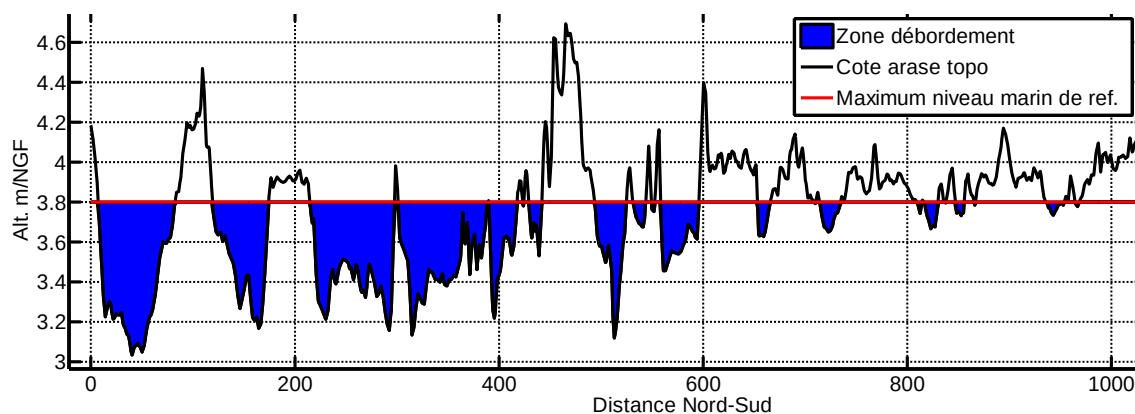


Figure 43 : Profil topographique (A-B) Nord-Sud de la ligne de submersion (noir) de la zone1 ; niveau marin de référence aléa « actuel sans ouvrage » (ici 3,80m/NGF).

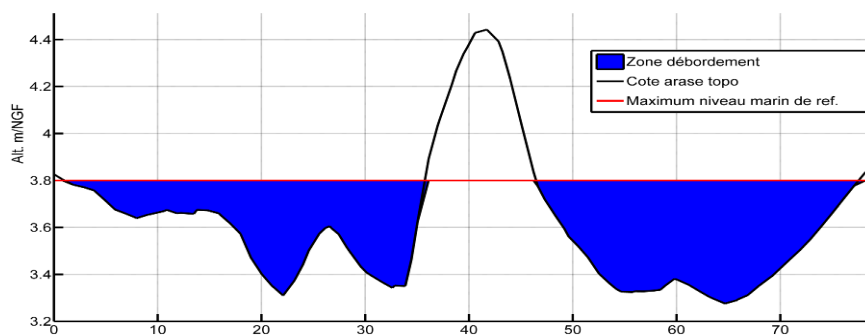


Figure 44 : Profil topographique d'Ouest en Est (C-D) du seuil topographique entre les zones 1 et 2 extrait du Lidar 2005.

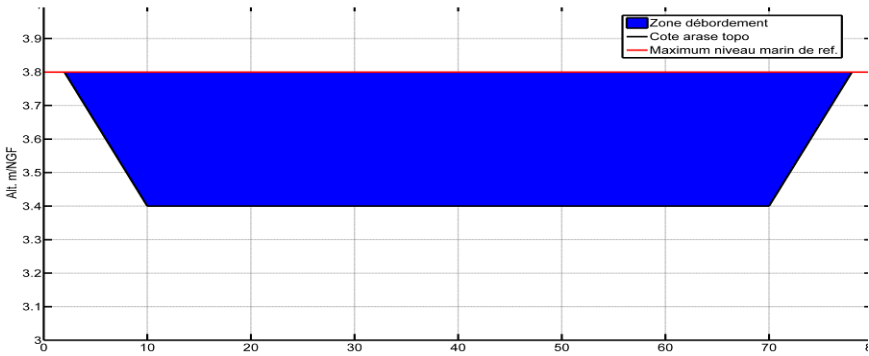


Figure 45 : Profil topographique « simplifié » d'Ouest en Est (C-D) du seuil topographique entre les zones 1 et 2 extrait du Lidar.

Durée de débordement (minutes)	Niveau de la mer atteint (m/NGF)	zone 1		zone 2	
		Volume d'eau débordant (m3) dans la zone 1	Cote altimétrique atteinte (m/NGF) issue de l'abaque alti/volume	Volume d'eau débordant (m3) dans la zone 2	Cote altimétrique atteinte (m/NGF) issue de l'abaque alti/volume
0	3.2				
15	3.3	1300		0	
30	3.4	32000		9000	
45	3.5	78000		21000	
60	3.6	170000	3.2	38000	
75	3.65	300000	3.5	58000	
90	3.7	450000	3.65	78000	
105	3.75	605000	3.75	96000	
120	3.8	740000	3.8	110000	
135	3.6			116000	3
150	3.5			120000	3.1
165	3.4			120000	3.1

Figure 46 : Secteur de « Bélisaire-Morava » : Tableau illustrant la chronologie des volumes débordants pour la zone 1 (rouge) et la zone 2 (bleu) ; le niveau de la mer et la cote altimétrique associé sont renseignés (noir).

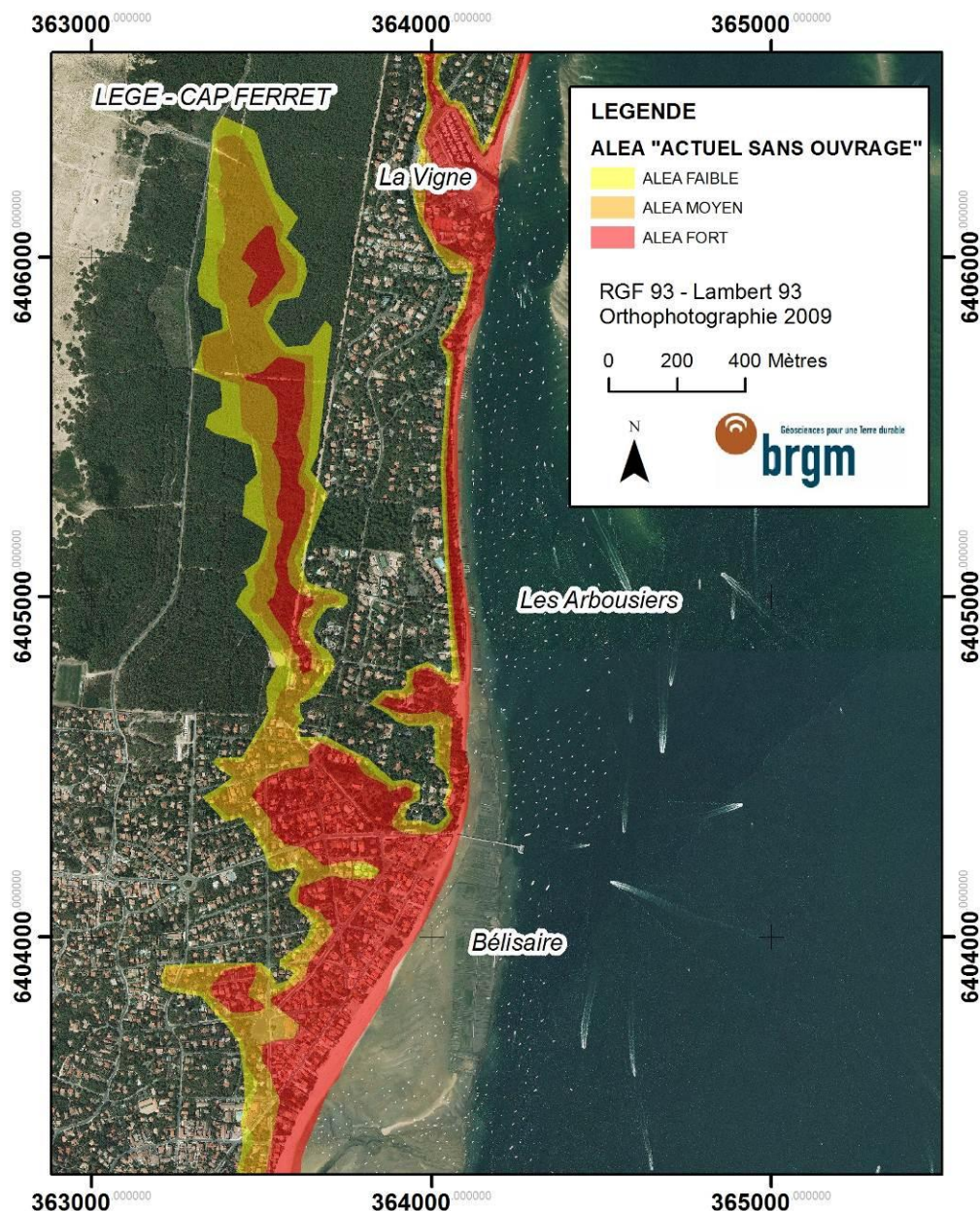


Figure 47 : Cartographie de l'aléa « actuel sans ouvrage » sur le secteur de « Bélisaire - Morava » (commune de Lège-Cap-Ferret). Echelle 1/20 000.

6.2.2. La méthode « topo/niveau »

La méthode « topo/niveau » a été appliquée à toutes les communes du Bassin en dehors des secteurs de « Bélisaire-Morava » sur la commune de Lège-Cap-Ferret et de « La Chapelle » sur la commune d'Arcachon.

6.3. ZONAGE DE L'ALEA CLAPOT ET VAGUES

Pour rappel, les zones particulièrement exposées à l'effet des vagues se trouvent sur les secteurs de la Pointe du Cap-Ferret, du Pyla-Plage à Arcachon et d'Andernos-les-Bains (Figure 36).

En raison de la relative forte pente topographique sur le linéaire compris entre le Pyla-Plage (commune de La-Teste-de-Buch) et le Perreire (commune d'Arcachon), il n'y a pas de submersion marine par débordement sur ce secteur. En revanche, l'effet des vagues (chocs, projections par exemple) peut être important dans le chenal qui prolonge la Passe Sud. C'est pourquoi une bande de sécurité d'approximativement 10 à 15 m a été cartographiée en aléa fort afin de prendre en compte cet effet des vagues (cf paragraphes 5.5.3 et 6.1).

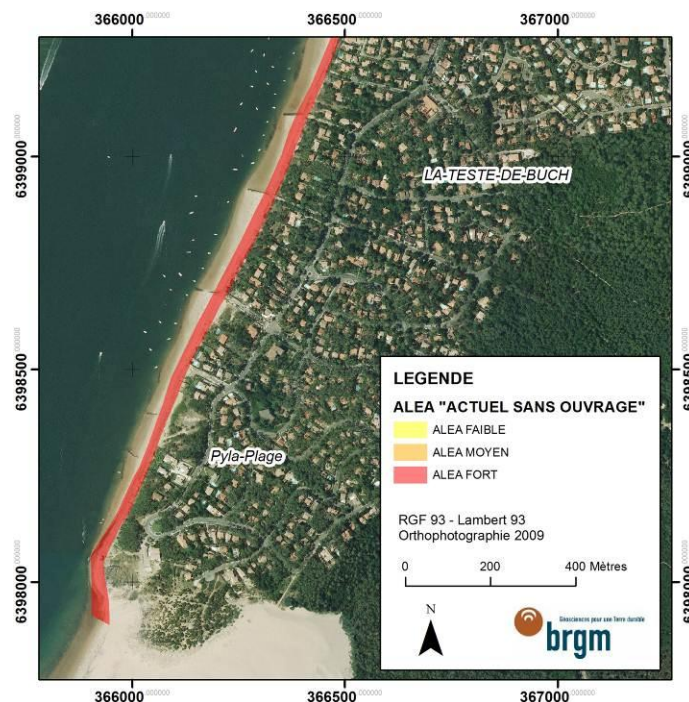


Figure 48 : Bande de sécurité sur les secteurs exposés aux vagues, exemple de Pyla-Plage (commune de la Teste-de-Buch). Echelle 1/10 000.

6.4. COMPARAISON AUX EVENEMENTS HISTORIQUES

La cartographie de la submersion marine pour l'évènement de référence (aléa « actuel sans ouvrage ») a été comparée à la cartographie des surfaces inondées lors des tempêtes Klaus (24/01/09) et Xynthia (28/02/10, Mugica et al., 2010, Rapport BRGM/RP-58723-FR). Il est constaté que l'aléa « actuel sans ouvrage » est globalement supérieur à la submersion générée par ces 2 tempêtes sur le pourtour du Bassin (Figure 49 et Figure 50 : Comparaison de l'aléa « actuel sans ouvrage » avec la submersion générée par la tempête Klaus (24/01/09) sur la commune d'Andernos-les-Bains. Echelle 1/30 000. Figure 50 pour la commune d'Andernos-les-Bains par exemple).

Une exception a été constatée dans le quartier du Mauret à Andernos-les-Bains. Comme précisé dans le paragraphe 5.4, l'isoligne brute correspondant au niveau marin au rivage (c'est-à-dire 3,95 m/NGF) est par endroit inférieure à la limite de la submersion survenue lors de

Xynthia dans ce quartier (Figure 24). La limite de l'aléa submersion a été ajustée à partir de la limite de la submersion générée par Xynthia.

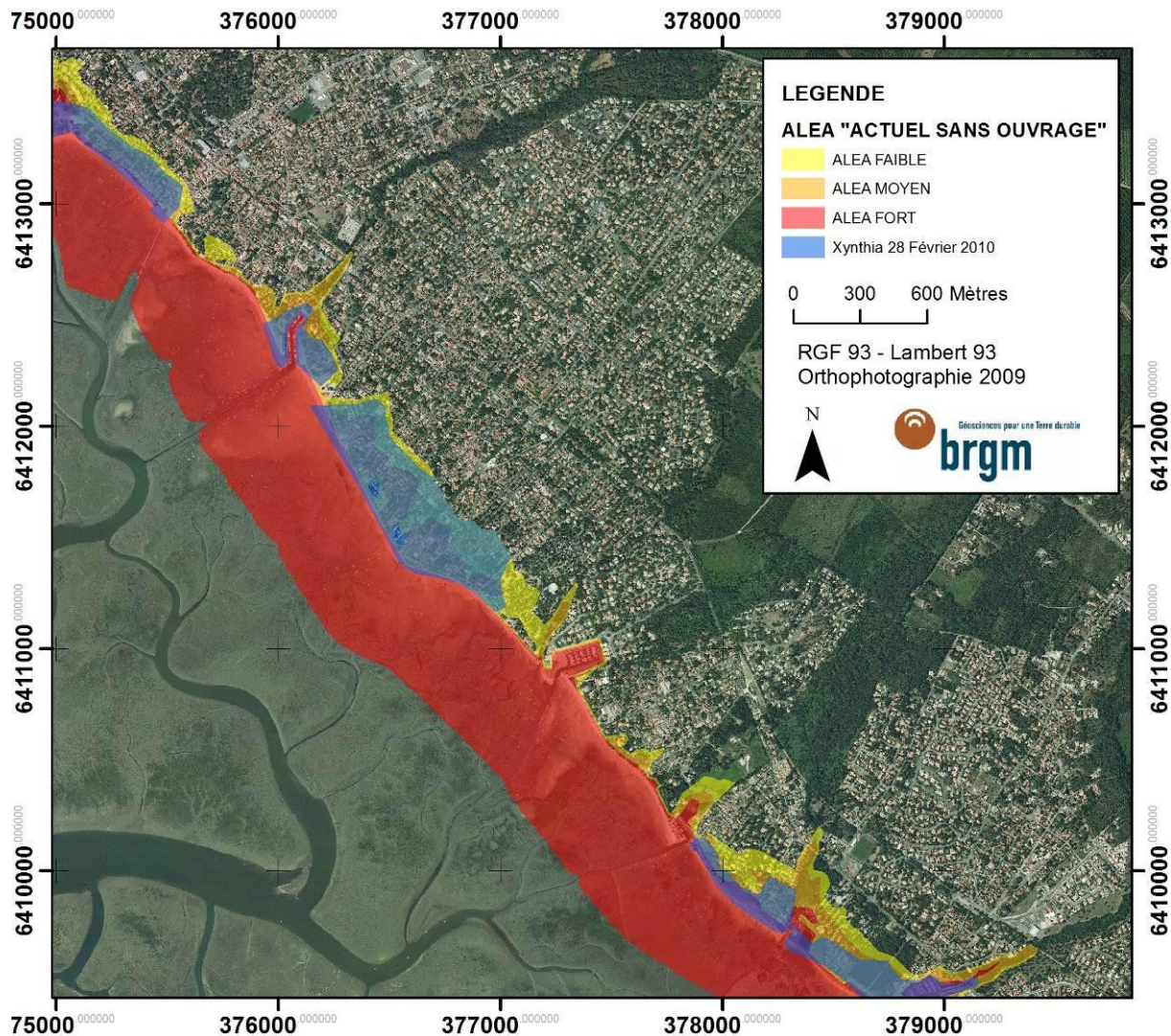


Figure 49 : Comparaison de l'aléa « actuel sans ouvrage » avec la submersion générée par la tempête Xynthia (28/02/10) sur la commune d'Andernos-les-Bains. Echelle 1/30 000.

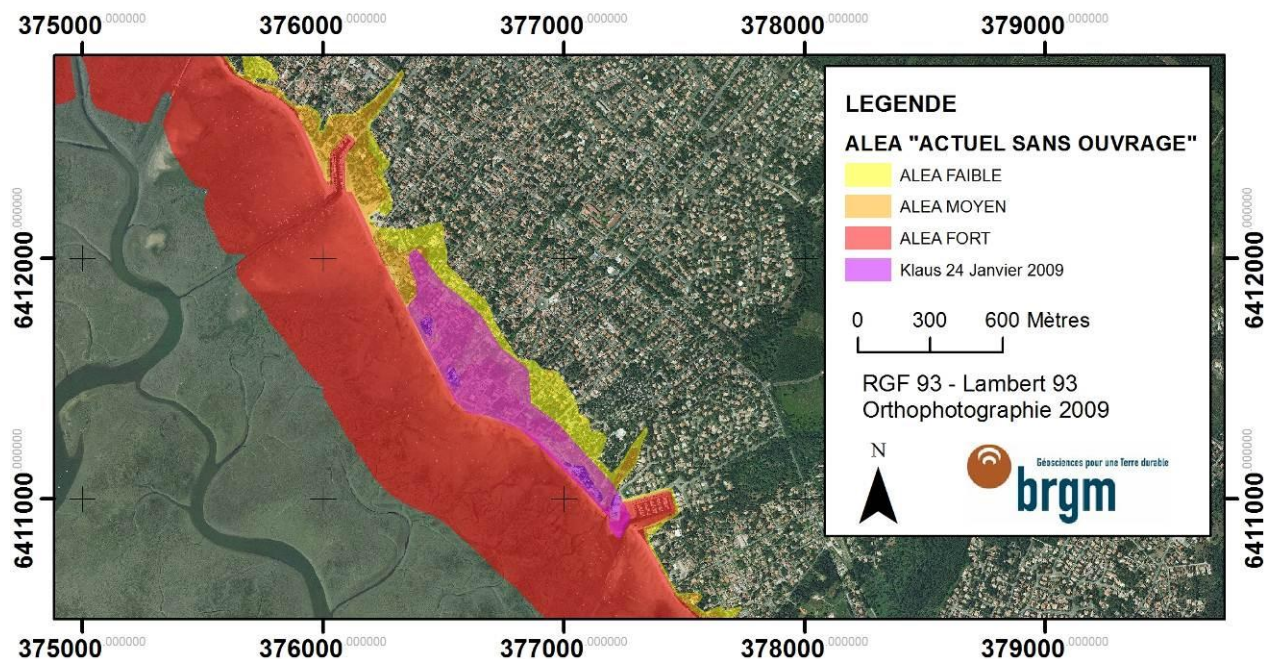


Figure 50 : Comparaison de l'aléa « actuel sans ouvrage » avec la submersion générée par la tempête Klaus (24/01/09) sur la commune d'Andernos-les-Bains. Echelle 1/30 000.

6.5. CARTOGRAPHIE DES ZONES HAUTES ISOLEES, REMBLAIS ET SEUILS TOPOGRAPHIQUES

Les zones dites « hautes isolées » (cf. 5.5.4) sont des zones dont l'altitude est supérieure au niveau marin de référence au rivage, dont la surface est supérieure à 2000m² (surface représentable à l'échelle de restitution 1/25 000) et qui se situent au sein d'une zone submersible.

Elles ont été cartographiées de la manière suivante (Figure 51) :

- aléa faible si leur altitude est comprise entre le niveau marin de référence au rivage et 4,5 m/NGF;
- hors d'eau si leur altitude est supérieure à 4,5 m/NGF.

Les zones hautes isolées ont été cartographiées hors d'eau à partir de 4,5 m/NGF et non pas à partir du niveau marin de référence au rivage afin de prendre en compte une marge d'une cinquantaine de centimètres liée à l'imprécision de la donnée Lidar 2005 et à la méthode de classification des niveaux d'aléa par intervalles de hauteur d'eau de 50 cm.

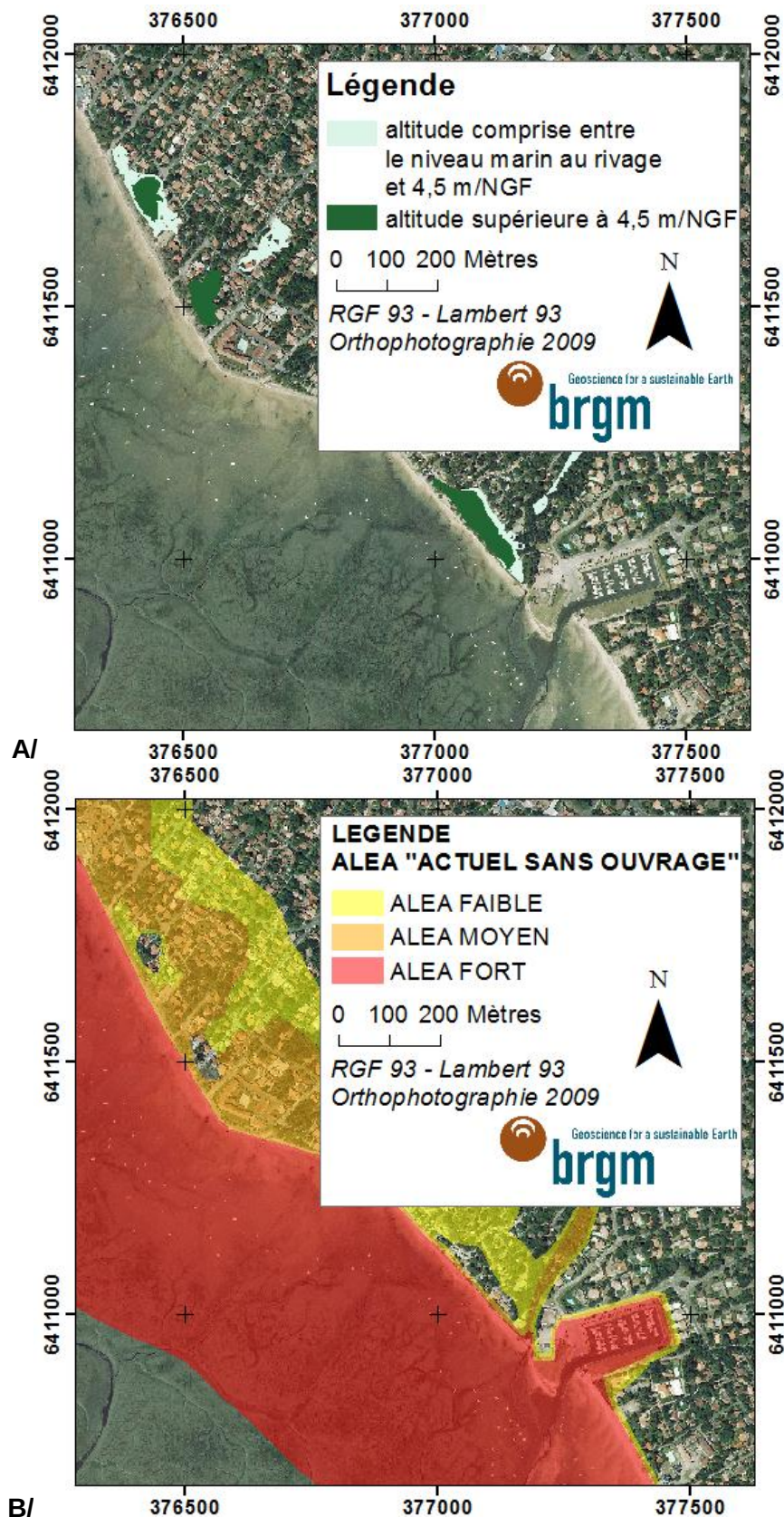


Figure 51 : Exemple A/ de zones hautes isolées au sein de la surface inondable pour l'aléa « actuel sans ouvrage » et B/ des modalités de cartographie (commune d'Andornos-Les-Bains).

Cas particuliers :

- Les zones hautes isolées situées au niveau des zones humides ou recouvertes de végétation, mobiles ou en travaux n'ont pas été considérées, c'est-à-dire n'ont pas été cartographiées hors d'eau, car la donnée topographique n'est pas considérée fiable ou pérenne dans ces environnements (Figure 52).
- Les remblais présentant des connexions hydrauliques (route, voie ferrées, etc.) et identifiés paragraphe 5.5.2, sont cartographiés en aléa faible même si leur altitude est supérieure à 4,50 m/NGF car ils sont considérés « perméables » (Figure 53).
- Les seuils topographiques identifiés dans le paragraphe 5.5.1 ont également été cartographiés en aléa (faible ou moyen) car ils sont considérés submersibles (sous l'effet du jet de rive, de franchissement par paquets de mer ou d'accumulation d'eau du fait de la configuration locale du site).

Les zones hautes isolées sont présentées en Annexe 6. Pour chacune des zones hautes isolées identifiées, les modalités de cartographie sont précisées comme suit :

- Zones hautes considérées : cartographiées hors d'eau ;
- Zones hautes non considérées : non cartographiées hors d'eau, maintenues en aléa car la donnée topographique n'est pas considérée fiable ou pérenne ;
- Remblais : cartographiés hors d'eau mais considérés « perméables » car présence de connexions hydrauliques ;
- Seuils topographiques : cartographiés en aléa car considérés submersibles.

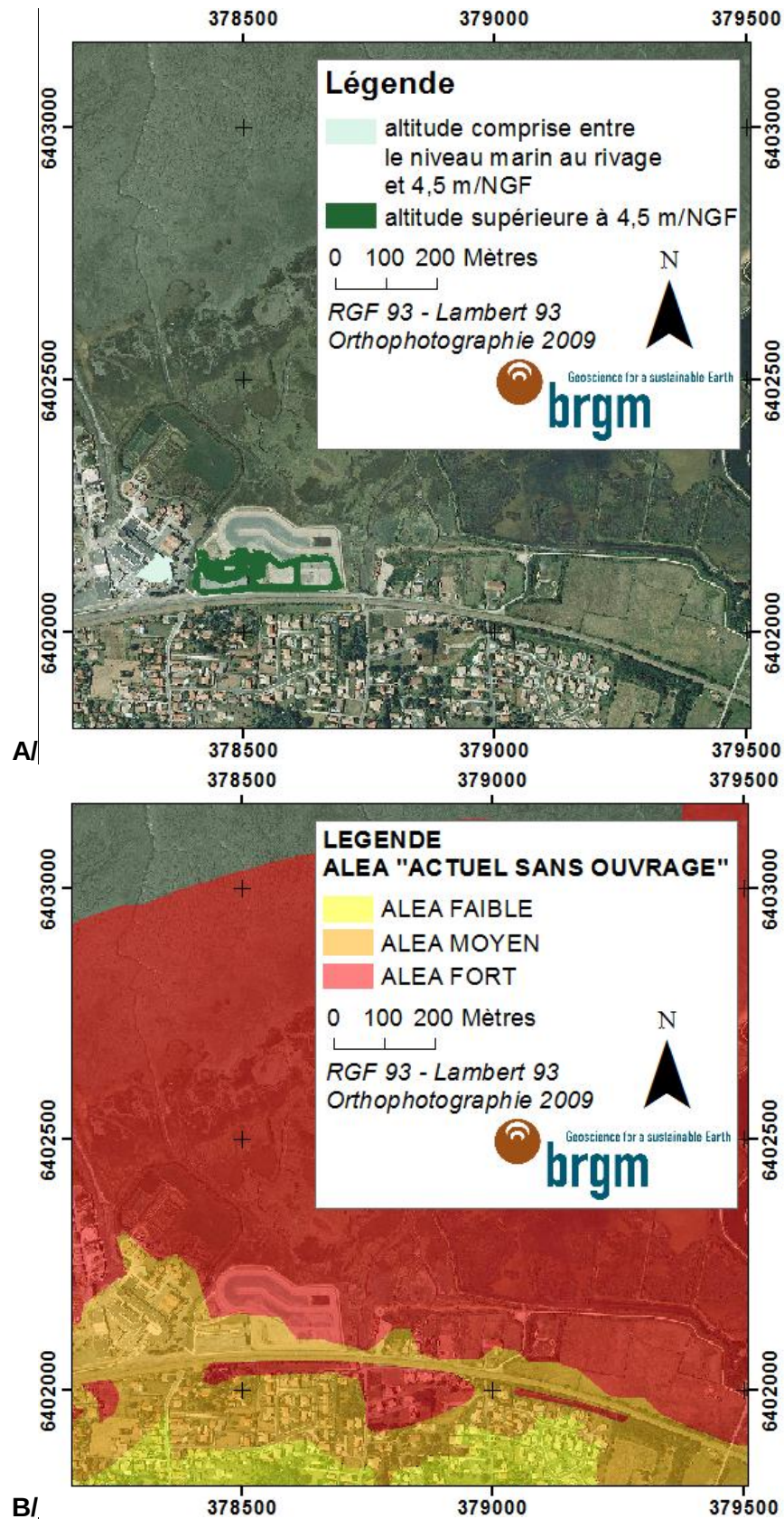


Figure 52 : Exemple A/ de zones hautes isolées non considérée car situées en zones ayant fait l'objet de réaménagement et dont la donnée topographique n'est pas considérée pérenne et B/ des modalités de cartographie (cas des bassins de décantation de La Molle, commune de Gujan-Mestras).

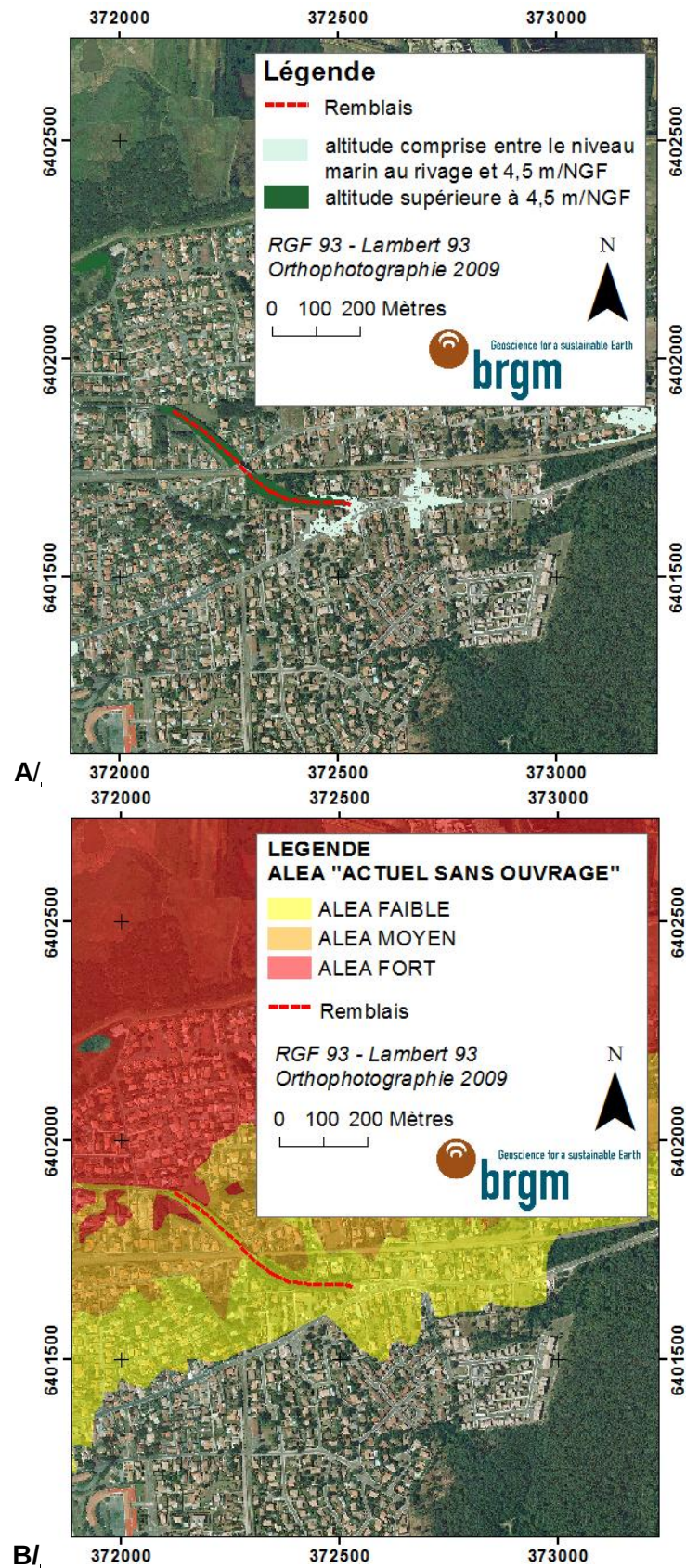


Figure 53 : Exemple A/ de zones hautes isolées correspondant à un remblais et B/ des modalités de cartographie (route sur la commune de La-Teste-de-Buch).

7. Conclusion

Comme suite à la détermination du niveau marin de l'évènement naturel de référence au rivage dont la méthodologie et les résultats sont détaillés dans le rapport BRGM/RP-61408-FR, la cartographie de l'aléa submersion marine sur le Bassin d'Arcachon fait l'objet de ce présent rapport. Elle a été réalisée à partir des données existantes disponibles et en l'état des connaissances actuelles.

Conformément aux recommandations méthodologiques (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011), une approche « statique » a été mise en œuvre dans cette deuxième phase pour caractériser les aléas « naturels ». Elle consiste à projeter sur la topographie (MNT issu des levés Lidar de 2005 du SIBA) :

- le niveau marin au rivage de l'évènement naturel de référence. Il s'agit de la méthode dite « topo/niveau » qui est employée sur les secteurs où la pente topographique est relativement importante ou la morphologie trop complexe. Cette méthode est appliquée à toutes les communes du Bassin sauf sur les secteurs de « La Chapelle » à Arcachon et « Bélisaire-Morava » à Lège-Cap-Ferret ;
- les volumes d'eau pénétrants à terre calculés pour l'évènement naturel de référence sur les secteurs où la pente topographique est relativement faible, afin de ne pas surestimer la surface de la zone inondée : méthode « topo/volume ». Il s'agit du secteur « La Chapelle » (commune d'Arcachon) et du secteur « Bélisaire-Morava » (commune Lège-Cap-Ferret).

Dans cette deuxième phase de l'étude PPRL du Bassin d'Arcachon, les effets des vagues (franchissement par paquets de mer, projections liées au déferlement), des seuils topographiques et des connexions hydrauliques ont été estimées à dire d'expert, sur la base notamment d'une visite de terrain (5 au 8 novembre 2012), de la connaissance historique des événements passés ainsi que d'une analyse critique des outils et données utilisées.

La cartographie a été réalisée pour l'aléa « actuel sans ouvrage » ainsi que pour l'aléa « 2100 sans ouvrage ». Pour l'aléa « actuel sans ouvrage », le niveau marin au rivage intègre une surcote de 20 cm pour une première prise en compte de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique ainsi qu'une marge d'incertitude de 15 cm liée à la méthode. Le niveau marin résultant correspond au niveau marin de référence dont la valeur est comprise entre 3,62 m/NGF à l'entrée de la lagune et 3,98 m/NGF en amont de la lagune. Pour l'aléa « 2100 sans ouvrage », le niveau marin correspond au niveau marin de référence auquel une surcote de 40 cm est ajoutée afin de prendre en compte l'élévation du niveau marin liée au changement climatique (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011). Les valeurs sont comprises entre 4,02 m/NGF à l'entrée et 4,38 m/NGF en amont de la lagune.

Dans cette deuxième phase de l'étude PPRL du Bassin d'Arcachon, les ouvrages de protection côtière de type digue et muret rehaussant les perrés ont été considérés inexistantes et arasés à la demande de la DDTM33 et conformément aux recommandations méthodologiques. Dans ces conditions et avec les caractéristiques de l'évènement naturel de référence retenu, la totalité des communes du pourtour du Bassin d'Arcachon (excepté la commune de Mios) sont soumises à la submersion marine.

La méthode « topo/volume » a permis d'ajuster la cartographie des 3 niveaux d'aléas par la méthode « topo/niveaux » sur les secteurs de « La Chapelle » et « Bélisaire Morava ».

A l'échelle de la région Aquitaine, quatre niveaux d'aléa ont été définis en fonction de la hauteur d'eau à terre produite par la submersion et par la dynamique de submersion estimés à dire d'expert : faible, modéré, fort et très fort. Sur le Bassin d'Arcachon, seuls les 3 premiers niveaux d'aléa (faible, modéré et fort) sont représentés. A titre informatif, des symboles ont été rajoutés à la cartographie afin de mettre en évidence l'effet des vagues (houle ou clapot). Ces caractéristiques locales ont été estimées par une analyse d'expert sur la base notamment d'une visite de terrain (5 au 8 novembre 2012), de la connaissance historique des événements passés ainsi que de l'analyse critique des outils et données utilisés.

Les résultats de la cartographie ont également été comparés et affinés grâce aux informations des événements historiques issues de l'étude du CETE SO (2012) ainsi qu'à la cartographie des surfaces inondées lors de Xynthia (Rapport BRGM/RP-58723-FR). Il est constaté que l'aléa « actuel sans ouvrage » est supérieur à la submersion générée par l'événement historique Xynthia, sur tout le pourtour du Bassin (à une exception près constatée localement dans le quartier du Mauret à Andernos-les-Bains), ce qui est en accord avec les recommandations méthodologiques (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011) : « *l'évènement de naturel de référence sur un secteur homogène est un évènement centennal ou un évènement historique si celui-ci est supérieur* ».

Conformément aux recommandations méthodologiques (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011), la cartographie de la submersion marine a été réalisée à une échelle au 1/25 000.

L'approche « statique » mise en œuvre dans cette deuxième phase a permis d'obtenir une estimation des surfaces inondables par submersion marine qui sera affinée, ultérieurement dans une troisième phase, par une approche « dynamique » plus précise et complète qui permettra d'estimer les vitesses d'écoulement de l'eau, la durée de la submersion, les zones d'entrée d'eau, l'influence du bâti, etc.

8. Références bibliographiques

Bulteau T., Delvallée E., Thiébot J., Pédreros R. (2012) - Retour d'expérience sur l'utilisation des probabilités conjointes pour la caractérisation de niveaux marins à la côte. XIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Cherbourg, 12-14 juin 2012, DOI:10.5150/jngcgc.2012.001-B

CETE SO (2012) – Submersions marines sur le bassin d'Arcachon, Etude historique. Rapport de novembre, version 2, 47 p.

Hawkes P.J., Gouldby B.P., Tawn J.A., Owen M.W. (2002) - The joint probability of waves and water levels in coastal engineering design. Journal of Hydraulic Research, Vol. 40, n° 3, pp 241-251. doi:10.1080/00221680209499940.

Mallet C., Idier D., Thiébot J., Le Nindre Y.M., Mugica J., Roche A. (2009) – Submersions marines à Andernos-les-Bains (Gironde) et aménagements de protection. Avis et recommandations. BRGM/RP-57462-FR. Rapport final, 20 ill., 10 tab., 52 p.

MEDDTL (2011) - Circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux. NOR : DEVP1119962C.

MEDDTL (2011) - Premiers éléments méthodologiques pour l'élaboration des PPRL Analyse et cartographie des aléas littoraux. Version 11 de novembre 2011, 90 p.

Mugica J. et Mallet C. (2009) – Ouvrages de protection contre la submersion marine à Andernos-les-Bains (33). Avis et recommandations. Rapport BRGM/RP-57902-FR. 17 p., 3 fig.

Mugica J., Delvallée E., Pédreros R. (2010) - Application de modèles numériques pour l'estimation de l'altitude du plan d'eau à Andernos-les-Bains. Rapport BRGM/RP-58723-FR. 92 p., 64 fig., 14 tab., 6 ann.

Mugica J. Bulteau T., Paris F. et Pédreros R., avec la collaboration de Delvallée E. (2013) – Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL du Bassin d'Arcachon (Gironde), Détermination de l'évènement naturel de référence. Rapport intermédiaire BRGM/RP-61408-FR, 75 p., 37 fig., 10 tab., 1 ann.

Mugica J., Ayache B., Hoareau A. avec la collaboration de Prévotaux B., Delhorbe M-A., Le Nindre Y-M. (2013) – Analyse de la précision des données Lidar de 2005 sur le Bassin d'Arcachon. Rapport BRGM/RP-62369-FR, X fig., X p.

ONERC (2010) – Synthèse – Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles. 6p. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/synth_niveau_mer.pdf

SHOM, CETMEF (2012) – Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantiques), 160p.

Annexe 1

Compte rendu de la première réunion du comité scientifique



Réf. : CR_AQISUB_20/06/2011

Pessac, le 20 juin 2011

COMPTE RENDU DE RÉUNION	
Rédacteur : J. Mugica	
Projet : à créer	Numéro :
Objet : Première réunion du Comité Scientifique pour la caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL en Aquitaine	
Date : 27/05/2011	Lieu : Pessac (SGR) en visioconférence avec Brest (CETMEF)
Participants : BRGM : E. Delvallée, C. Mallet, J. Mugica, J. Thiébot CASAGEC : D. Rihouey CETE SO : D. Felts, Y. Nedelec CETMEF : A. Creach, C. Perherin SOGREAH : V. Mazeiraud, D. Lartigue	
Absents : RRLA (équipe METHYS du laboratoire EPOC) : P. Bonneton ONF : B. Daubet BRGM : T. Bulteau, M. Garçin, R. Pedreros,	
Diffusion : BRGM + DREAL + DDTM 33/40/64 + GIP Littoral Aquitain + participants + absents	

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS
1. Introduction - Présentation du contexte (cf. diaporama) - Rappel de la composition et des objectifs du comité scientifique (cf. diaporama) - Objectif de la réunion = présentation puis discussion de la méthodologie que le BRGM propose de mettre en œuvre pour déterminer l'aléa de référence sur chacun des secteurs soumis à un PPRL → méthodologie basée sur la génération de réanalyses de niveaux d'eau et de vagues puis sur l'analyse de leurs probabilités conjointes. Ne fait pas l'objet de cette réunion mais sera soumis à concertation lors d'éventuelles prochaines réunions : ○ Détermination finale de l'évènement de référence sur chacun des secteurs = analyse des résultats des probabilités conjointes pour le choix de(s) scénario défavorable(s) en considérant les facteurs locaux particuliers à chacun des secteurs ○ Méthodologie de propagation des facteurs de forçages à la côte puis la propagation de la submersion à terre fera également l'objet d'une prochaine concertation du comité scientifique.

CR_Réunion_2011_05_27_Com_Sci_PPRL_AQI.doc

1/4

- Point sur l'état d'avancement de la révision de la doctrine par le CETMEF : Révision de la doctrine pour l'élaboration des PPRL principalement sur la submersion marine suite à la tempête Xynthia afin de prendre en compte : - o les interactions entre tous les processus (débordement, changement climatique...), - o l'élévation du niveau marin liée au changement climatique, - o l'effet des ouvrages. Organisation = 1 comité technique et 4 sous-groupes : - analyse du fonctionnement naturel de l'hydraulique du littoral - évolution du trait de côte - caractérisation de l'aléa submersion - prise en compte des ouvrages Les principes de doctrine d'élaboration des PPRL feront l'objet d'une circulaire. Celle-ci est actuellement en cours de consultation et disponible sur internet. Elle sera finalisée en juin 2011. Doctrine ≠ guide méthodologique repris depuis janvier 2011 et prévu pour fin 2011. Egalement ≠ de la stratégie nationale de gestion du TC (rapport du Député Cousin à venir).	2. Modélisation numérique des données de niveaux d'eau et de vagues pour la détermination de l'événement de référence Objectif = préparer les données de niveaux d'eau et de vagues nécessaires pour l'analyse des probabilités conjointes pour la détermination de l'aléa de référence. Méthodologie présentée et mise en œuvre par le BRGM (cf.diaporama) : - Modélisation numérique des niveaux d'eau (marée + surcote atmosphérique) à partir de MARS (Ifremer) afin de combler la faible couverture spatiale sur la côte aquitaine → il existe seulement 2 marégraphes (Arcachon et Socoa). - Utilisation des conditions de houle au large sur la côte aquitaine issues du modèle couplée Wave Watch III - SWAN (thèse BRGM, E. Charles / jeux de données de 30 ans). Pour l'analyse des probabilités conjointes, les données de vagues et de niveaux d'eau doivent provenir d'un même site → calcul des niveaux d'eau et extraction des conditions de houle au niveau de l'isobathe - 20 m ou - 50 m (à préciser après analyse des données). A noter : les facteurs de forçage correspondant à l'aléa de référence seront donc déterminés au large → la méthodologie pour la propagation de ces forçages à la côte fera l'objet d'une prochaine concertation pour chacun des secteurs étudiés. Validation des résultats à partir des données mesurées au niveau de bouées (Biscarrosse, Gascogne, CANDHIS) et de modèles (ERA40, NOA-VWV3, ANEMOC) → permet d'estimer des incertitudes. Question CETE SO : limite de la validation liée au dysfonctionnement des marégraphes lors des événements extrêmes ? Lors d'événements extrêmes → ≠ de 10-20 cm estimée entre mesures et réalité, même ≠ avec la modélisation ⇒ mais pas de problème si bonne estimation des incertitudes.
--	--

Possibilité de dissocier les incertitudes liées à la marée et aux effets atmosphériques.

Données de vagues issues de la thèse BRGM d'E.Charles : mise à disposition au public à définir → probable constitution d'une BDD → Pas de problème pour l'utilisation des données (par le BRGM) dans le cadre de ce projet.

CETMEF : la doctrine prévoit l'utilisation des niveaux d'eau extrêmes (marée + surcote atmosphérique) calculés par le SHOM et des conditions de houle, provenant d'ANEMOC par exemple, pour calculer le wave setup → la doctrine ne contre-indiquera pas l'approche du BRGM avec la génération de réanalyses de vagues et de niveaux d'eau présentant l'avantage d'offrir une très bonne couverture spatiale et temporelle.

Remarque : Il faut aussi calculer les incertitudes à la côte.

3. Probabilités conjointes pour la détermination de l'évènement de référence

Objectif = déterminer les différentes combinaisons de facteurs de forçage (hauteur significative des vagues Hs, et niveaux d'eau SWL = marée + surcote atmosphérique) de l'aléa centennal au large (isobathe -20 ou -50 m à préciser, cf. paragraphe 2)

Méthodologie présentée et mise en œuvre par le BRGM (cf.diaporama) : utilisation du logiciel JOIN-SEA (HR Wallingford et université de Lancaster).

Après ajustement des distributions marginales pour chacune des variables analysées (Hs d'une part et SWL d'autre part), le logiciel JOIN-SEA permet d'analyser les relations de dépendance entre les variables → détermination d'un modèle de dépendance = approche innovante en France.

CETMEF : la doctrine prévoit l'analyse des probabilités conjointes (par la méthode du DEFRA) pour déterminer l'aléa centennal. Dans cette approche simplifiée, la dépendance entre niveau d'eau et hauteur de vagues est prise en compte de façon très simplifiée (il n'y a pas de modèle de dépendance ajusté sur la base d'une analyse statistiques mais juste un coefficient reliant les deux variables, ce coefficient est estimé de façon peu rigoureuse) → la **doctrine ne contre-indiquera pas la mise en œuvre de l'approche plus fine du BRGM** pour ajuster les relations de dépendance entre les variables.

La doctrine prévoit : calcul des niveaux extrêmes (marée + surcote + wave setup (utilisation ANEMOC)) puis application de 20 cm d'incertitude. 2 cartes d'aléas à fournir :

- Aléa actuel ou « court terme » + 20 cm (élévation à 20 ans / ONERC)
- Aléa à 100 ans : idem + 1 m

JOIN-SEA permet de déterminer les différentes combinaisons de forçage (Hs,SWL) correspondant à un aléa centennal. Ces forçages seront propagés afin de calculer le setup (élévation locale du plan d'eau sous l'effet du déferlement des vagues) et éventuellement le runup (zone de battement des vagues à l'interface terre-mer) à la côte soit par une formule empirique de type Stockdon soit par modélisation numérique (MARS et SWAN pour le setup). La combinaison la plus défavorable, c'est-à-dire générant le niveau d'eau maximal, sera ainsi déterminée sur chacun des secteurs. Les effets locaux seront ainsi considérés.

Remarque : l'ajustement par JOIN-SEA de la loi marginale pour SWL a tendance à sous-estimer les niveaux d'eau centennaux (marée + surcote atm.) d'environ 10 cm (voir

diaporama). Au lieu d'ajuster une distribution statistique directement sur le signal marégraphique (marée + surcote atm.), il serait préférable (i) de séparer la partie déterministe du signal qui est liée à la marée seule et la partie aléatoire du signal qui est liée à la surcote de pleine mer (i.e. faire une analyse en composante harmonique), (ii) d'ajuster une distribution de probabilité sur les deux variables séparément (marée, surcote de pleine mer) et (iii) de convoluer les deux distributions pour estimer la distribution de SWL.

Depuis la réunion, nous avons développé un outil permettant de réaliser les étapes précitées. Les valeurs de SWL centennales ne sont plus sous-estimées à présent.

4. Prochaines étapes, calendrier prévisionnel

1. Juillet 2011 : détermination de l'évènement de référence par secteur = combinaison Hs, SWL défavorable, c'est-à-dire générant un niveau total (marée + surcote + setup (+ runup)) maximal.
2. Août 2011 : détermination d'une méthodologie de propagation des facteurs de forçage correspondant à l'évènement de référence pour calculer le niveau total à la côte : formules empiriques de type Stockdon ou bien modélisation numérique (MARS et SWAN).
3. Septembre : détermination d'une méthodologie de propagation de la submersion à terre : statique = croisement des niveaux d'eau simulés avec la topographie ou bien dynamique = modélisation numérique (vitesses de courant).

→ échanges du comité scientifique à prévoir (mail, téléphone, éventuelle réunion)

Action	Responsable	Délai	Soldé
Rédaction d'un rapport présentant la méthodologie proposée pour déterminer l'aléa centennal et l'évènement de référence par secteur	BRGM	Août 2011	

Annexe 2

Compte rendu de la réunion intermédiaire du comité scientifique



Réf. :

Pessac, le 20/09/2012

COMPTE RENDU DE RÉUNION	
Rédacteur : Mugica J.	Entité : BRGM, DIR Aquitaine
Diffusion externe : oui Visa et nom du responsable : Lenotre N.	
Projet : AQUISUB 33, AQUISUB-40 et AQUISUB-64	Numéro : PSP11AQI24/25/26
Objet : Réunion intermédiaire du Comité Scientifique	
Date : 20/09/2012	Lieu : BRGM Pessac
Participants : BRGM - DR AQI : C. Mallet, J. Mugica BRGM R3C : R. Pedreros, F. Paris CETMEF : C. Perhrerin CETE SO : D. Felts, G. Arnaud, CASAGEC : D. Rihouey, J. Dugor	
Absents : SOGREAH : V. Mazeiraud, D. Lartigue, CETE SO : Y. Nedelec, EPOC : P. Bonneton	
Diffusion : Participants + absents + DREAL Aquitaine + DDTMs 33, 40 et 64	

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS
Rappel du contexte Le BRGM a été sollicité par les DDTM de la Gironde, des Landes et des Pyrénées Atlantiques en association avec la DREAL Aquitaine pour caractériser l'aléa submersion marine sur les secteurs soumis à un PPRL : • Convention cadre DREAL/BRGM en date du : 19/11/2011 • Convention d'application DDTM Gironde/BRGM en date du : 14/11/2011 • Convention d'application DDTM Landes/BRGM en date du : 29/03/2012 • Convention d'application DDTM Pyrénées Atlantiques/BRGM en date du : 05/04/2012 Les principales étapes de cette étude sont les suivantes : 1. Préparation des données (météorologiques, océanographiques, bathymétriques et topographiques) → utilisation de mesures de terrain + utilisation ou génération de simulations rétrospectives (vagues, vent, niveaux d'eau) 2. Etudes historiques des événements de submersion marine (CETE SO pour la Gironde, C. Lavigne archéogéographe pour les Landes, CASAGEC pour les Pyrénées Atlantiques) 3. Détermination de l'évènement de référence → analyses statistiques pour la détermination d'évènements centennaux au large + modélisation numérique pour propagation vers le rivage 4. Cartographie de l'aléa submersion → modélisation numérique dans les Landes et les Pyrénées Atlantiques, calcul des volumes d'eau pénétrant à terre + croisement avec la topo (lidar 2005) en Gironde. 5. Analyse à dire d'expert (visite de terrain notamment)

IM 192 (22/07/09)

1/4

6. Restitution (réunion, rapport)

La plupart de ces étapes sont réalisées par le BRGM mais sur certains secteurs, certaines étapes sont réalisées par un sous-traitant (CASAGEC, C. Lavigne archéogéographe) ou par un service de l'Etat partenaire (CETE SO).

Afin de réunir les compétences régionales, de réaliser l'étude dans l'état actuel des connaissances et des recommandations méthodologiques du ministère, le BRGM a constitué un comité scientifique composé du BRGM, CASAGEC, CETE SO, CETMEF, Laboratoire EPOC de l'Université Bordeaux 1 et SOGREAH.

Introduction :

Réunion intermédiaire du Comité Scientifique de l'étude PPRL submersion marine en Aquitaine organisée à l'initiative du BRGM. (cf. *diaporama BRGM intro*)

Objectifs :

- Présentation et discussion des résultats des analyses statistiques pour déterminer les événements centennaux → résultats BRGM pour l'ensemble de la région Aquitaine (cf. *diaporamas BRGM étapes 1 et 3*)
- Présentation et discussion des événements de référence au rivage :
 - Résultats BRGM pour la Gironde et les Landes (cf. *diaporamas BRGM étapes 3 et 4*)
 - Résultats CASAGEC pour les Pyrénées Atlantiques (cf. *diaporama CASAGEC*)
- Proposition et discussion d'une méthodologie de propagation à terre et de cartographie de l'aléa pour chacun des secteurs (discussion notamment des points suivants : incertitudes, changement climatique, ouvrages) (cf. *diaporama BRGM étape 5 et diaporama CASAGEC*)

☞ En préalable, il est décidé la rédaction d'une note par le comité scientifique pour valider les résultats du BRGM et de CASAGEC sur la base des rapports d'étude, des diaporamas présentés en réunions et des discussions → Le CETMEF se charge de rédiger le premier jet de la note avant diffusion pour avis et validation au comité scientifique

Remarques :

- Volonté des membres du comité scientifique d'être sollicité plus en amont par rapport aux livrables et plus fréquemment.
- Pas de mandat de la DREAL pour une participation du CETE SO et du CETMEF à ce comité scientifique → CETE SO et CETMEF doivent vérifier s'ils ont besoin d'être missionnés.

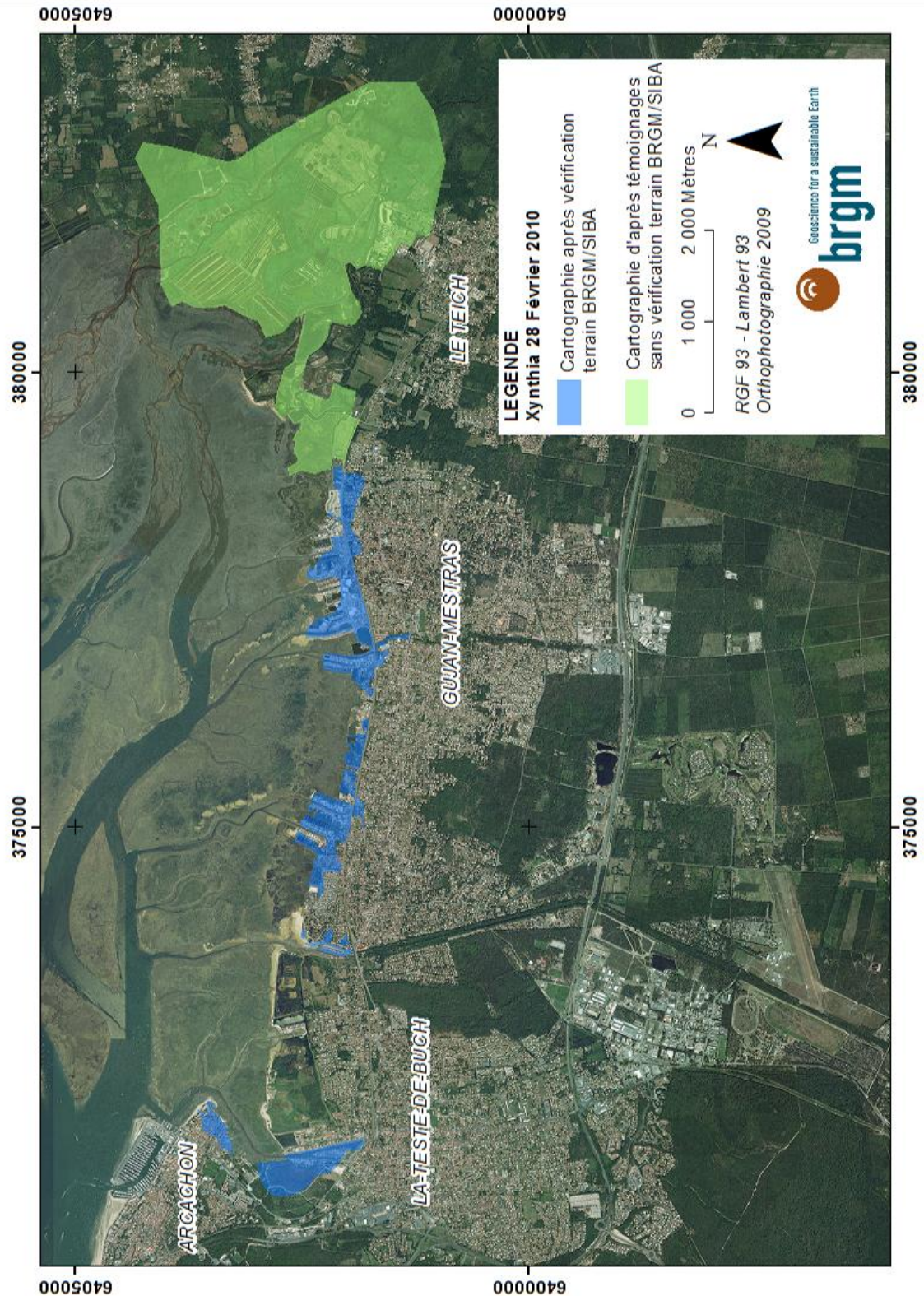
Questions techniques sur les diaporamas

- Pourquoi génération de simulations rétrospectives de niveaux d'eau uniquement à partir de 1979 et non à partir de 1958 comme les données de vagues (BD BoBWA) ?
- Utilisation des données météo CFSR uniquement disponibles à partir de 1979 et de meilleure qualité que les vents ERA40 utilisées pour la génération de la BD BoBWA (thèse E. Charles, 2012)
- Pourquoi relation de dépendance entre Hs (hauteur significative des vagues) et SWL (niveaux d'eau comprenant marée + surcote atmosphérique) ?
- Hypothèse de dépendance car la surcote atmosphérique et Hs proviennent d'un même événement de tempête

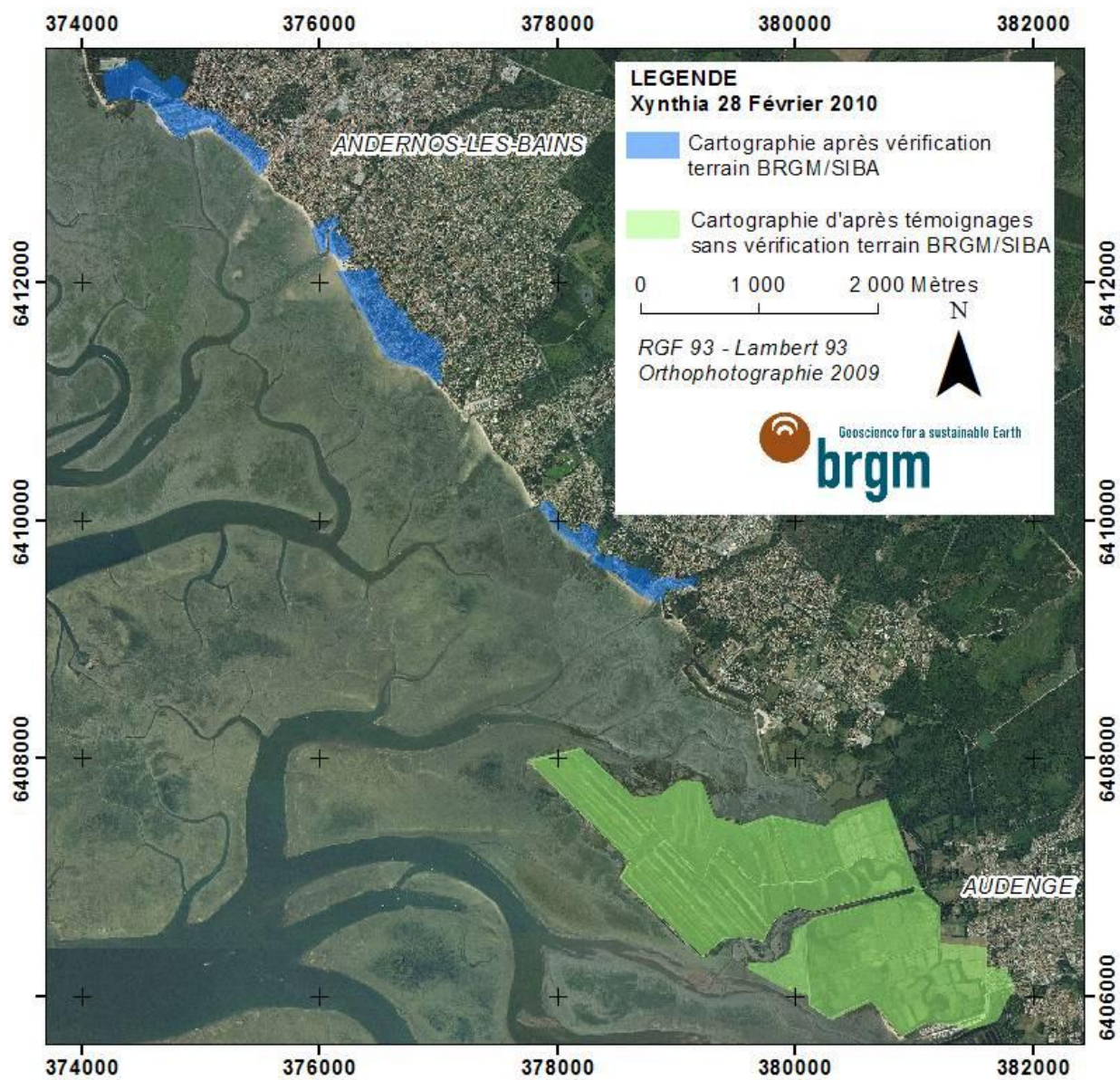
- Pour les analyses statistiques, cela revient au même d'analyser la dépendance entre Hs et SWL ou Hs et la surcote atmosphérique (car marée = part déterministe de SWL) . - Calcul Incertitude dans les Landes Il existe une incertitude liée à la pente → différence qui peut atteindre 30 à 40 cm sur les niveaux marins si variation de 2% de la pente. Quelle pente retenir ? la pente la plus préjudiciable pour le niveau marin au rivage a été retenue.
<u>Analyses et compléments recommandés :</u> - Vérifier l'existence de seiches sur le Bassin d'Arcachon Remarque : les directions de vents testées proviennent de l'analyse des relations de dépendance entre les vents et les vagues et de l'analyse de la fréquence de ces directions sur le Bassin d'Arcachon. - Présentation des résultats de CASAGEC : - o mettre échelle sur les figures et légendes, signaler les ouvrages (digue Arta par exemple) et valeurs de setup - o ajouter marge de 20 cm à SWL (première prise en compte de l'élévation du niveau marin) avant propagation vers le rivage - Extraire et fournir combinaisons centennales à CASAGEC pour le secteur du Bourret Boudigau pour comparaison méthode Stockdon (BRGM) / méthode SWAN (CASAGEC). - Considérer le niveau marin total fourni dans la version 11 (nov. 2011) du rapport du MEDDTL « 1^{er} éléments méthodologiques pour l'élaboration ni les tableaux des combinaisons centennales (Hs, Zo, setup, etc.) comme exemple → pas de comparaison entre méthode simplifiée et complète à réaliser. Etat de l'art sur les méthodes d'analyse des concomitances du CETMEF à paraître.
<u>Recommandations méthodologiques d'après le rapport du MEDDTL « 1^{er} éléments méthodologique pour l'élaboration des PPRL » → confirmation CETMEF sur ces points :</u> - Si estimation de l'incertitude liée à l'ensemble des étapes de la méthode, ajout de cette incertitude au niveau marin total au rivage plutôt que la marge de sécurité de 25 cm recommandée ⇒ accord pour ajout de l'incertitude estimée à 15 cm sur le Bassin d'Arcachon (cf. <i>diaporama BRGM</i>) - Les marges de 20 cm et de 40 cm pour la prise en compte de l'élévation du niveau marin liée au changement climatique pour l'aléa actuel et l'aléa à 2100 respectivement, sont à ajouter au large. - Prise en compte uniquement des ouvrages de protection contre la submersion marine (digues). Autres ouvrages de fixation du trait de côte arasés (épis par exemple) ou intégrés (perrés, ouvrages portuaires et structurant par exemple) à la topographie, pas de scénario de défaillance pour ces ouvrages ni d'estimation de la surface érodée en cas de défaillance → cas des Landes et des Pyrénées Atlantiques évoqués.

Annexe 3

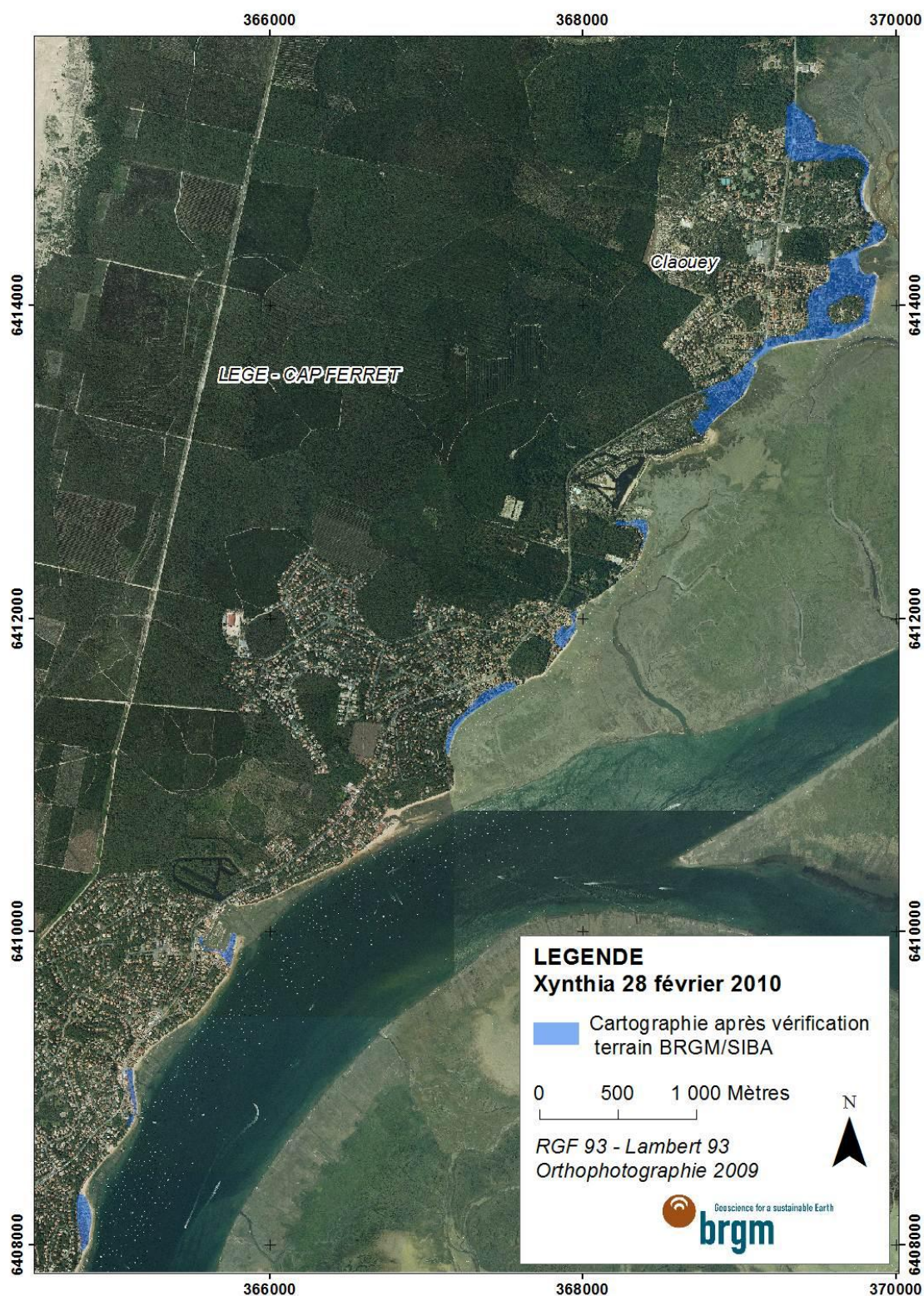
Cartes des surfaces inondées par submersion marine lors de la tempête Xynthia (28/02/2010)



Secteur Sud Bassin (communes d'Arcachon, La-Teste-de-Buch, Gujan-Mestras, Le Teich et Biganos)



Secteur Est Bassin (communes d'Audenge et d'Andernos-Les-Bains)



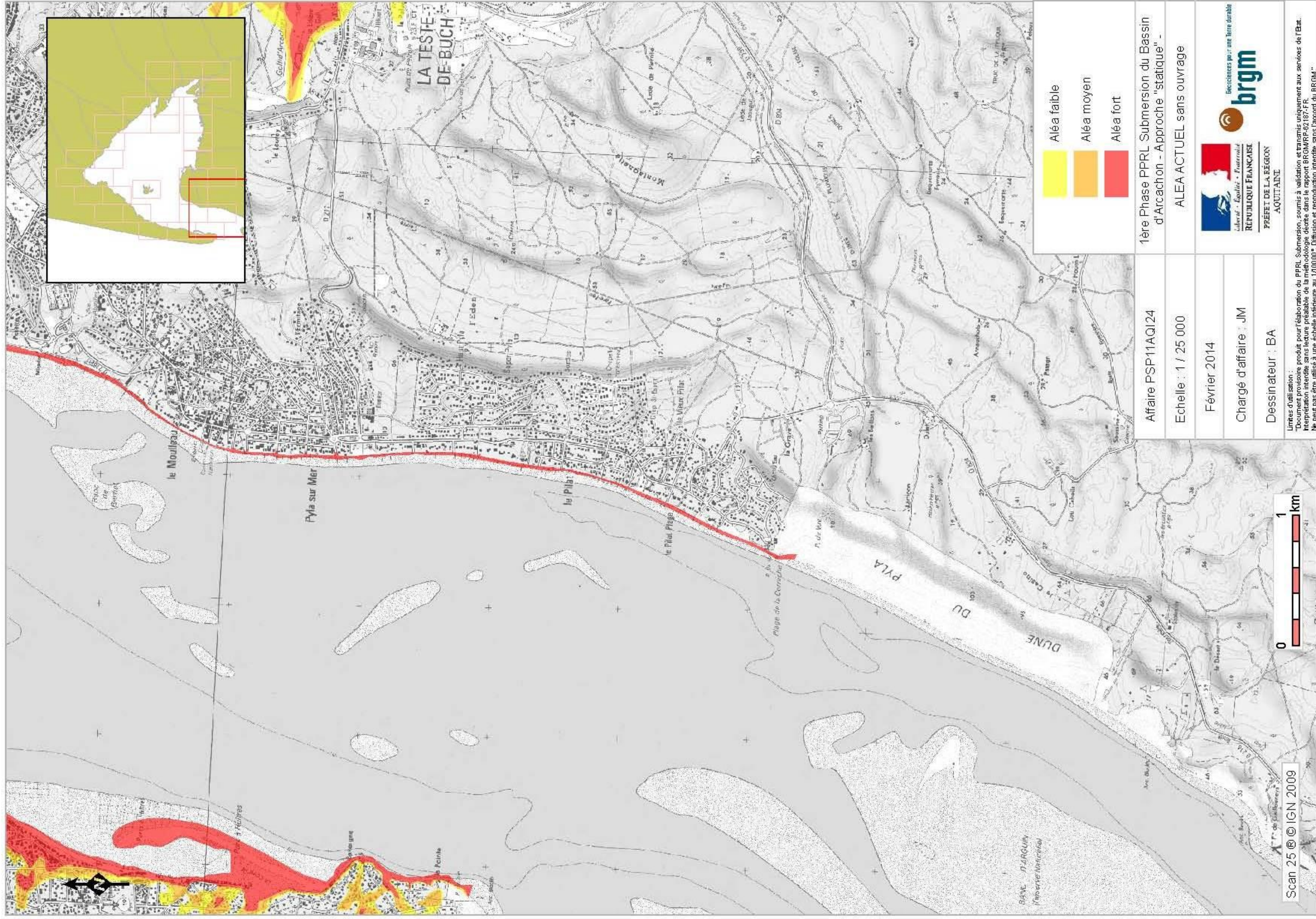
Secteur Ouest Bassin (communes de Lège-Cap-Ferret)



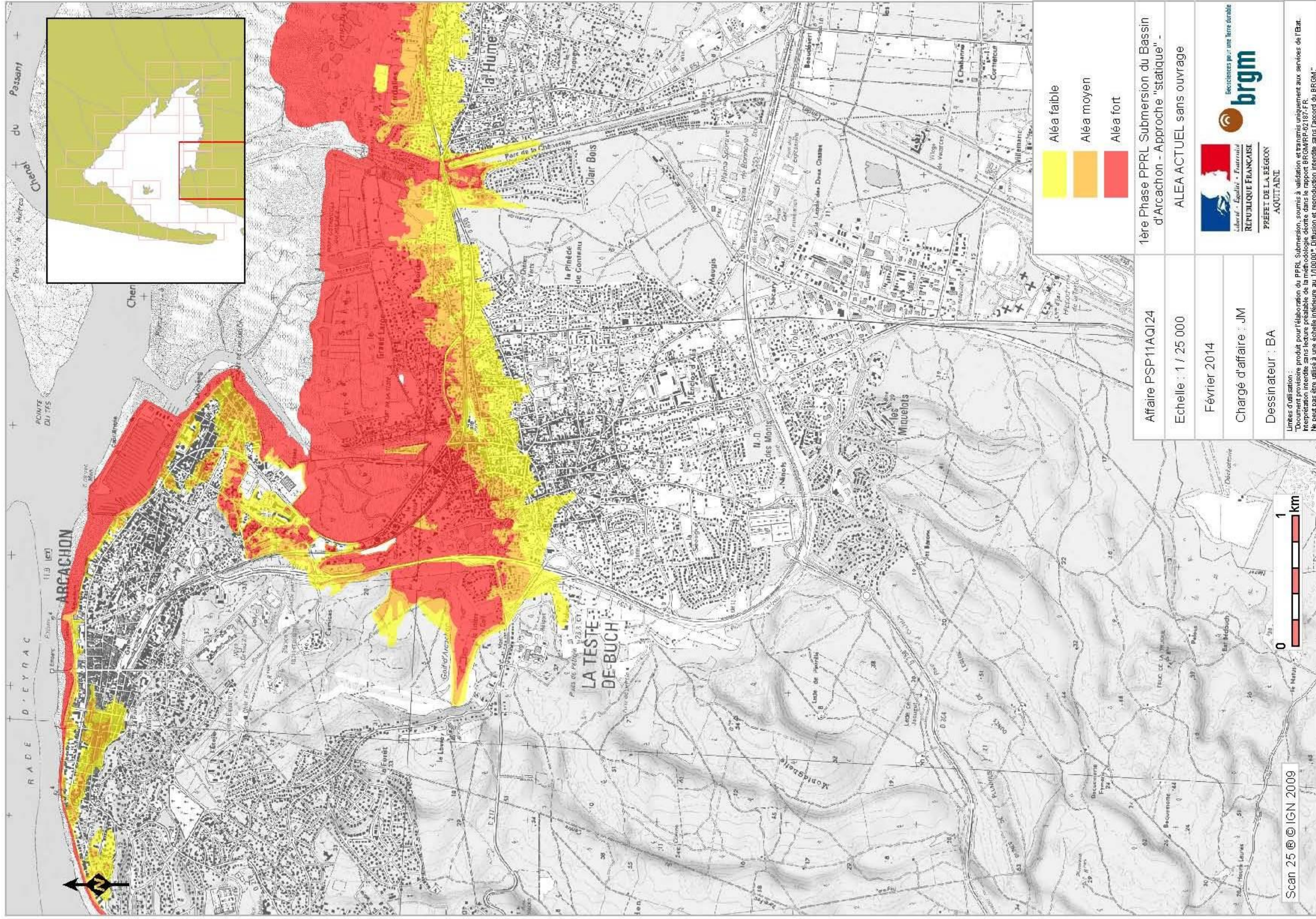
Secteur de La Pointe du Cap-Ferret

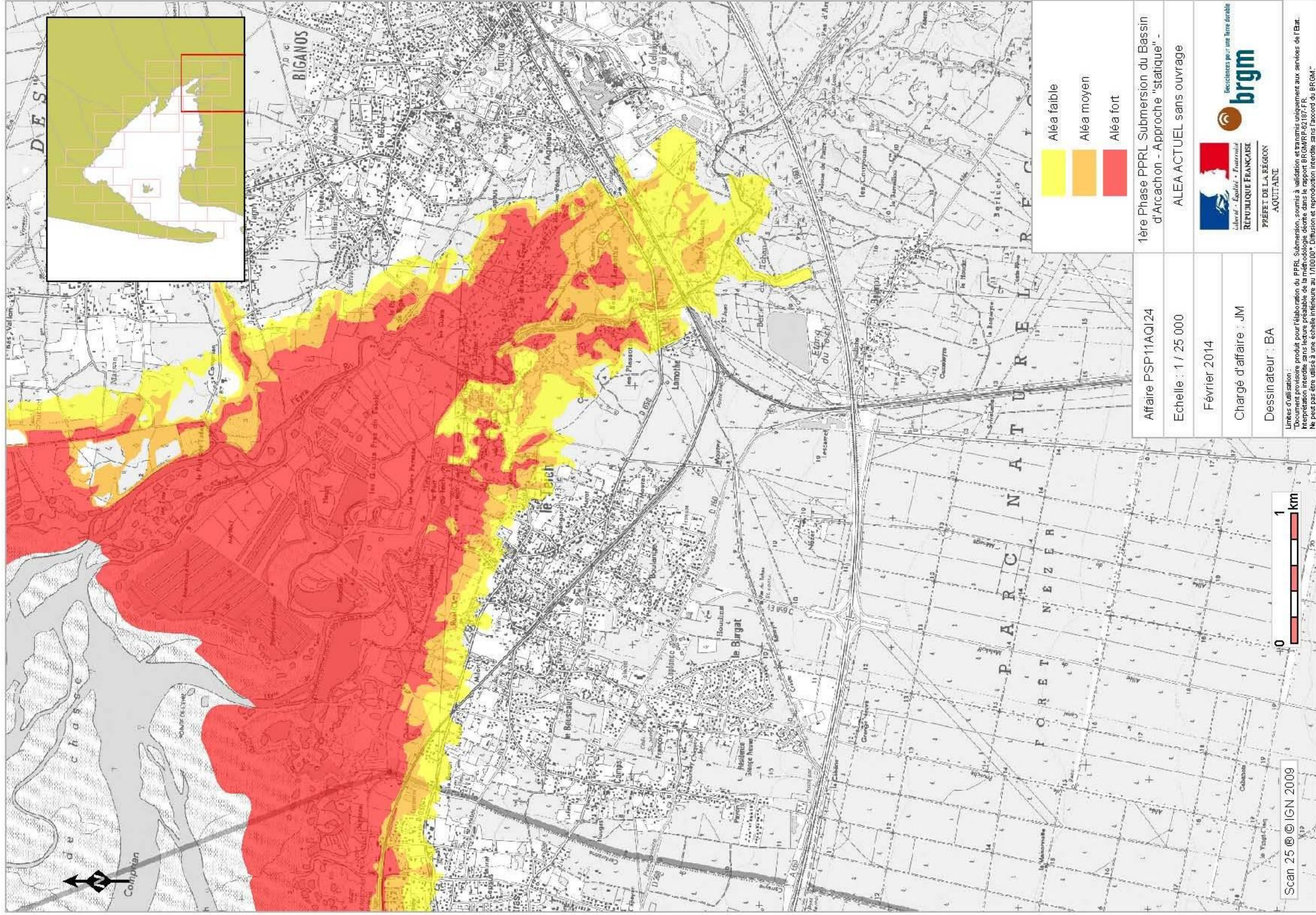
Annexe 4

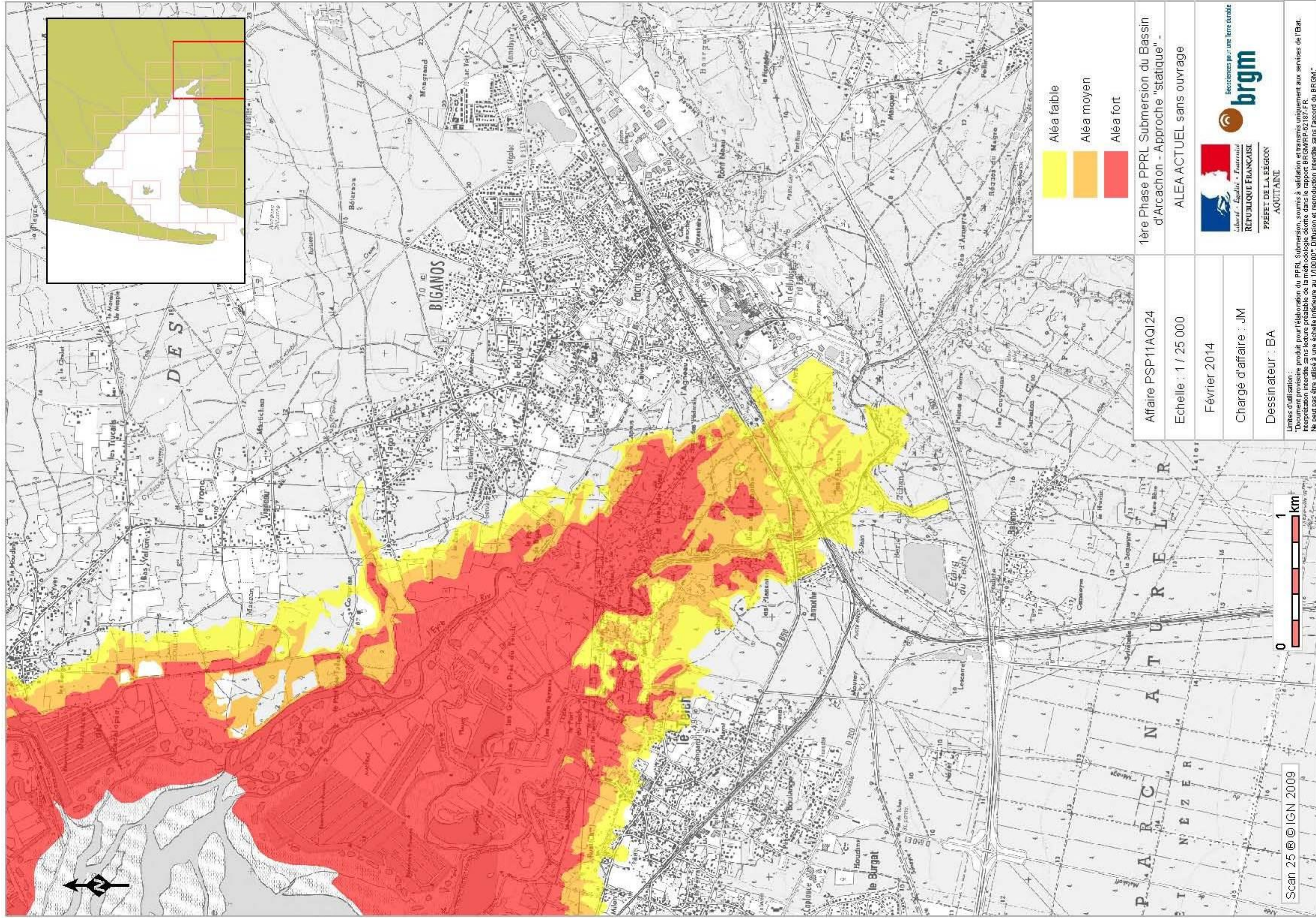
Cartographie de l'aléa submersion marine « actuel sans ouvrage », échelle 1 / 25 000



Scan 25® © IGN 2009







Affaire PSP11AQI24

Echelle : 1 / 25 000

Février 2014

Chargé d'affaire : JM

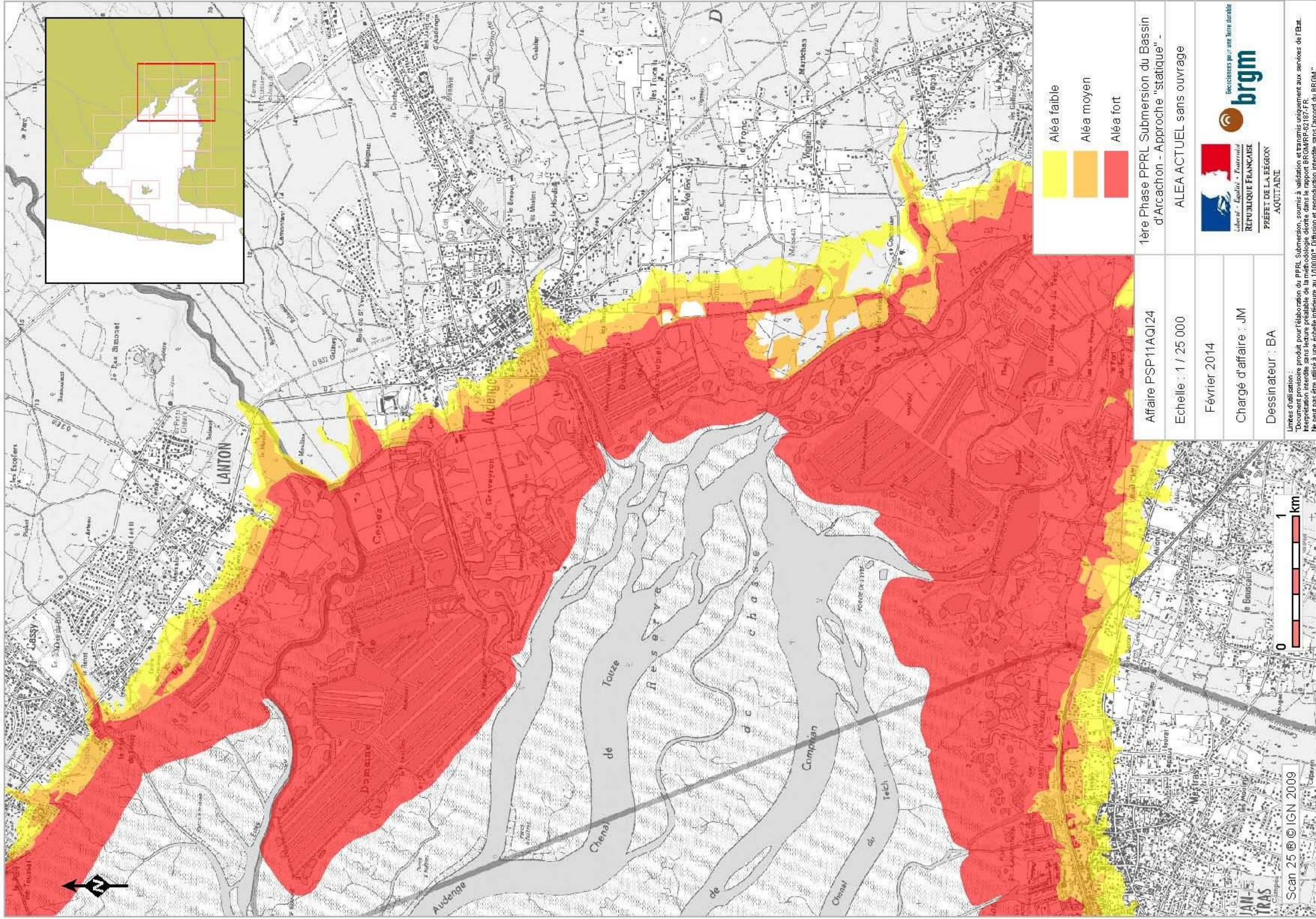
Dessinateur : BA

1ère Phase PPRL Submersion du Bassin d'Arcachon - Approche "statique" -

ALEA ACTUEL sans ouvrage

Limites d'utilisation :

"Document provisoire produit pour l'élaboration du PPRL Submersion, soumis à validation et transmis uniquement aux services de l'Etat. Interprétation interdite sans lecture préalable de la méthodologie décrite dans le rapport BRGM/RP-62187-FR. Ne peut pas être utilisé à une échelle inférieure au 1/10000". Diffusion et reproduction interdite sans l'accord du BRGM."



Affaire PSP11AQI24

Echelle : 1 / 25 000

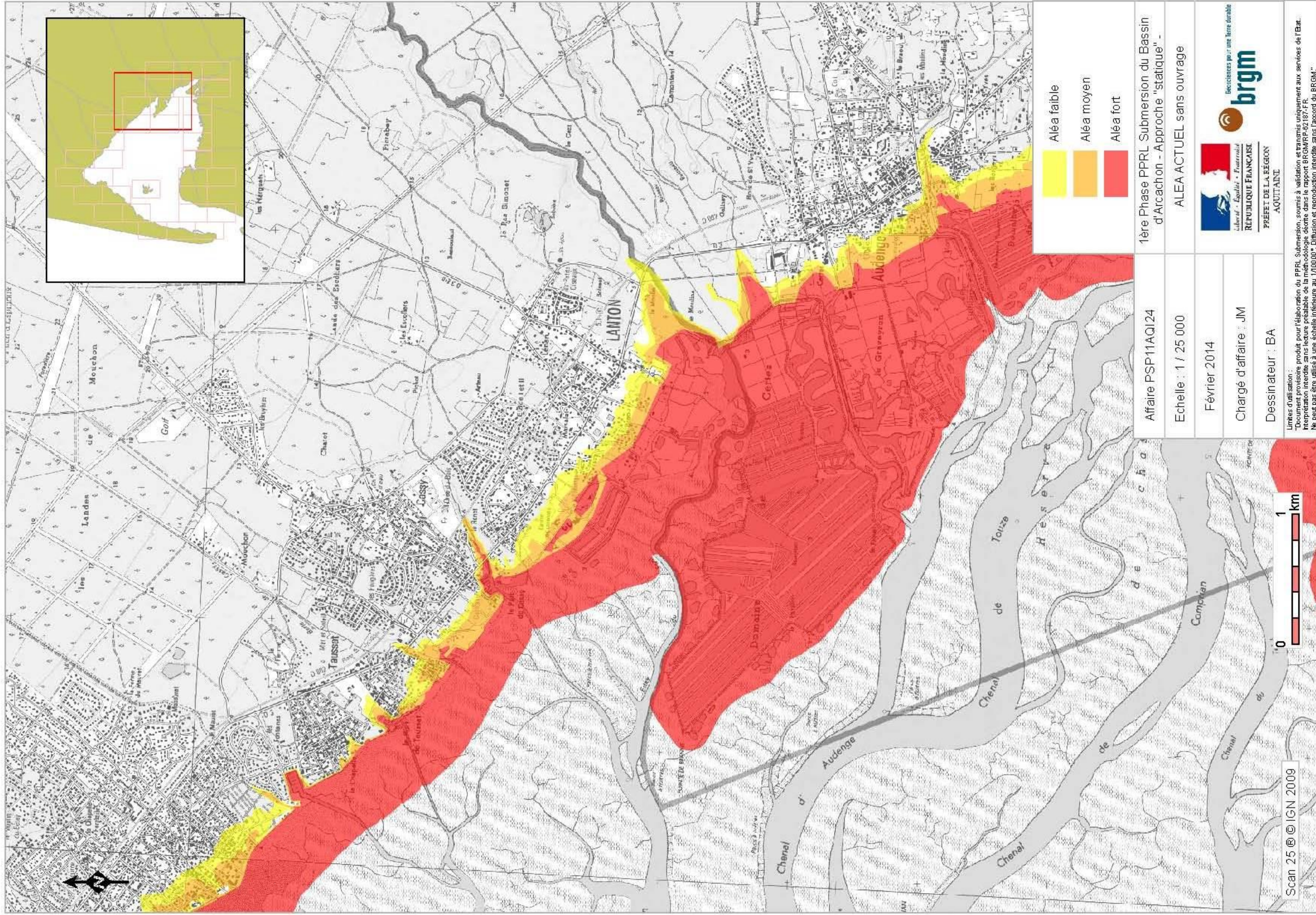
Février 2014

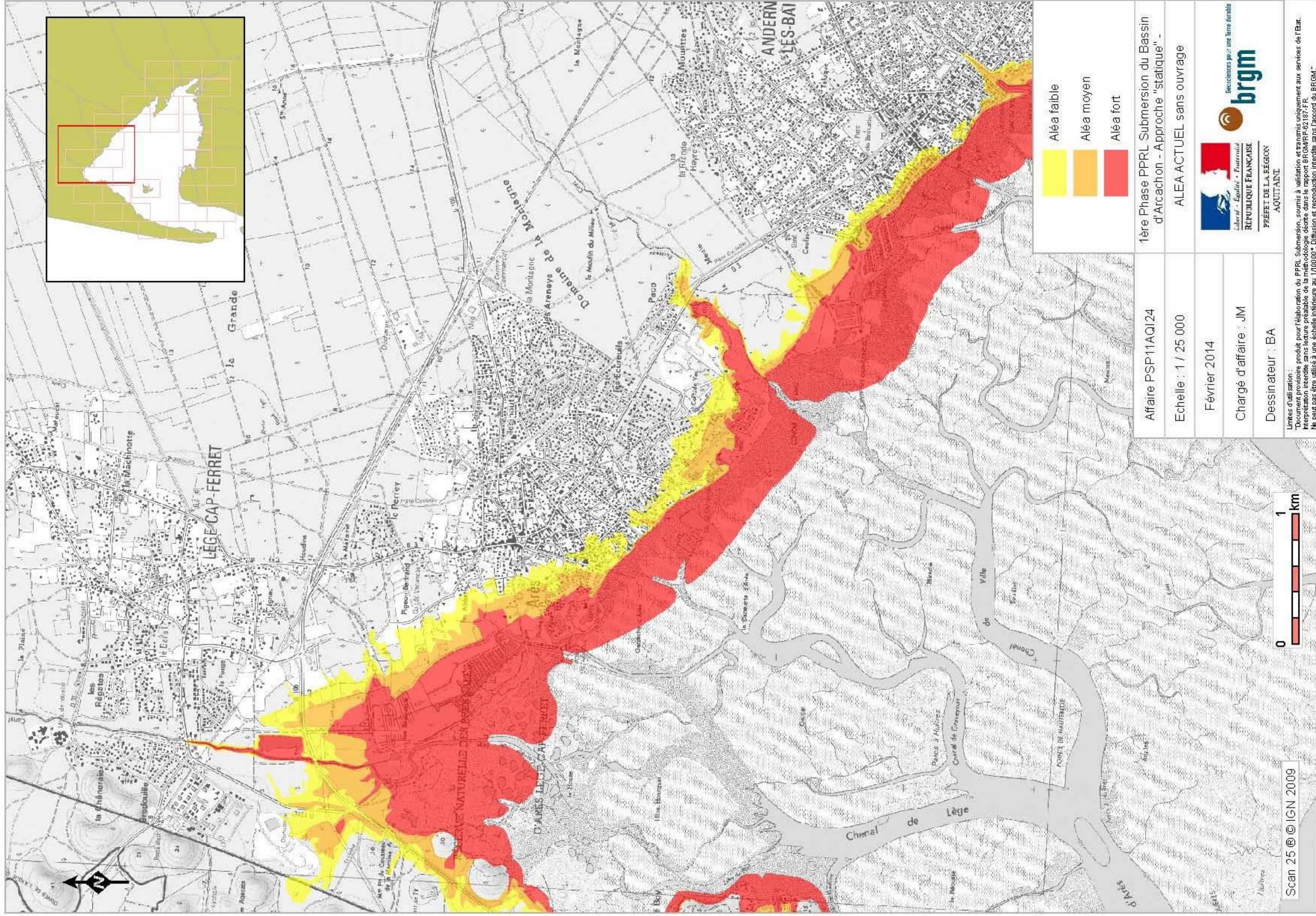
Chargé d'affaire : JM

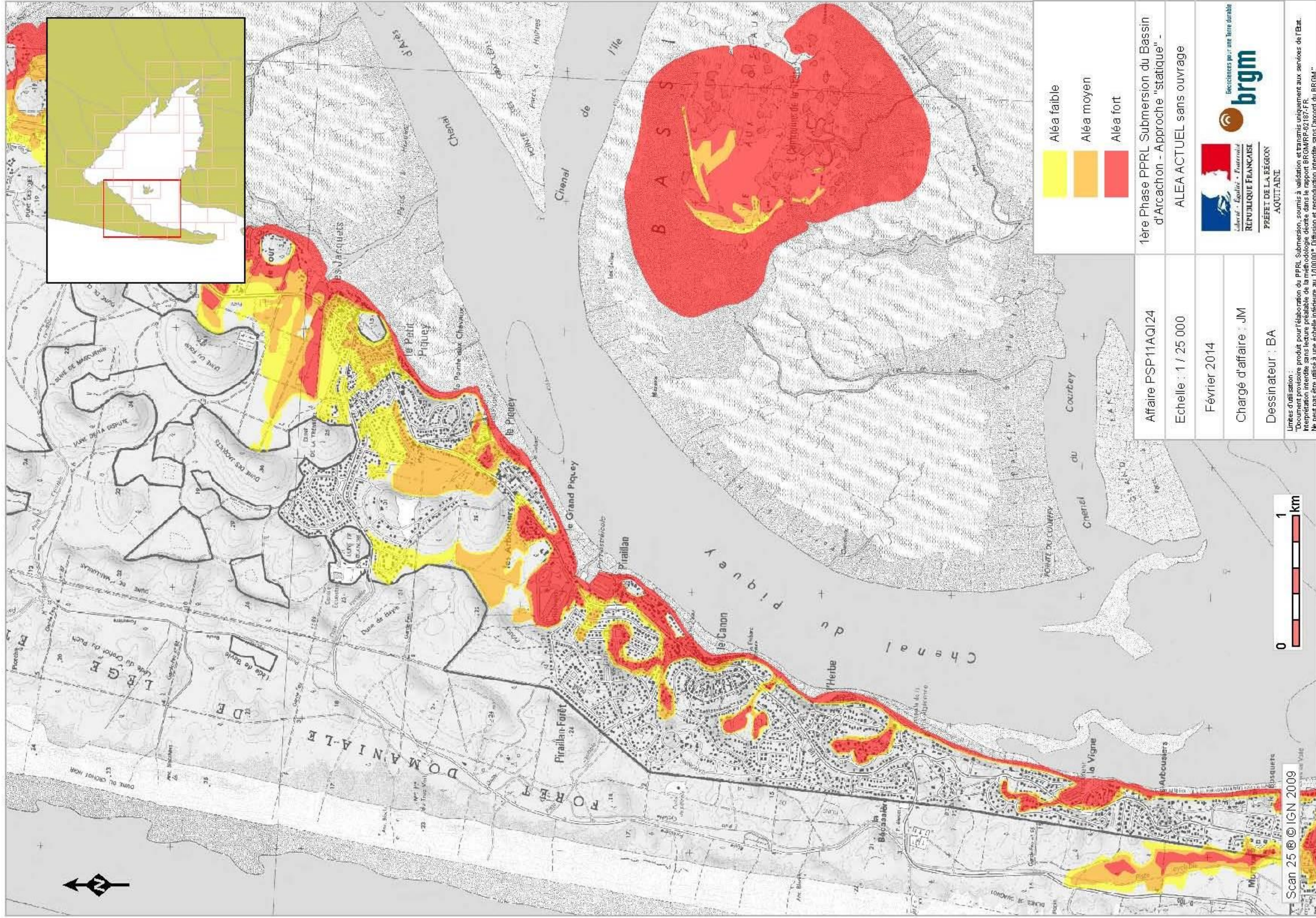
Dessinateur : BA

1ère Phase PPRL Submersion du Bassin
d'Arcachon - Approche "statique" -

ALEA ACTUEL sans ouvrage

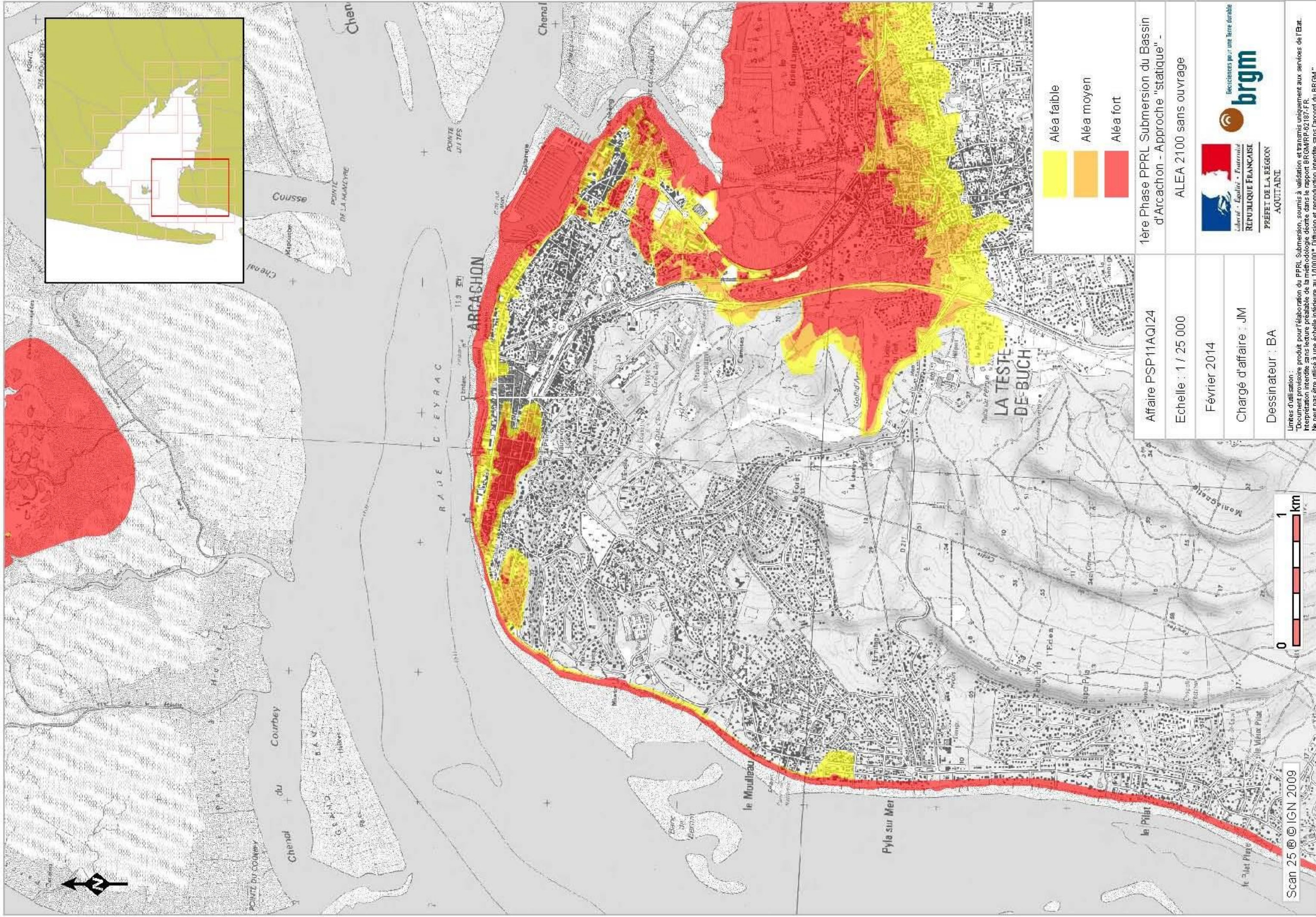






Annexe 5

Cartographie de l'aléa submersion marine « 2100 sans ouvrage », échelle 1 / 25 000



Affaire PSP11AQI24	1ère Phase PPRL Submersion du Bassin d'Arcachon - Approche "statique" -
Echelle : 1 / 25 000	ALEA 2100 sans ouvrage
Février 2014	
Chargé d'affaire : JM	
Dessinateur : BA	

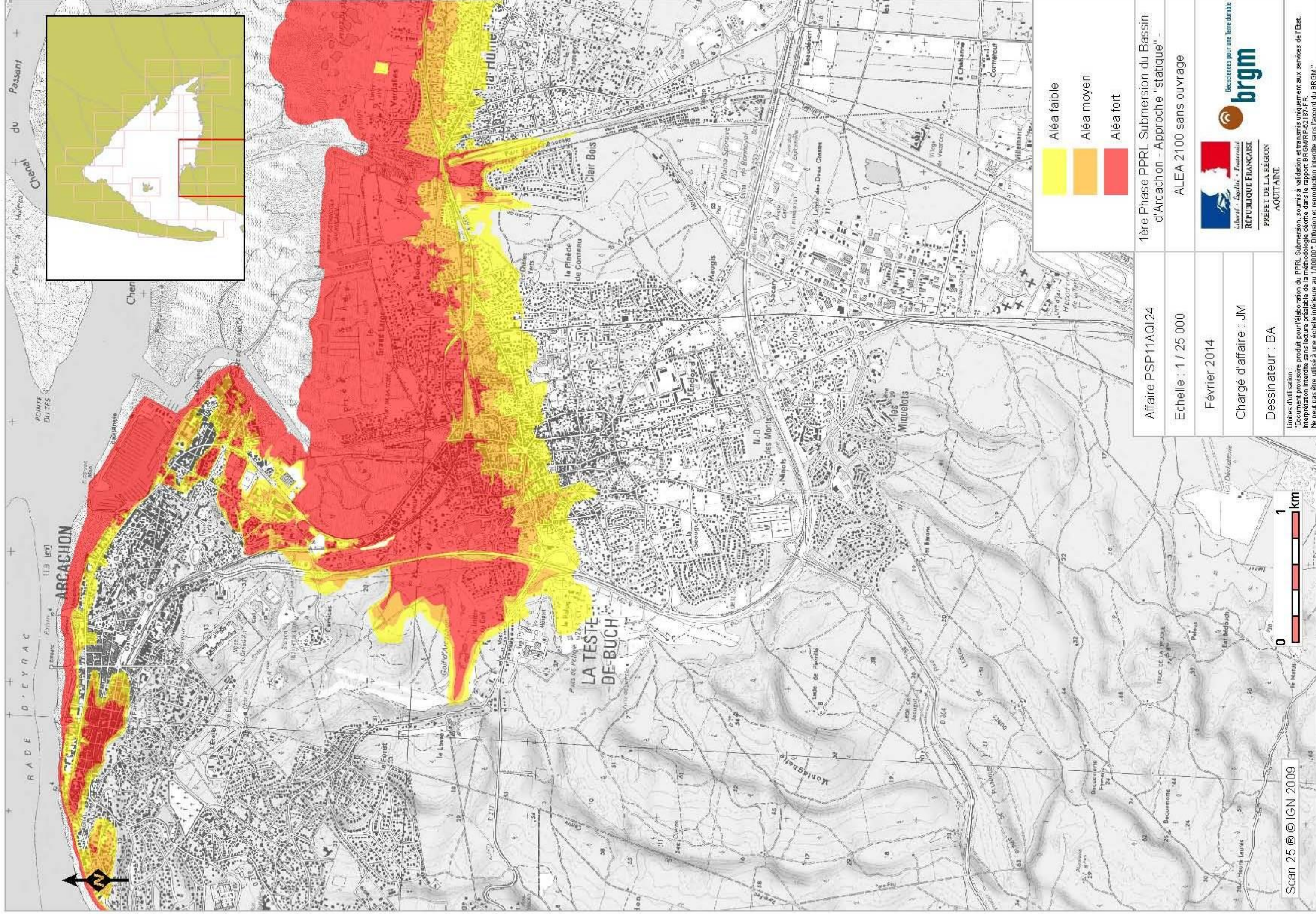


REPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté - Egalité - Fraternité



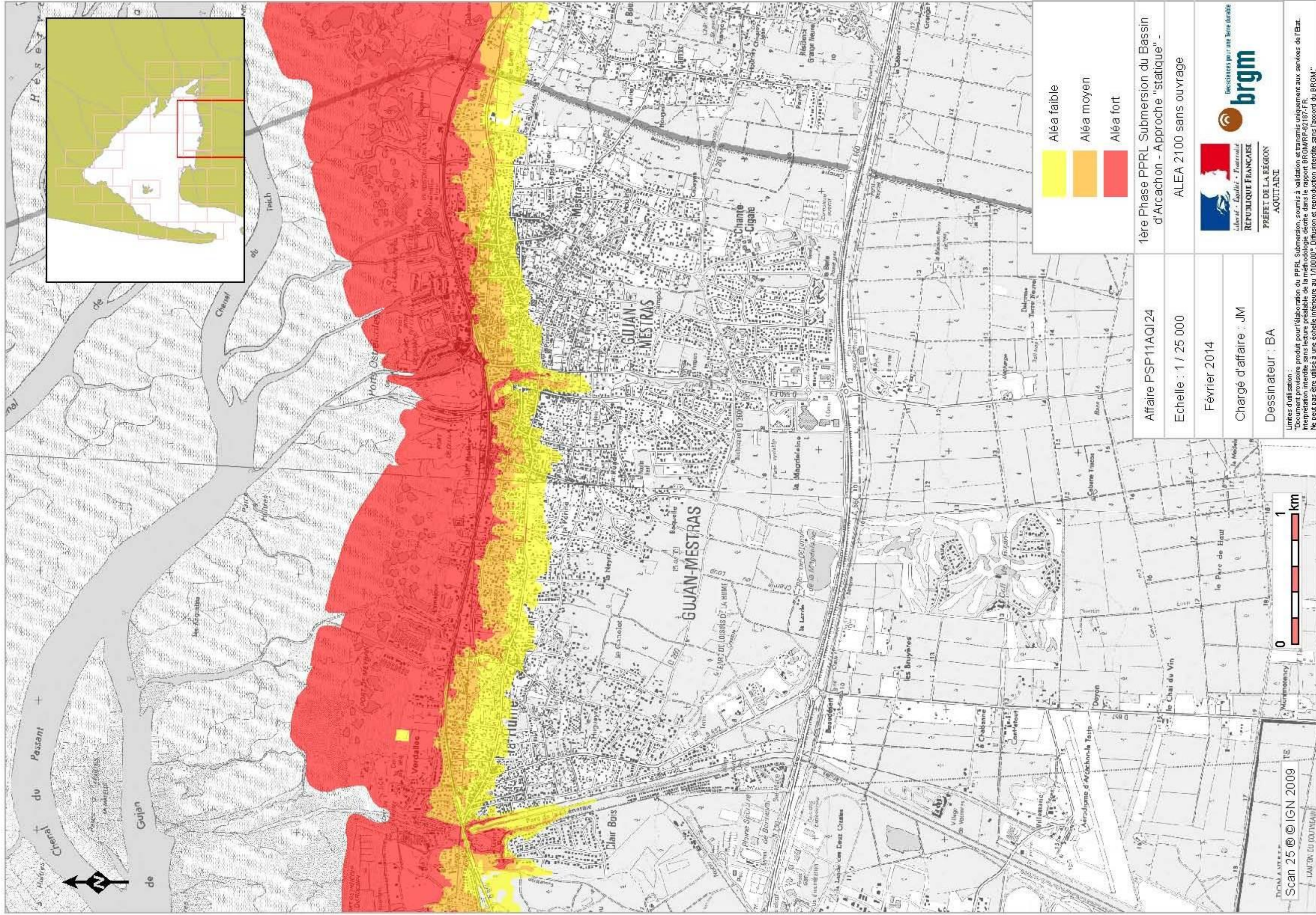
BRGM
Biosciences pour une terre durable

PRÉFET DE LA RÉGION
AQUITAINE



Affaire PSP11AQI24	1ère Phase PPRL Submersion du Bassin d'Arcachon - Approche "statique" -
Echelle : 1 / 25 000	ALEA 2100 sans ouvrage
Février 2014	
Chargé d'affaire : JM	
Dessinateur : BA	

Limites d'utilisation :
Document provisoire produit pour l'élaboration du PPRL Submersion, soumis à validation et transmis uniquement aux services de l'Eat.
Interprétation interdite sans lecture préalable de la méthodologie décrite dans le rapport BRGM/RP-62187-FR.
Ne peut pas être utilisé à une échelle inférieure au 1/10000. Diffusion et reproduction interdite sans l'accord du BRGM.

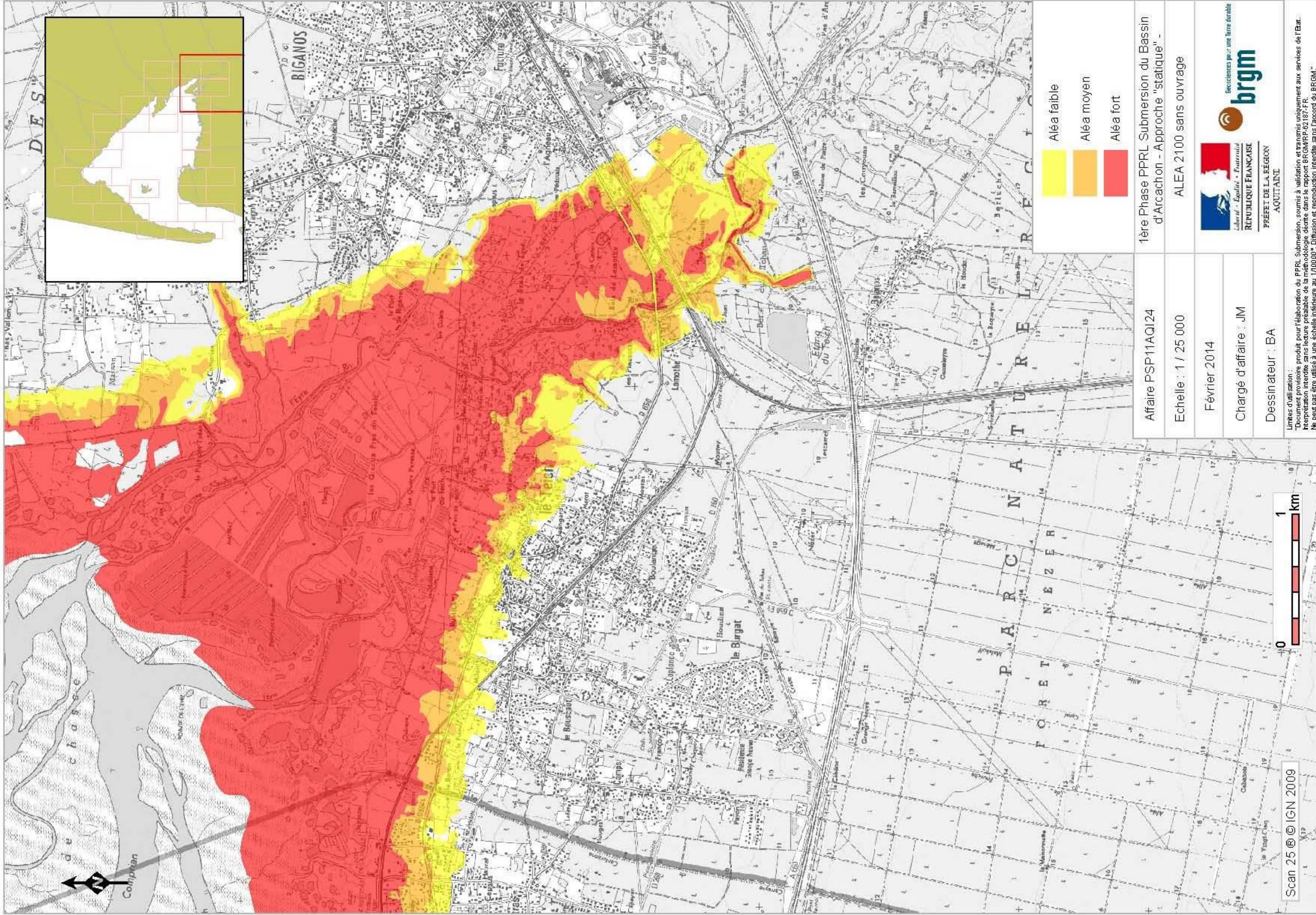


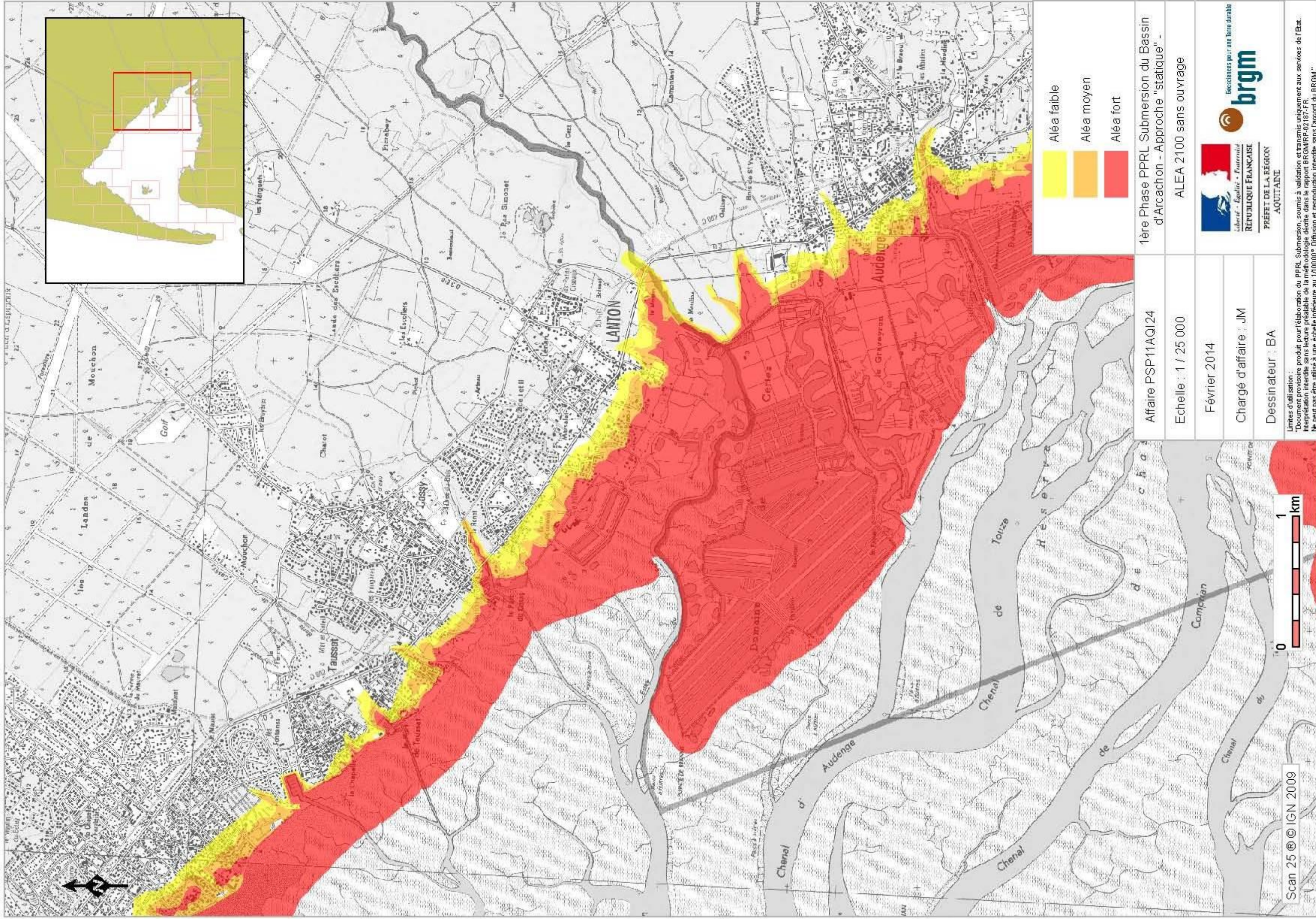
1ère Phase PPRL Submersion du Bassin d'Arcachon - Approche "statique" -

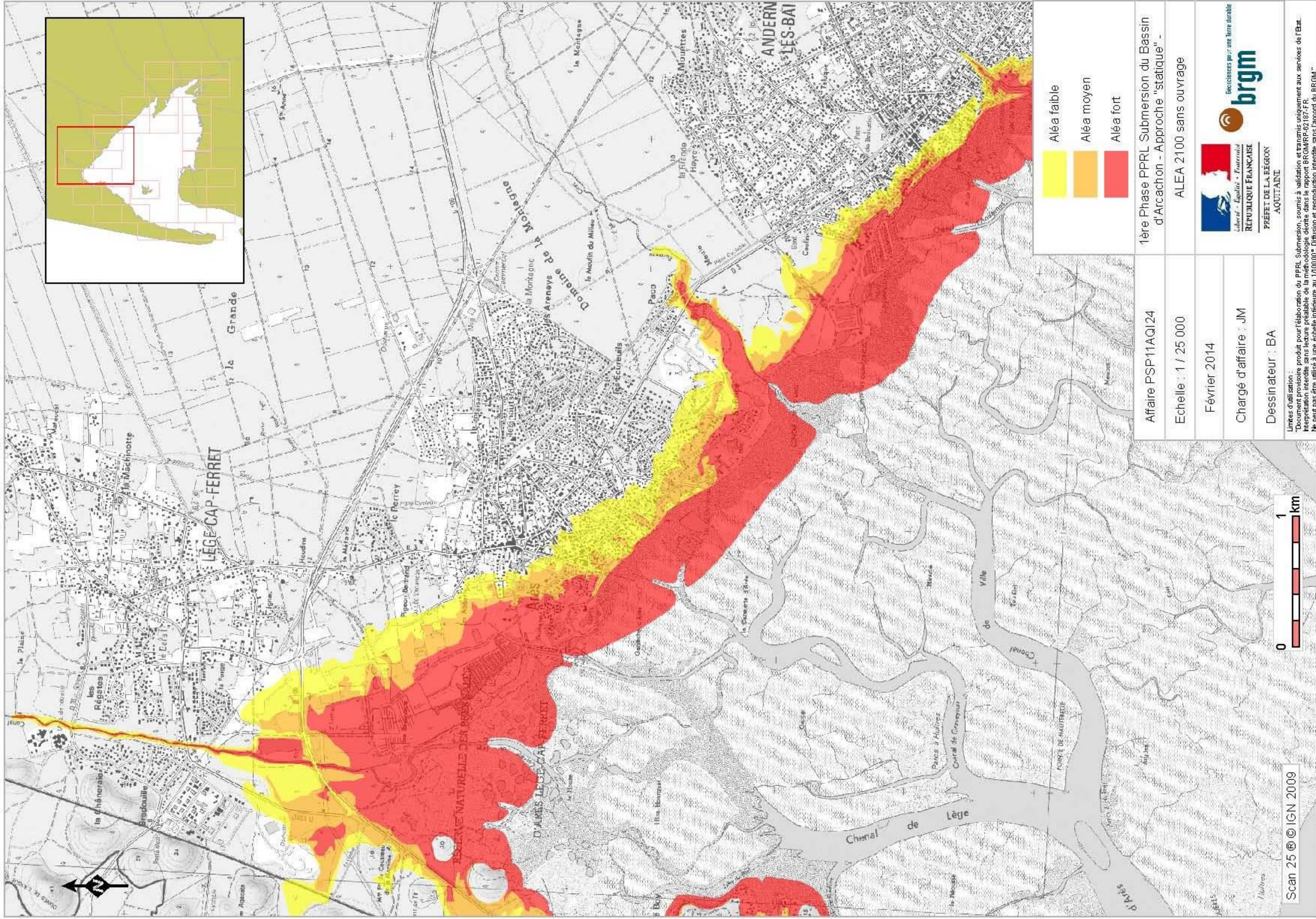
ALEA 2100 sans ouvrage

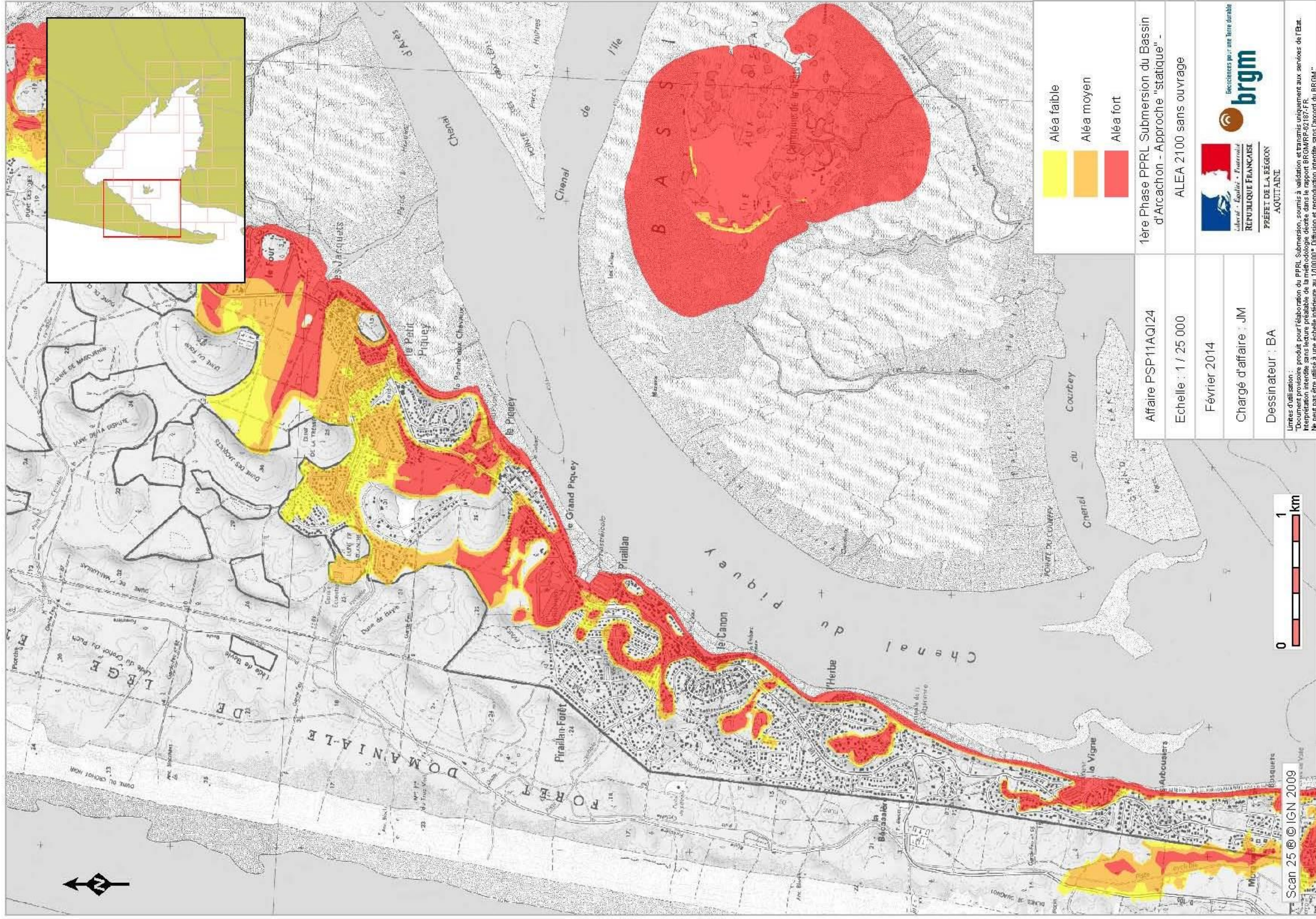


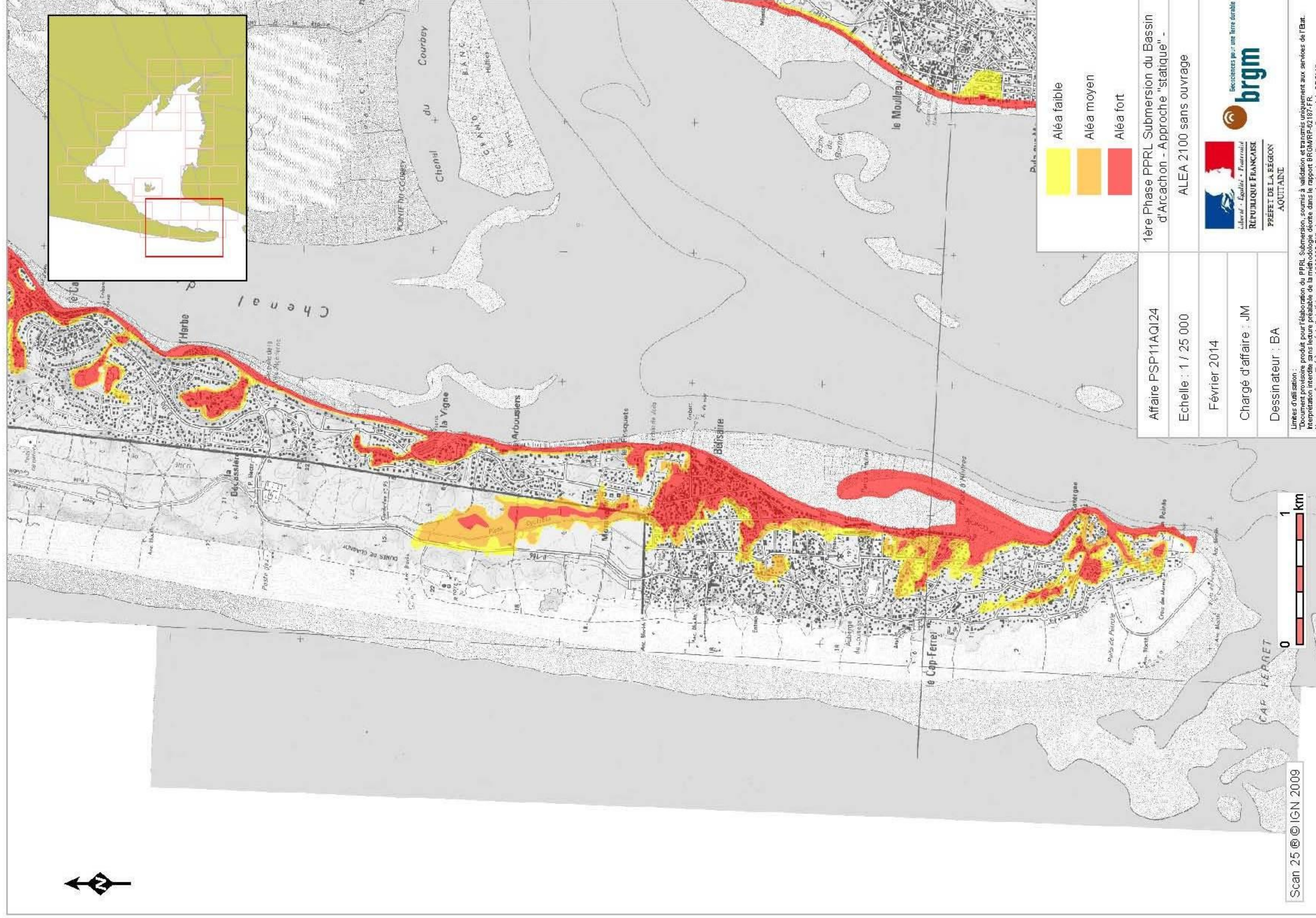
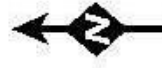
Document provisoire produit pour l'élaboration du PPRL Submersion, soumis à validation et transmis uniquement aux services de l'Etat.
Interprétation interdite sans lecture préalable de la méthodologie décrite dans le rapport BRGM/RP-62187-FR.
Ne peut pas être utilisé à une échelle inférieure au 1/100 000. Diffusion et reproduction interdite sans l'accord du BRGM.









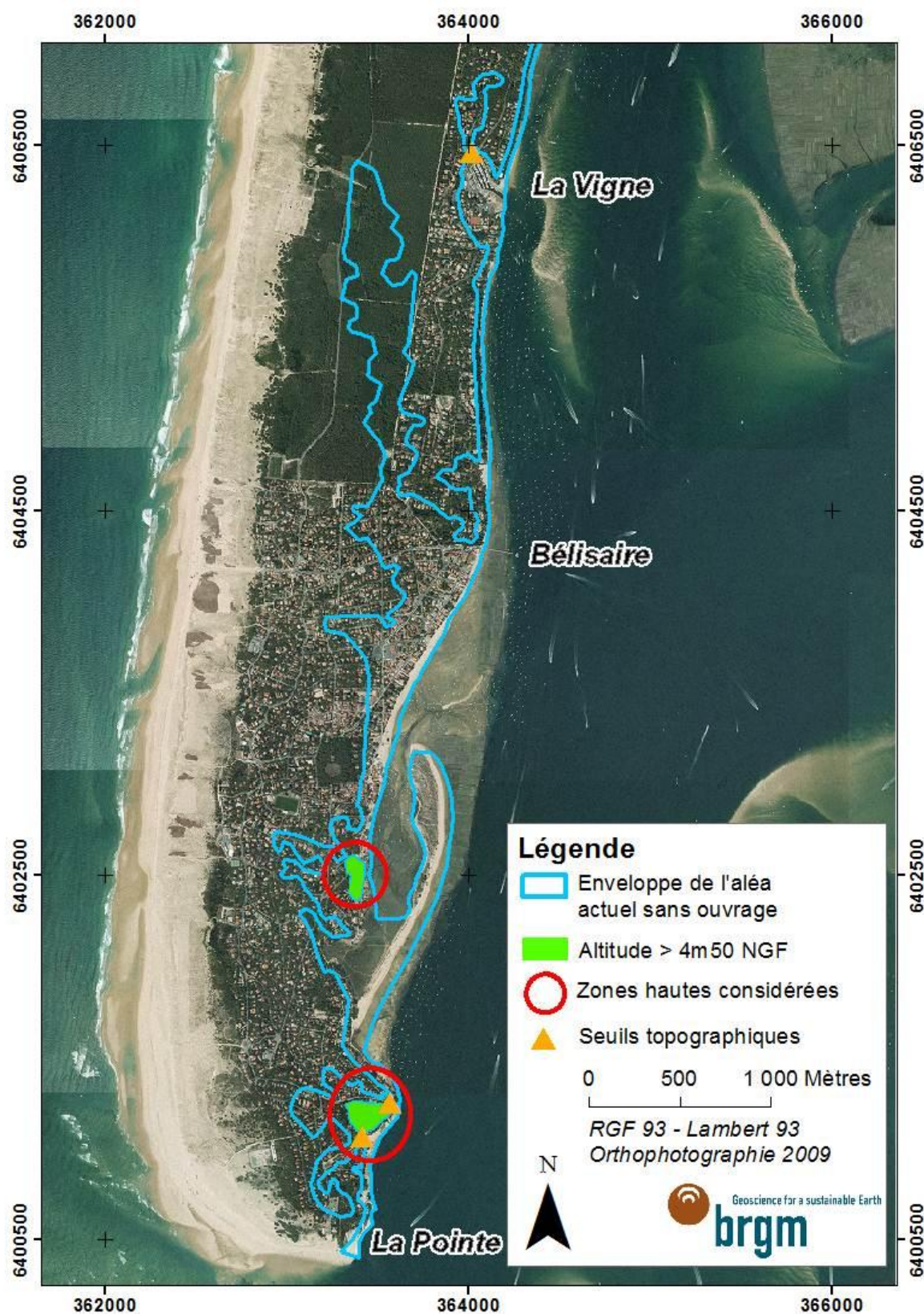


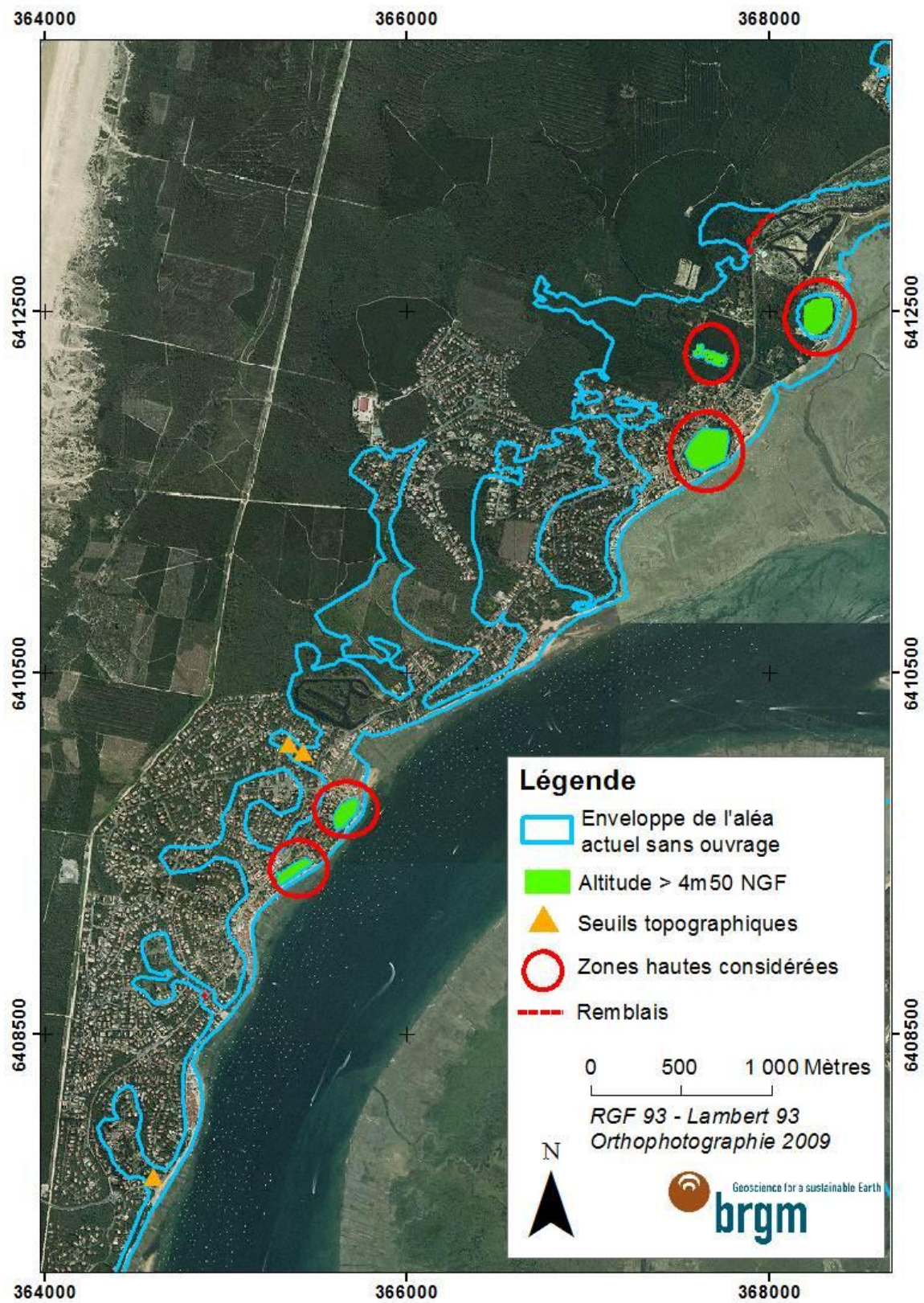
Affaire PSP11AQI24	1ère Phase PPRL Submersion du Bassin d'Arcachon - Approche "statique" -
Echelle : 1 / 25 000	ALEA 2100 sans ouvrage
Février 2014	
Chargé d'affaire : JM	
Dessinateur : BA	

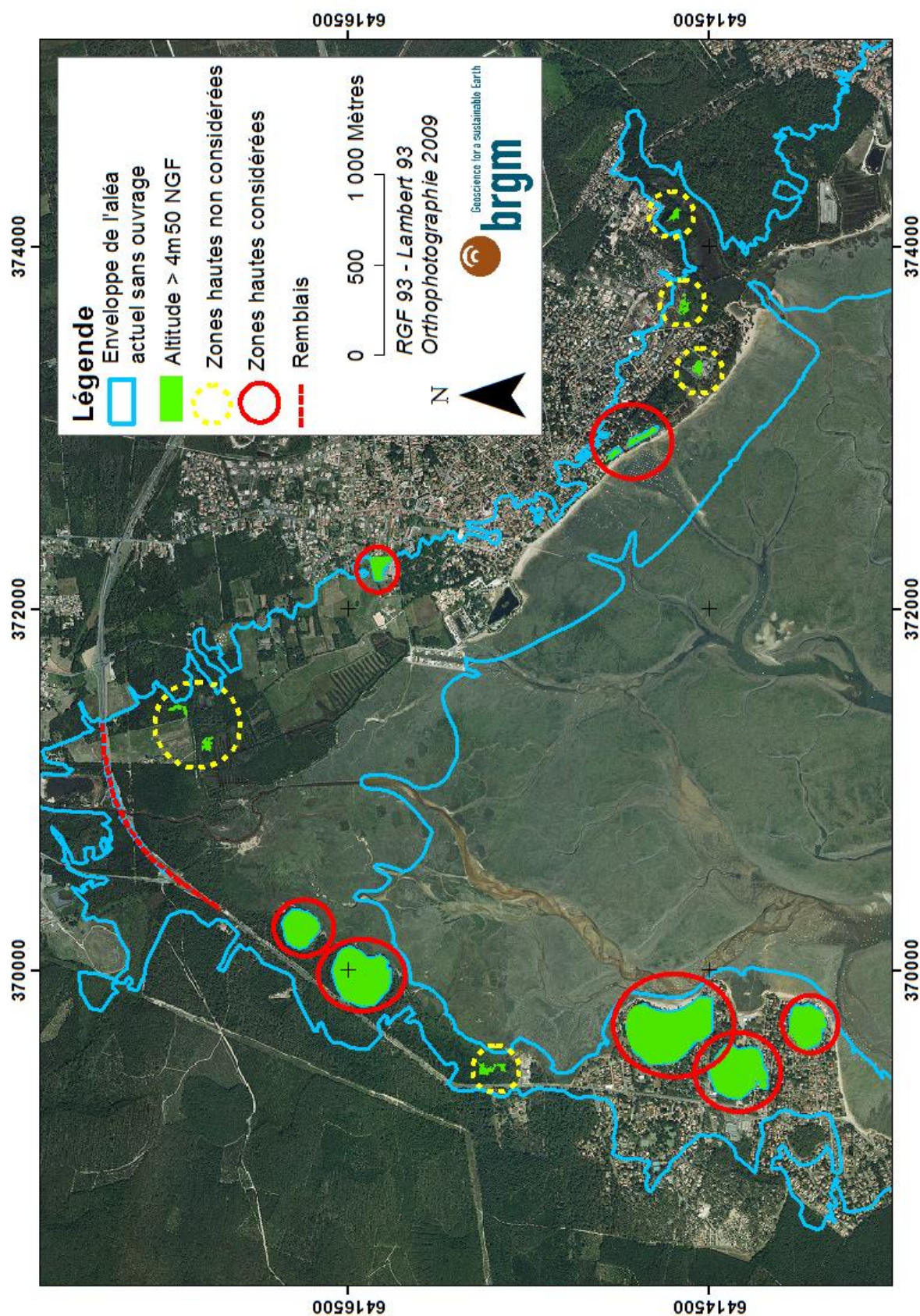


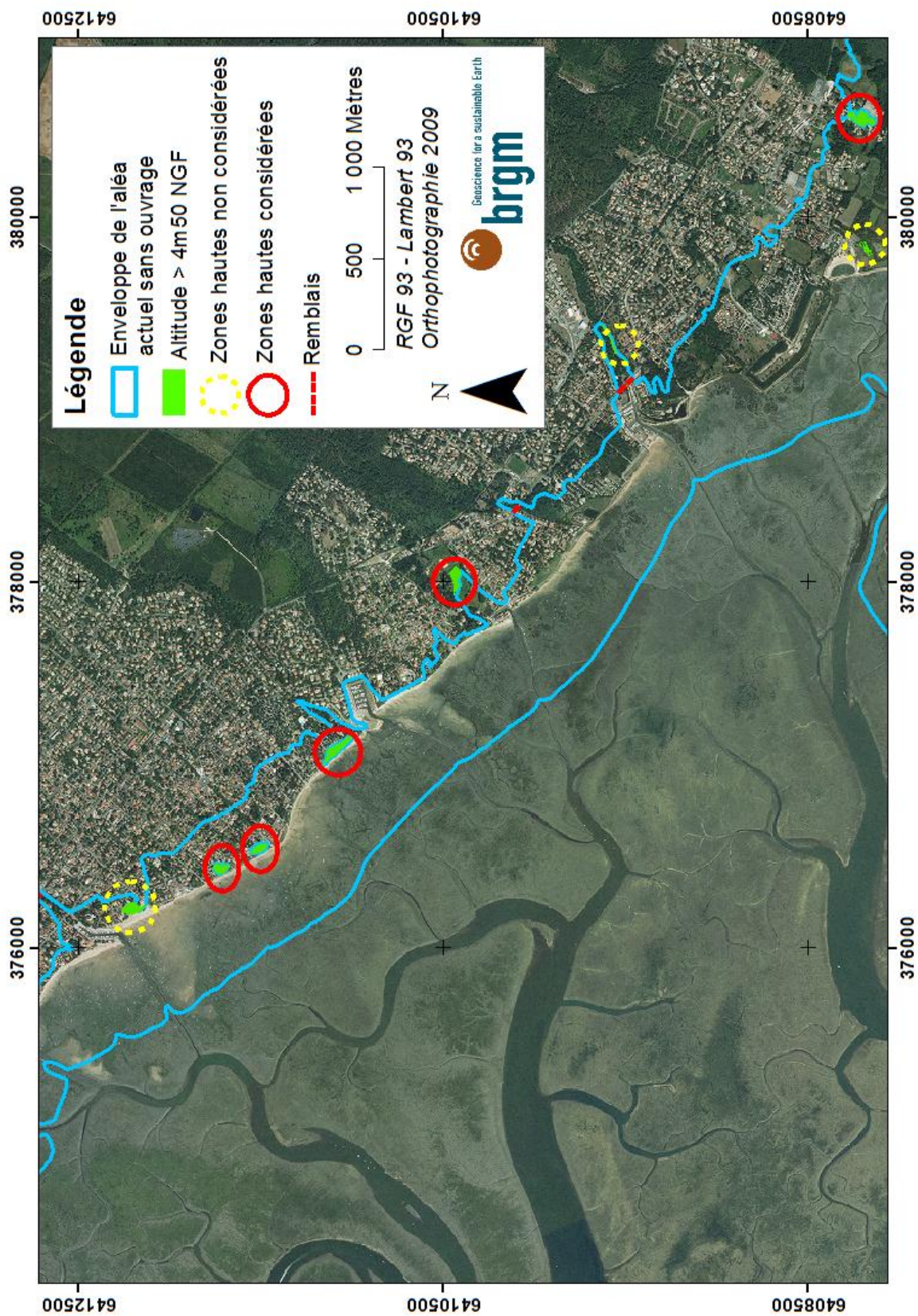
Annexe 6

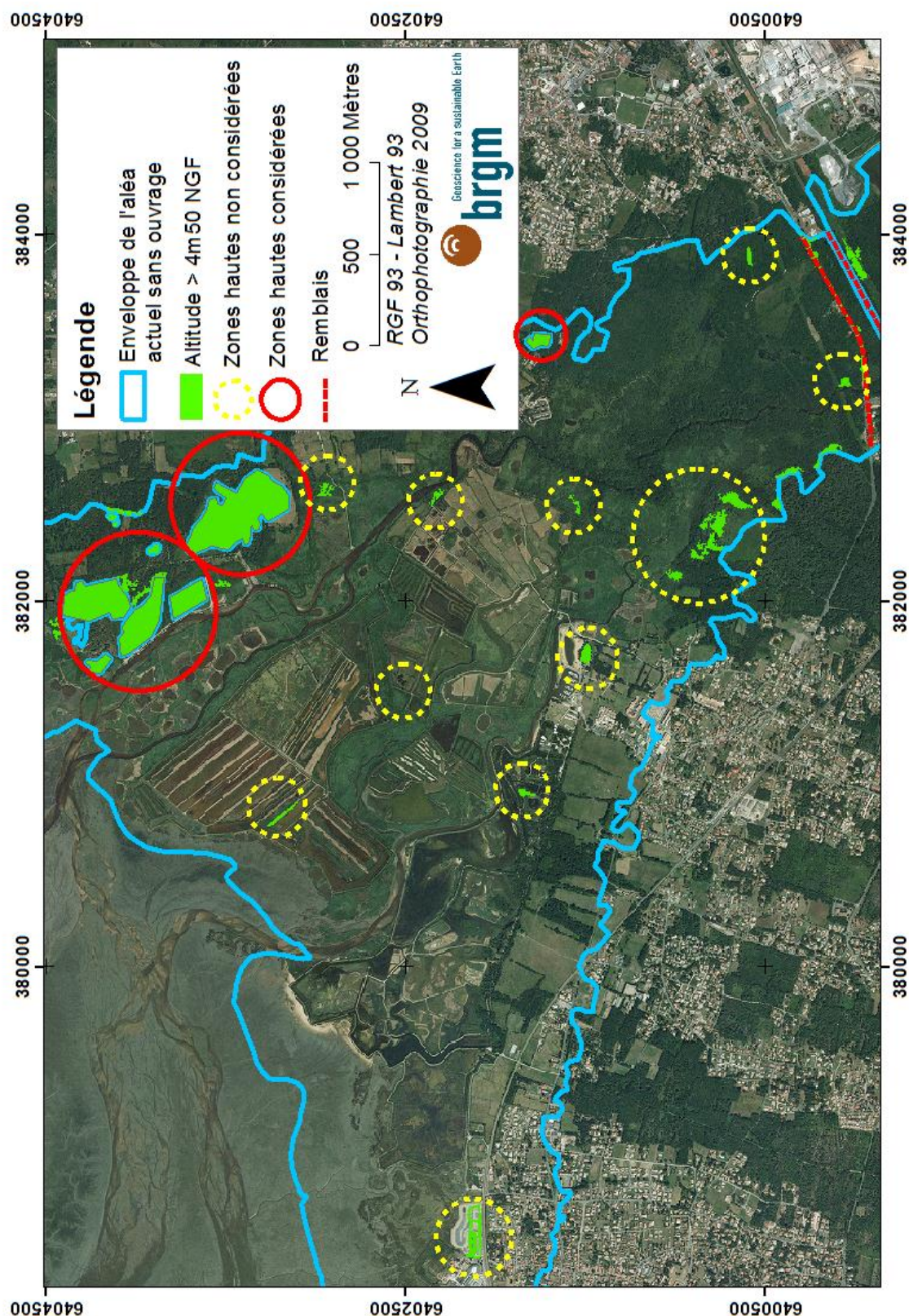
Identification des zones hautes isolées au sein de la surface inondable de l'aléa actuel sans ouvrage et modalités de leur prise en compte

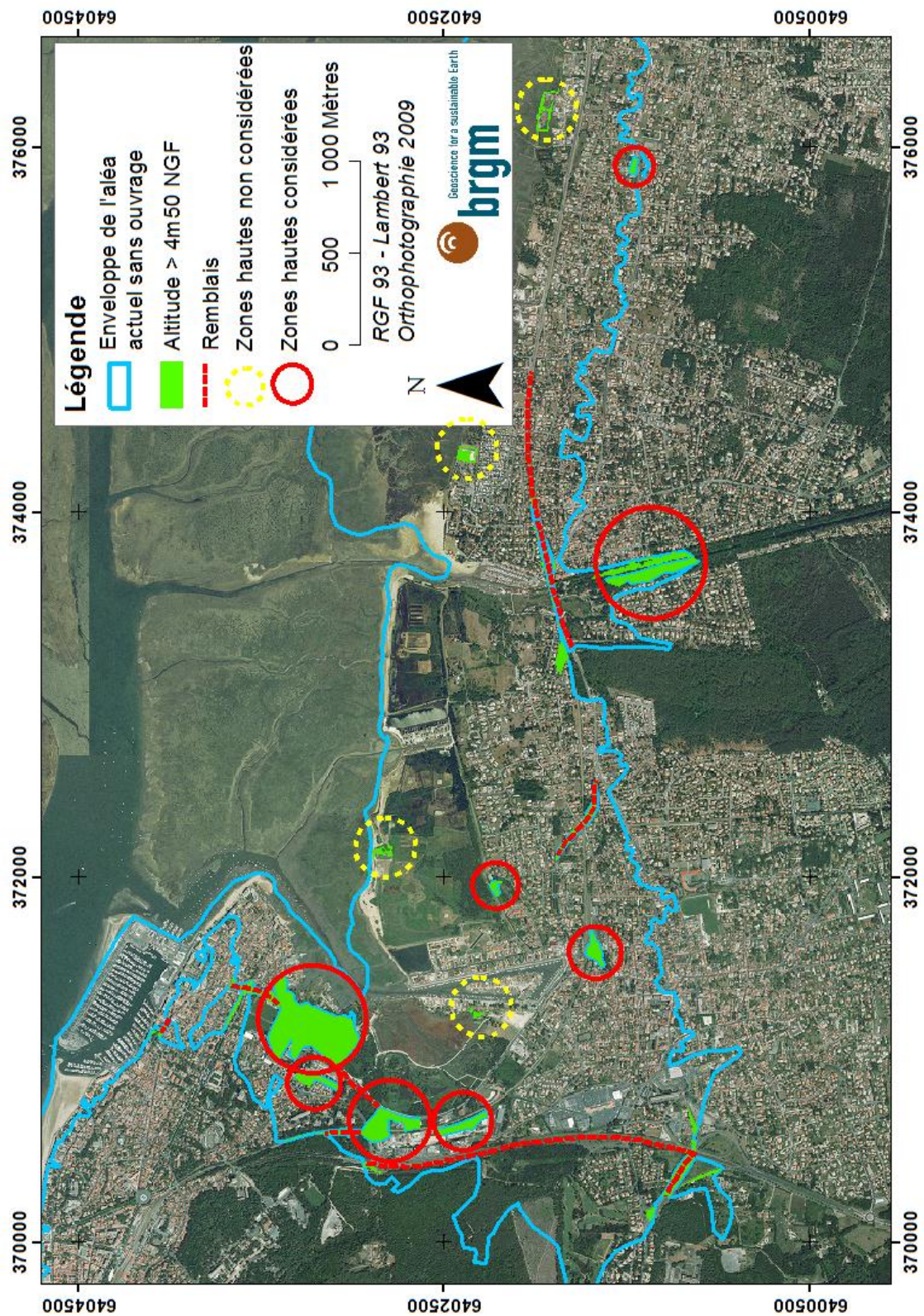














Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

BRGM Direction Régionale Aquitaine
Parc Technologique Europarc
24, avenue Léonard de Vinci
33600 – Pessac – France
Tél. : 05 57 26 52 70