

Amélioration de la méthode RNACC : Caractérisation des incertitudes relatives à la quantification des impacts de l'élévation du niveau marin

Rapport final

BRGM/RP 59405-FR
Mars 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2011

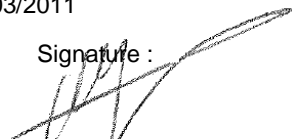
M. Yates Michelin, G. Le Cozannet, Y. Krien, N. Lenôtre
Avec la collaboration de
T. Bulteau

Vérificateur :

Nom : Manuel Garcin

Date : 21/03/2011

Signature :



Approbateur :

Nom : Hormoz Modaressi

Date : 25/03/2011

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : Érosion côtière, Submersion marine, Changement climatique, Élévation du niveau marin

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

Yates-Michelin M., Le Cozannet G., Krien Y., Lenôtre N. (2011) - Amélioration de la méthode RNACC : caractérisation des incertitudes relatives à la quantification des impacts de l'élévation du niveau marin. Rapport final BRGM/RP-59405-FR, 142 p., 32 tab., 57 fig., 5 ann.

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

En application du Plan Climat français (2006), un groupe de travail interministériel « Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associé en France » a été constitué pour évaluer les dommages potentiels et envisager des mesures permettant de limiter le coût des impacts du changement climatique. Le groupe plénier a été décliné en sept groupes de travail thématiques dont le groupe de travail GT RNACC : Risques naturels, assurance et changement climatique. Un sous-groupe technique avait été constitué pour évaluer les risques côtiers en quantifiant les conséquences du changement climatique (aléas côtiers érosion et submersion marine) dans des zones côtières avec une estimation des coûts potentiels induits en région Languedoc-Roussillon. Ces travaux sont disponibles dans le rapport BRGM/RP-57141-FR (Le Cozannet *et al.*, 2009).

Ce projet se place donc dans la continuité des travaux menés dans le cadre du groupe de travail thématique Risques côtiers du Groupe de Travail RNACC (convention DGPR-BRGM 2009 n° 0001337 action 6.1). Il est financé par le MEEDTL/DGPR par la convention DGPR-BRGM 2010 (n° 0007326 action V.3).

L'étude du groupe de travail thématique Risques côtiers du Groupe de Travail national RNACC a identifié plusieurs sources d'incertitudes importantes pour l'évaluation de l'impact potentiel du changement climatique : élévation du niveau marin, précision et justesse des données altimétriques disponibles à l'échelle régionale, processus géomorphologiques induits par l'élévation du niveau marin et position du trait de côte. La présente étude a pour objectif d'évaluer les incertitudes associées à chacune de ces sources, en termes d'érosion et de submersion côtière. Cette évaluation a été effectuée à partir d'analyses de sensibilité.

L'étude est menée en Languedoc-Roussillon, sur un site délimité par la zone dans laquelle un levé Lidar a été effectué en 2007. Ceci constitue une limite dans la mesure où les zones situées en arrière des étangs n'avaient pas été levées, alors qu'elles peuvent être affectées par des submersions. Il sera cependant aisé de reproduire les méthodes présentées ici lorsque davantage de données Lidar seront disponibles, notamment avec le programme Litto-3D du SHOM et de l'IGN.

Deux types d'approches existent pour évaluer les conséquences potentielles de l'élévation du niveau marin : des approches par analyse des facteurs de la vulnérabilité (exemple Gornitz *et al.*, 1994), et des approches déterministes (exemple : Hinkel *et al.*, 1994). La présente étude met en évidence que des sources d'incertitudes importantes demeurent lorsque des approches déterministes sont mises en œuvre. Il est possible d'améliorer les évaluations en mettant à disposition des données topographiques de bonne qualité (perspective offerte par Litto3D à relativement court terme), mais il sera également nécessaire également d'améliorer la connaissance des processus d'érosion sur le long terme (de 20 à 100 ans), notamment à travers des programmes d'observation du trait de côte.

La présente étude contribue ainsi aux efforts menés pour améliorer la quantification des impacts potentiels du changement climatique sur les aléas érosion et submersion côtière, suivant les approches déterministes. Elle contribue surtout à une meilleure compréhension des incertitudes associées à ces approches et pourrait être intégrée dans des outils d'évaluation déterministe des conséquences du changement climatique.

Sommaire

1. Introduction.....	13
1.1. CONTEXTE	13
1.2. OBJECTIF	13
2. Résumé des principaux résultats de l'étude.....	15
2.1. INTRODUCTION ET POSITIONNEMENT DE L'ÉTUDE.....	15
2.2. SITE D'ÉTUDE, MÉTHODE ET DONNÉES.....	17
2.2.1. Site d'étude.....	17
2.2.2. Érosion côtière et analyse de la submersion.....	17
2.2.3. Hypothèses d'évolution du trait de côte	18
2.2.4. Disponibilité de données topographiques	18
2.3. RESULTATS ET DISCUSSION	18
2.3.1. Evaluation de la sensibilité aux scenarii d'élévation du niveau marin .	18
2.3.2. Analyse de sensibilité aux hypothèses d'évolution du trait de côte.....	20
2.3.3. Évaluation des données topographiques	21
2.3.4. Agrégation des incertitudes	22
2.4. CONCLUSION	23
3. Site d'étude, données et hypothèses de travail.....	25
3.1. CARACTÉRISTIQUES DU SITE D'ÉTUDE.....	25
3.1.1. Contexte régional.....	25
3.1.2. Choix et description du site d'étude	26
3.1.3. Caractéristiques du site d'étude en termes d'occupation du sol	27
3.2. DONNÉES	28
3.2.1. Synthèse des données utilisées.....	28
3.2.2. Modèles numériques de terrain (MNT).....	29
3.2.3. Données de traits de côte historiques et actuels	31
3.2.4. Données bathymétriques	34
3.2.5. Données d'occupation du sol et bâtiments.....	37
3.2.6. Données de cartographie de l'extension de submersions marines.....	38
3.3. CHOIX D'UNE HYPOTHÈSE D'ÉLEVATION DU NIVEAU MARIN	39
3.4. RESUME	40

4. Méthodes	41
4.1. RETOUR SUR LA MÉTHODE DU PROJET RNACC 1	41
4.2. MÉTHODE POUR L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ DU PRÉSENT PROJET ..	43
4.2.1. Approche générale du projet.....	43
4.2.2. Méthode d'analyse de sensibilité	44
4.2.3. Analyse de sensibilité au choix d'une hypothèse d'élévation du niveau marin.....	45
4.2.4. Analyse de sensibilité à l'évolution long terme du trait de côte	46
4.2.5. Analyse de sensibilité à la précision des données altimétriques.....	46
4.3. MÉTHODE D'ANALYSE DES DONNÉES ALTIMÉTRIQUES	46
4.4. MÉTHODE D'ÉVALUATION DE LA SUBMERSION ET DE L'ÉROSION	48
4.4.1. Méthode d'analyse de la submersion	48
4.4.2. Méthodes d'analyse de l'érosion	49
4.5. MÉTHODE DE HIÉRARCHISATION DES INCERTITUDES	54
4.6. RÉSUMÉ.....	54
5. Analyse de sensibilité	55
5.1. ANALYSE DE SENSIBILITÉ AU CHOIX D'UNE HYPOTHÈSE D'ÉLÉVATION DU NIVEAU MARIN	55
5.1.1. L'évaluation de l'aléa érosion.....	55
5.1.2. L'évaluation de l'aléa submersion	57
5.1.3. Estimation des impacts potentiels	60
5.1.4. Analyse des résultats.....	62
5.2. ANALYSE DE SENSIBILITÉ À LA QUALITÉ D'UN MNT.....	62
5.2.1. Précision et justesse des données altimétriques et évaluation de la pertinence de MNT	62
5.2.2. Incertitudes liées à la conversion d'un MNE en MNT	64
5.2.3. Incertitudes liées à l'utilisation des données Lidar comme référence ..	66
5.2.4. Incertitudes induites par le choix d'un MNT pour l'évaluation des aléas érosion et submersion.....	67
5.2.5. Influence du choix du MNT sur l'identification du trait de côte	67
5.2.6. Influence du choix du MNT sur l'évaluation de l'aléa érosion	69
5.2.7. Influence du choix du MNT sur l'évaluation de l'aléa submersion.....	70
5.2.8. Mise en œuvre de l'évaluation des surfaces érodées et submergées	70
5.2.9. Estimation des impacts potentiels	72
5.2.10. Synthèse des résultats.....	73

5.3. ANALYSE DE SENSIBILITÉ AUX HYPOTHÈSES D'ÉVOLUTION LONG TERME DU TRAIT DE COTE	74
5.3.1. Mise en œuvre de l'évaluation de l'aléa érosion.....	74
5.3.2. L'évaluation de l'aléa submersion	81
5.3.3. Estimation des impacts potentiels.....	82
5.3.4. Analyse des résultats.....	84
6. Agrégation et hiérarchisation des incertitudes	87
6.1. CRITERE N°1 : SURFACES IMPACTÉES.....	87
6.2. CRITERE N°2 : TERRITOIRES URBANISÉS ET ARTIFICIALISÉS POTENTIELLEMENT IMPACTÉS.....	88
6.3. SYNTHÈSE.....	90
7. Amélioration de la méthode RNACC: mise en œuvre sur la région Languedoc-Roussillon et actualisation des résultats du RNACC	91
7.1. PROPOSITION D'AMÉLIORATION DE LA MÉTHODE RNACC-1 (2009)	91
7.2. MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE DES ALÉAS CÔTIERS DANS LE CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	92
7.2.1. Évaluation de l'érosion potentielle en 2100	92
7.2.2. Évaluation de la submersion potentielle en 2100	94
7.3. COMPARAISON AVEC D'AUTRES ÉVALUATIONS EN LANGUEDOC-ROUSSILLON.....	94
7.3.1. Comparaison avec la cartographie réalisée dans le cadre du projet MISSEVA	94
7.3.2. Comparaison avec la cartographie AZISM (Atlas des Zones Inondables - Submersion Marine)	96
7.3.3. Limites de l'exercice de comparaison	98
7.4. DÉNOMBREMENT DES BÂTIMENTS POTENTIELLEMENT AFFECTÉS....	98
7.5. DISCUSSION : COMMENT S'EXPLIQUENT LES DIFFÉRENCES ENTRE L'ÉVALUATION DE 2009 ET LA PRÉSENTE ÉVALUATION ?.....	99
7.6. CONCLUSION : COMMENT UTILISER LES MÉTHODES DÉTERMINISTES PRÉSENTÉES DANS LA PRÉSENTE ÉTUDE ?	100
8. Conclusion et perspectives	101
9. Remerciements	105
10. Bibliographie.....	107

Liste des figures

Figure 1 : Moyenne, écart type, minimum et maximum du recul du trait de côte le long la zone d'étude en appliquant la loi de Bruun.	19
Figure 2 : Surface cumulée de la zone submergée du site d'étude en fonction de l'altitude.	20
Figure 3 : Distributions empiriques des différences entre le MNT de l'IGN et le MNT Lidar, en fonction de l'altitude des données Lidar.	22
Figure 4 : Occupation des sols de la zone de moins de 2 m d'altitude, selon CORINE Landcover 1999 [source : Bélair, (2007)].	24
Figure 5 : Côte du Languedoc-Roussillon avec le site d'étude (en rouge).	26
Figure 6 : Occupation des sols selon la base de données Corine Land Cover 2006 (European Environment Agency) dans le site d'étude.	27
Figure 7 : Occupation des sols dans la zone du levé Lidar topo-bathymétrique de 2007.	28
Figure 8 : MNT de l'IGN (grille de 50 m) à Carnon en Languedoc-Roussillon.	30
Figure 9 : MNT d'Intermap (grille de 5 m) à Carnon en Languedoc-Roussillon.	30
Figure 10 : MNT Lidar (grille de 2 m) à Carnon en Languedoc-Roussillon.	31
Figure 11 : Exemple de positions du trait de côte définies par la courbe d'altitude 0 m NGF pour les trois types de données topographiques, ainsi que les données Corine Land Cover 2006 et HistoLitt.	33
Figure 12 : Isobathe de -10 m ; données SHOM (cartes marines) digitalisées pour le projet RESPONSE et données du levé Lidar de 2007.	35
Figure 13 : Lidar topo-bathymétrique de 2007 et isobathes de basse résolution de 10 m dans la zone de l'étang de Pierre-Blanche.	36
Figure 14 : Lidar topo-bathymétrique de 2007 et isobathes de basse résolution de 10 m dans la zone de l'étang de Carnon.	37
Figure 15 : Méthode appliquée dans le cadre de l'étude du groupe de travail Risques Côtiers du RNACC [adaptée de Le Cozannet et al. (2009)].	42
Figure 16 : Schéma de la méthodologie générale du projet, où les boîtes grises indiquent les étapes où les incertitudes dans le projet RNACC sont évaluées.	44
Figure 17 : Variables utilisées pour l'analyse de sensibilité ; les trois boîtes grisées indiquent celles pour lesquelles l'analyse de sensibilité (visant à l'évaluation des incertitudes) est menée.	45
Figure 18 : Rappel de la définition de la précision et de l'exactitude (biais faible) : en rouge, la valeur théorique, en noir, les données.	47
Figure 19 : Schéma de l'application de la loi de Bruun avec une translation verticale et vers la terre du profil d'équilibre à cause d'une élévation du niveau de la mer [source : Pilkey and Cooper, 2004].	51

Figure 20 : Exemple des zones potentiellement érodées à Carnon plage, suivant l'application de la loi de Bruun pour estimer le recul du trait de côte avec 4 scénarios différents d'élévation du niveau marin.	56
Figure 21: Moyenne, écart type, minimum et maximum du recul du trait de côte le long la zone d'étude en appliquant la loi de Bruun.	56
Figure 22 : Exemple de surfaces impactées par les aléas érosion et submersion permanente et temporaire (à cause d'un événement décennal et un événement centennal) entre Palavas-les-Flots et La Grande Motte, en utilisant les scénarios d'élévation du niveau marin de (a) 0,5 m et (b) 1,5 m.	58
Figure 23 : Surface cumulée de la zone submergée du site d'étude en fonction de l'altitude. ...	60
Figure 24 : Distributions des types d'occupation du sol des zones affectées par l'érosion et la submersion permanente et temporaire, selon les 4 scénarios d'élévation du niveau marin.	61
Figure 25 : Distributions empiriques des différences entre le MNT de l'IGN et le MNT Lidar, en fonction de l'altitude des données Lidar.	63
Figure 26 : Même format que la Figure 25, pour les données d'Intermap.	64
Figure 27 : Zonage réalisé à partir des données Corine LandCover pour faire l'analyse des incertitudes sur les données altimétriques en fonction de l'occupation du sol.	65
Figure 28 : Distributions empiriques de la différence entre la position du trait de côte définie par les données Lidar et par les données (a) de l'IGN et (b) d'Intermap.	68
Figure 29 : Distributions empiriques de la différence entre la position du trait de côte définie par les données Lidar et par les données (a) de Corine Land Cover 2006 (CLC06) et (b) d'Histolitt (même format que la Figure 28).	69
Figure 30 : Surface érodée déterminée avec la loi de Bruun en prenant l'hypothèse d'une élévation de 1 m du niveau marin en 2100 pour les trois MNT (de l'IGN, d'Intermap et Lidar).	71
Figure 31 : Exemple de zones potentiellement inondables en 2100 avec le zonage défini par les trois MNT et 1 m d'élévation du niveau marin (Zone située au nord des Aresquiers).	71
Figure 32 : Surfaces concernées par les aléas érosion et submersion permanente et temporaire (pour des événements décennal et centennal) pour les trois MNT en fonction de l'occupation des sols.	72
Figure 33 : Un exemple des observations du trait de côte entre 1942 et 2003 à l'est de Palavas-les-Flots.	76
Figure 34 : Les taux d'évolution du trait de côte (en m/an) calculés avec une regression linéaire avec (en haut) et sans (en bas) les observations de 1942.	77
Figure 35 : Un exemple d'évolution long terme du trait de côte suivant les 5 méthodes d'analyse : une zone tampon de 500 m, la loi de Bruun avec une élévation du niveau marin de 1 m en 2100, l'extrapolation des tendances historiques, l'extrapolation des tendances historiques avec une accélération de l'élévation du niveau marin de 7 mm/an, et le dire d'experts.	81
Figure 36 : Distributions d'occupation du sol dans les zones affectées par l'érosion, l'accrétion, la submersion permanente, la submersion décennale et la submersion centennale, suivant les 5 hypothèses d'évolution du trait de côte : une zone tampon de 500 m (ZT), l'application de la loi de Bruun (BR), l'extrapolation des tendances historiques (E),	

l'extrapolation des tendances historiques avec un ajustement pour tenir compte de l'accélération de l'élévation du niveau marin (EA), et le dire d'experts (DE).....	83
Figure 37 : Taux d'évolution du trait de côte retenus pour les 30 entités définies en Languedoc-Roussillon.	93
Figure 38 : Comparaison de la zone de pression évaluée dans cette étude avec la zone de submersion définie dans l'étude MISEEVA à l'échelle régionale.	95
Figure 39 : Comparaison de la zone de pression évaluée dans cette étude avec la zone de submersion définie dans l'étude MISEEVA à l'échelle locale à Palavas-les-Flots.....	96
Figure 40 : Comparaison de la zone de pression évaluée dans cette étude avec la cartographie de l'AZI submersion marine à l'échelle régionale.....	97
Figure 41 : Comparaison de la zone de pression évaluée dans cette étude avec la cartographie de l'AZI submersion marine à l'échelle locale de Palavas-les-Flots (à droite).	98
Figure 42 : Schéma des contributions au niveau maximal de l'eau dans la situation actuelle et la situation avec une élévation du niveau marin (ce schéma n'est pas à l'échelle).	123
Figure 43 : Schéma de la surcote (bleu foncé) engendrée par trois forçages différents : (a) la surcote due à l'effet de la pression atmosphérique, (b) la surcote due au vent et (c) le setup, la surcote liée au déferlement des vagues (pas à l'échelle).	124
Figure 44 : Un exemple des zones affectées par la submersion temporaire : actuellement la zone A (occurrence décennale) et la zone B (occurrence centennale).....	125

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résultats de l'analyse statistique (RMSE, biais, écart type des erreurs, et précision) caractérisant les différences entre les MNT de l'IGN et d'Intermap par rapport au MNT Lidar.	21
Tableau 2 : Estimation du pourcentage de surfaces impactées par les aléas érosion et submersion (permanente et temporaire) à l'horizon 2100 avec une élévation du niveau de la mer de 1 m et l'application de la loi de Bruun pour estimer l'évolution long terme du trait de côte.	22
Tableau 3 : Données utilisées pour la présente étude.	29
Tableau 4 : Pourcentage de transects dans la zone d'étude avec des mesures de la position du trait de côte pour chaque année d'observations.	32
Tableau 5 : Résumé des références des différents jeux de données pour définir le trait de côte.	34
Tableau 6 : Caractéristiques des aléas considérés, effets généralement attendus de l'élévation du niveau marin selon Nicholls et al. (2007) et traitement effectué dans RNACC [source : Garcin et al. (2008) modifié].	42
Tableau 7 : Échelle numérique de Saaty.....	54

Tableau 8 : Gammes d'altitude qui délimitent les zones de submersion permanente et temporaire pour chacun des scénarios d'élévation du niveau marin.....	57
Tableau 9 : Surfaces impactées par la submersion permanente et la submersion temporaire générée par un événement décennal et centennal.	57
Tableau 10 : Nombre de bâtiments potentiellement affectés selon les hypothèses d'élévation du niveau marin (Données BD Topo Pays).	61
Tableau 11 : Résultats de l'analyse statistique (RMSE, biais, écart type des erreurs, et précision) caractérisant les différences entre les MNT de l'IGN et d'Intermap par rapport au MNT Lidar.....	62
Tableau 12 : Résultats des analyses statistiques (RMSE, biais, écart type des erreurs et précision) caractérisant les différences entre le MNT de l'IGN et celui d'Intermap par rapport au MNT Lidar, pour chacune des zones d'occupation des sols.	66
Tableau 13 : Biais moyen et écart type des différences entre le trait de côte défini avec le MNT Lidar et les trait de côte définis avec les MNT de l'IGN et d'Intermap, ainsi que ceux donnés par Corine Land Cover 2006 et Histolitt.	68
Tableau 14 : Moyenne et écart type de la pente de la côte entre la berme et la profondeur de fermeture (supposée correspondre à l'isobathe 10 m) et du recul du trait de côte calculé en appliquant la loi de Bruun avec 1 m d'élévation du niveau marin.....	69
Tableau 15 : Estimation du pourcentage de surfaces impactées par les aléas érosion et submersion (permanente et temporaire) à l'horizon 2100 avec une élévation du niveau de la mer de 1 m et l'application de la loi de Bruun pour estimer l'évolution long terme du trait de côte.....	70
Tableau 16 : Nombre de bâtiments potentiellement affectés selon le MNT choisi (Données BD Topo Pays).	73
Tableau 17 : Résumé des résultats du mouvement du trait de côte suivant les 5 hypothèses d'évolution long terme : si l'hypothèse permet l'érosion (E) ou l'accrétion (A) et le moyen, l'écart type, le minimum et le maximum mouvement du trait de côte (- est érosion et + est accrétion).....	79
Tableau 18 : Surfaces érodées et accrétées suivant les 5 hypothèses d'évolution du trait de côte (les pourcentages de la zone de l'étude sont entre parenthèses).	80
Tableau 19 : Les surfaces affectées par la submersion permanente (entre 0 et +1 m NGF), la submersion temporaire à cause d'un événement décennal (entre +1 et +2 m NGF) et la submersion temporaire causée par un événement centennal (entre +2 et +3 m NGF) selon les 5 hypothèses d'évolution du trait de côte.	82
Tableau 20 : Nombre de bâtiments potentiellement affectés selon les représentations de l'érosion (Données BD Topo Pays).	84
Tableau 21 : Synthèse du jugement pour le critère n° 1 : surfaces impactées.	88
Tableau 22 : Synthèse du jugement pour le critère n° 2 : surfaces urbanisées et artificialisées potentiellement impactées.....	89
Tableau 23 : Les surfaces considérées potentiellement affectées par la submersion ou par l'érosion suivant les trois analyses, et pourcentage différence entre les autres cartographies et l'étude présente.....	98
Tableau 24 : Le nombre de bâtiments dans les zones de pression sur le Languedoc-Roussillon, selon la méthode proposée.	99

Tableau 25 : Échelle de Saaty (issue de Hammami, 2003).	130
Tableau 26 : Indice de cohérence moyen (issu de Hammami, 2003).	131
Tableau 27 : Importance relative des principales sources d'incertitude pour l'évaluation déterministe de l'érosion potentielle en 2100 (indice de cohérence du jugement : 0,08).	136
Tableau 28 : Importance relative des principales sources d'incertitudes pour l'évaluation déterministe de la submersion permanente en 2100 par rapport à l'état actuel (indice de cohérence du jugement : 0,07).	137
Tableau 29 : Importance relative des principales sources d'incertitude pour l'évaluation déterministe de la submersion temporaire (événement centenal) en 2100 par rapport à l'état actuel (indice de cohérence du jugement : 0,10).	138
Tableau 30 : Importance relative des principales sources d'incertitude pour l'évaluation déterministe de la submersion temporaire (événement centenal) en 2100 par rapport à l'état actuel (indice de cohérence du jugement : 0,1).	139
Tableau 31 : Importance relative des principales sources d'incertitude pour l'évaluation déterministe de l'érosion potentielle en 2100 pour le critère n° 2 (indice de cohérence du jugement : 0).	140
Tableau 32 : Importance relative des principales sources d'incertitude pour l'évaluation déterministe de la submersion permanente potentielle en 2100 pour le critère n° 2 (indice de cohérence du jugement : 0,09).	141
Tableau 33 : Importance relative des principales sources d'incertitude pour l'évaluation déterministe de la submersion décennale en 2100 pour le critère n° 2 (indice de cohérence du jugement : 0,06).	141
Tableau 34 : Importance relative des principales sources d'incertitude pour l'évaluation déterministe de la submersion centennale en 2100 pour le critère n° 2 (indice de cohérence du jugement : 0,08).	142

Liste des annexes

Annexe 1 : Article étendu présenté à la conférence « Littoral 2010 », Londres, 8-9 septembre 2010.	113
Annexe 2 : Article accepté dans Journal of Coastal Research ; Proceedings of the 11 th International Coastal Symposium, Szczecin, Poland, June 2011	117
Annexe 3 : Méthode d'évaluation de la submersion	121
Annexe 4 : Méthode d'évaluation des incertitudes	127
Annexe 5 : Mise en œuvre de la méthode d'évaluation des incertitudes	133

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

En application du Plan Climat français (2006), un groupe de travail interministériel « Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France » a été constitué pour évaluer les dommages potentiels et envisager des mesures permettant de limiter le coût des impacts du changement climatique. Le groupe plénier a été décliné en sept groupes de travail thématiques dont le groupe GT RNACC : Risques Naturels, Assurance et Changement Climatique. Un sous-groupe technique avait été constitué pour évaluer les risques côtiers (érosion et submersion marine) en quantifiant les conséquences du changement climatique dans des zones côtières avec une estimation des coûts potentiels induits en région Languedoc-Roussillon. Ces travaux sont disponibles dans le rapport BRGM RP 57141 (Le Cozannet *et al.*, 2009). Par la suite, il y sera fait référence ainsi « étude RNACC-1 (2009) ».

Ce projet se place donc dans la continuité des travaux menés dans le cadre du groupe de travail thématique Risques côtiers du Groupe de Travail RNACC (convention DGPR-BRGM 2009 n° 0001337 action 6.1).

L'étude du groupe de travail thématique Risques côtiers du Groupe de Travail national RNACC a identifié plusieurs sources d'incertitudes importantes pour l'évaluation de l'impact potentiel du changement climatique. La présente étude a pour objet d'évaluer de manière déterministe les incertitudes associées à chacune de ces sources en termes d'érosion et de submersion marine. Ces sources d'incertitudes sont liées :

- aux incertitudes liées à l'évaluation de l'élévation du niveau marin,
- à la qualité des données altimétriques disponibles à l'échelle régionale,
- aux limites de la connaissance des processus géomorphologiques induits par l'élévation du niveau marin,
- dans une moindre mesure aux bases de données disponibles concernant les enjeux (logements notamment).

L'étude RNACC initiale a aussi identifié des sources d'incertitudes liées à l'estimation des zones submergées et à l'estimation des coûts induits, ces incertitudes ne seront pas traitées dans la présente étude.

1.2. OBJECTIF

L'objectif de cette étude est d'évaluer la robustesse des résultats obtenus dans le cadre du RNACC sur les impacts du changement climatique en région Languedoc-Roussillon en termes d'érosion et de submersion marine. Cette évaluation sera faite à

partir d'analyses de sensibilité du résultat final à plusieurs sources d'incertitude, plus précisément :

- une analyse de sensibilité à l'élévation du niveau marin, à partir des différentes hypothèses envisagées dans les scénarios de changement climatique,
- une analyse de sensibilité aux formulations employées pour l'estimation des zones érodées à l'avenir, qui restent plus ou moins arbitraires étant donné la difficulté de modéliser et de prendre en compte l'ensemble des processus qui régissent l'érosion à long terme,
- une analyse de sensibilité à la précision des données altimétriques, qui dépend de la disponibilité des MNT de haute résolution.

Chaque analyse de sensibilité permettra de quantifier les incertitudes sur les résultats en termes d'érosion et de submersion marine. On s'appuiera sur ces analyses pour identifier des moyens de réduire les incertitudes et faire des recommandations d'acquisition de nouvelles données ou d'introduction de nouvelles méthodes. Cette étude propose enfin des améliorations à la méthode RNACC et conclut par sa mise en œuvre en Languedoc-Roussillon.

2. Résumé des principaux résultats de l'étude

2.1. INTRODUCTION ET POSITIONNEMENT DE L'ÉTUDE

Le quatrième panel intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a conclu avec un niveau élevé de confiance que « le changement climatique et l'élévation du niveau exposera côtes à des risques accrus » (Nicholls *et al.*, 2007). Un grand nombre d'études ont ainsi récemment porté sur les conséquences du changement climatique sur les aléas côtiers érosion et submersion. Ces études amènent à appliquer des méthodes de caractérisation de ces aléas à des échelles de temps de plusieurs décennies à un siècle. Les méthodes existantes utilisées habituellement pour caractériser l'aléa actuel d'érosion et de submersion côtière ne sont de fait pas applicables sur les échelles de temps visées et, par conséquent, des méthodes plus simples sont nécessaires pour les études d'évaluation des aléas.

Les études de long terme visant à évaluer les risques côtiers dans le contexte du changement climatique commencent souvent par une hypothèse sur les effets du changement climatique, et se poursuivent par une chaîne d'évaluations des impacts potentiels de cette hypothèse sur les aléas érosion et submersion côtière, puis éventuellement des risques en prenant en compte la vulnérabilité. Les impacts potentiels sur la zone côtière peuvent être causés par des changements dans les régimes de tempête, de précipitations, du climat des vagues, et du niveau relatif de la mer (Nicholls *et al.*, 2007). Bien que la variabilité et le changement potentiel de tous ces facteurs pourrait influencer fortement l'avenir des littoraux, de grandes incertitudes et un manque de données entravent toute analyse quantitative de l'impact de ces facteurs. Ainsi, l'impact de l'élévation du niveau de la mer est le facteur le plus couramment étudié de l'impact du changement climatique sur les zones côtières.

Il y a cependant de grandes incertitudes dans les estimations de l'élévation du niveau de la mer, en particulier à des échelles locales. Aux difficultés liées aux prédictions globales de l'élévation du niveau de la mer s'ajoutent celles liées à la variabilité régionale de ce phénomène, puis les limites de nos connaissances concernant les subsidences et surrections plus ou moins locales. Ceci conduit à majorer les hypothèses d'élévation du niveau marin retenues, par exemple de 50 % (Hulme *et al.*, 2002).

En outre, sans modèles fiables pour évaluer l'évolution du littoral à long terme en réponse à l'élévation du niveau de la mer, une variété de méthodes différentes sont actuellement appliquées : création d'une zone tampon fixe (EUROSION, 2004), application de la loi de Bruun (Bruun, 1962), extrapolation des taux historiques d'érosion ou d'accrétion (Pilkey et Cooper, 2004), extrapolation de ces taux historiques avec un ajustement pour tenir compte d'une accélération future élévation du niveau de la mer (EUROSION, 2004), évaluation des experts locaux (par exemple Vinchon *et al.*, 2009). Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients. Dans les zones manquant de données et des connaissances antérieures des changements côtiers, le

projet EUROSION (2004) recommande de définir la zone potentiellement érodable avec une zone tampon de 500 m de large. Cette méthode simple est facilement applicable, mais l'inconvénient est son caractère arbitraire, négligeant l'histoire des sites, leur géologie, leur géomorphologie et la variabilité des forçages côtiers. La règle de Bruun est la méthode la plus couramment appliquée (par exemple EUROSION, 2004 ; Cowell, 2006 ; Hinkel et Klein, 2009) pour évaluer le recul du rivage (R), causée par l'élévation du niveau de la mer (S) :

$$R = S \left(\frac{L}{B + h} \right) = S \left(\frac{1}{\tan \alpha} \right)$$

avec $\tan \alpha$, la pente de la plages, B, la hauteur berme, h, la profondeur de fermeture, et L la longueur de la zone de surf (Bruun, 1962).

La règle de Bruun suppose que le profil de plage sous-marine s'adapte à l'élévation du niveau de la mer en conservant sa forme avec une translation vers le rivage. L'avantage de l'application de la règle de Bruun est qu'elle nécessite peu de données et prend en compte en partie la variabilité morphologique le long de la côte. Cependant, elle suppose que la plage maintient un profil constant d'équilibre, que l'élévation du niveau de la mer est le seul facteur important entraînant l'érosion du trait de côte, et que le budget de sédiments est fermé entre la berme et la profondeur de fermeture (au large de laquelle il n'y aurait plus de transport des sédiments actif). Ces hypothèses sont rarement respectées (Pilkey et Cooper, 2004), et bien que Zhang *et al.* (2004) a validé la règle de Bruun avec les observations sur la côte du New Jersey, États-Unis, d'autres études (par exemple, List *et al.*, 1997) ont montré que cette formule empirique est trop simple d'expliquer le changement observé des rives, en négligeant de trop nombreux autres facteurs importants.

En raison de ces limitations, Pilkey et Cooper (2004) suggèrent qu'il est préférable d'abandonner la règle de Bruun et d'extrapoler les changements observés du littoral historiquement, en supervisant cette opération par expertise. L'extrapolation des tendances historiques suppose que l'évolution future du littoral sera contrôlée par les mêmes processus qui touchent actuellement le littoral (à savoir l'influence locale de la géologie, géomorphologie, les vagues, l'élévation du niveau de la mer, et les budgets des sédiments). Deux inconvénients de cette méthode sont (1) l'hypothèse que les tendances actuelles (par exemple, les budgets des sédiments, etc) sont représentatifs des tendances futures, et (2) le besoin à long terme d'observations historiques couvrant la zone d'étude qui ne seraient pas biaisés par des fluctuations naturelles ou artificielles de courtes terme (par exemple, la variabilité saisonnière, l'établissement de structures de défenses côtières...). Le projet EUROSION (2004) a suggéré une adaptation de cette méthode pour prendre en compte les prévisions d'une accélération de l'élévation du niveau des mers. Un second terme est ajouté : la règle de Bruun est appliquée en utilisant la différence entre l'élévation du niveau de la mer actuelle et future, indiquée par des prévisions :

$$R_{future} = R_{historical} + (S_{future} - S_{historical}) \frac{L}{P(B + h)}$$

où P est la proportion de sédiments érodés avec une taille de grains suffisamment grande pour rester dans la zone active du profil de plage.

Cette méthode prend en compte l'influence de facteurs locaux et l'accélération éventuelle de l'élévation du niveau des mers, mais nécessite de nombreuses observations pour permettre une estimation robuste des tendances historiques. Elle est également soumise au débat concernant l'applicabilité de la règle de Bruun. La dernière méthode considérée dans cette étude est une évaluation par des experts. Même si cette méthode est subjective et dépend fortement des experts concernés, Hinton *et al.* (2007) recommande d'utiliser les connaissances d'experts en raison des limites des modèles à long terme.

Enfin, un manque de données limite souvent les études concernant les impacts du changement climatique en zones côtières. En particulier, une topographie et des levés bathymétriques de bonne qualité sont nécessaires pour l'identification précise de la position du littoral actuel et une bonne estimation des zones potentiellement affectées.

Les incertitudes associées à chaque étape de l'évaluation de l'érosion et de la submersion marine créent une chaîne d'erreurs conduisant à des différences potentiellement importantes dans le résultat final en fonction des scénarios choisis. Dans cette étude, trois analyses de sensibilité indépendantes sont présentées pour évaluer les effets de la variabilité dues (1) aux différents scénarios d'élévation du niveau de la mer, (2) aux différents modèles de l'évolution du littoral, et (3) à la qualité des données topographiques. Les résultats sont présentés pour un site d'étude spécifique situé en Languedoc-Roussillon.

2.2. SITE D'ÉTUDE, MÉTHODE ET DONNÉES

2.2.1. Site d'étude

L'étude est réalisée le long d'une côte basse représentant 20 km de tronçon de la côte méditerranéenne, dans la région Languedoc-Roussillon. La zone côtière est principalement composée d'étroites plages de sable fin, et l'arrière-plage est caractérisée par des dunes de petite taille (généralement moins de 5 m de hauteur) ou des ouvrages de protection. Ce site d'étude a été choisi en raison de la disponibilité de nombreuses données.

2.2.2. Érosion côtière et analyse de la submersion

Afin d'évaluer l'érosion côtière et les inondations, l'analyse suit les étapes suivantes : (1) sélection d'une hypothèse de hausse du niveau des mers, (2) l'estimation des changements du trait de côte en appliquant une loi choisie de l'évolution du littoral, et (3) estimation de l'aléa de submersion côtière par croisement des niveaux d'eau correspondant aux niveaux moyen, décennal ou centennal avec des données topographiques. Dans cette étude, quatre niveaux d'élévation du niveau marin ont été choisis (0, 0,5, 1 et 1,5 m).

2.2.3. Hypothèses d'évolution du trait de côte

Dans cette étude, cinq méthodes existantes d'évaluation de l'évolution du trait de côte ont été appliquées : (1) une zone tampon de 500 m pour les zones érodables, (2) l'application de la règle de Bruun, (3) l'extrapolation des tendances historiques, (4) l'extrapolation des tendances historiques avec un ajustement pour tenir compte de l'accélération de l'élévation du niveau de la mer, et (5) l'utilisation du « dire d'expert ».

Les tendances historiques ont été calculées suivant une régression linéaire d'observations de la position du trait de côte entre 1942 et 2003 (données fournies par la DREAL-LR), sur des sites avec un minimum de trois observations historiques. Dans cette étude, le « dire d'experts » a été utilisée pour améliorer la méthode précédente en extrapolant les tendances historiques et en appliquant la règle de Bruun à l'accélération de l'élévation du niveau de la mer. Les tendances historiques ont été recalculées en moyenne pour des régions homogènes présentant des conditions géologiques et géomorphologiques similaires. Ceci permet d'enlever la variabilité haute fréquence le long de la côte qui est irréaliste et principalement causée par la variabilité spatiale et temporelle des observations du littoral. L'extrapolation des tendances historiques est donc une méthode qui doit être supervisée pour pallier au manque de données. En outre, il convient de prendre garde aux discontinuités dues à l'installation d'un aménagement ou à un événement extrême au voisinage de la période d'observations.

2.2.4. Disponibilité de données topographiques

À l'échelle nationale en France, le meilleur modèle disponible gratuitement de données numériques de terrain (MNT) est produit par l'IGN (Institut Géographique National français), avec une résolution horizontale de 50 m. Il se présente sous la forme d'une grille présentant des valeurs entières pour l'altitude. Dans la région d'étude, un ensemble d'autres données disponibles ont été fournies par le DREAL-LR : levé Lidar de 2007 (résolution planimétrique de 2 m) et levé réalisé par la société Intermap.

2.3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.3.1. Evaluation de la sensibilité aux scénarii d'élévation du niveau marin

Ici, de la même manière que dans de nombreuses autres études concernant l'évolution long terme du littoral, la règle de Bruun est appliquée pour évaluer les effets d'élévation du niveau de la mer allant de 0 à 1,5 m. Pour appliquer la règle de Bruun, la pente du littoral est calculée entre l'isobathe -10 m et la berme, identifiée comme étant la limite de la végétation ou bien les ouvrages urbains. Le recul du rivage prédit avec la règle de Bruun est inversement proportionnel à la pente de la plage. Avec 1 m d'élévation du niveau de la mer, la règle de Bruun prédit un recul du rivage moyenne d'environ 90 ± 22 m. En appliquant la règle de Bruun, l'érosion augmente linéairement avec l'élévation du niveau de la mer (Figure 1). Sur ce site d'étude, chaque tranche de 0,1 m d'élévation du niveau de la mer correspond donc à 9 ± 2 m d'érosion littorale. Par conséquent, avec cette fourchette d'estimation des prévisions de l'élévation du niveau

de la mer, la règle de Bruun peut être utilisée pour estimer les barres d'erreur sur l'érosion littorale prédite. Ces résultats sont applicables sur des plages avec une pente similaire, et cette analyse peut être répétée à des sites ayant une morphologie différente pour estimer une fourchette de valeurs potentielles d'érosion côtière.

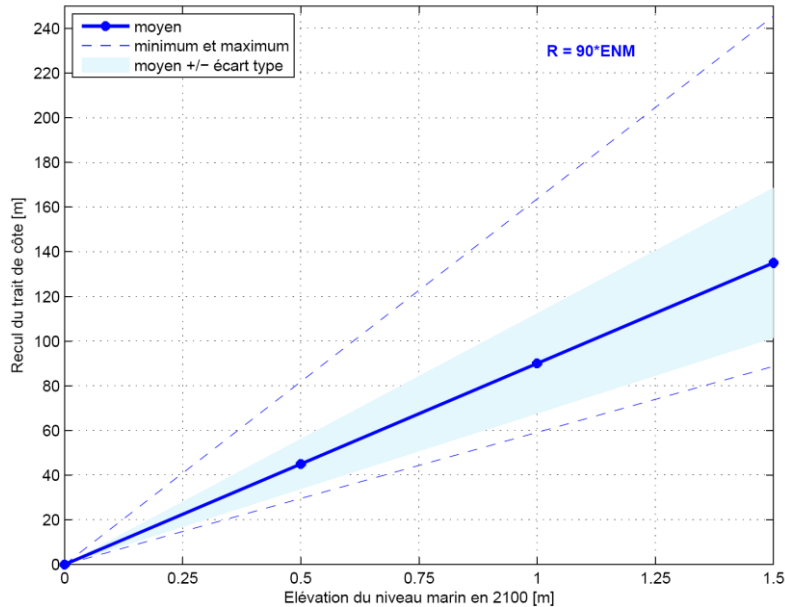


Figure 1 : Moyenne, écart type, minimum et maximum du recul du trait de côte le long la zone d'étude en appliquant la loi de Bruun.

Le recul du trait de côte étant proportionnel à l'élévation du niveau marin (il s'élève en moyenne à 90 m par mètre d'élévation du niveau marin en 2100), donc on peut présenter les résultats par des courbes continues plutôt que par des valeurs ponctuelles.

L'étendue des aléas de submersion permanente et temporaire est très dépendante du scénario de hausse du niveau de la mer sélectionné. La submersion permanente est supposée affecter des zones à des altitudes inférieures à la valeur élévation du niveau marin choisie (*i.e.* jusqu'à 1,5 m, selon le scénario choisi ici). Le niveau décennal (+1 m NGF) et centennal (+2 m NGF) des zones de submersion temporaires, sont translatés verticalement pour prendre en compte l'élévation du niveau de la mer, affectant ainsi des zones d'altitude plus. Les effets d'évolutions potentielles des caractéristiques de l'onde de tempête ou du régime des vagues ne sont pas considérés ici. En calculant la surface cumulée des zones potentiellement inondées en fonction de l'altitude (Figure 2), la superficie totale touchée et l'ampleur du changement dans la surface d'une augmentation de l'élévation du niveau de la mer peuvent être estimés. Par exemple, avec 0,3 m d'élévation du niveau de la mer sur ce site d'étude, la superficie affectée par la submersion permanente est de 2,0 km². Des analyses similaires peuvent être menées pour les zones de submersion temporaire. Cependant, les réductions de la superficie des zones temporairement inondées avec une augmentation de l'élévation du niveau de la mer sont dues à la topographie locale et à la limite de la zone d'étude. Cette méthode peut être appliquée à n'importe quel site pourvu de données topographiques adéquates.

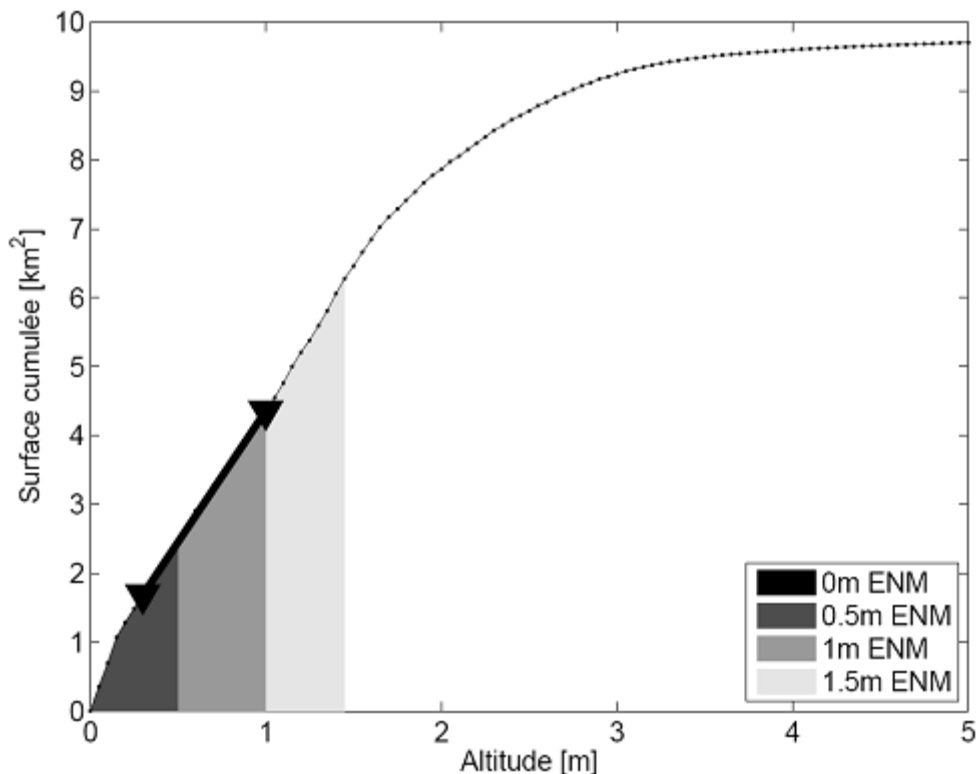


Figure 2 : Surface cumulée de la zone submergée du site d'étude en fonction de l'altitude. Cette courbe est utilisée pour estimer l'augmentation moyenne des surfaces submergées suivant les différents scénarios d'élévation du niveau marin.

2.3.2. Analyse de sensibilité aux hypothèses d'évolution du trait de côte

Le second test de sensibilité évalue comment les prédictions d'évolution du littoral varient en utilisant cinq approches différentes. Les estimations de changement du trait de côte varient effectivement de manière importante le long du littoral, avec une accrétion nette maximale prédite de 479 m et une érosion maximale prédite de 555 m. La règle de Bruun, prédisant une moyenne d'environ 90 ± 22 m d'érosion sur ce site d'étude, est la méthode la plus couramment appliquée, même si son application est considérée comme discutable (Pilkey et Cooper, 2004).

L'utilisation d'une zone tampon de 500 m surestime la largeur de la zone potentiellement érodée par rapport aux autres approches. La variabilité des taux d'évolution le long de la côte sont les plus importants lors de l'extrapolation des données historiques. Ceci est dû notamment aux observations qui sont menées à plusieurs reprises depuis les années 1930 mais pas partout.

Par ailleurs, dans ces zones, les processus naturels et surtout anthropiques (avec des aménagements mis en place pendant la période d'observation) doivent être pris en compte à travers une supervision par expertise de cette approche par extrapolation. Le « dire d'expert » est ainsi utilisé pour superviser l'extrapolation des tendances

historiques, en faisant des moyennes des taux changement pour des sections du littoral considérées géomorphologiquement relativement homogènes.

Par ailleurs, une dernière approche prend en compte à la fois les impacts de l'accélération de l'élévation du niveau de la mer et les tendances observées. Bien que cette approche se base également sur la règle de Bruun, elle est recommandée ici car elle prend en compte – bien que de manière imparfaite - le plus processus physiques et notamment les processus observés e long du littoral, ainsi que l'accélération. La difficulté ici est qu'il n'est pas possible de procéder à une validation de ces approches. Aussi, il est difficile d'estimer les barres d'erreurs potentielles ou de recommander une approche particulière. La méthode choisie permet, comme Pilkey et Cooper (2004) le suggèrent, de combiner tendances historiques, «œil d'expert» et prise en compte de l'élévation du niveau marin.

2.3.3. Évaluation des données topographiques

Il s'agit de comparer deux ensembles de données topographiques, en utilisant les données Lidar comme référence. Pour les données IGN de 50m de résolution horizontale, la RMSE est d'environ 1,27 m sur le site d'étude (Tableau 1). Les erreurs de cette ampleur sont trop importantes pour étudier l'impact de l'élévation du niveau de la mer, notamment pour les scénarios d'élévation du niveau marin de moins de 1 m. Lorsque les données sont encore divisées par zone d'altitude (Figure 3), le biais et l'écart type dépendent de l'altitude.

<i>Critères de précision et d'exactitude</i>	<i>MNT IGN</i>	<i>MNT Intermap</i>
Z RMSE	1,27 m	0,64 m
Z biais	0,16 m	0,12 m
Z écart type, σ	1,26 m	0,64 m
Z précision, 3σ	3,79 m	1,91 m

Tableau 1 : Résultats de l'analyse statistique (RMSE, biais, écart type des erreurs, et précision) caractérisant les différences entre les MNT de l'IGN et d'Intermap par rapport au MNT Lidar.

En moyenne, les données IGN surestime les basses altitudes (0-1 m) et sous-estime les altitudes supérieures à 2 m, avec le plus grand biais dans la gamme de 3-7 m. De plus, les erreurs de MNT induisent des problèmes de positionnement du trait de côte qui peuvent être importantes. Ici, la différence constatée entre trait de côte issu du Lidar et trait de côte issu de l'IGN est de 56 m \pm 32 m, principalement en raison de la taille de la grille (50 m).

L'érosion et la submersion côtière ont été estimées avec trois ensembles de données en appliquant la règle de Bruun et une hypothèse de 1m de l'élévation du niveau de la mer. Les données IGN conduisent à une zone potentiellement érodée nettement plus large (surestimé de 70 % par rapport aux données Lidar), en raison de différences dans la pente de la plage estimée. Lorsqu'on examine les zones potentiellement inondées, la surface peut varier jusqu'à 270 %. Même dans les zones où les surfaces potentiellement affectées par les inondations sont similaires, leurs localisations sont souvent significativement différentes.

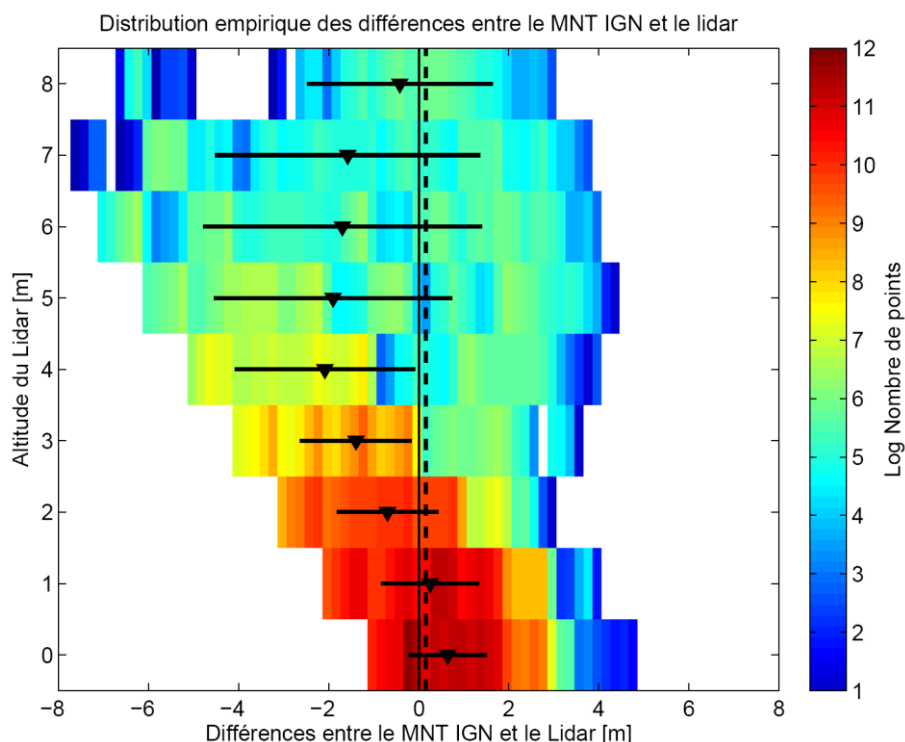


Figure 3 : Distributions empiriques des différences entre le MNT de l'IGN et le MNT Lidar, en fonction de l'altitude des données Lidar.

Les triangles et les lignes horizontales indiquent le biais et l'écart type par gamme d'altitude respectivement. La ligne verticale en pointillés indique le biais calculé pour toute la distribution (Tableau 11) et la ligne verticale solide les points de différence nulle.

Données altimétriques	Érosion	Submersion permanente	Submersion temporaire, événement décennal	Submersion temporaire, événement centennal
MNT de l'IGN	4,3 km ²	7,4 km ²	2,7 km ²	2,8 km ²
MNT d'Intermap	4,2 km ²	2,0 km ²	1,9 km ²	1,1 km ²
MNT Lidar	2,6 km ²	3,6 km ²	2,5 km ²	0,99 km ²

Tableau 2 : Estimation du pourcentage de surfaces impactées par les aléas érosion et submersion (permanente et temporaire) à l'horizon 2100 avec une élévation du niveau de la mer de 1 m et l'application de la loi de Bruun pour estimer l'évolution long terme du trait de côte.

2.3.4. Agrégation des incertitudes

L'analyse des incertitudes a été réalisée pour deux critères : les surfaces potentiellement affectées par les différents aléas et les surfaces urbanisées et artificialisées potentiellement affectées par les différents aléas. L'analyse conclut que les différentes sources d'incertitudes revêtent une importance comparable pour les deux critères : les incertitudes sont liées en premier lieu (pour environ un tiers) aux limites de notre connaissance de l'élévation du niveau marin, en second lieu mais de manière importante (pour plus d'un quart chacun) à la qualité des données

altimétriques et à la connaissance des processus, et de manière mineure à la connaissance du trait de côte.

Ces résultats sont conformes à l'intuition et ne sont pas surprenants. Ils peuvent cependant être gardés en mémoire afin de bien mesurer quelles avancées pourraient effectivement être attendues suite à l'amélioration significative, par exemple, des données topographiques existantes.

2.4. CONCLUSION

En utilisant des observations sur un site d'étude dans la région Languedoc-Roussillon, cette étude présente un aperçu simple des méthodes utilisées pour évaluer l'érosion potentielle sur le long terme, en prenant en compte les effets du changement climatique. Elle présente une analyse des erreurs impliquées dans de telles études. Les erreurs associées à la variabilité des scénarios d'élévation du niveau de la mer semblent les plus importantes, suivent le choix d'une hypothèse de l'évolution du littoral, et les effets de la qualité des données topographiques. Enfin, des recommandations plus générales sont données pour appliquer des méthodes sur d'autres sites d'étude.

Carte N°5: Occupation du sol de la zone des 2 mètres*

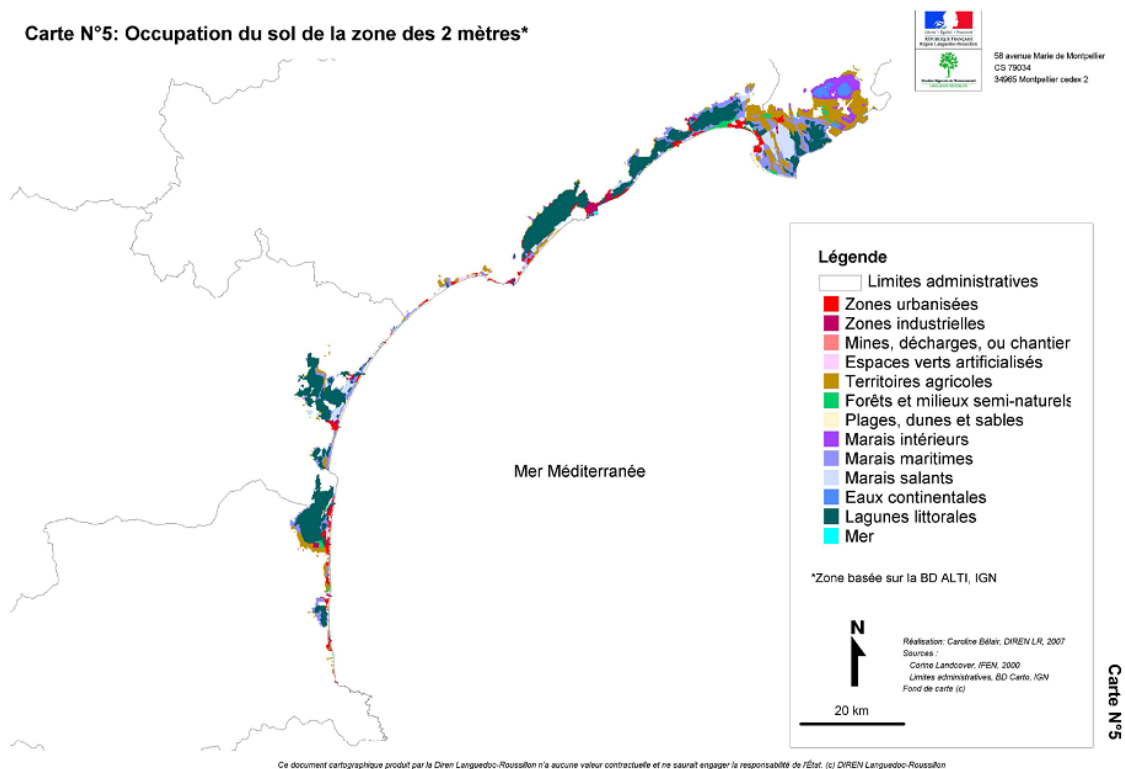


Figure 4 : Occupation des sols de la zone de moins de 2 m d'altitude, selon CORINE Landcover 1999 [source : Bélar, (2007)].

3. Site d'étude, données et hypothèses de travail

3.1. CARACTÉRISTIQUES DU SITE D'ÉTUDE

3.1.1. Contexte régional

L'étude RNACC-1 (2009) a été appliquée à la région Languedoc-Roussillon en raison de la vulnérabilité de cette région aux aléas érosion et submersion mais aussi en raison de la disponibilité de données.

Le linéaire côtier entre la frontière avec l'Espagne et le Grau-du-Roi, à l'ouest du delta du Rhône, fait environ 215 km. La zone littorale est constituée de plages sableuses (90 % du linéaire) et de falaises rocheuses (entre la frontière avec l'Espagne et Collioure, mais aussi à Sète et Agde). Les plages sableuses sont souvent associées avec des « lidos », ou systèmes de dunes basses qui séparent les lagunes de la mer (e.g. Lido de Sète à Marseillan et Lido de Maguelone aux Arresquiers).

La population des 54 communes littorales du Languedoc-Roussillon était d'environ 394 425 habitants en 2006, avec des centres d'urbanisation et de population dans les zones basses. La cartographie des zones de moins de 2m d'altitude indique qu'une grande surface pourrait être affectée par des aléas côtiers qui seront modifiés au cours du XXI^e siècle par le changement climatique (Belair, 2007 ; Figure 4). Cette cartographie a été réalisée à partir de données de Corine Land Cover 1999 et d'une délimitation des zones situées en deçà de 2 m d'altitude.

La zone côtière est composée principalement de lagunes, de territoires agricoles, de marais, de zones urbanisées, de plages et de dunes. Pour protéger les communes et les biens exposés, plus de 250 ouvrages de protection (exemple : les jetées, épis, brises lames, digues portuaires, digues frontales, etc.) ont été construits le long des côtes sableuses, des embouchures, et des ports (Samat, 2007).

Les plages en Languedoc-Roussillon sont sensibles à l'érosion. Leur granulométrie fine ou moyenne (entre 0,18 et 0,5 mm) constitue un facteur de vulnérabilité important. La plupart des plages sont étroites (entre 10 et 60 m de largeur), même s'il existe aussi des plages très larges (e.g. Flèche de l'Espiguette) où les sédiments s'accumulent (Samat, 2007). La majorité des dunes et des lidos sont assez bas et étroits (entre 3 et 5 m de haut et 70 et 80 m de large), et sont sensibles à l'érosion à cause du régime du vent et de la fréquentation touristique. De nombreux auteurs estiment que le changement climatique constituera un facteur aggravant (Vinchon *et al.*, 2006 ; Durand and Heurtefeux, 2006 ; Samat, 2007).

3.1.2. Choix et description du site d'étude

Pour pouvoir effectuer une analyse de sensibilité, il est nécessaire de restreindre cette étude à une zone dans laquelle des données de bonne qualité sont disponibles.

Le site d'étude est une région du Languedoc-Roussillon dans laquelle un levé Lidar de données topographiques a été réalisé en 2007 par l'EID-Méditerranée, le Conseil Général de l'Hérault et la DREAL. Ce site (Figure 5), d'approximativement 30 km de longueur, s'étend de Frontignan à La Grande-Motte, avec une surface d'environ 32 km².



Figure 5 : Côte du Languedoc-Roussillon avec le site d'étude (en rouge).

Avertissement : le site d'étude choisi ici présente une limite importante : il se concentre sur la zone du lido sans examiner la zone située en arrière des étangs. Ceci constitue une limite importante de l'étude présentée ici. Pour autant, les méthodes

proposées pourront être appliquées de manière identique dès que le levé Lidar de 2009 effectué dans le cadre de Litto3D aura été mis à disposition des utilisateurs¹.

3.1.3. Caractéristiques du site d'étude en termes d'occupation du sol

Les distributions de l'occupation des sols des surfaces exposées aux aléas érosion et submersion sont classifiées avec les données CLC 2006. Au total, la région d'étude couvre une surface d'environ 32 kilomètres carrés et est constituée de 9 classes d'occupation des sols différentes, représentées en Figure 6. Ces surfaces sont rapportées à la couverture Lidar de 2007. Par superposition aux données CLC 2006, les lagunes littorales et les « mers et océans » constituent plus de la moitié de la zone de l'étude (environ 19 km², Figure 7). Viennent ensuite principalement les zones urbanisées (environ 3 km²), les marais maritimes (environ 4 km²), les plages, dunes et sable (environ 3 km²), et la végétation sclérophylle, ou plus généralement la végétation basse (environ 1,5 km²).

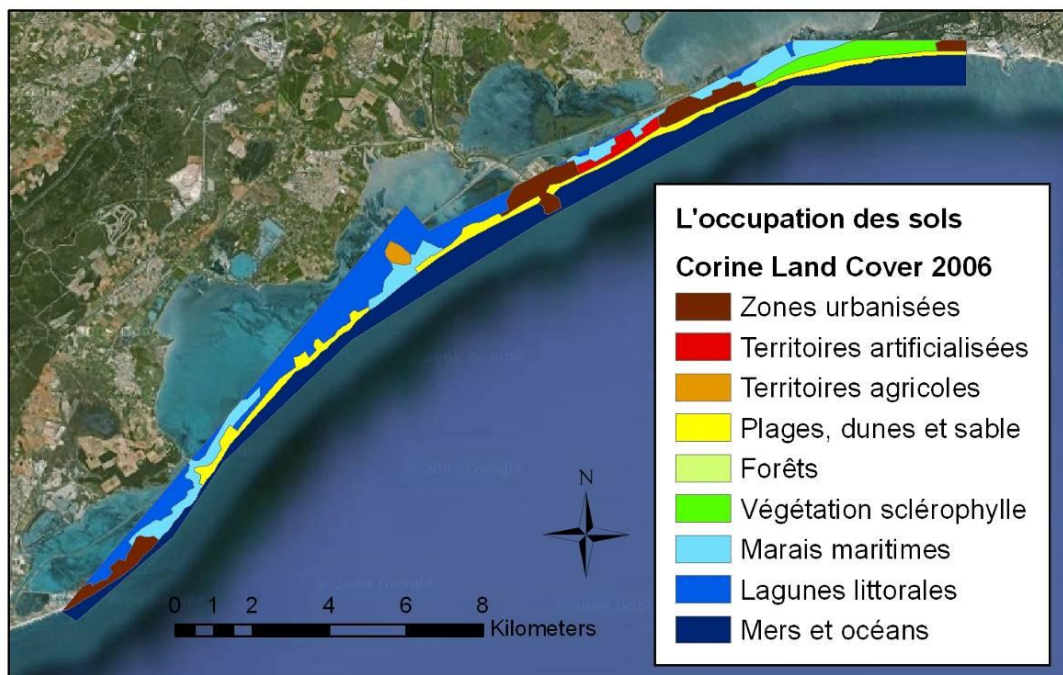


Figure 6 : Occupation des sols selon la base de données Corine Land Cover 2006 (European Environment Agency) dans le site d'étude.

¹ À la date de parution de ce rapport, il est prévu que la région Languedoc-Roussillon soit « la première région métropolitaine à bénéficier d'une couverture Litto3D complète de son littoral en février 2012 » (Source : 4^e compte rendu de réunion d'utilisateurs de Litto3D).

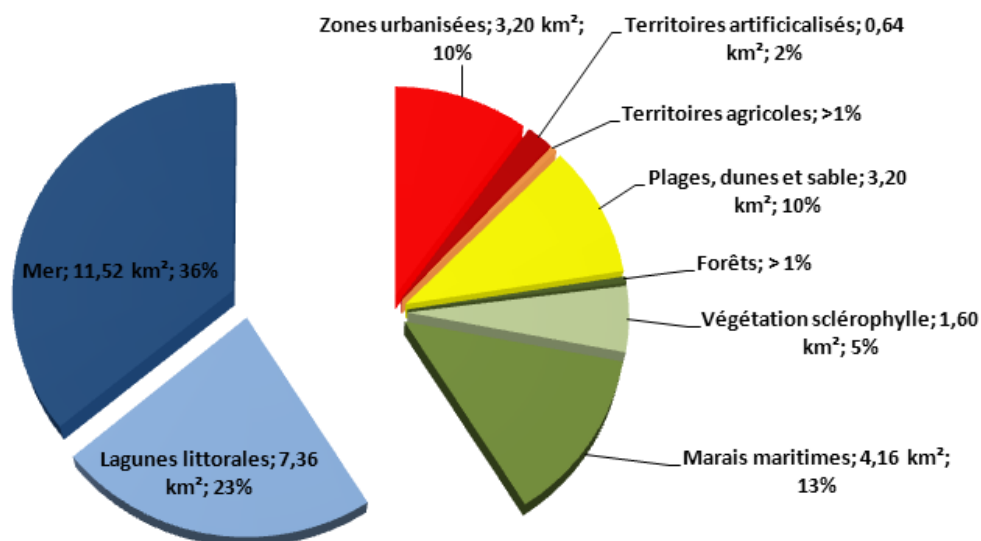


Figure 7 : Occupation des sols dans la zone du levé Lidar topo-bathymétrique de 2007. Les 36 % de mer correspondent à la surface de la partie maritime du levé. Les 23 % aux zones lagunaires. L'érosion et la submersion s'exercent sur les autres entités (zones urbanisées, plages, marais...).

3.2. DONNÉES

3.2.1. Synthèse des données utilisées

Tout au long de cette étude, les données présentées dans le Tableau 3 sont utilisées.

Données	Description	Propriétaire	Résolution / échelle de la donnée
MNT de l'IGN	Topographie (raster) du Languedoc-Roussillon	IGN	50 m résolution planimétrique
MNT d'Intermap	Topographie (raster) de la zone de l'étude	Intermap	5 m résolution planimétrique
MNT du Lidar	Topographie (raster) de la zone de l'étude	DREAL - LR	2 m résolution planimétrique
Trait de Côte HistoLITT	Courbe du trait de côte	SHOM / IGN	~1/10 000, dépendant de la source des données
Trait de Côte historique	Courbes de la position du trait de côte issus de photographies et de levés	DREAL - LR	La résolution dépend de type du levé
Trait de côte EuroSION	Position du trait de côte et information associée	www.euroSION.org	Information au 1/25 000 portée sur le trait de côte EuroSION
Bathymétrie	Courbe de 10m de profondeur	SHOM	
Cartes géologiques	Géologie du Languedoc-Roussillon (fichiers shapes)	BRGM	1/50 000
Corine Land Cover 2006	Occupation de sols du Languedoc-Roussillon (fichier shape)	European Environment Agency	25 hectares (et 100 m de largeur)
BDTopo Bâtiments Indifférenciés	La position des bâtiments de plus de 20m²	IGN	maximum ~10 m

Atlas des Zones Inondables, Submersion Marine (AZISM)	Zones considérées potentiellement inondables utilisant la courbe de 5m d'altitude	DREAL - LR	Entre 1/10 000 et 1/25 000
Zones de submersion du projet MISEEVA	Zones considérées potentiellement submergées par une tempête de référence en 2100	BRGM / ANR	~50 m

Tableau 3 : Données utilisées pour la présente étude.

Dans les paragraphes suivants, les données les plus importantes pour la suite de l'étude sont décrites.

3.2.2. Modèles numériques de terrain (MNT)

Les données altimétriques sont présentées sous forme d'un modèle de terrain numérique (MNT). Pour le site d'étude, il existe trois MNT disponibles :

- **Le MNT BD Alti de l'IGN** est la base de données altimétriques disponible actuellement sur tout le territoire français. Ce MNT, dans sa version la mieux résolue, a une résolution planimétrique² de 50 m et une résolution verticale³ métrique. Ce MNT a été produit de la manière suivante : les valeurs altimétriques ont été dérivées des courbes de niveau et des points côtés des cartes IGN, puis une interpolation a été effectuée pour estimer l'altitude en chaque point de la grille. La justesse⁴ dépend des courbes de niveau de l'IGN et de la variabilité d'altitude du terrain (Source : BD ALTI, descriptif technique).
- **Le MNT d'Intermap** est construit à partir de données altimétriques obtenues par interférométrie radar (ISFAR : *interferometric sythnthetic aperature radar* de Intermap Technologies). Ce MNT, dont la résolution planimétrique est de 5 m, est obtenu à partir du Modèle Numérique d'Élévation (MNE), en le soumettant à des révisions manuelles et à un contrôle de qualité pour enlever les bâtiments et la végétation. (Source : site web de Intermap Technologies). Les données d'Intermap sont des MNT commerciaux qui ne sont pas disponibles gratuitement. La société Intermap a gracieusement fourni les données pour cette étude.
- **Le MNT Lidar** (données DREAL LR, Conseil Général de l'Hérault et EID-Méditerranée, réalisé avec le soutien du projet BEACHMED-e du programme INTERREG III c) est construit avec des données altimétriques obtenues par levés laser aéroportés (Lidar : *light detecting and ranging*). Le MNT -de 2 m de résolution horizontale- est obtenu par des traitements et filtrages du MNE. Les données Lidar sont des MNT commerciaux qui ne sont pas disponibles gratuitement.

² La résolution planimétrique correspond à la taille de la maille utilisée.

³ La résolution verticale est liée à l'échantillonnage réalisé. Ce produit renseigne les altitudes par une valeur entière et a donc une résolution verticale de 1 m.

⁴ La justesse est l'aptitude à fournir des valeurs peu biaisées.

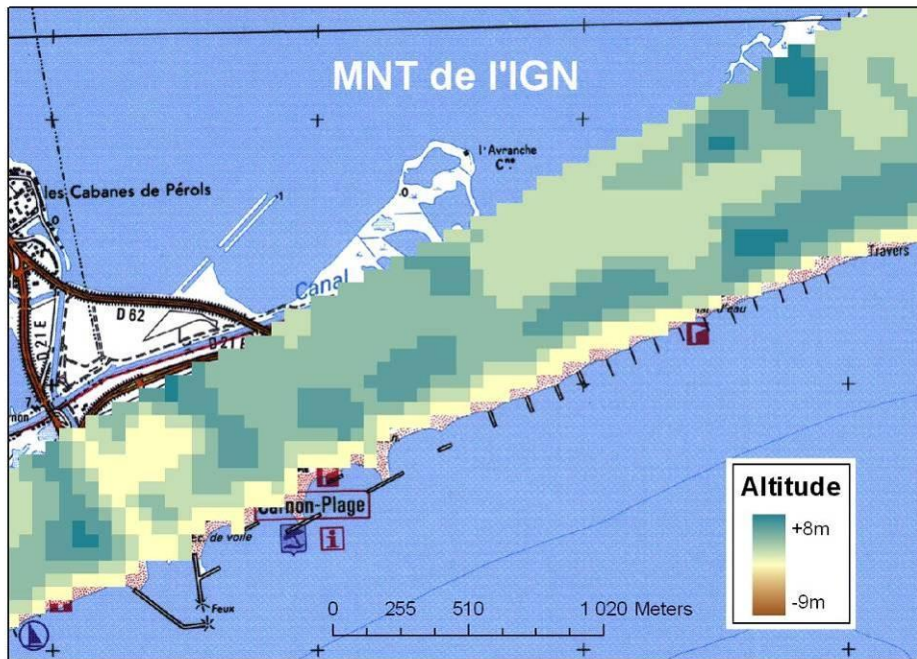


Figure 8 : MNT de l'IGN (grille de 50 m) à Carnon en Languedoc-Roussillon.

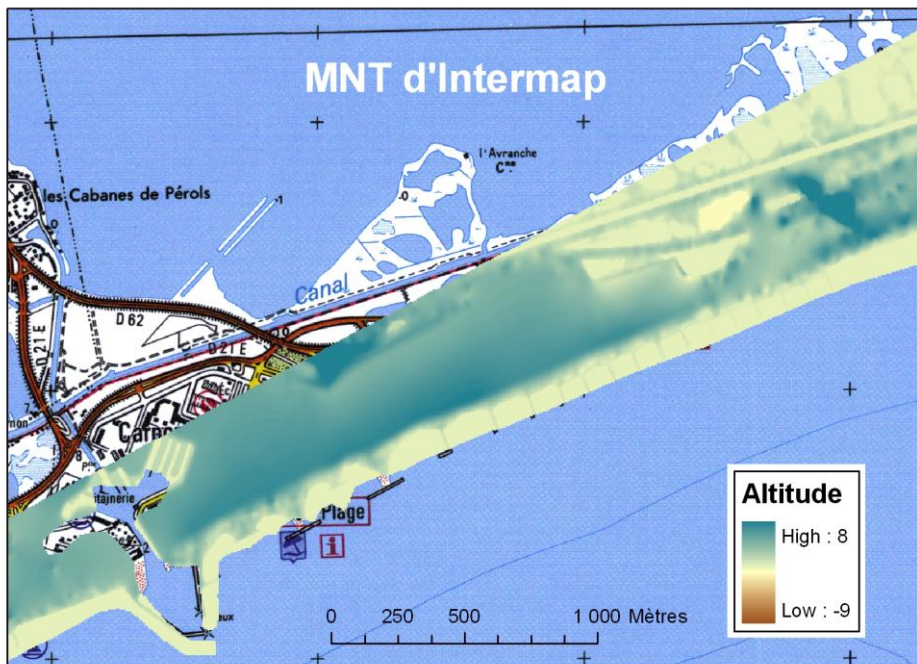


Figure 9 : MNT d'Intermap (grille de 5 m) à Carnon en Languedoc-Roussillon.

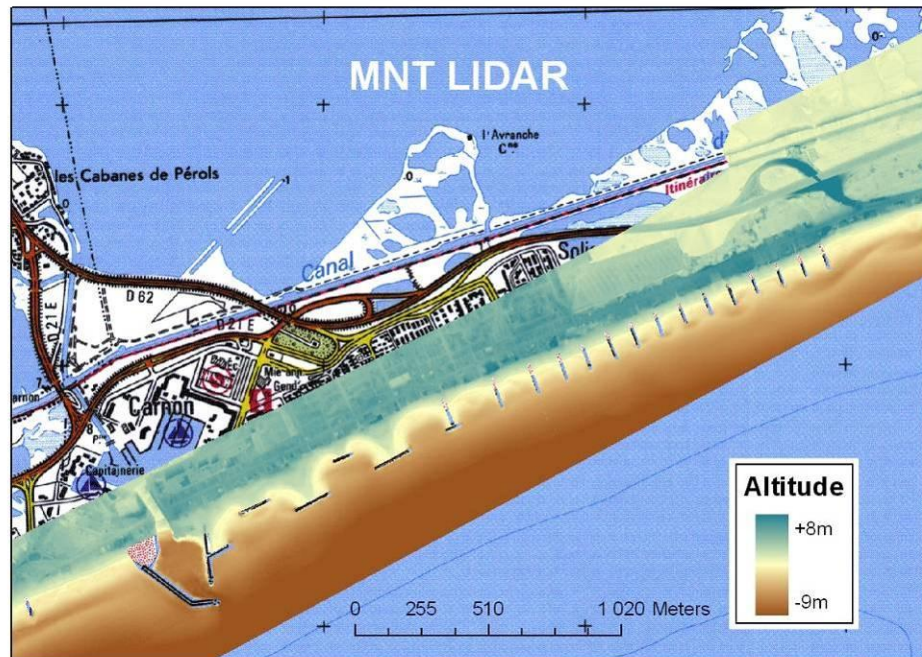


Figure 10 : MNT Lidar (grille de 2 m) à Carnon en Languedoc-Roussillon.

Le MNT de la BD Topo Pays de l'IGN n'est pas utilisé dans cette étude. Cette donnée, d'une résolution planimétrique de 25m, est basée sur la BD Alti de l'IGN avec des améliorations en agglomération (Source : BD Topo Pays, descriptif technique).

Les trois MNT ont des modes de production différents qui tiennent à la fois à la résolution et aux méthodologies utilisées. Les Figure 8 à Figure 10 illustrent de manière qualitative les différences entre les trois MNT dans les environs de Carnon. Les données de l'IGN et d'Intermap ne couvrent que la partie terrestre. Les données Lidar s'étendent en revanche jusqu'à -9 m.

3.2.3. Données de traits de côte historiques et actuels

Données historiques du trait de côte

Les données historiques du trait de côte ont été fournies par la DREAL Languedoc-Roussillon. Elles couvrent la période entre 1850 et 2008, selon les sites. Dans la zone d'étude entre Frontignan et La Grande Motte, des données existent en 1942, 1992, 1995, 1997, 1998 (très peu), 2000 et 2003, avec une couverture variable (Tableau 4).

Les données de 1942 et 1998 proviennent d'une digitalisation de photos numériques de l'IGN (et de la DRE pour 1992). Le trait de côte est identifié comme la « limite visible

atteinte par l'eau »⁵, avec une précision annoncée de l'ordre de 7 ou 8 m. Les données de 1995 et 1997 proviennent d'un levé par géodimètre réalisé par la DRE. Celles de 2000 et 2003 sont issues d'un levé DGPS. Pour ces levés, le trait de côte est défini comme la première ligne face à la mer ou à la lagune joignant les points situés à la cote +0 m NGF (Courbe de niveau 0m NGF), avec une précision planimétrique d'environ 50 cm.

	1942	1992	1995	1997	1998	2000	2003
<i>Pourcentage de couverture dans la zone de l'étude</i>	57 %	96 %	78 %	79 %	11 %	96 %	95 %

Tableau 4 : Pourcentage de transects dans la zone d'étude avec des mesures de la position du trait de côte pour chaque année d'observations.

Références actuelles

Trois traits de côte sont utilisés dans le cadre de la présente étude :

- Corine Land Cover 2006 (CLC06) : l'identification du trait de côte est faite à partir d'images satellites, avec une résolution de 25 m. Le trait de côte résulte ici de la classification de l'occupation du sol effectuée à la date et à l'heure d'acquisition de l'image : le trait de côte sépare les surfaces émergées (sol) des surfaces sous l'eau (mer, lagune).
- Histolitt (de l'IGN et du SHOM) : le trait de côte est défini à partir des données topographiques de l'IGN et des données bathymétriques du SHOM. Chaque segment du trait de côte Histolitt identifie l'origine de la référence choisie localement pour le segment : BDTopo, Orthophotos, carte au 1/25 000, ou source inconnue.
- EuroSION (2004) : ce trait de côte a été construit à partir de la première version de Corine Coastal Erosion pour les pays membres de l'union Européenne en 1990, par numérisation du trait de côte IGN désigné sous les termes « laisse des plus hautes mers » et figurant sur les cartes série bleue, TOP 25 ou IPLI (Inventaire Permanent du Littoral)⁶.

⁵ Source : http://www.languedoc-roussillon.developpement-durable.gouv.fr/article.php3?id_article=536

⁶ Lors du projet EuroSION, ces données ont ensuite été corrigées à partir de données Landsat distribuées par la NASA. Finalement, le trait de côte a été corrigé localement au moyen de cartes au 1/25 000 en France et entre le 1/25 000 et le 1/50 000 dans d'autres zones. Néanmoins, la précision des données est limitée par la géométrie de ce trait de côte. En d'autres termes, si la géométrie actuelle du trait de côte EuroSION devrait être améliorée, les données qui sont portées sur le trait de côte sont bien utilisables au 1/25 000. Il serait nécessaire de procéder à un report des informations portées par ce trait de côte sur un trait de côte ayant une géométrie exploitable pour des études au 1/25 000. On peut d'ailleurs noter qu'afin de mener des études aux échelles inférieures au 1/100 000, le CGDD/SOeS a reporté sur le trait de côte de la base de données CORINE Land Cover (base de données sur l'occupation du sol) : en particulier, le tracé de ce trait de côte ne se superpose pas parfaitement avec le trait de côte de Corine Land Cover.

Aucune de ces références ne correspond donc rigoureusement à la définition du trait de côte du SHOM : « laisse des plus hautes mers dans le cas d'une marée astronomique de coefficient 120 et dans des conditions météorologiques normales (pas de vent du large, pas de dépression atmosphérique susceptible d'élever le niveau de la mer) ». Le trait de côte Histolitt reste la référence pour représenter le trait de côte à l'échelle nationale à de grandes échelles (petite emprise).

Les MNT sont par ailleurs classiquement utilisés pour estimer la position du trait de côte, soit par une analyse de la pente de la plage, soit en reportant une hauteur d'eau sur le MNT. Nous utilisons ici la seconde approche en reportant la cote 0 m NGF sur les différents MNT pour en extraire les traits de côte correspondant⁷.

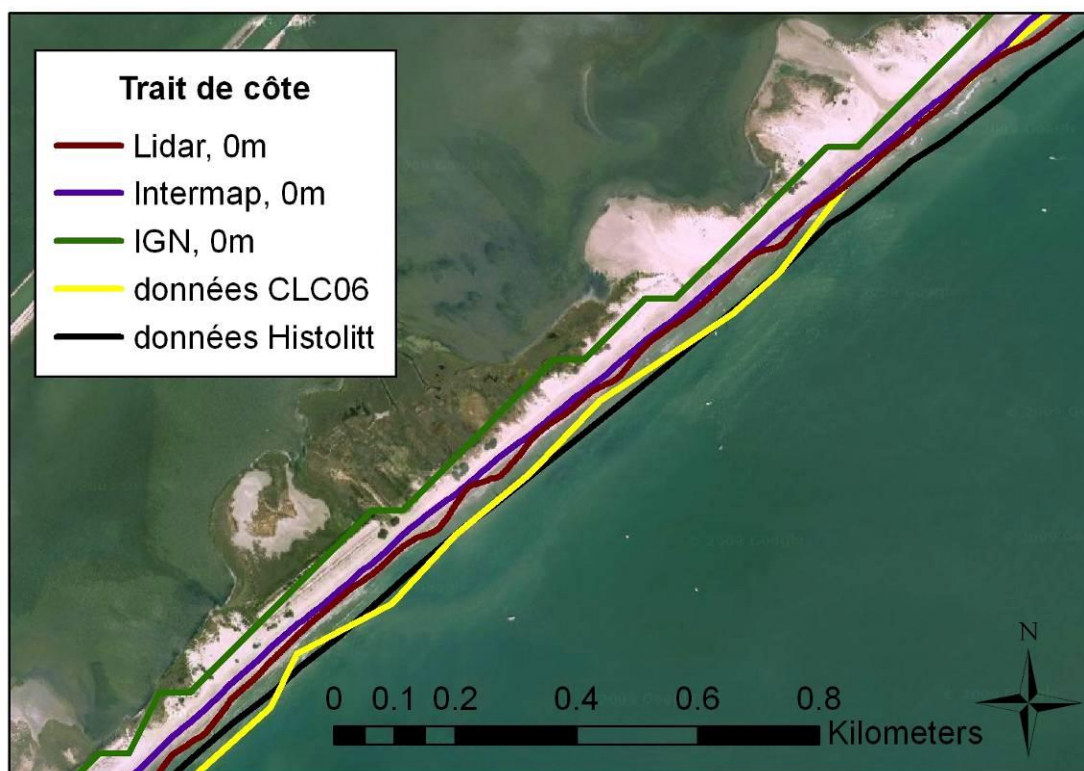


Figure 11 : Exemple de positions du trait de côte définies par la courbe d'altitude 0 m NGF pour les trois types de données topographiques, ainsi que les données Corine Land Cover 2006 et HistoLitt.

La position du trait de côte varie significativement entre les trois MNT (qui ont des résolutions planimétriques très différentes) et les données CLC06 et HistoLitt (Figure 11). Dans cet exemple, le trait de côte du MNT de l'IGN est par exemple nettement décalé vers l'intérieur des terres.

⁷ Le marqueur du trait de côte est ainsi le même que pour les levés de 2000 et 2003 effectués par la DREAL.

Le Tableau 5 résume les différents jeux de données utilisés pour identifier le trait de côte. Comme cela a été indiqué plus haut, une difficulté réside dans le choix d'un marqueur du trait de côte : en effet, l'hétérogénéité des données de bases (photos aériennes, satellite, données GPS, Lidar...) ne permet pas de choisir le même marqueur à chaque fois.

<i>Trait de côte</i>	<i>Données fournies par</i>		<i>Marqueur du trait de côte</i>
données historiques du trait de côte 1942 et 1998	DREAL Roussillon	Languedoc-	« limite visible atteinte par l'eau » par analyse de photos numériques de l'IGN
données historiques du trait de côte 1995 et 1997	DREAL Roussillon	Languedoc-	levé par géodimètre réalisé par la DRE (Altitude 0m NGF)
données historiques du trait de côte 2000 et 2003	DREAL Roussillon	Languedoc-	levé DGPS (Altitude 0 NGF)
Corine Land Cover 2006	European Environment Agency		Analyse d'images satellites (Limite surface en eau / surface émergée ; sur une plage suffisamment large: limite eau / sable)
Trait de côte Histolitt (TCH)	IGN / SHOM		Référence choisie localement : BDTopo, Orthophotos, carte au 1/25 000... ⁸
EuroSION (2004)	European Environment Agency		Trait de côte Corine Erosion Côtière (base cartes IGN 1/25 000) corrigé à partir d'images Landsat (NASA)
MNT Lidar	EID Méditerranée, CG Hérault, DREAL Languedoc-Roussillon		Ici : altitude 0m NGF (par cohérence avec les levés historiques DREAL).
MNT IGN et Intermap	IGN, Intermap		Altitude 0m NGF
Définition officielle du trait de côte	SHOM		« laisse des plus hautes mers dans le cas d'une marée astronomique de coefficient 120 et dans des conditions météorologiques normales (pas de vent du large, pas de dépression atmosphérique susceptible d'élever le niveau de la mer) »

Tableau 5 : Résumé des références des différents jeux de données pour définir le trait de côte.

3.2.4. Données bathymétriques

Des données bathymétriques résultent de la digitalisation de l'isobathe -10 m (données SHOM) effectuée dans le cadre du projet RESPONSE (Vinchon *et al.*, 2009). Cette approche est utilisée en l'absence d'autres données de bathymétrie. Ces données peuvent être comparées avec la donnée du Lidar bathymétrique de 2007 (Figure 12).

⁸ http://www.shom.fr/fr_page/fr_prod_num/Specifications_techniques_TCH_v1.pdf

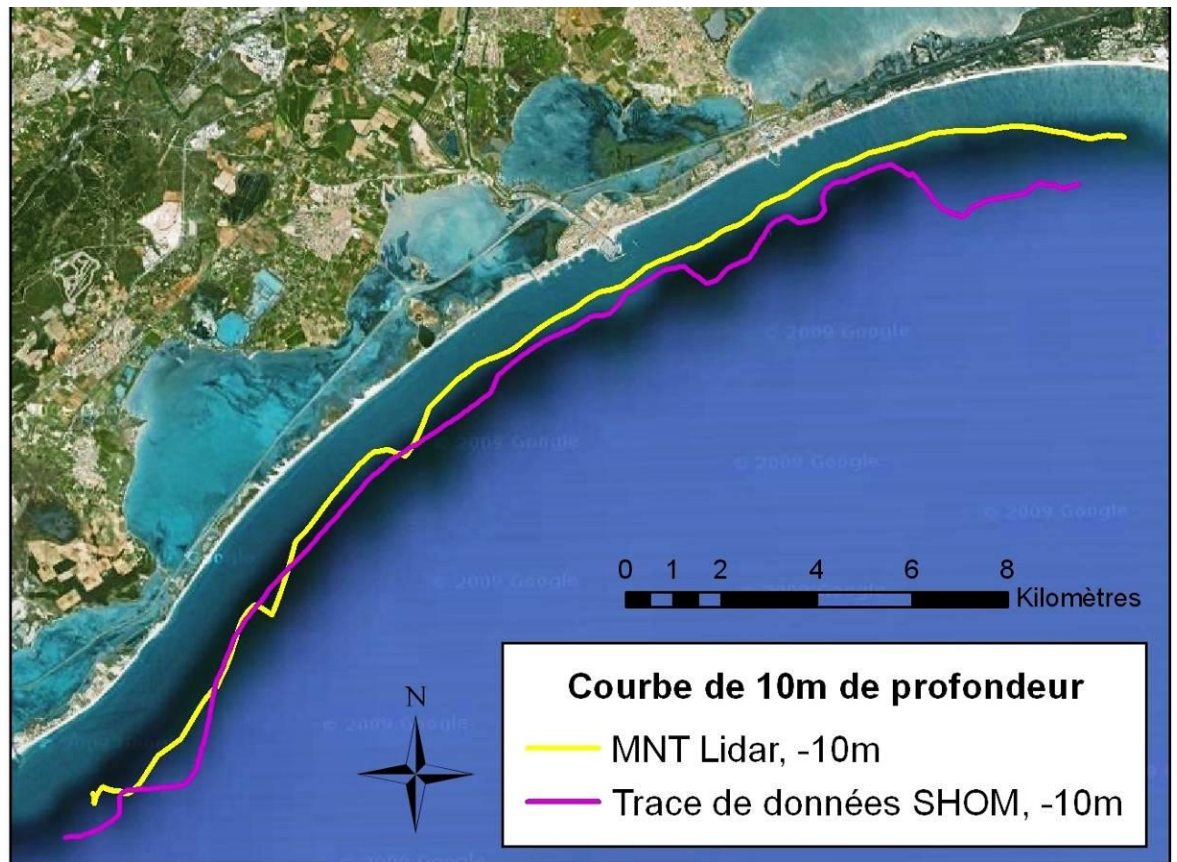
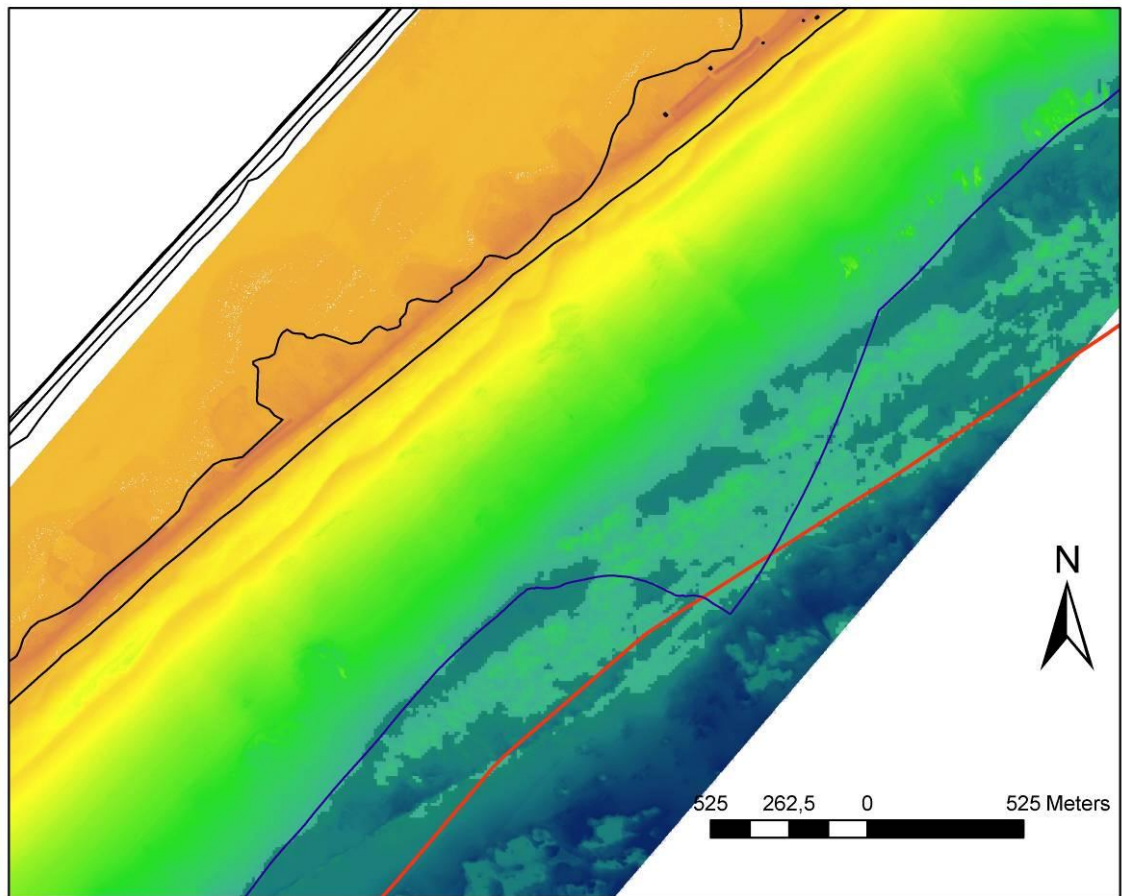


Figure 12 : Isobathe de -10 m ; données SHOM (cartes marines) digitalisées pour le projet RESPONSE et données du levé Lidar de 2007.

On note des différences qui peuvent être expliquées aisément : tout d'abord, du fait d'une disponibilité en sable limitée, les roches affleurent en plusieurs endroits, ce qui cause une bathymétrie complexe dans la zone des -10 m. D'autre part, les pentes dans cette gamme de profondeur ne sont pas très fortes. Ceci est illustré dans la Figure 13 et la Figure 14.

Ainsi, la représentation de l'isobathe -10 m comprend intrinsèquement des incertitudes planimétriques importantes du fait de la bathymétrie du site d'étude.



Légende

- Trait de côte Histolitt (SHOM/IGN)
- Isobathe -10m de basse résolution issu du Lidar
- Isobathe -10m de basse résolution issu d'une digitalisation de données SHOM
- Bâtiments (Bâti indifférentié de la BD Topo Pays)

Lidar

Altitude (en grisé: zones inférieures à -10 m)

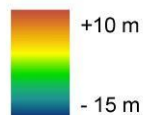
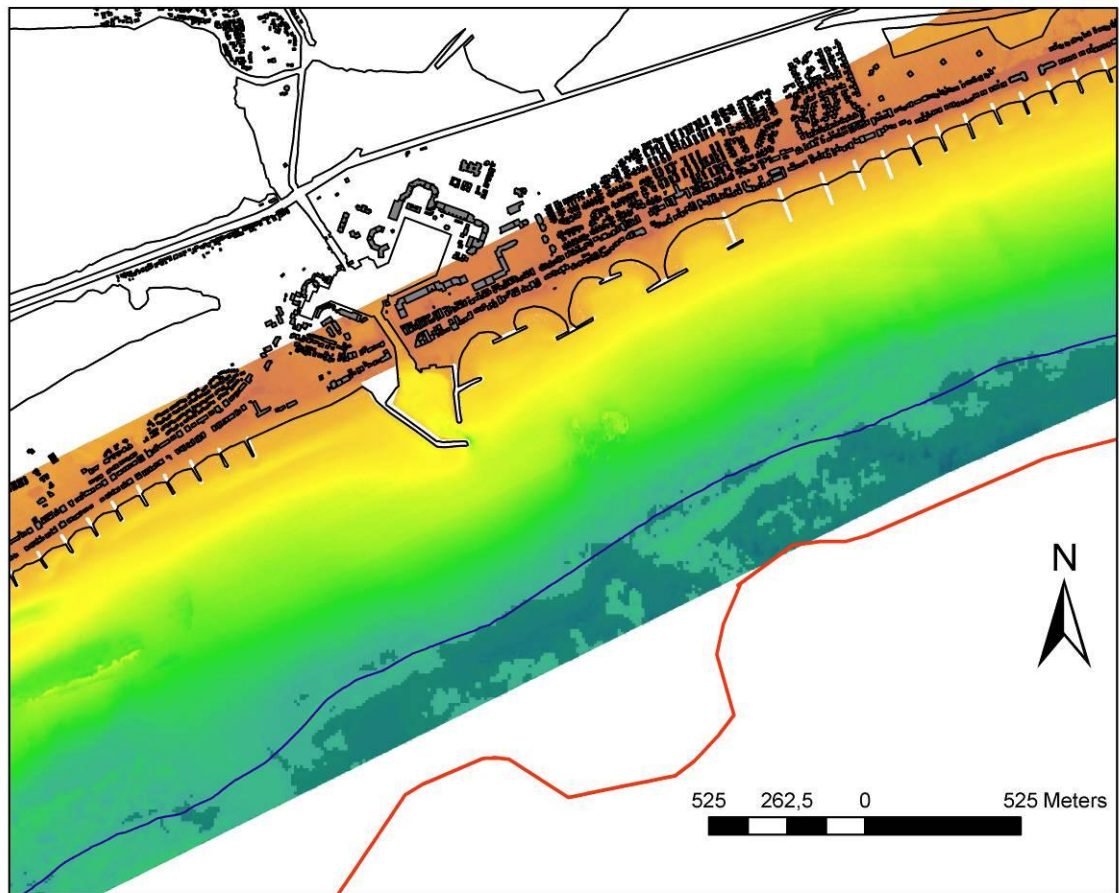


Figure 13 : Lidar topo-bathymétrique de 2007 et isobathes de basse résolution de 10 m dans la zone de l'étang de Pierre-Blanche.

(Données Lidar EID Méditerranée, DREAL LRO et CG Hérault ; Données SHOM cartes marine).



Légende

- Trait de côte Histolitt (SHOM/IGN)
- Isobathe -10m de basse résolution issu du Lidar
- Isobathe -10m de basse résolution issu d'une digitalisation de données SHOM
- Bâtiments (Bâti indifférentié de la BD Topo Pays)

Lidar

Altitude (en grisé: zones inférieures à -10 m)

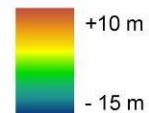


Figure 14 : Lidar topo-bathymétrique de 2007 et isobathes de basse résolution de 10 m dans la zone de l'étang de Canon.

(Données Lidar EID Méditerranée, DREAL LRO et CG Hérault ; Données SHOM cartes marine).

3.2.5. Données d'occupation du sol et bâtiments

Occupation du sol

Nous utilisons les données Corine Land Cover 2000 et 2006 mise à disposition par l'« European Environment Agency ». Corine Land Cover (CLC) est une base de données géographique environnementale européenne qui constitue un inventaire de l'occupation des sols. La taille minimum pour une classification d'une zone est 25

hectares (1 hectare = 0,01 km²), avec une largeur minimum de 100 m. Les données sont classifiées en trois niveaux de détails, et les métadonnées indiquent une précision thématique d'au moins 85 %. La mise à jour en 2006 tient compte de tous les changements d'au moins 5 hectares par rapport à CLC 2000. Dans la zone d'étude en Languedoc-Roussillon, le seul changement entre 2000 et 2006 était le positionnement du trait de côte.

Bâtiments

La base de données de bâtiment utilisée est issue de la BD Topo Pays (couche : « bâtiments Indifférenciés »). Les bâtiments sont dénombrés simplement sous un logiciel SIG par intersection de couches géoréférencées, dénombrement des polygones correspondant aux bâtiments et suppression des éventuels doublons liés au découpage d'un bâtiment. L'estimation des logements par le modèle Popeval développé par le SOeS n'est pas possible ici car elle n'est valable qu'en agrégeant des données au-delà de 20 à 30 communes, ce qui n'est pas le cas ici.

Ainsi, dans l'étude RNACC-1 (2009), le dénombrement effectué concernait des logements (Base de données INSEE géolocalisée à une échelle de plus petite emprise par le MEEDTL/CGDD/SOeS), alors que ce sont ici les bâtiments qui sont décomptés. Le site d'étude choisi ici est trop petit pour que cette donnée soit utilisée.

3.2.6. Données de cartographie de l'extension de submersions marines

Deux jeux de données ont été comparés avec les résultats obtenus dans le cadre de la présente étude. Il s'agit des données issues du projet MISSEVA et les données de la cartographie AZISM (Atlas des Zones inondables – submersion marine). Dans les deux cas, il ne s'agit pas d'une cartographie de l'aléa à proprement parler mais d'une analyse de scénarios. Les cartographies ne doivent donc pas être comparées de manière fine, mais uniquement de-visu afin d'évaluer si les différences constatées peuvent s'expliquer pour une raison ou une autre (différence entre les jeux de données, différence entre les approches, processus pris en compte, etc.).

Données MISSEVA

Le projet ANR MISEEVA (Marine Inundation hazard exposure and Social, Economical and Environmental Vulnerability Assessment) a pour objectif de définir la vulnérabilité de la zone côtière à l'exposition de la submersion marine (Vinchon *et al.*, 2010).

L'évaluation des zones submergées en Languedoc-Roussillon a été faite suivant deux méthodes différentes :

- la modélisation de haute résolution temporelle et spatiale à l'échelle locale,
- et l'estimation à l'échelle régionale avec l'utilisation conjointe de modèles numériques des formules semi-empiriques.

C'est cette seconde approche qui a été retenue pour l'exercice de comparaison.

Cette étude ne tient pas compte de l'évolution du trait de côte et est focalisée uniquement sur la délimitation des zones submergées, en supposant la bathymétrie et la topographie inchangée. L'apport majeur de ce projet en termes de cartographie réside dans le fait que les processus hydrodynamiques sont modélisés finement de manière complète.

L'étude a proposé plusieurs scénarios de submersions. Le scénario le plus pertinent pour effectuer une comparaison avec la présente analyse est celui qui a consisté à cartographier les zones potentiellement submergées avec 1 m d'élévation du niveau marin pour une tempête extrême de référence.

Pour faire la cartographie des surfaces affectées, une version retravaillée de la topographie du MNT de l'IGN (de 50 m de résolution horizontale) a été effectuée. Le niveau de l'eau extrême de l'eau été calculé en sommant les composantes suivantes (voir annexe 3) :

- le niveau d'eau moyen (qui comprend le niveau de l'élévation du niveau de la mer, le niveau de la marée, la surcote atmosphérique et la surcote due aux vagues (ou wave set-up),
- l'altitude extrême instantané atteinte par l'eau, le wave run-up.

De manière évidente, la surcote, le set-up et le run-up ne sont pas identiques le long la côte, ce qui motive leur modélisation complète.

La tempête de novembre 1982 a été utilisée comme référence pour l'étude. Le niveau de la marée et de la surcote atmosphérique a été calculé pendant la tempête en forçant le modèle MARS (Ifremer) avec des données NCEP (NOAA) pour les conditions du vent et de pression. La surcote due aux vagues et le run-up ont été calculés avec les formules empiriques de Stockdon *et al.* (2006), à partir du champ de vagues du modèle SWAN (Delft Univ.) forcé par le vent NCEP.

Données de la cartographie AZISM (Atlas des Zones Inondables - Submersion Marine)

L'AZISM (Atlas des Zones Inondables - Submersion Marine) est délimitée par la courbe de niveau +5 m NGF et le trait de côte de la base de données BDTopo. Ces données ont été fournies par la DREAL Languedoc-Roussillon.

3.3. CHOIX D'UNE HYPOTHÈSE D'ÉLÉVATION DU NIVEAU MARIN

Enfin, Hulme *et al.* (2002) ont suggéré que des analyses d'impact devraient prendre en compte des élévations du niveau marin majorant de +50 % l'élévation prédite (d'origine climatique et liée aux subsidences plus ou moins locales) afin de prendre en compte les effets de la variabilité régionale et les incertitudes liées aux prédictions de l'élévation du niveau marin. Cette proposition, qui amène à prendre des valeurs hypothétiques d'élévation du niveau marin en 2100 de l'ordre du mètre, sont reprises

par le rapport 2007 du GIEC (WGII, chapitre 6.3.2). Une alternative est d'utiliser plusieurs valeurs d'élévation du niveau marin (GIEC 2007, WG II, chapitre 2.4.6.3).

Dans le cadre de ce projet, quatre valeurs d'élévation du niveau marin ont été choisies : 0 m, 0,5 m, 1 m et 1,5 m.

3.4. RESUME

Ainsi, le site d'étude est délimité par la zone dans laquelle le levé Lidar de 2007 a été effectué. Ceci constitue une limite dans la mesure où les zones situées en arrière des étangs n'avaient pas été levées. Il sera cependant aisé de reproduire les méthodes présentées dans le chapitre suivant lorsque davantage de données Lidar seront disponibles, notamment avec le programme Litto-3D du SHOM et de l'IGN.

Les données utilisées sont des données côtières disponibles : MNT, traits de côte historique et références, données d'occupation des sols et données permettant d'obtenir une référence pour la submersion.

Enfin, 4 hypothèses d'élévation du niveau marin sont retenues pour l'analyse de sensibilité qui va suivre : 0 m ; 0,5 m ; 1 m et 1,5 m.

4. Méthodes

4.1. RETOUR SUR LA MÉTHODE DU PROJET RNACC 1

Le projet RNACC-1 (2009) a eu pour but d'évaluer les dommages et le coût des impacts à cause du risque d'érosion et de submersion.

Les hypothèses de changements climatiques et sociétaux utilisés dans ce projet étaient les suivants :

- le scénario A2 du GIEC (2007),
- l'horizon temporel de 2100,
- le scénario dit à économie constante et à enjeux constant.

La méthode du projet RNACC est une adaptation de celle mise en œuvre dans le cadre du projet EUROSION (2004a). Elle a été appliquée en Languedoc-Roussillon où la majorité de la zone littorale est composée de zones basses. Cette région a été choisie car elle bénéficie d'études et de données pré-existantes. La méthode appliquée a permis d'évaluer les impacts sur les logements, les personnes et les établissements publics et privés en considérant les enjeux actuels en zones côtières et la modification des aléas (Figure 15).

Les hypothèses de changement climatique choisies (une élévation du niveau marin de 1 m et des régimes inchangés de tempêtes, de vagues et de précipitations) induisent une modification des aléas côtiers érosion et submersion marine. Ces aléas causent des pertes de terres par des processus différents qui sont ici évalués séparément :

- l'érosion est causée par des processus actifs (le transport de sédiments),
- la submersion permanente est définie comme une réponse passive à l'élévation relative du niveau marin,
- la submersion temporaire est une réponse passive aux forçages marins.

Suivant la méthodologie d'EUROSION, l'érosion était quantifiée par une zone tampon de 500 m autour des côtes susceptibles d'être érodées. Avec 1 m d'élévation du niveau marin, la submersion permanente était constituée des zones en deçà de +1 m NGF (Nivellement Général de la France), et la submersion temporaire des zones en deçà de +2 m NGF pour un événement décennal et de +3 m NGF pour un événement centennal (Tableau 6). Ces valeurs sont issues d'une estimation simplifiée des niveaux marins extrêmes. Elles sont cohérentes avec les niveaux retenus pour les plans de prévention des risques littoraux (PPRL).

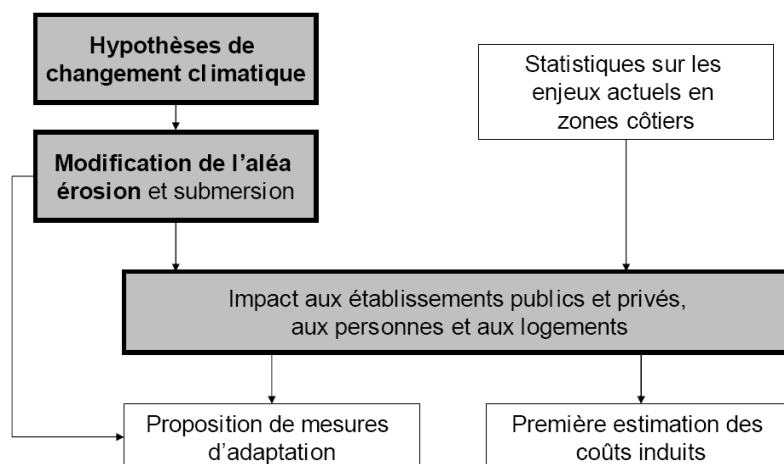


Figure 15 : Méthode appliquée dans le cadre de l'étude du groupe de travail Risques Côtiers du RNACC [adaptée de Le Cozannet et al. (2009)].

Les enjeux existant actuellement en zone côtière ont été dénombrés pour estimer l'exposition future aux aléas, puisqu'il n'est pas possible d'extrapoler les tendances actuelles à ces échéances. Pour évaluer les impacts sur les personnes, les logements et les établissements publics et privés, il est possible d'utiliser les données existantes de l'occupation des terres de Corine Land Cover 2000 (UE-CGDD/SOeS), le tissu urbain des petites communes de la BD Carto 2000 (IGN), les contours d'îlots urbains d'Iris 1999 (IGN/INSEE), les logements de la BDCom 1999 (INSEE) et la population (habituelle et non saisonnière) issues du recensement de l'INSEE de 1999.

Aléa	Effet généralement attendu du changement climatique	Type	Durée caractéristique	Réversibilité des effets	Modélisation à l'échelle régionale pour l'étude RNACC
Érosion	aggravation	continu ou discontinu	infra-annuelle à pluriannuelle	irréversible	zone tampon de 500 m autour des côtes érodables
Submersion temporaire	aggravation	discontinu	quelques heures à quelques jours	réversible	création d'une zone pour les z compris entre 0 et 3 m, à laquelle est soustraite la zone correspondant aux aléas ayant des effets irréversibles
Submersion permanente	création d'un nouvel aléa	continu	pluriannuelle à pluri-décennale	irréversible	création d'une zone pour les z compris entre 0 et 1 m, selon la morphologie de la côte

Tableau 6 : Caractéristiques des aléas considérés, effets généralement attendus de l'élévation du niveau marin selon Nicholls et al. (2007) et traitement effectué dans RNACC [source : Garcin et al. (2008) modifié].

Les enjeux actuels ont été croisés avec les zones d'aléa futur obtenues pour évaluer les populations, les logements, et les établissements publics et privés exposés. Les résultats sont présentés dans des tables dénombrant le nombre de personnes, de logements, d'entreprises, et de salariés potentiellement affectés.

Une première estimation des coûts induits a ensuite été faite, en tenant compte des dommages potentiels directs et tangibles aux logements. Les coûts pour les entreprises, ainsi que les pertes indirectes (les coûts associées à la santé, le patrimoine historique et culturel, les emplois, les pertes d'exploitation, et les revenus de taxes) et non tangibles (dégradation des paysages et des espaces naturels par exemple) n'étaient pas considérés dans cette première analyse en raison du manque de données.

4.2. MÉTHODE POUR L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ DU PRÉSENT PROJET

4.2.1. Approche générale du projet

Cette étude s'inscrit dans une perspective d'amélioration de la méthode RNACC-1 (2009). Il s'agit en particulier de quantifier les incertitudes induites par les évaluations :

- de l'élévation du niveau marin ;
- des aléas côtiers érosion et submersion marine, pour lesquelles les incertitudes découlent de deux facteurs importants :
 - la qualité des données topographiques,
 - la connaissance des processus d'évolution du trait de côte.

On analysera dans cette étude comment chacune de ces sources d'incertitude – évaluée de manière indépendante – a une incidence sur l'évaluation des aléas érosion et submersion. La méthode générale d'évaluation de l'aléa suit la méthode RNACC-1 (2009). On se limitera toutefois à l'étude des surfaces concernées, de l'occupation des sols, et des logements impactés (Figure 16).

On ne tient pas compte notamment des sources d'incertitudes liées à l'estimation des impacts sur les établissements publics et privés et la population, ou encore à l'évaluation des coûts induits. Ces choix s'expliquent dans la mesure où il n'existe que peu ou pas de données pour évaluer ces incertitudes de manière quantitative, mais aussi parce que notre objectif est d'évaluer les incertitudes conduisant à l'évaluation de l'aléa et de l'exposition des enjeux.

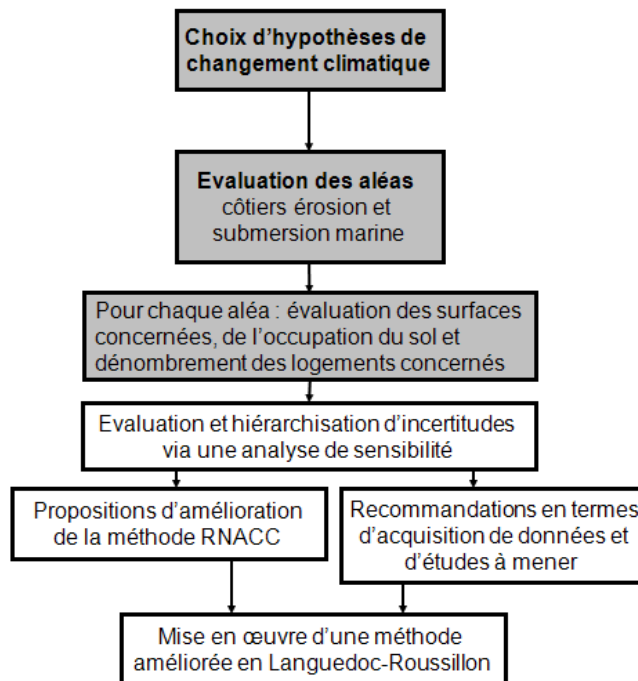


Figure 16 : Schéma de la méthodologie générale du projet, où les boîtes grises indiquent les étapes où les incertitudes dans le projet RNACC sont évaluées.

4.2.2. Méthode d'analyse de sensibilité

Chaque analyse sera traitée indépendamment pour estimer les incertitudes associées avec une seule source. On effectuera à chaque fois plusieurs tests (ex. plusieurs hypothèses de l'élévation du niveau marin pour évaluer la sensibilité à l'élévation du niveau marin), en suivant les étapes suivantes :

- choix d'un scénario d'élévation du niveau marin,
- évaluation des surfaces érodées suivant une hypothèse sélectionnée d'évolution de long terme due à l'élévation du niveau marin,
- évaluation des surfaces submergées suivant la méthodologie appliquée dans le projet RNACC (la submersion permanente, la submersion décennale et la submersion centennale ; voir Annexe 3),
- estimation des distributions de l'occupation des sols affectées par les aléas érosion et submersion, effectuée en croisant la cartographie de l'occupation des sols (Corine Land Cover 2006),
- estimation du nombre de bâtiments potentiellement affectés, en utilisant la couche « bâti indifférencié » de la base de données BD Topo Pays.

Les incertitudes seront évaluées à partir de l'ordre de grandeur de la variabilité de l'ensemble des résultats.

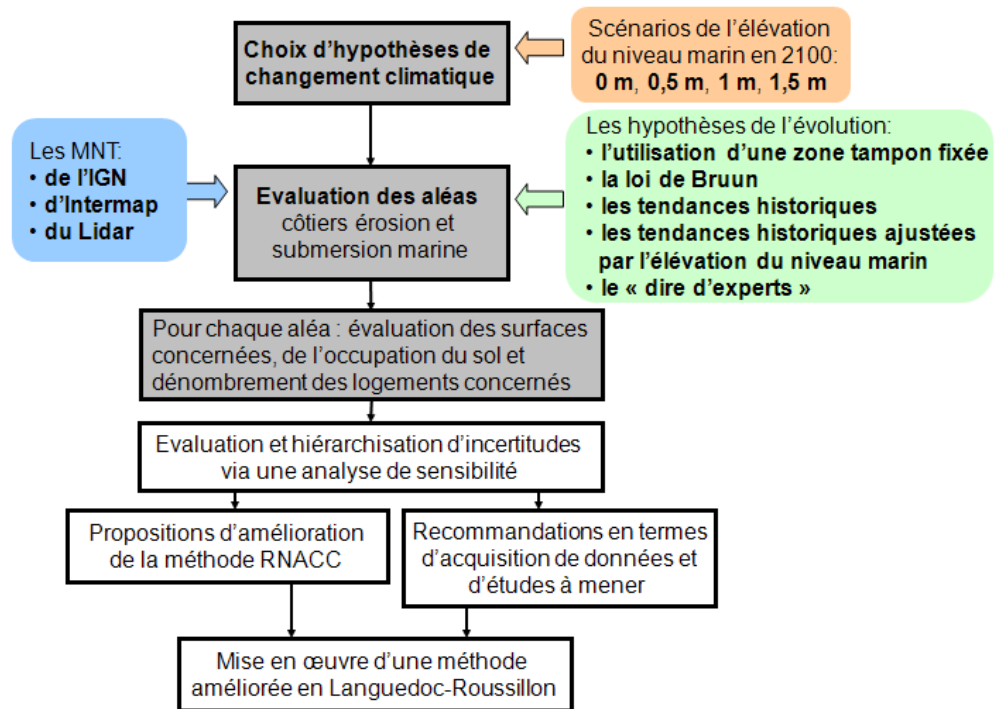


Figure 17 : Variables utilisées pour l'analyse de sensibilité ; les trois boîtes grisées indiquent celles pour lesquelles l'analyse de sensibilité (visant à l'évaluation des incertitudes) est menée.

Les analyses de sensibilité menées de manière indépendante permettront ainsi d'établir une hiérarchisation des sources d'incertitudes et de proposer des stratégies à adapter pour les réduire. Ces résultats seront utilisés pour faire des recommandations pour améliorer la méthode RNACC en faisant des acquisitions de données ou en réalisant des études complémentaires. La mise en œuvre de ces améliorations sera faite en Languedoc-Roussillon. Les cartographies finales obtenues seront comparées avec des cartographies existantes et disponibles (par exemple celles issues du projet ANR MISSEVA).

Les impacts du changement climatique sur les zones côtières seront évalués en termes de surfaces érodées et submergées, mais aussi en termes d'impacts sur les biens. Deux indicateurs sont ici choisis : l'occupation des sols des zones concernées et le dénombrement des bâtiments affectés.

4.2.3. Analyse de sensibilité au choix d'une hypothèse d'élévation du niveau marin

Le choix d'un scénario d'élévation du niveau marin a un impact direct sur les aléas érosion et submersion dans le contexte du changement climatique. Dans l'étude RNACC, on s'est contenté de considérer le cas d'une élévation de 1 m en 2100. Pour évaluer les incertitudes liées à cette hypothèse, quatre scénarios d'élévation du niveau marin (0 m, 0,5 m, 1 m et 1,5 m) sont testés. La loi de Bruun est appliquée pour estimer le mouvement du trait de côte avec chacun des scénarios. Les données Lidar

quant à elles sont utilisées pour calculer le mouvement du trait de côte (voir 0), ainsi que pour évaluer les surfaces érodées et submergées. Les résultats obtenus permettront de faire une analyse de sensibilité à l'élévation du niveau marin.

4.2.4. Analyse de sensibilité à l'évolution long terme du trait de côte

Cette analyse a pour objet d'étudier dans quelle mesure le choix de la démarche adoptée pour simuler l'évolution long terme du trait de côte influe sur l'identification des zones qui devraient être érodées suite au changement climatique. Dans l'étude RNACC, une zone tampon de 500 m a été appliquée pour estimer les zones potentiellement érodées en 2100. Ici, les zones potentiellement érodées seront estimées en utilisant 5 méthodes d'évaluation du mouvement du trait de côte :

- une zone tampon de 500 m,
- l'application de la loi de Bruun,
- une extrapolation des tendances historiques,
- une extrapolation des tendances historiques avec un ajustement pour l'élévation du niveau marin,
- une zone définie par « dire d'experts ».

Un scénario d'élévation du niveau marin de 1 m est choisi pour l'évaluation de l'évolution du trait de côte et des zones submergées. Les données topographiques du MNT Lidar sont utilisées pour la définition du trait de côte initial, pour appliquer la loi de Bruun (évaluation de la pente de la côte), et pour l'estimation des zones potentiellement impactées.

4.2.5. Analyse de sensibilité à la précision des données altimétriques

Les données altimétriques jouent un rôle important dans plusieurs étapes de l'évaluation de l'impact potentiel du changement climatique. Elles sont utilisées pour déterminer la position du trait de côte, pour estimer la pente (si on choisit d'appliquer la loi de Bruun), ou encore pour croiser la topographie avec les niveaux d'eau extrêmes pour cartographier les zones submergées.

Dans un premier temps, nous comparerons les MNT de l'IGN et d'Intermap avec les données Lidar à l'aide d'une étude statistique. Nous ferons ensuite une analyse pour estimer dans quelle mesure le mouvement du trait de côte ou encore les surfaces érodées et submergées obtenues lors d'une étude d'impact sont sensibles au type de données altimétriques utilisées. On considérera une élévation du niveau marin de 1 m, et les zones érodées seront déterminées en appliquant la loi de Bruun.

4.3. MÉTHODE D'ANALYSE DES DONNÉES ALTIMÉTRIQUES

En plus de l'analyse de sensibilité, les trois MNT présentés précédemment sont comparés entre eux à l'aide d'une analyse statistique. En l'absence de levé GPS sur le

terrain, on se servira des données Lidar -supposées les plus précises- comme référence pour les calculs de différences.

La Figure 18 rappelle la définition des critères de qualité de précision et d'exactitude. Dans cette figure, le carré rouge représente la valeur théorique, et les points noirs les données. Des données « précises » mais « biaisées » sont caractérisées par exemple par un faible écart type mais une valeur moyenne assez éloignée de la valeur théorique. Ce sont ces critères de précision et d'exactitude qui sont les premiers critères de qualité à considérer pour l'évaluation de la qualité d'un MNT.

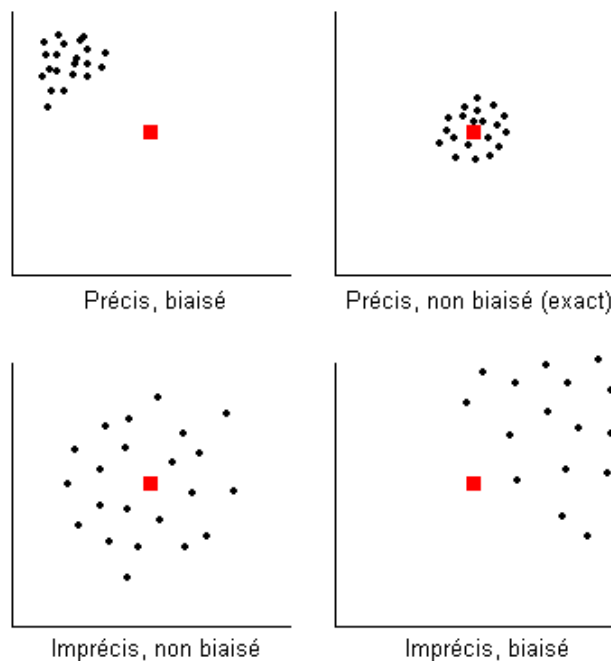


Figure 18 : Rappel de la définition de la précision et de l'exactitude (biais faible) : en rouge, la valeur théorique, en noir, les données.

On peut envisager deux méthodes pour calculer les différences entre les MNT avec des pas de grilles différents:

- re-échantillonner les MNT de l'IGN et d'Intermap sur la grille du MNT Lidar pour faire une comparaison entre chaque point Lidar et le point équivalent dans les autres MNT,
- ou re-échantillonner le MNT Lidar sur la grille de l'IGN et celle d'Intermap par lissage.

Dans cette étude, on considère que les données de référence sont les données Lidar. On choisit par conséquent de ne pas les dégrader, ce qui revient à appliquer la première méthode. Les MNT de l'IGN et d'Intermap ont donc été ré-échantillonnés sur la grille du MNT Lidar. Chaque type de données est donc disponible sur une même grille de 2 m de résolution.

Les données Lidar situées en deçà de la cote 0 m NGF ont été enlevées pour tenir compte du fait que les MNT de l'IGN et d'Intermap ne couvrent que la partie terrestre.

Les différences entre MNT sont calculées en chaque point de la grille de 2 m. Une différence positive indique que les données IGN ou Intermap surestiment l'altitude et une différence négative que les données sous-estiment l'altitude par rapport aux données Lidar.

Les différences entre MNT seront analysées en termes :

- de précision : erreur quadratique moyenne (RMSE, *root mean square error*), écart type des erreurs sous hypothèse de distribution gaussienne (σ), précision à 3 σ sous hypothèse de distribution gaussienne,
- d'exactitude : calcul de biais.

Soit $y = (\hat{x} - x)$ la différence entre la valeur réelle x et son estimation \hat{x} (les données) en un point de la grille. Le biais s'écrit :

$$\text{Biais} = \bar{y} = E[(\hat{x} - x)],$$

avec E l'espérance mathématique. Le RMSE est une mesure des erreurs qui dépend de la précision et de l'exactitude des données :

$$\text{RMSE} = \sqrt{E[(y)^2]},$$

alors que l'écart type des erreurs (σ) est une mesure de la dispersion des différences, et est indépendant du biais :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2},$$

où N est le nombre de valeurs (points). Quand l'écart type est utilisé pour décrire des distributions normales, les valeurs entre $+1 \sigma$ et -1σ de la moyenne représentent approximativement 68 % de la variance. Toujours sous hypothèse de distribution normale et avec une mesure plus sévère de la dispersion, définie par trois fois par l'écart type des erreurs, 99,73 % des données sont en deçà du seuil de précision. Une autre statistique plus commune est la 95 % quantile, où les valeurs sont l'extérieur de ce gamme ($+1,96 \sigma$ et $-1,96 \sigma$) dans 5 % de tous les cas.

4.4. MÉTHODE D'ÉVALUATION DE LA SUBMERSION ET DE L'ÉROSION

4.4.1. Méthode d'analyse de la submersion

Pour l'analyse de la submersion marine, cette étude reprend la démarche utilisée dans le projet RNACC 2009 pour l'évaluation des zones submergées (Voir annexe 3).

4.4.2. Méthodes d'analyse de l'érosion

Plusieurs méthodes sont actuellement appliquées pour l'évaluation de l'érosion long terme du trait de côte dans le contexte du changement climatique. Cette étude a pour objet d'estimer les incertitudes associées à chacune de ces méthodes et de les comparer entre elles.

Pour évaluer les impacts du changement climatique en termes d'érosion et de submersion, il est nécessaire de pouvoir déterminer comment évolue le trait de côte sur de longues échelles de temps (typiquement 10-100 ans). Or celui-ci répond à une grande variété de forçages, que l'on ne sait pas forcément bien modéliser. L'évolution du trait de côte dépend notamment fortement de la géomorphologie et la géologie locale. Par ailleurs, les changements font intervenir des processus couvrant une large gamme d'échelles spatiales et temporelles, qui vont des interactions entre les grains de sable pendant les quelques secondes associées au passage des vagues, jusqu'à la formation des côtes des continents sur des milliers d'années.

Plusieurs méthodes existent pour évaluer l'évolution des zones côtières en réponse au changement climatique, qui présentent chacune des avantages et des inconvénients. Cette analyse a pour objectif d'évaluer les différences entre plusieurs méthodes actuellement appliquées. En général, les études d'évolution du trait de côte tiennent compte de deux processus différents dépendant de l'échelle temporelle :

- l'évolution à court terme causée par un événement extrême, généralement à l'échelle locale, comme une tempête de référence. L'érosion induite par cet événement est prédite avec la modélisation de haute résolution de l'hydrodynamique et l'évolution morphologique ;
- l'évolution à long terme, s'exerçant en réponse à des processus au moins pluriannuels (ex. l'érosion à cause de l'élévation du niveau marin pendant une période de 100 ans, ou bien l'érosion progressive liée à une réduction d'apports de sédiments). Ce type d'érosion est estimé par le biais de formules empiriques ou par dire d'experts.

Il s'agit ici de comparer les méthodes d'estimation de la seconde catégorie, i.e. les formules empiriques basées sur :

- l'utilisation d'une zone tampon de 500 m ;
- l'application de la loi de Bruun ;
- l'extrapolation des tendances historiques ;
- l'extrapolation des tendances historiques, ajustées par l'application de la loi de Bruun pour tenir compte de l'accélération de l'élévation du niveau marin ;
- la détermination d'une zone par le « dire d'experts ».

Les détails de chaque méthode sont présentés ci-après. On décrira leurs avantages, leurs inconvénients, ainsi que leurs limites.

Une zone tampon de 500 m

Dans l'étude RNACC, l'évolution long terme du trait de côte était estimée avec une zone tampon de 500 m autour des côtes susceptibles d'être érodées. Cette méthode avait été sélectionnée en raison de l'absence de modèles fiables et de la forte dépendance du recul du trait de côte à des forçages hydrodynamiques ainsi qu'à des critères géologiques, géomorphologiques, et bathymétriques pour lesquels on ne dispose que de peu de données. La valeur de 500 m suit les recommandations du projet EuroSION (2004) pour l'évaluation des zones potentiellement exposées aux aléas côtiers dans le contexte du changement climatique⁹.

Partant de l'assertion de Cooper et Pilkey (2004) selon laquelle il n'est pas possible de quantifier de manière exacte le recul du trait de côte soumis à une élévation du niveau marin de l'ordre du mètre, une zone tampon a été définie, modélisant un recul arbitraire de 500m des rivages érodables.

• Avantages

Cette méthode est facilement applicable aux échelles régionales et couvre une période temporelle indéterminée. L'utilisation d'une zone tampon n'est pas limitée par des hypothèses de forçages causant l'évolution long terme, et ne nécessite pas de données précises pour pouvoir être appliquée, hors mis une description de la géomorphologie côtière.

• Inconvénients

La définition de la largeur de la zone est arbitraire et n'est pas basée sur des processus physiques. Ainsi, une estimation des zones érodées par ce moyen demeure simpliste.

La loi de Bruun

La loi de Bruun (Bruun, 1962) est la méthode la plus appliquée actuellement pour estimer l'érosion long terme des plages, même s'il existe un débat sur la validité du modèle. L'application de la loi de Bruun est basée sur l'hypothèse que les plages ont toujours un profil d'équilibre qui s'adapte aux changements du niveau de la mer selon une translation du profil, sans changement de forme (Figure 19). La formule de Bruun prédit le recul du trait de côte, R , suivant la formule :

$$R = S \left(\frac{L}{B + h} \right) = S \left(\frac{1}{\tan \alpha} \right),$$

où S est l'élévation du niveau de la mer, L la largeur du zone de surf, B la hauteur de la berme et h la profondeur de fermeture. Une manière de simplifier cette formulation

⁹ Dans la démarche EuroSION, il s'agit bien de définir une carte de susceptibilité et non d'aléa.

consiste à écrire la loi de Bruun comme le produit de l'élévation du niveau de la mer et d'une estimation de la pente de la plage ($\tan \alpha$) entre la berme et la profondeur de fermeture.

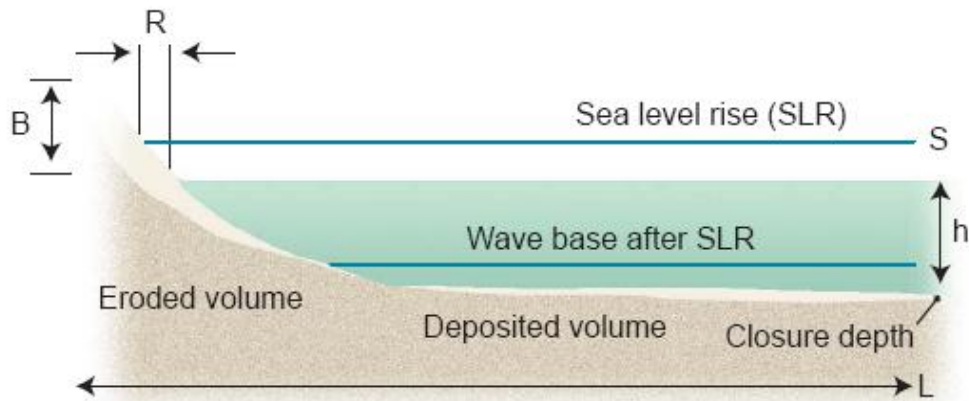


Figure 19 : Schéma de l'application de la loi de Bruun avec une translation verticale et vers la terre du profil d'équilibre à cause d'une élévation du niveau de la mer [source : Pilkey and Cooper, 2004].

• Avantages

La loi de Bruun est applicable aux petites échelles spatiales en raison du nombre limité de variables requises. La formule est simple à appliquer, dès lors que des données de pente de la plage sont disponibles.

• Inconvénients

Ce modèle a l'inconvénient de nécessiter des données bathymétriques et topographiques pour estimer la zone de transport des sédiments (L , B , h), ou de manière équivalente, la pente de la côte ($\tan \alpha$). La méthode requiert par ailleurs plusieurs hypothèses qui en limitent son application :

- le profil de la bathymétrie a toujours la même forme d'équilibre ;
- l'élévation du niveau marin engendre toujours un recul de trait de côte ;
- le bilan sédimentaire est supposé fermé entre la berme et la profondeur de fermeture, et il n'y a pas de transport sédimentaire au-delà de cette profondeur de fermeture, ni de changements de flux de transport *longshore*.

Cette formule est donc limitée aux zones sableuses et néglige les effets du transport *longshore*. En outre, la profondeur de fermeture -qui correspond à la limite du profil actif- reste une approximation. Les observations montrent que le transport sédimentaire pourrait s'étendre beaucoup plus loin, jusqu'à plusieurs kilomètres de la côte pendant les tempêtes (Wright *et al.*, 1991 ; Pilkey *et al.*, 1993). L'élévation du niveau marin est par ailleurs le seul processus qui soit pris en compte. Tous les autres forçages causant l'évolution des plages sont négligés.

Bien que Zhang *et al.* (2004) aient validé le modèle avec des observations sur la côte de New Jersey, plusieurs études (Pilkey et Davis, 1987 ; List *et al.*, 1997) ont démontré que cette méthode était en général trop simpliste pour expliquer les taux d'érosion mesurés. Le débat sur la validité est encore d'actualité : bien qu'une partie de la communauté scientifique ait démontré que les hypothèses ne sont pas valables (Cooper et Pilkey, 2004 ; Pilkey et Cooper, 2004), cette méthode est encore utilisée dans plusieurs études (e.g. EUROSION, 2004a ; Cowell, 2006 ; Snoussi *et al.*, 2009 ; Hinkel et Klein, 2009).

L'extrapolation des tendances historiques

Dans les régions pour lesquelles des observations du mouvement historique de trait de côte existent, Pilkey et Cooper (2004) ont suggéré qu'il était préférable d'abandonner la loi de Bruun et d'estimer l'évolution long terme du rivage avec une extrapolation des tendances historiques ($R_{\text{futur}} = R_{\text{historique}}$). Les tendances historiques sont estimées avec des observations du trait de côte (par exemple des photographies aériennes, des levés GPS, des levés Lidar), et la robustesse de l'estimation dépend de la quantité et de la qualité des données disponibles.

• Avantages

Cette méthode tient compte de tous les processus qui affectent le mouvement du trait de côte actuel. L'influence de la géologie, de la géomorphologie locale, du climat des vagues, de l'élévation du niveau marin actuel, du bilan sédimentaire et d'autres forçages importants sont implicitement intégrés dans les tendances historiques mesurées. L'application de cette méthode permet une évaluation à l'échelle locale, dépendant des observations disponibles.

• Inconvénients

Cette méthode comporte un inconvénient majeur : elle repose sur l'hypothèse implicite que les événements et les tendances historiques observés sont représentatifs de l'avenir. Cette méthode requiert par ailleurs un grand nombre de données à la fois spatiales et temporelles pour avoir des estimations robustes des tendances long terme (sans biais saisonniers, annuels, interannuels, etc.) en fonction de la localisation géographique.

L'extrapolation des tendances historiques avec un ajustement pour tenir compte de l'accélération de l'élévation du niveau marin

Il a été aussi recommandé dans le cadre du projet EUROSION (2004b) d'employer une méthode d'extrapolation des tendances historiques avec un ajustement pour tenir compte de l'accélération de l'élévation du niveau marin. Cette méthode est essentiellement la combinaison des deux méthodes précédentes : extrapolation des tendances historiques et l'application ($R_{\text{historique}}$) de la loi de Bruun utilisant l'augmentation du taux de l'élévation du niveau marin ($S_{\text{futur}} - S_{\text{historique}}$) :

$$R_{\text{futur}} = R_{\text{historique}} + (S_{\text{futur}} - S_{\text{historique}}) \frac{L_*}{P(B + h_*)},$$

où L est la largeur du profil actif, h_* la profondeur de fermeture, et P la proportion de sédiments érodés qui ont une taille suffisante pour pouvoir rester dans le profil actif des plages (Dean, 1991). Cette formule permet donc d'incorporer à la fois les effets dus à l'élévation du niveau marin (la loi de Bruun) et aux stocks sédimentaires (implicite dans le taux historique).

- **Avantages**

Cette méthode s'efforce de tenir compte des principaux processus responsables de l'érosion long-terme du trait de côte en combinant les observations historiques avec une loi de Bruun adaptée pour tenir compte de l'évolution des forçages dans le futur. Cette méthode convient pour une étude à l'échelle locale, tenant compte de la variabilité spatiale.

- **Inconvénients**

Cette méthode requiert un grand nombre de données spatiales et temporelles. Par ailleurs, la question de la validité de la loi de Bruun pour la prédiction de l'évolution long terme des plages continue à se poser.

Le « dire d'experts »

Hinton *et al.* (2007) estiment que les modèles actuels ne permettent pas de calculer l'érosion à long terme de manière satisfaisante. Compte tenu du manque de données nécessaire pour valider ces modèles, il est recommandé d'utiliser le « dire d'experts ». Il s'agit de rassembler un groupe d'experts pour identifier de manière qualitative les zones probablement érodées à l'horizon 2100 en s'appuyant sur leurs connaissances, leurs expériences antérieures, et l'ensemble des données et des prédictions disponibles réalisées avec les autres méthodes.

- **Avantages**

Le principal avantage de cette méthode est qu'elle permet d'obtenir des résultats réalistes avec un minimum de données quantitatives. Elle repose en effet essentiellement sur l'expérience des experts et leur connaissance du terrain.

- **Inconvénients**

Cette méthode donne néanmoins des résultats très subjectifs dans la mesure où le système et les données disponibles peuvent être interprétés de manière différente selon les experts. On peut ainsi s'attendre à obtenir des cartographies sensiblement différentes selon le choix qui est fait lors de la constitution du groupe d'experts.

4.5. MÉTHODE DE HIÉRARCHISATION DES INCERTITUDES

Les critères quantitatifs examinés dans les parties précédentes ne peuvent pas être comparés facilement entre eux. Une phase d'assimilation qualitative de ces informations est nécessaire.

Pour cette phase d'assimilation, nous utilisons la méthode « Analytical Hierarchy Process » (AHP) de Saaty (2008) qui présente notamment l'avantage de traduire une information qualitative ou seulement partiellement quantitative en information quantitative. Pour cela, on dispose d'une échelle numérique présentée dans le Tableau 7.

Par la suite, l'importance relative de chaque critère par rapport aux autres est évaluée. Ceci permet de remplir une matrice, à partir de laquelle est calculée la « priorité » de chaque critère. Il est alors possible d'effectuer une synthèse des priorités en effectuant une moyenne pondérée de ces critères. Enfin, un indice de cohérence du jugement est calculé : il permet d'évaluer si les jugements portés sont cohérents entre eux et doit être inférieur à 0,1 pour être satisfaisant.

Une description détaillée de la méthode AHP est donnée dans Saaty (2008) et dans l'annexe 4. L'application qui en est donnée ci-dessous suit les différentes étapes explicitées dans cette publication.

Cette méthode est un cadre de travail général qui peut être décliné pour un grand nombre d'applications très différentes : ici il s'agit de hiérarchiser d'importance que prennent tel ou tel phénomène en intégrant des informations semi-quantitatives. Dans d'autres cas, elle peut être utilisée en cartographie multicritère pour la cartographie de l'aléa ou du risque.

Importance	Définition	Explication
1	Importance égale	Les deux critères présentent des caractéristiques équivalentes
3	Un peu d'importance	L'expérience du jugement favorise légèrement un critère par rapport à un autre
5	Beaucoup d'importance	L'expérience favorise fortement un critère par rapport à un autre
7	Beaucoup plus d'importance	On constate en pratique qu'un critère est plus important qu'un autre
9	Importance Absolue	L'évidence montre qu'un critère est clairement favorisé par rapport à l'autre
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires	

Tableau 7 : Échelle numérique de Saaty.

4.6. RÉSUMÉ

L'objectif de ce projet est de quantifier et de hiérarchiser les incertitudes associées (1) au choix d'un scénario d'élévation du niveau marin, (2) au choix d'une hypothèse d'évolution long terme du trait de côte et (3) à l'utilisation des données altimétriques de résolution variable par des analyses de sensibilité. Les résultats seront utilisés pour proposer des améliorations de la méthode RNACC-1 (2009). Cette étude présente également une démonstration de sa mise en œuvre en Languedoc-Roussillon.

5. Analyse de sensibilité

5.1. ANALYSE DE SENSIBILITÉ AU CHOIX D'UNE HYPOTHÈSE D'ÉLÉVATION DU NIVEAU MARIN

Les incertitudes associées à la hausse du niveau marin ne permettent pas d'estimation précise à l'échelle régionale. Une analyse de sensibilité est donc menée pour évaluer les effets de l'élévation du niveau marin en déterminant les zones impactées par l'érosion et la submersion en considérant plusieurs scénarios d'élévation envisageables.

Les quatre scénarios proposés (0, 0,5, 1 et 1,5 m d'élévation du niveau marin) sont donc utilisés pour mener l'analyse de sensibilité. La méthode consiste à appliquer la loi de Bruun pour calculer l'érosion et évaluer les zones submergées grâce aux données topographiques Lidar.

5.1.1. L'évaluation de l'aléa érosion

Les zones considérées comme potentiellement érodées sont déterminées en appliquant la loi de Bruun sur le site d'étude (Figure 20). En utilisant la loi de Bruun, nous faisons implicitement l'hypothèse que c'est la disponibilité sédimentaire et non la présence d'ouvrages ou de mesures diverses de protection qui gouverne l'évolution du trait de côte à l'échelle du siècle. Nous rappelons également les réserves de Cooper et Pilkey (2004) sur la validité de cette loi.

Dans le cas particulier d'un niveau de la mer inchangé en 2100, le trait de côte est ici le même qu'à l'heure actuelle car la loi de Bruun ne tient pas compte des autres facteurs impliqués dans le déplacement du trait de côte.

Le recul du trait de côte croît linéairement avec l'élévation du niveau marin. Dans la zone d'étude, le recul moyen du trait de côte est environ 90 m par mètre d'élévation du niveau de la mer (Figure 21), avec un écart type de 22 m et une gamme de valeurs allant de 60 m jusqu'à 164 m, qui dépendent de la pente de la côte à l'échelle locale. Les surfaces des zones érodées, exprimées en surface érodée par mètre de linéaire côtier, sont les suivantes : 0 m²/m (pour 0 m d'élévation du niveau marin), 45 m²/m (pour 0,5 m), 87 m²/m (pour 1 m) et 130 m²/m (pour 1,5m).

Les courbes présentées dans la Figure 21 donnent une estimation des incertitudes liées aux scénarios d'élévation du niveau marin. Si on se réfère à la gamme de valeurs d'élévations du niveau marin présentées par Meehl *et al.* (2007) dans le rapport du GIEC (entre 0,18 et 0,6 m environ, selon les 6 scénarios d'émissions), le recul du trait de côte est de l'ordre de 40 m en moyenne, avec un écart type de 10 m.

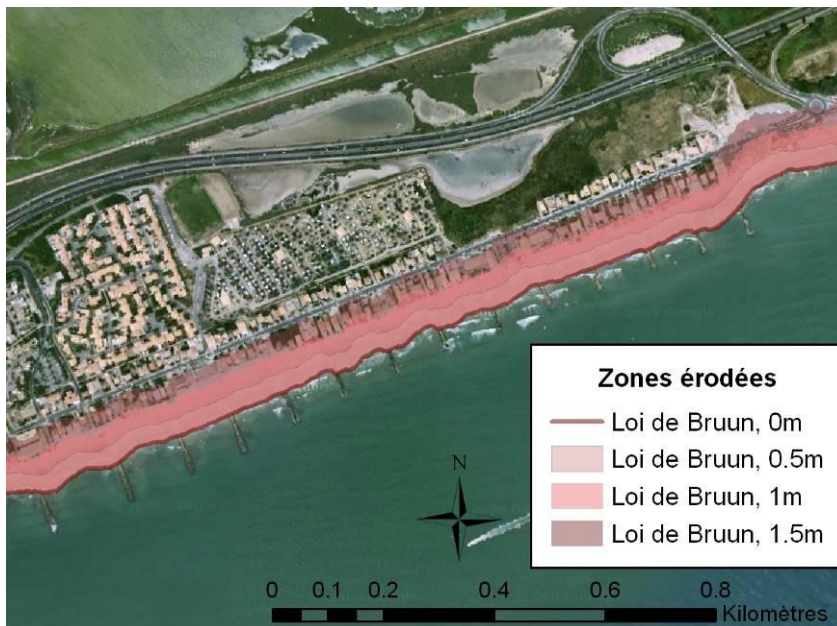


Figure 20 : Exemple des zones potentiellement érodées à Carnon plage, suivant l'application de la loi de Bruun pour estimer le recul du trait de côte avec 4 scénarios différents d'élévation du niveau marin.

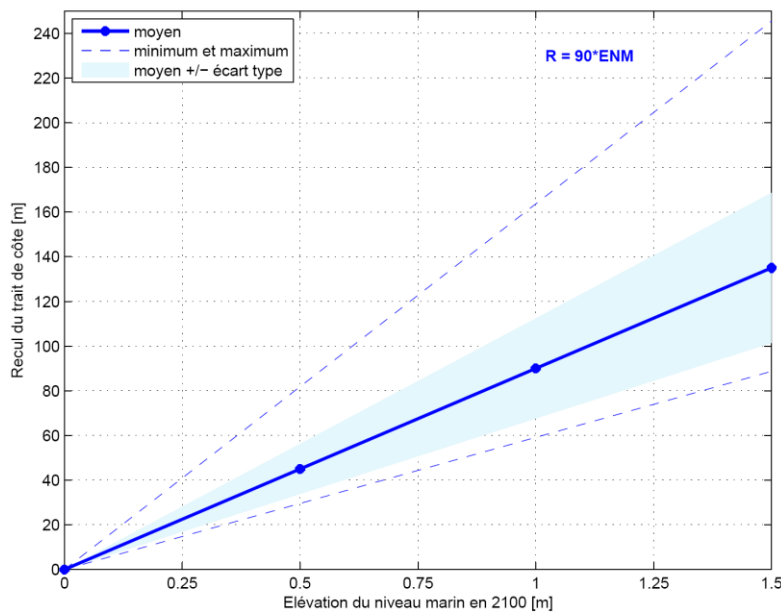


Figure 21: Moyenne, écart type, minimum et maximum du recul du trait de côte le long la zone d'étude en appliquant la loi de Bruun.

Le recul du trait de côte étant proportionnel à l'élévation du niveau marin (il s'élève en moyenne à 90 m par mètre d'élévation du niveau marin en 2100), donc on peut présenter les résultats par des courbes continues plutôt que par des valeurs ponctuelles.

5.1.2. L'évaluation de l'aléa submersion

La localisation des zones submergées dépend des hypothèses d'élévation du niveau marin. Les zones affectées par chaque aléa sont présentées dans le Tableau 8 pour les 4 scénarios considérés. La zone de submersion permanente correspond à la région se trouvant sous le niveau de l'eau en 2100 (ex : sous 1m NGF dans le cas d'une élévation du niveau de la mer de 1 m). Les zones de submersion temporaire dues à un événement décennal ou centennal correspondent aux terres situées à moins d'un mètre et moins de 2 m respectivement au-dessus du niveau de submersion permanente.

Élévation du niveau marin	Submersion permanente	Submersion temporaire, événement décennal	Submersion temporaire, événement centennal
0 m	-	0 à +1 m NGF	+0 à +2 m NGF
0,5 m	0 à +0,5 m NGF	+0,5 à +1,5 m NGF	+0,5 à +2,5 m NGF
1 m	0 à +1 m NGF	+1 à +2 m NGF	+1 à +3 m NGF
1,5 m	0 à +1,5 m NGF	+1,5 à +2,5 m NGF	+1,5 à +3,5 m NGF

Tableau 8 : Gammes d'altitude qui délimitent les zones de submersion permanente et temporaire pour chacun des scénarios d'élévation du niveau marin.

Les résultats présentés sont les surfaces impactées, sans tenir compte du fait que l'intersection entre zones érodées et zones submergées n'est pas nulle. Les résultats sont présentés dans le Tableau 9 et la Figure 22. Rappelons qu'ils ne portent que sur la zone d'étude pour lesquels on a des données Lidar disponibles. On ne tient pas compte notamment de certaines zones basses dans les étangs, qui devraient pourtant être affectés par la submersion.

Élévation du niveau marin	Submersion permanente	Submersion temporaire, événement décennal	Submersion temporaire, événement centennal
0 m	0 km ² (0 %)	4,3 km ² (13,8 %)	7,8 km ² (11,2 %)
0,5 m	2,2 km ² (7,0 %)	3,4 km ² (10,8 %)	5,4 km ² (6,3 %)
1 m	3,5 km ² (11,3 %)	2,5 km ² (7,9 %)	3,5 km ² (3,1 %)
1,5 m	4,3 km ² (13,8 %)	1,3 km ² (4,0 %)	1,7 km ² (1,3 %)

Tableau 9 : Surfaces impactées par la submersion permanente et la submersion temporaire générée par un événement décennal et centennal.
(les surfaces affectées par l'érosion sont soustraites)

Il faut noter que la limite nord de l'acquisition Lidar ne permet pas d'évaluer la limite réelle de la submersion. Ceci se traduit par un effet de seuil dans l'évaluation des surfaces qui est visible dans la Figure 22.

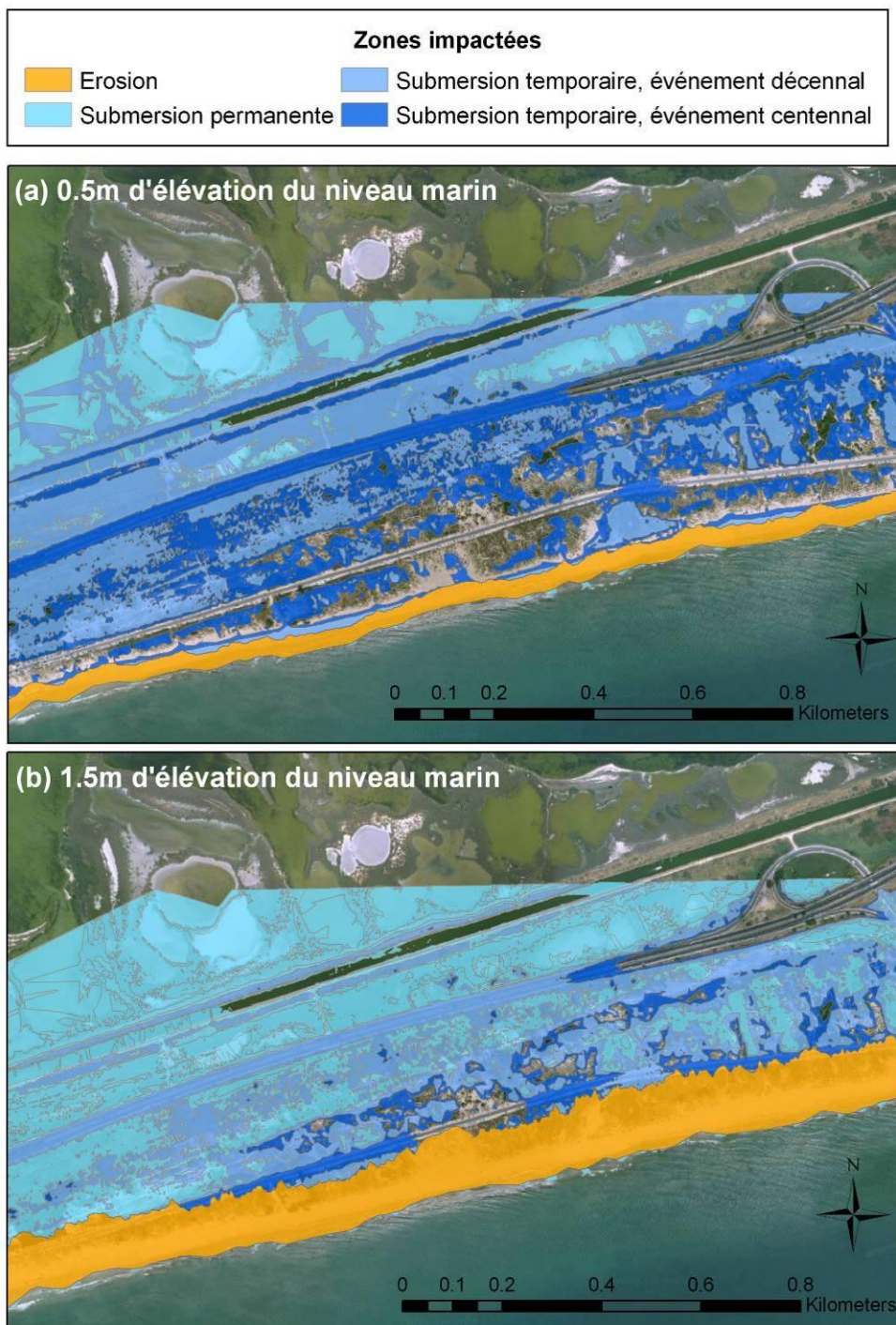


Figure 22 : Exemple de surfaces impactées par les aléas érosion et submersion permanente et temporaire (à cause d'un événement décennal et un événement centennal) entre Palavas-les-Flots et La Grande Motte, en utilisant les scénarios d'élévation du niveau marin de (a) 0,5 m et (b) 1,5 m.

La Figure 22 montre que les différences obtenues entre deux scénarios d'élévation du niveau marin peuvent être importantes. Elles sont ici caractérisées par une forte augmentation des zones érodées et des zones affectées par la submersion permanente dans le cas d'une élévation de 1,5 m par rapport à une élévation de 0,5 m du niveau de la mer. Les surfaces affectées uniquement par les submersions temporaires diminuent donc du fait de la topographie et parce que la surface de la zone d'étude est limitée. Pour compléter cette étude, il faudrait donc disposer de données topographiques précises couvrant par exemple toute la zone de Languedoc-Roussillon entre 0 m NGF et 5 m NGF, ce qui est une perspective qu'offre le programme SHOM/IGN Litto3D.

Une manière d'évaluer les effets de la spécificité topographique de la zone d'étude est d'estimer la différence entre les surfaces submergées selon les scénarios d'élévation du niveau marin. Par exemple, en utilisant des scénarios pour lesquels l'élévation est comprise entre 0 et 1,5 m, on obtient des zones submergées dont la surface varie de 0 à 2 m d'altitude et 0 à 3,5 m d'altitude respectivement. La Figure 23 montre comment la zone d'étude est progressivement affectée par l'aléa de submersion en fonction des différentes hypothèses d'élévation du niveau marin.

On évalue l'influence de la spécificité de la topographie de la manière suivante : dans le cas d'une topographie représentant une pente constante et un trait de côte rectiligne, la submersion suit linéairement l'élévation du niveau marin. Dans le cas présent, la Figure 23 montre qu'il ne s'agit pas d'une régression linéaire. Ceci est dû d'une part à la spécificité de la topographie de la zone étudiée, d'autre part à ses limites géographiques (fixées par l'emprise du Lidar) qui n'incluent pas la totalité des zones potentiellement submergées vers l'arrière-pays.

Si on en reste à une approximation linéaire et à des élévations du niveau marin entre 0,3 et 1,0 m d'élévation du niveau marin pour cet exemple, 0,1 m d'élévation du niveau marin se traduit par une surface totale submergée augmentée d'approximativement 0,1 km².

Le même type d'analyse pourrait être fait pour chaque type de submersion : en utilisant les scénarios entre 0 et 1,5 m d'élévation du niveau marin pour estimer les surfaces submergées, 0,1 m d'élévation du niveau marin cause :

- une augmentation de la surface impactée par la submersion permanente d'environ 0,4 km² ;
- une diminution de la surface impactée par la submersion temporaire causée par un événement décennale d'environ 0,1 km² ;
- et une diminution de la surface impactée par la submersion temporaire causée par un événement centennale d'environ 0,2 km² .

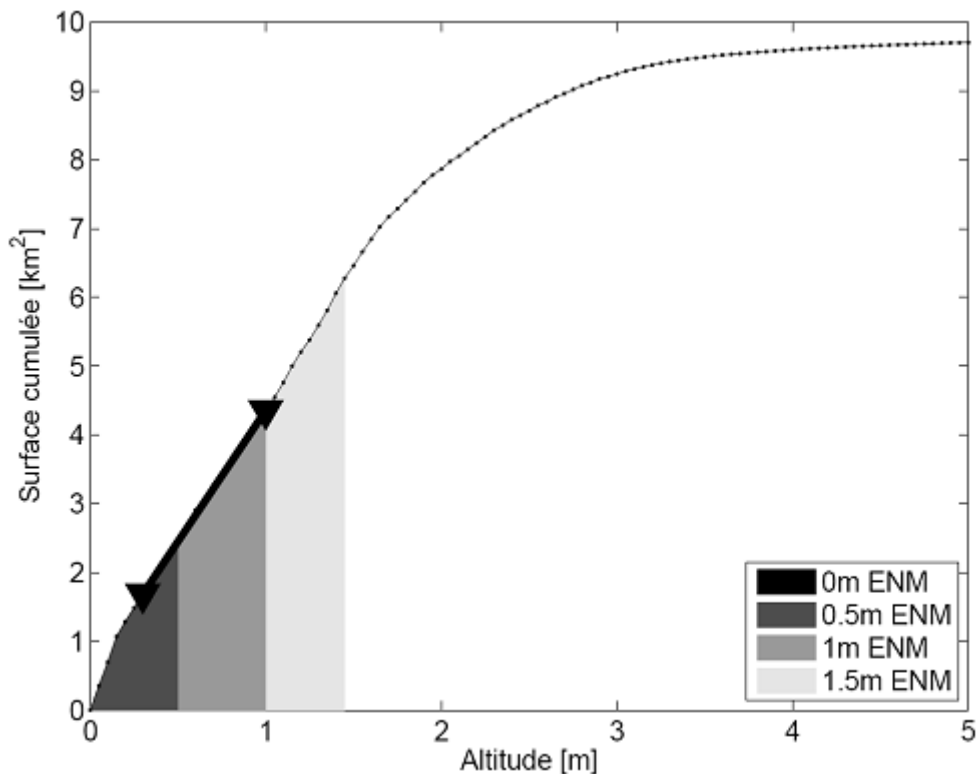


Figure 23 : Surface cumulée de la zone submergée du site d'étude en fonction de l'altitude. Cette courbe est utilisée pour estimer l'augmentation moyenne des surfaces submergées suivant les différents scénarios d'élévation du niveau marin.

Il faut retenir de cette approche que l'étude menée ici peut être reproduite sur d'autres sites pour lesquels on chercherait à évaluer dans quelle mesure une élévation du niveau marin se traduit par davantage de zones submergées ou si la topographie introduit des effets de seuils. La limite de l'approche présentée ici est que la zone du levé Lidar de 2007 n'est pas étendue suffisamment vers l'arrière-pays et ne permet pas une évaluation complète des surfaces submergées. La seconde limite est le caractère simpliste de la modélisation de la submersion, qui revient à considérer la mer comme un plan d'eau alors que les différents processus (surcotes atmosphérique, setup, jet de rive) devraient être modélisés.

5.1.3. Estimation des impacts potentiels

Les distributions des types d'occupation du sol

Les distributions des type d'occupation du sol des surfaces affectées par l'érosion et la submersion sont variés (Figure 24). Dans cette figure, les lagunes potentiellement affectées sont présentées. L'érosion affecte plutôt les plages mais aussi les zones urbanisées qui sont localisées près de la côte. Les zones affectées par la submersion permanente sont des marais maritimes et des zones urbanisées. Du fait de l'emprise trop réduite de la couverture Lidar, la surface totale affectée par la submersion

temporaire diminue avec l'augmentation du niveau marin (certaines zones deviennent érodées ou submergées de manière permanente). Cependant, le pourcentage des zones urbanisées potentiellement affectées augmente pour la zone d'étude considérée.

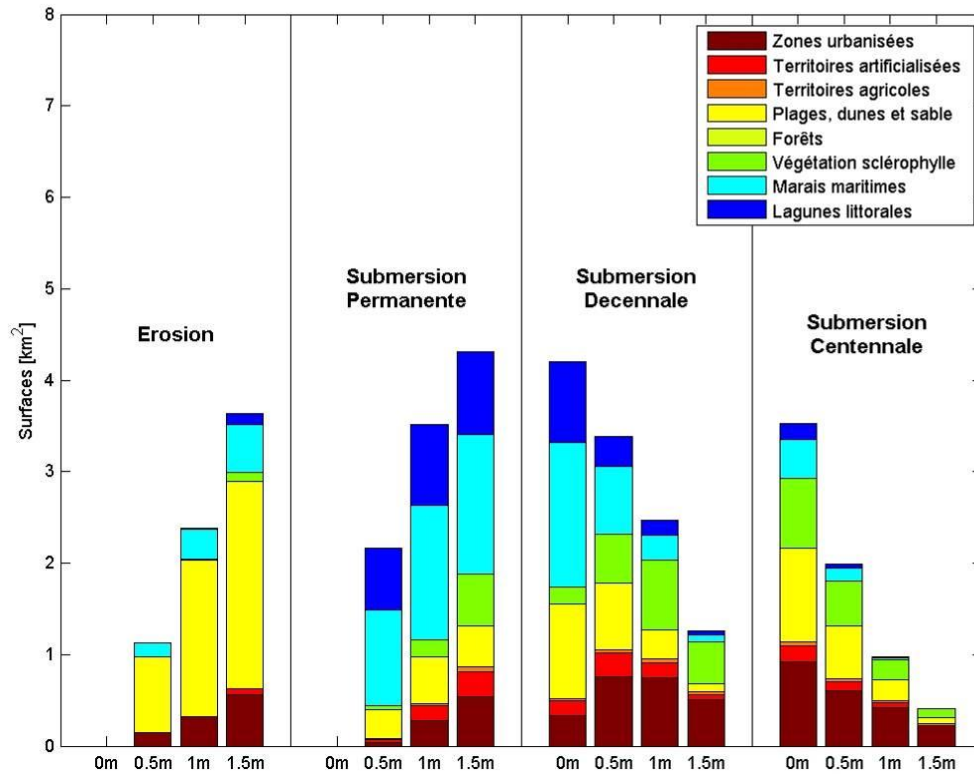


Figure 24 : Distributions des types d'occupation du sol des zones affectées par l'érosion et la submersion permanente et temporaire, selon les 4 scénarios d'élévation du niveau marin.

Domages potentiels aux bâtiments

Le Tableau 10 présente le nombre de bâtiments potentiellement affectés par les différents aléas selon l'hypothèse d'élévation du niveau marin choisie.

Hypothèse d'élévation du niveau marin choisie	Nombre de bâtiments inclus dans la zone concernée par :			
	l'érosion	la submersion permanente	la submersion temporaire décennale	la submersion temporaire centennale*
0m	0	0	780	2 189
0,5 m	128	8	2 148	1 391
1 m	710	637	1 812	1 019
1,5 m	1 426	1 525	881	403

Tableau 10 : Nombre de bâtiments potentiellement affectés selon les hypothèses d'élévation du niveau marin (Données BD Topo Pays).

*par convention, les bâtiments dénombrés dans cette colonne excluent ceux qui sont contenus dans la zone concernée par la submersion temporaire décennale.

5.1.4. Analyse des résultats

L'élévation du niveau marin induit une augmentation des surfaces impactées par la submersion, notamment la submersion permanente. Ces surfaces n'augmentent pas de manière proportionnelle avec l'élévation du niveau marin en raison des effets de la topographie locale. Nous constatons que le choix d'une hypothèse d'élévation du niveau marin est effectivement une source d'incertitudes importantes qui se traduirait par une marge d'erreurs de l'ordre d'un facteur 6 sur l'évaluation du coût des dommages.

5.2. ANALYSE DE SENSIBILITÉ À LA QUALITÉ D'UN MNT

Nous avons vu qu'il était important de disposer d'informations précises sur l'augmentation du niveau marin pour identifier les zones exposées aux aléas érosion et submersion du fait du changement climatique. Dans cette partie, nous allons à présent évaluer les incertitudes associées aux données altimétriques. On s'attend en effet à ce que la résolution horizontale et verticale des données altimétriques aient une influence non négligeable dans le processus d'identification et de cartographie des zones impactées par le changement climatique.

Nous allons dans un premier temps évaluer la précision et la justesse du MNT, d'une manière générale, puis en fonction de l'occupation du sol. Dans un deuxième temps, nous allons une fois de plus mener une analyse de sensibilité, en comparant cette fois les résultats obtenus avec plusieurs jeux de données altimétriques. Nous nous limiterons à un scénario de changement climatique et une méthode d'évaluation de l'érosion causée par l'élévation du niveau marin.

5.2.1. Précision et justesse des données altimétriques et évaluation de la pertinence de MNT

L'analyse statistique montre des différences significatives entre les MNT de l'IGN et d'Intermap par rapport aux données Lidar sur l'ensemble de la zone (Tableau 11).

<i>Critères de précision et d'exactitude</i>	<i>MNT IGN</i>	<i>MNT Intermap</i>
Z RMSE	1,27 m	0,64 m
Z biais	0,16 m	0,12 m
Z écart type, σ	1,26 m	0,64 m
Z précision, 3σ	3,79 m	1,91 m

Tableau 11 : Résultats de l'analyse statistique (RMSE, biais, écart type des erreurs, et précision) caractérisant les différences entre les MNT de l'IGN et d'Intermap par rapport au MNT Lidar.

Le MNT d'Intermap est meilleur que le MNT de l'IGN pour l'ensemble des critères statistiques y compris le biais (Tableau 11). Le MNT de l'IGN a tendance à surestimer les altitudes par rapport aux données Lidar, tandis que celui d'Intermap tend à les sous-estimer.

La Figure 25 et la Figure 26 illustrent les différences entre les MNT en fonction de la gamme d'altitude. Pour le MNT de l'IGN, la majorité des altitudes basses de 0 ou +1 m NGF sont surestimées, alors que les altitudes de plus de +2 m NGF sont sous-estimées. La dispersion des données a par ailleurs tendance à augmenter avec l'altitude, en particulier entre +4 et +7 m NGF. La qualité des données de l'IGN est donc meilleure pour les zones comprises entre 0 et +1 m NGF que pour les altitudes supérieures.

Le MNT d'Intermap présente une augmentation du biais entre +3 et +5 m NGF et une légère augmentation de l'écart type pour les altitudes de plus de +3 m NGF. La qualité des données d'Intermap est donc elle aussi un peu meilleure pour les zones basses (entre 0 et +2 m NGF).

Les raisons de l'augmentation du biais et de l'écart type avec l'altitude restent à déterminer. Elles pourraient être liées à la conversion MNE-MNT dans les zones affectées par des obstructions du signal par les bâtiments et la végétation.

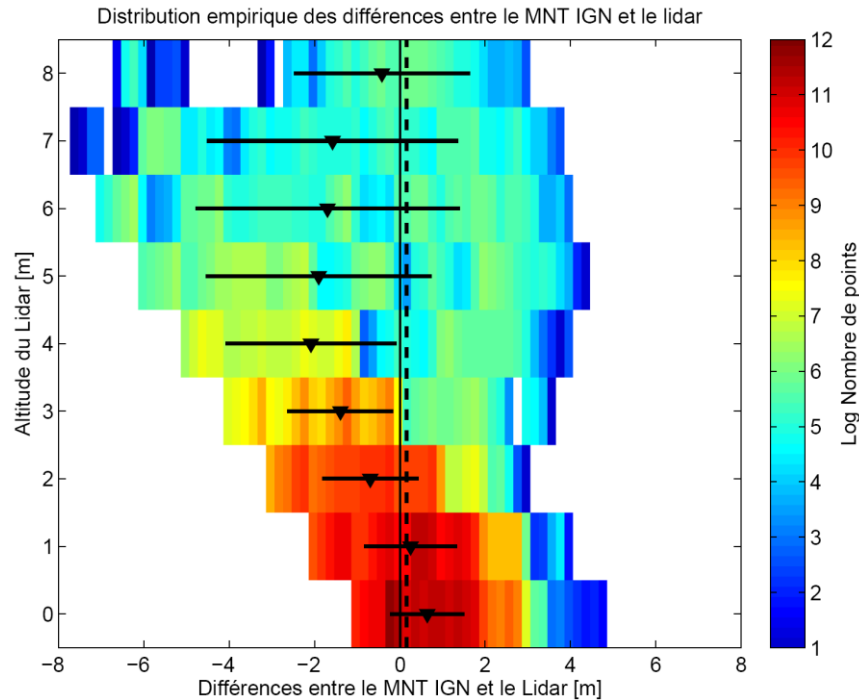


Figure 25 : Distributions empiriques des différences entre le MNT de l'IGN et le MNT Lidar, en fonction de l'altitude des données Lidar.

Les triangles et les lignes horizontales indiquent le biais et l'écart type par gamme d'altitude respectivement. La ligne verticale en pointillés indique le biais calculé pour toute la distribution (Tableau 11) et la ligne verticale solide les points de différence nulle.

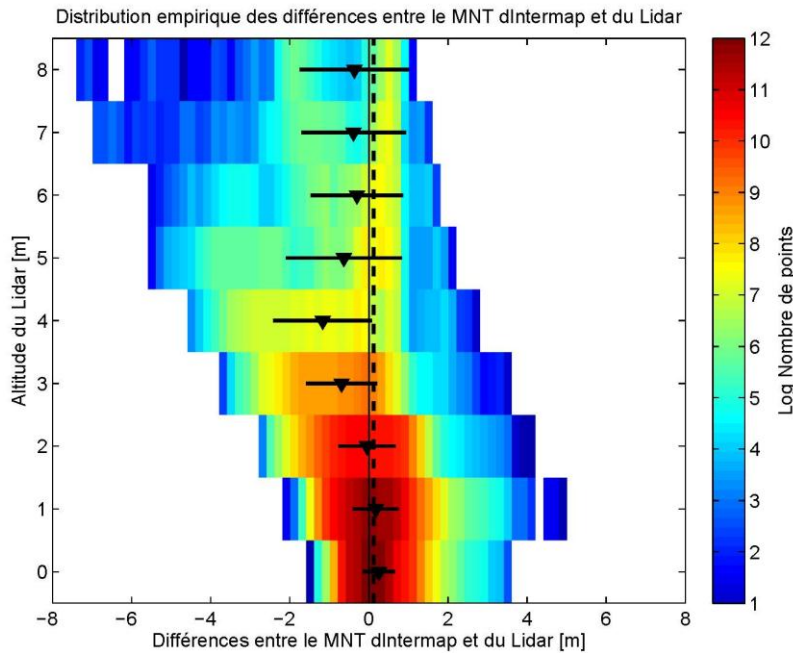


Figure 26 : Même format que la Figure 25, pour les données d'Intermap.

5.2.2. Incertitudes liées à la conversion d'un MNE en MNT

Il peut y avoir certaines zones pour lesquelles la conversion du MNE en MNT a détérioré la qualité des données. Ce serait le cas typiquement pour les zones urbanisées et fortement végétalisées.

Pour déterminer si c'est le cas et afin de minimiser les impacts liés à ces traitements, nous avons découpé la zone d'étude en plusieurs régions en fonction de l'occupation du sol, et nous avons refait l'analyse précédente de manière indépendante pour chacune d'entre elles.

Le découpage a été réalisé en utilisant les données Corine Land Cover 2000. Celles-ci ont été tout d'abord traitées pour découper la zone d'étude en trois régions : les zones urbanisées, les eaux maritimes, et les zones naturelles. Ces dernières regroupent les espaces verts artificiels, les cultures permanentes, les forêts, la végétation arbustive et/ou herbacée, ainsi que les espaces ouverts faible végétation et zones humides maritimes. Un sous-zonage a été fait par la suite pour distinguer les espaces verts avec faible végétation des « zones naturelles ». Ceci a permis de réaliser un dernier test dans une zone très peu bâtie et végétalisée, pour laquelle la conversion du MNE au MNT a eu peu d'impact sur les données. Le zonage est représenté dans la Figure 27.

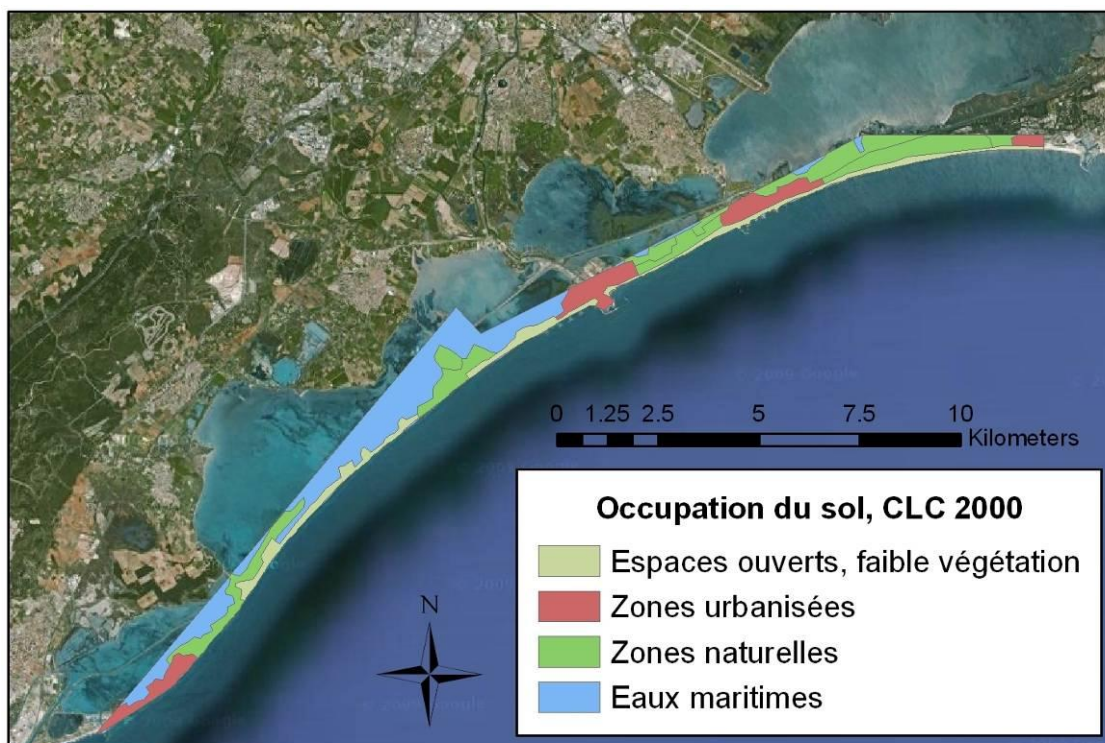


Figure 27 : Zonage réalisé à partir des données Corine LandCover pour faire l'analyse des incertitudes sur les données altimétriques en fonction de l'occupation du sol.

L'analyse statistique des données altimétriques n'est réalisée que dans les zones urbanisées et « naturelles ». La comparaison n'est pas possible en effet pour les zones d'eaux maritimes : les données Lidar indiquent l'altitude du fond des étangs et la bathymétrie sous-marine, les données d'Intermap mesurent le niveau instantané de l'eau (avec tous les effets météorologiques et les vagues), tandis que les données de l'IGN sont fixées à 0m NGF.

Les résultats de l'analyse statistique montrent des différences entre les zones urbanisées et naturelles. Contrairement aux attentes, les MNT semblent de meilleure qualité dans les zones urbanisées que dans les zones naturelles, en incluant les zones d'espaces ouverts avec faible végétation pour les critères de précision. En revanche, les biais sont effectivement plus faibles dans les espaces ouverts. L'hypothèse selon laquelle les données seraient meilleures dans les zones sans bâtiments et autres types d'obstructions n'est donc pas pleinement vérifiée. On constate par ailleurs que les espaces ouverts avec faible végétation donnent des résultats assez similaires à ceux des zones naturelles, à l'exception de l'augmentation significative du biais avec le MNT de l'IGN. D'une manière générale, les résultats ne varient pas de manière significative (sauf le biais), et ce d'autant plus qu'on ne peut pas attribuer le même degré de confiance à tous ces résultats en raison de la différence de nombre de points dans chaque zone.

Cette analyse repose sur l'hypothèse que les données Lidar constituent une bonne référence, ce que nous recommandons de discuter dans une notice technique des

données Lidar lors d'un prochain levé, dans la mesure où ce sont précisément ces données qui nécessitent le plus de traitement pour passer du MNE au MNT. En d'autres termes, il serait nécessaire de disposer d'une analyse de la qualité de ces données réalisée à partir d'une référence telle que des levés GPS.

Les MNT	IGN			Intermap		
Zonage des MNT	Zones urbanisées	Zones naturelles	Espaces ouverts, faible végétation	Zones urbanisées	Zones naturelles	Espaces ouverts, faible végétation
Z RMSE	1,23 m	1,39 m	1,38 m	0,65 m	0,70 m	0,70 m
Z biais	0,39 m	0,10 m	-0,73 m	0,42 m	0,13 m	0,08 m
Z écart type, σ	1,16 m	1,39 m	1,17 m	0,49 m	0,69 m	0,69 m
Z précision, 3σ	3,49 m	4,17 m	3,51 m	1,48 m	2,06 m	2,06 m

Tableau 12 : Résultats des analyses statistiques (RMSE, biais, écart type des erreurs et précision) caractérisant les différences entre le MNT de l'IGN et celui d'Intermap par rapport au MNT Lidar, pour chacune des zones d'occupation des sols.

Les meilleurs résultats obtenus en termes d'erreur et de précision sont indiqués en gras pour chaque MNT.

En définitive, nous pouvons tirer de cette analyse la conclusion que les différences entre les trois MNT ne sont pas liées uniquement aux traitements effectués pour passer du MNE au MNT.

5.2.3. Incertitudes liées à l'utilisation des données Lidar comme référence

Dans cette étude, le manque de données fiables n'a pas permis de réaliser une comparaison des trois types de MNT par rapport à de « vraies » valeurs de référence.

Le MNT Lidar est celui considéré comme le plus précis et juste parmi les trois disponibles. Il a donc été utilisé comme référence pour évaluer la qualité des MNT de l'IGN et d'Intermap. Mais le MNT Lidar contient aussi des sources d'incertitudes qui pourraient fausser en partie les résultats de l'analyse statistique menée pour les autres MNT :

- le MNT Lidar est aussi un produit d'une conversion d'un MNE en MNT, et cette conversion pourrait apporter des erreurs, de la même façon que pour les MNT de l'IGN et d'Intermap ;
- le MNT est un produit de données espacées de manière inhomogène, qui ont été maillées avec un pas de 2 m. Ceci induit des incertitudes liées aux « footprint », à la résolution des observations brutes, et au lissage des données pour le maillage ;
- les données brutes du Lidar nécessitent un traitement important pour les rectifier géographiquement et corriger leurs biais altimétriques. Nous n'avons pas eu accès au protocole de ce traitement.

En l'absence de données GPS permettant de faire une évaluation quantitative des incertitudes du MNT Lidar. Il faut donc garder en mémoire que toutes les analyses statistiques menées dans cette étude pour estimer la qualité des MNT de l'IGN et d'Intermap sont relatives au MNT Lidar, qui introduit lui aussi des incertitudes, même si elles sont supposées très petites. Il s'agit donc de comparaisons relatives, mais qui

nous semblent suffire dans cette étude pour évaluer les différences entre les trois types de MNT ainsi que les incertitudes associées.

Nous recommandons, pour un prochain levé, de mettre à disposition des utilisateurs de données Lidar une notice technique détaillée examinant la qualité de ces données (a-minima précision, exactitude, mais éventuellement autres critères) en prenant comme référence des données de GPS ou de nivellement. Ceci devrait être fait sur des zones représentatives de chaque profil d'utilisateur (exemple : des zones basses côtières représentatives pour l'étude des submersions marines).

5.2.4. Incertitudes induites par le choix d'un MNT pour l'évaluation des aléas érosion et submersion

L'analyse de sensibilité à la précision des données altimétriques doit être faite indépendamment des autres analyses de sensibilité. On choisit donc de partir d'un scénario d'élévation du niveau marin de 1 m et d'appliquer la loi de Bruun pour estimer l'évolution à long terme du trait de côte (section 4.2.5). L'évaluation des aléas érosion et submersion est effectuée avec les trois MNT de l'IGN, d'Intermap et Lidar. Dans l'analyse, les données altimétriques des MNT sont utilisées dans trois étapes :

- pour identifier la position actuelle du trait de côte,
- pour estimer les zones concernées par l'érosion avec l'application de la loi de Bruun (on a besoin des données topographiques et altimétriques pour le calcul de la pente de côte (entre la berme et la profondeur de fermeture)),
- et pour délimiter les zones affectées par la submersion avec les niveaux de hauteur de l'eau.

L'impact du choix de ces trois MNT est discuté pour chacune de ces étapes. On comparera ensuite les résultats en termes de surfaces concernées, de distributions d'occupation des sols et de dénombrement des bâtiments impactés.

5.2.5. Influence du choix du MNT sur l'identification du trait de côte

La première étape de l'identification des zones côtières affectées par les aléas érosion et submersion est de déterminer le positionnement du trait de côte actuel.

Pour quantifier les différences entre les différentes positions du trait de côte, on fait une analyse statistique pour calculer la moyenne et l'écart type (Tableau 13) ainsi que les distributions empiriques (Figure 28 et Figure 29) des différences entre le trait de côte défini à partir des données Lidar et celui obtenu à partir des MNT de l'IGN et d'Intermap.

Les résultats (Tableau 13) montrent que les positions des traits de côte issue des données de l'IGN, d'Intermap et d'Histolitt le long de la zone d'étude sont en moyenne plus décalées vers l'intérieur des terres que les données Lidar. À l'inverse, la position du trait de côte de la base de données CLC06 est en moyenne décalée côté océan. Cette différence est importante pour l'estimation des zones érodées et submergées :

- dans les zones où le trait de côte issu de CLC06 est davantage décalé vers l'océan que les traits de côtes issus des MNT, les zones d'érosion et de submersion pourraient affecter des surfaces classifiées comme mers et océans ;
- dans les zones où le trait de côte issu de CLC06 est davantage décalé vers l'intérieur des terres que les traits de côtes issus des MNT, les zones évoluées en accrétion pourraient contenir des surfaces classifiées comme terrestres (ex : les zones urbanisées, les plages, dunes et sable, etc.).

Source de données	Biais moyen	Ecart type des différences
courbe à 0 m du MNT de l'IGN	-56 m	32 m
courbe à 0 m du MNT d'Intermap	-6 m	20 m
Corine Land Cover 2006	8 m	24 m
Histolitt	-2 m	27 m

Tableau 13 : Biais moyen et écart type des différences entre le trait de côte défini avec le MNT Lidar et les trait de côte définis avec les MNT de l'IGN et d'Intermap, ainsi que ceux donnés par Corine Land Cover 2006 et Histolitt.

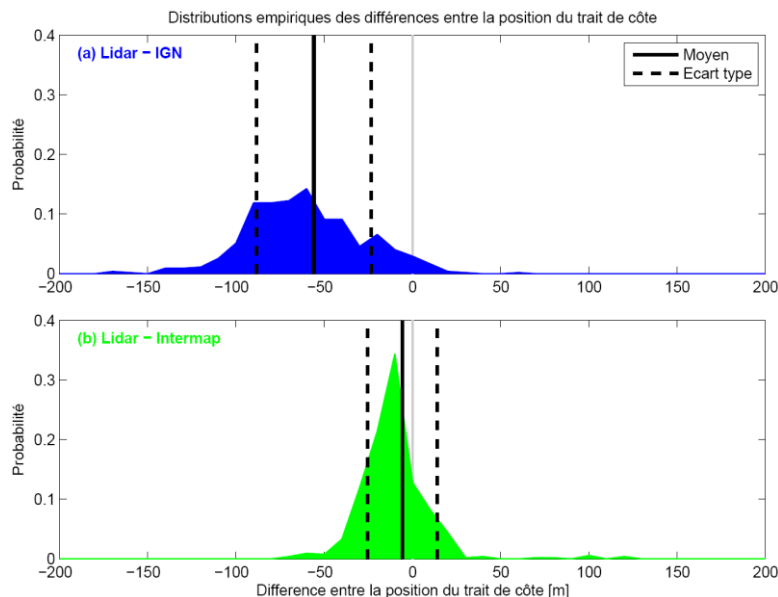


Figure 28 : Distributions empiriques de la différence entre la position du trait de côte définie par les données Lidar et par les données (a) de l'IGN et (b) d'Intermap.

Les différences positives indiquent que le trait de côte défini avec les données de l'IGN ou d'Intermap est décalé vers la mer par rapport aux données Lidar. Les différences négatives indiquent à l'inverse que le trait de côte est décalé vers l'intérieur des terres.

Les distributions des écarts entre le trait de côte défini par les données Lidar et ceux définis par les MNT de l'IGN et d'Intermap (Figure 28) montrent que le trait de côte d'Intermap est beaucoup plus proche de celui donné par le Lidar que le trait de côte de l'IGN. Les différences entre le trait de côte Lidar et ceux de CLC06 et d'Histolitt donnent quant à eux des résultats moins bons que les données Intermap mais meilleurs que ceux de l'IGN.

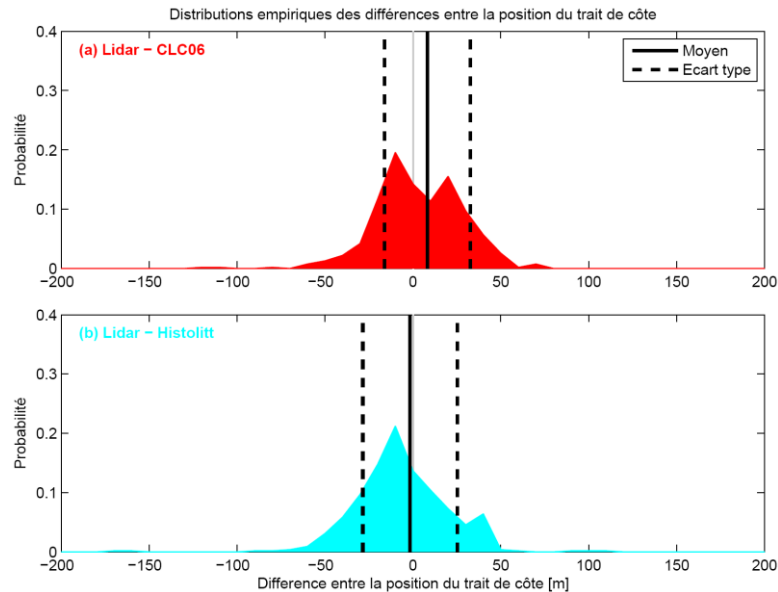


Figure 29 : Distributions empiriques de la différence entre la position du trait de côte définie par les données Lidar et par les données (a) de Corine Land Cover 2006 (CLC06) et (b) d’Histolitt (même format que la Figure 28).

5.2.6. Influence du choix du MNT sur l'évaluation de l'aléa érosion

L'application de la loi de Bruun permet d'estimer le recul du trait de côte en 2100 causé par une élévation du niveau marin de 1 m à partir de la pente de la côte entre la berme et l'isobathe 10 m. La position géographique de la berme est définie manuellement. On en déduit la hauteur de la berme pour les trois MNT. La position correspondant à la profondeur de fermeture est donnée par l'isobathe 10 m. Dans le cas des MNT de l'IGN et d'Intermap, pour lesquels il n'existe pas de données bathymétriques, on se sert des données du SHOM (les limites liées à l'utilisation de ces données sont exposées en chapitre 3.2.4).

MNT	Pente de la côte		Recul du trait de côte avec 1 m d'élévation du niveau marin	
	moyenne	écart type	moyenne	écart type
MNT de l'IGN	0,0067	0,0017	160 m	47 m
MNT d'Intermap	0,0075	0,0021	145 m	46 m
MNT Lidar	0,0117	0,0025	90 m	22 m

Tableau 14 : Moyenne et écart type de la pente de la côte entre la berme et la profondeur de fermeture (supposée correspondre à l'isobathe 10 m) et du recul du trait de côte calculé en appliquant la loi de Bruun avec 1 m d'élévation du niveau marin.

La pente calculée pour appliquer la loi de Bruun varie le long du linéaire côtier en fonction de l'altitude de la berme et de la position de l'isobathe 10 m. La valeur moyenne et l'écart type calculés pour chaque MNT sont présentés dans le Tableau 14. On y trouvera par ailleurs la moyenne et l'écart type du recul de trait de côte.

5.2.7. Influence du choix du MNT sur l'évaluation de l'aléa submersion

Les surfaces submergées sont estimées à partir des trois MNT et en considérant une élévation du niveau marin de 1 m. On distinguera cette fois encore la submersion permanente (entre 0 et +1 m), la submersion temporaire avec une occurrence décennale (entre +1 et +2 m), et la submersion temporaire avec une occurrence centennale (entre +2 et +3 m). Les zones affectées par l'érosion ne sont pas comptabilisées comme zones submergées.

5.2.8. Mise en œuvre de l'évaluation des surfaces érodées et submergées

Les surfaces érodées sont calculées le long de la zone d'étude à partir de la loi de Bruun. La Figure 30 montre un exemple de surfaces érodées le long le lido au niveau de l'étang de Vic. Dans cet exemple, le trait de côte Lidar est en général plus décalé vers la mer que les deux autres traits de côtes, et les zones d'érosion sont plus larges (la pente est plus faible) avec les MNT de l'IGN et d'Intermap (Figure 30). La surface affectée par le recul du trait de côte varie donc selon les cas. Les différences entre les zones d'érosion obtenues sont variables elles aussi le long la côte. Pour la totalité de la zone d'étude, les surfaces affectées par l'érosion varie entre 2,6 et 4,3 km² environ selon le MNT utilisé (Tableau 15).

Les différences entre les surfaces affectées par la submersion permanente (entre 7 et 23 % environ selon le MNT utilisé, voir Tableau 15), sont plus marquées que pour les surfaces érodées (Figure 31). La différence est principalement liée à la résolution planimétrique et au pas d'un mètre en vertical du MNT de l'IGN. Les différences sont moins importantes pour les zones de submersion temporaire.

Données altimétriques	Érosion	Submersion permanente	Submersion temporaire, événement décennal	Submersion temporaire, événement centennal
MNT de l'IGN	4,3 km ²	7,4 km ²	2,7 km ²	2,8 km ²
MNT d'Intermap	4,2 km ²	2,0 km ²	1,9 km ²	1,1 km ²
MNT Lidar	2,6 km ²	3,6 km ²	2,5 km ²	0,99 km ²

Tableau 15 : Estimation du pourcentage de surfaces impactées par les aléas érosion et submersion (permanente et temporaire) à l'horizon 2100 avec une élévation du niveau de la mer de 1 m et l'application de la loi de Bruun pour estimer l'évolution long terme du trait de côte.

Les différences entre le MNT d'Intermap et le MNT Lidar sont davantage liées aux différences de précision et au biais entre les deux types de levés. Notons par ailleurs que le MNT d'Intermap inclut les ouvrages de protection (ex. Figure 31), ce qui n'est pas le cas pour le Lidar.

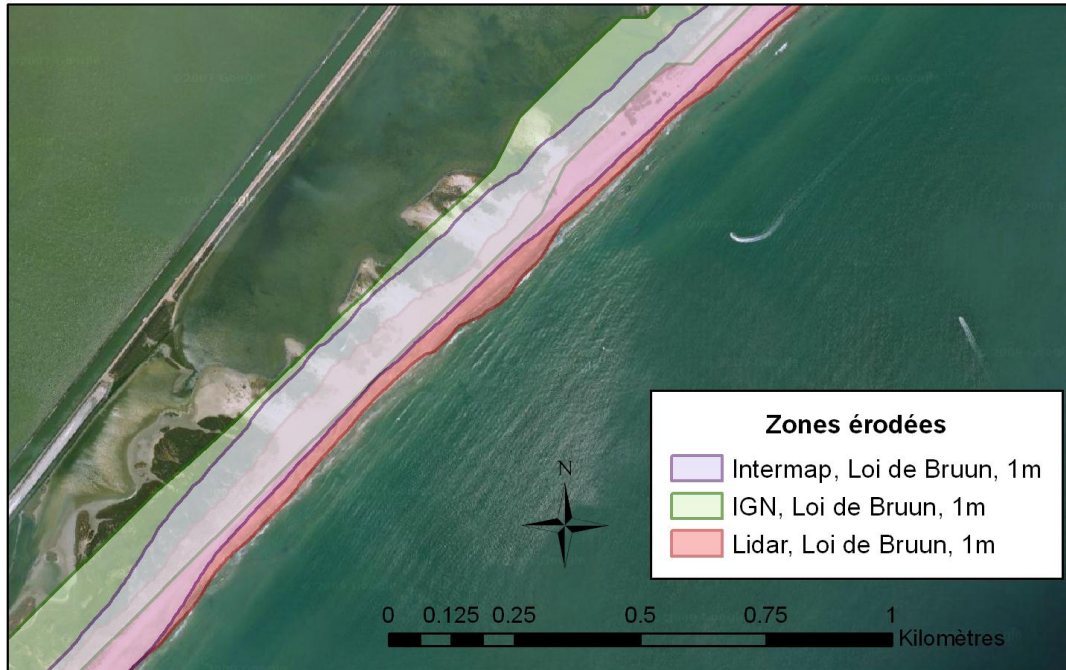


Figure 30 : Surface érodée déterminée avec la loi de Bruun en prenant l'hypothèse d'une élévation de 1 m du niveau marin en 2100 pour les trois MNT (de l'IGN, d'Intermap et Lidar).

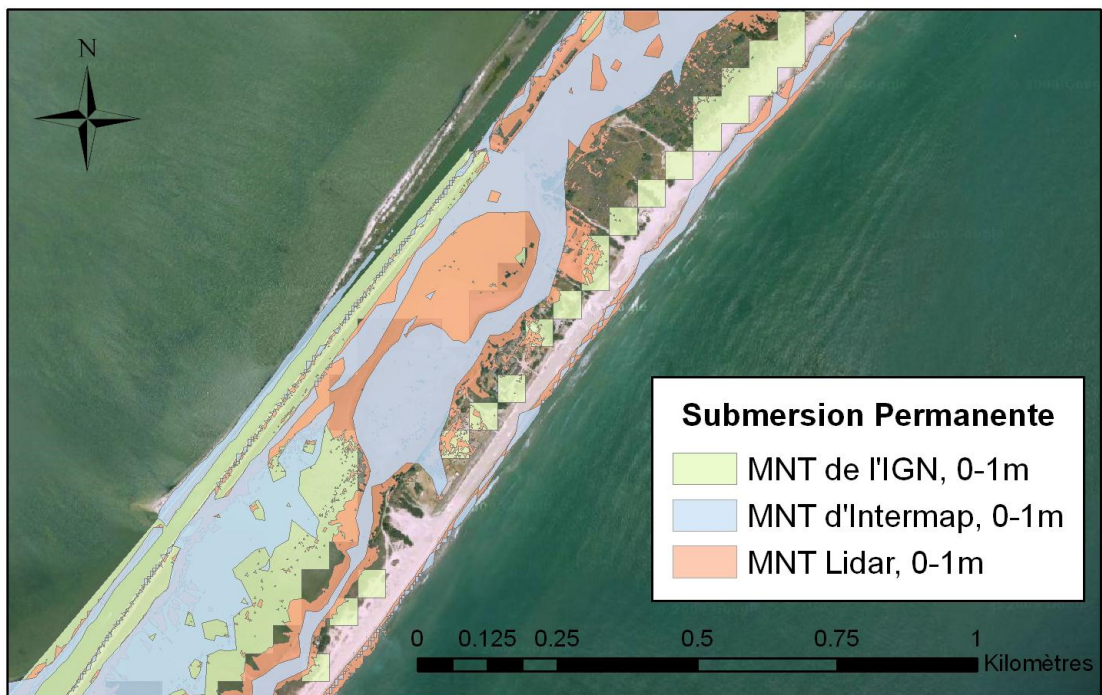


Figure 31 : Exemple de zones potentiellement inondables en 2100 avec le zonage défini par les trois MNT et 1 m d'élévation du niveau marin (Zone située au nord des Aresquiers).

5.2.9. Estimation des impacts potentiels

Occupation du sol

L'étude de l'occupation du sol montre que dans la zone d'étude, l'érosion évaluée à l'aide des MNT de l'IGN et d'Intermap affecte en général davantage les zones urbanisées que lorsque le MNT Lidar est utilisé. Ces différences sont liées au positionnement du trait de côte selon les différents MNT ainsi qu'au calcul de la pente.

La submersion permanente touche des surfaces beaucoup plus importantes avec le MNT de l'IGN (presque deux fois celle estimée avec les données Lidar). Les différences sont moins marquées avec la submersion décennale, mais la distribution du sol est différente. Avec les données d'Intermap et du Lidar, les zones urbanisées seraient plus affectées par une submersion décennale que si on fait usage des données de l'IGN. Pour une submersion centennale, la surface impactée est plus grande avec le MNT de l'IGN, en particulier dans les zones de marais maritimes et de végétation sclérophylle. Ces différences sont liées aux différences des MNT en termes de précision et d'exactitude.

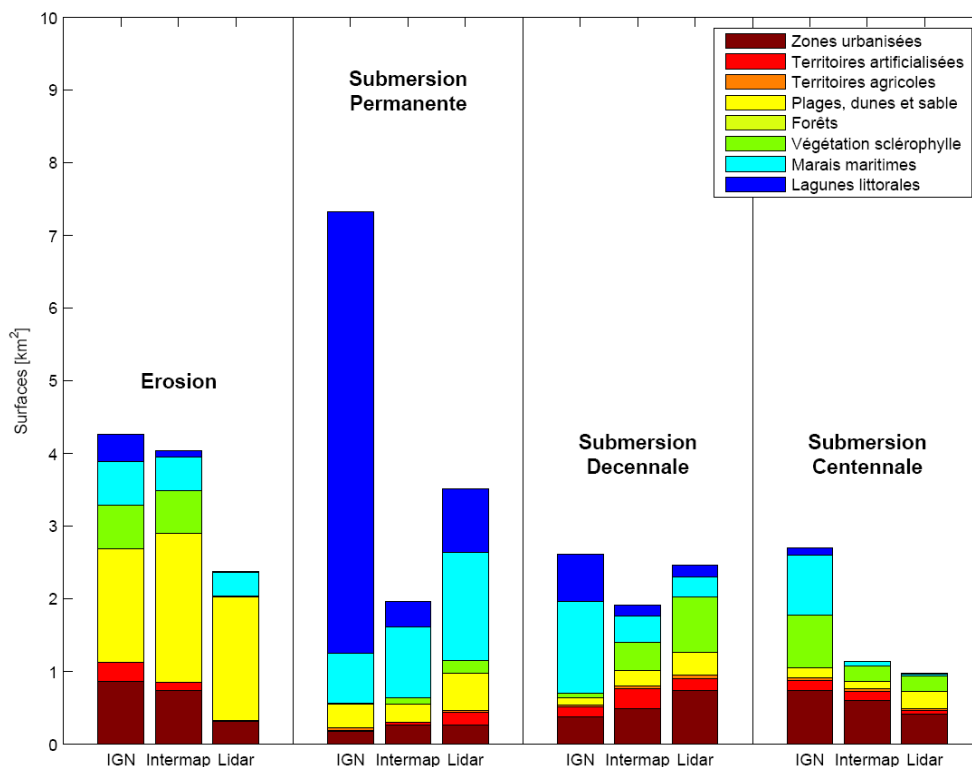


Figure 32 : Surfaces concernées par les aléas érosion et submersion permanente et temporaire (pour des événements décennal et centennal) pour les trois MNT en fonction de l'occupation des sols.

Dommages potentiels aux bâtiments

Le Tableau 16 présente le nombre de bâtiments potentiellement affectés par les différents aléas selon le MNT choisi.

MNT choisi	Nombre de bâtiments inclus dans la zone concernée par :			
	l'érosion	la submersion permanente	la submersion temporaire décennale	la submersion temporaire centennale*
MNT de l'IGN	2 337	198	448	1 499
MNT d'Intermap	1 632	365	1 143	1 071
MNT Lidar	710	637	1 812	1 019

Tableau 16 : Nombre de bâtiments potentiellement affectés selon le MNT choisi (Données BD Topo Pays).

*par convention, les bâtiments dénombrés dans cette colonne excluent ceux qui sont contenus dans la zone concernée par la submersion temporaire décennale.

5.2.10. Synthèse des résultats

L'analyse des données altimétriques a permis de réaliser une évaluation relative de la précision et du biais des MNT de l'IGN et d'Intermap par rapport aux données Lidar que nous avons considérées comme référence. L'analyse de ces trois MNT de maille de 2 m (Lidar), 5 m (Intermap) et 50 m (l'IGN) a montré les points suivants :

- la précision et la justesse du MNT d'Intermap sont meilleures que celles du MNT de l'IGN si les données Lidar sont prises comme référence,
- les deux MNT sont plus précis et présentent moins de biais près du trait de côte,
- la conversion des MNE en MNT ne constitue probablement pas la première source d'erreurs dans la mesure où les écarts ne sont pas plus faibles dans les espaces ouverts ou avec peu de végétation. Il faut toutefois garder à l'esprit que la conversion du MNE Lidar en MNT comporte aussi des erreurs. Ces conclusions sont donc à prendre avec précaution,
- enfin, les incertitudes du MNT Lidar sont supposées assez petites en comparaison avec les incertitudes des MNT de l'IGN et d'Intermap.

L'analyse de sensibilité aux données altimétriques a aussi montré que les surfaces impactées par les aléas érosion et submersion dépendent fortement du MNT utilisé. Ces différences sont liées à la résolution planimétrique et verticale. Le choix du MNT influe notamment sur:

- la localisation du trait de côte ;
- l'estimation de la hauteur de la berme (et de la profondeur de fermeture) pour le calcul de la pente de la côte pour appliquer la loi de Bruun ;
- la définition des zones submergées.

Les incertitudes associées au choix de l'un des trois MNT sont grandes, avec des surfaces potentiellement affectées par les aléas érosion et submersion (permanente et temporaire) et des coûts qui peuvent varier du simple au double selon le MNT choisi.

5.3. ANALYSE DE SENSIBILITÉ AUX HYPOTHÈSES D'ÉVOLUTION LONG TERME DU TRAIT DE CÔTE

5.3.1. Mise en œuvre de l'évaluation de l'aléa érosion

Il s'agit ici de décrire la mise en œuvre des 5 méthodologies décrites précédemment pour évaluer le recul du trait de côte :

- zone tampon de 500 m,
- loi de Bruun,
- extrapolation des tendances historiques,
- extrapolation des tendances historiques avec un ajustement pour tenir compte de l'accélération de l'élévation du niveau marin,
- « Dire d'expert ».

Ces cinq méthodes empiriques sont appliquées dans la zone d'étude pour analyser la sensibilité des résultats à l'évolution du trait de côte.

Une zone tampon de 500 m

Cette méthode est appliquée dans le SIG en créant une zone tampon de 500 m autour des zones considérées comme érodables. Dans la zone d'étude en Languedoc-Roussillon (entre Frontignan et La Grande-Motte), la côte est sableuse, à l'exception des ports à Frontignan, Palavas-les-Flots et Carnon. La zone tampon est donc définie dans l'ensemble de la zone d'étude. Le recul du trait de côte est considéré constant (500 m) le long la côte.

L'application de la loi de Bruun

La loi de Bruun est aussi appliquée dans toutes les régions sableuses avec une estimation du recul qui dépend de la pente de la côte, définie comme la pente entre la berme et la profondeur de fermeture. La berme d'une plage est la limite de la zone affectée par les vagues, qui marque la transition entre la zone avec des sédiments actifs et la zone stable arrière. En pratique, il est souvent difficile de délimiter la berme : ici la limite utilisée est la transition entre plage et arrière-plage, c'est-à-dire la végétation des dunes, les murs dans les zones urbanisées, etc.

Cette courbe est identifiée manuellement en utilisant deux types de données :

- la limite de la zone « plage, dunes et sable » identifiée dans les données Corine Land Cover 2006 ;
- et la transition obtenue visuellement sur des images géoréférencées et orthorectifiées d'images satellite.

L'altitude de la berme est obtenue en croisant cette courbe avec le MNT Lidar.

La profondeur de fermeture est définie comme la limite du profil actif, qui dépend fortement de la géologie, de la lithologie locale, et des conditions des vagues. Cette profondeur n'étant pas bien définie dans la zone d'étude, une estimation de -10 m est appliquée en première approximation. La position de l'isobathe 10 m est identifiée à partir des données bathymétriques du MNT Lidar. Un profil cross-shore est créé entre l'isobathe 10 m et la berme pour chaque point Lidar le long du trait de côte. La pente de la côte est supposée égale à la pente entre les deux extrémités du profil.

Le recul du trait de côte est alors estimé comme le produit du niveau d'élévation du niveau marin (1 m) et de l'inverse de la pente de la côte. Dans la région d'étude, la pente de la côte moyenne est d'environ 0,011, ce qui correspond approximativement à 90 m de recul du trait côte (avec un minimum d'environ 60 m et un maximum d'environ 160 m).

L'extrapolation des tendances historiques

Dans le cadre de la présente étude, le calcul du mouvement du trait de côte est réalisé pour les transects comprenant au moins trois mesures de position du trait de côte. L'outil DSAS est utilisé (Digital Shoreline Analysis System de l'USGS ; Thieler *et al.*, 2009). Cet outil crée des transects cross-shore à partir d'une « baseline » définie manuellement dans l'arrière plage (Figure 33).

Les transects sont définis tous les 50 m le long de la côte, et le taux du mouvement du trait de côte est calculé pour chacun d'entre eux. L'outil DSAS permet d'utiliser plusieurs méthodes de calcul différentes. Le taux de régression linéaire (avec un intervalle de confiance de 95 %) est choisi comme étant la méthode la plus pertinente et qui utilise au mieux l'ensemble des données. Le taux calculé pour chaque transect est appliqué pour estimer l'évolution du trait de côte en 2100.

La couverture spatio-temporelle des observations et les périodes choisies pour estimer le taux d'évolution du trait de côte sont sources d'incertitudes dans le calcul. Les résultats changent ainsi de manière significative selon que l'on tient compte ou non des données de 1942 (avant la construction des ouvrages de protection) dans l'analyse (Figure 34).

La différence moyenne serait ainsi d'environ 0,6 m/an (ou 60 m en 100 ans), avec un écart type de 1,2 m. Près de 11 % du linéaire de la zone d'étude seraient en érosion au lieu d'être en accrétion (et vice-versa) si l'on choisissait de ne pas tenir compte des données de 1942 dans le calcul. Ces différences rappellent un des principaux inconvénients de l'utilisation des données historiques : il est difficile de savoir si les taux calculés sont vraiment représentatifs et peuvent être utilisés comme base pour les taux d'évolution future.

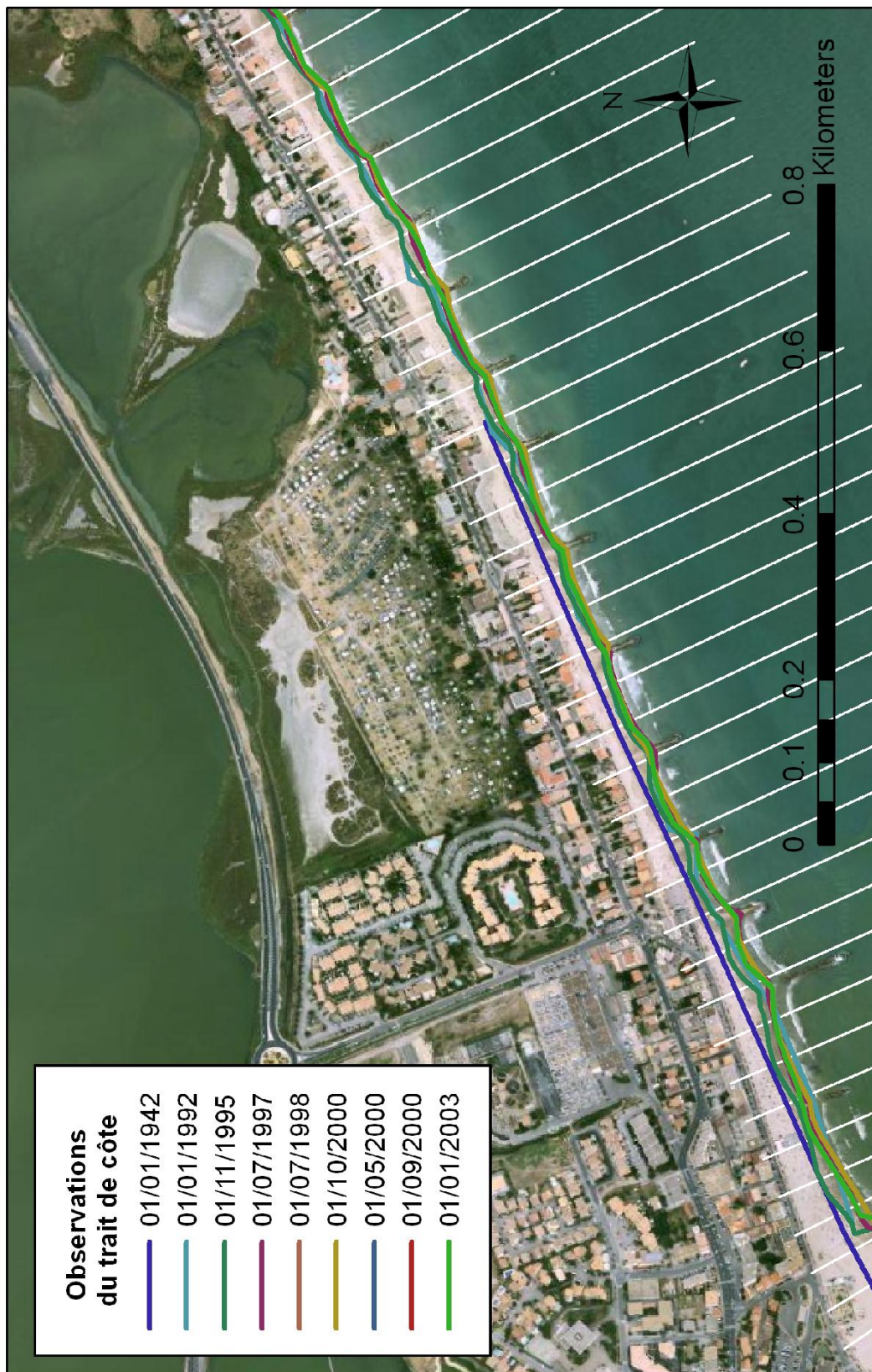


Figure 33 : Un exemple des observations du trait de côte entre 1942 et 2003 à l'est de Palavas-les-Flots. Les lignes blanches sont les transects cross-shore pour lequel le mouvement du trait de côte est défini.

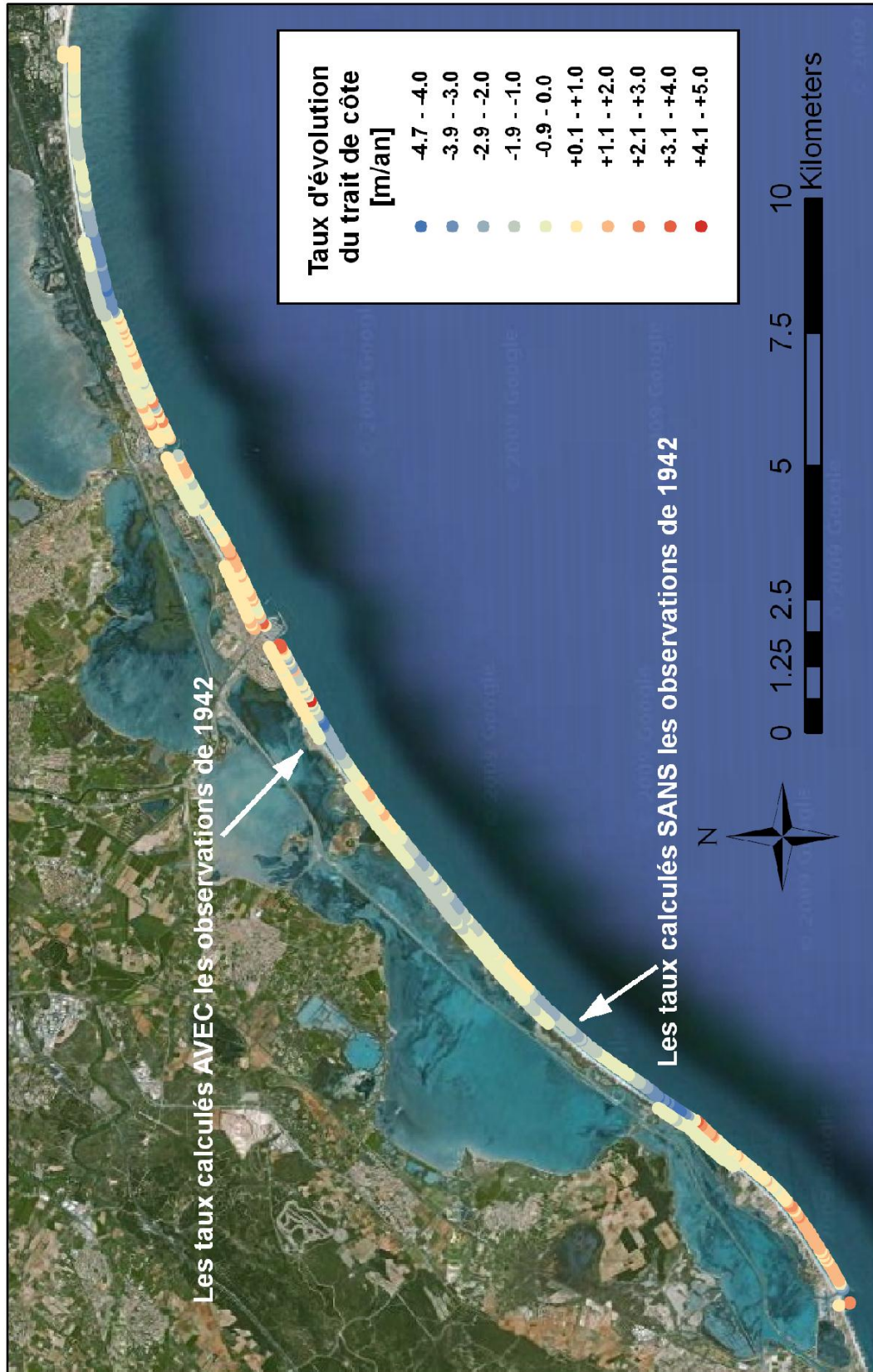


Figure 34 : Les taux d'évolution du trait de côte (en m/an) calculés avec une regression linéaire avec (en haut) et sans (en bas) les observations de 1942.

Pour cette analyse, le choix est fait d'utiliser toutes les données disponibles entre 1942 et 2003 pour l'estimation des taux historiques de l'évolution du trait de côte. Lorsque les données de 1942 sont utilisées, les taux d'érosion calculés sont représentatifs de de la succession de deux situations :

- dans un premier temps, une situation dans laquelle il n'y avait pas d'ouvrages,
- dans un second temps (à partir de la construction d'ouvrages), une situation dans laquelle les ouvrages sont présents.

Lorsqu'au contraire on calcule les taux d'érosion à partir de la date de construction des ouvrages, on suppose que l'efficacité de l'ouvrage demeure identique dans le temps.

Les modèles semi-empiriques choisis ne font pas un choix entre l'une ou l'autre de ces situations mais utilisent le plus de données disponibles possibles pour estimer un recul du trait de côte sur le long terme. Dans ce contexte, il est important de disposer de données sur de longues périodes de temps. Le fait que les ouvrages aient été construits entre des périodes d'acquisition incomplètes constitue ici une limite de l'approche.

On peut se demander si les ouvrages suffiront à stabiliser le trait de côte compte tenu des déficits sédimentaires en jeu l'évolution du trait de côte à de longues échéances de temps (100 ans). Pour cela, il serait intéressant de disposer d'un retour d'expérience sur l'efficacité des ouvrages et les besoins en maintenance de l'ensemble du système de défense.

Finalement, le déplacement moyen du trait de côte correspond à une érosion d'environ 60 m. Il y a néanmoins une grande variabilité le long de la côte (un écart type de 168 m, une érosion maximale d'environ 470 m aux Aresquiers et une accrétion pouvant aller jusqu'à 479 m à la pointe de l'Espiguette).

L'extrapolation des tendances historiques avec un ajustement pour tenir compte de l'accélération de l'élévation du niveau marin

Une modification du taux d'évolution de trait de côte est proposée pour tenir compte des effets de l'accélération de l'élévation du niveau marin. En Languedoc Roussillon, les observations historiques d'élévation du niveau marin donnent des valeurs comprises entre 2 et 3 mm/an. On sélectionne le taux maximal, à savoir 3 mm/an. Le scénario d'élévation du niveau marin considéré dans cette analyse de sensibilité est 1 m en 2100, ce qui correspond à environ 10 mm/an.

Pour tenir compte de l'accélération de l'élévation du niveau marin, l'extrapolation des tendances historiques est ajustée avec l'application de la loi de Bruun en fonction de la différence entre le taux futur et le taux historique (7 mm/an donc dans le cas présent). Cette méthode, similaire à l'analyse précédente, permet au trait de côte d'évoluer en érosion ou en accrétion. Le déplacement moyen du trait de côte correspond à une érosion d'environ 129 m. Il y a une grande variabilité le long de la côte (un écart type de 167 m, une érosion maximale d'environ 555 m et une accrétion pouvant aller jusqu'à 427 m).

Le « dire d'experts »

Cette dernière méthode d'estimation du mouvement du trait de côte est faite en utilisant les quatre autres hypothèses présentées ici et la connaissance de la région¹⁰.

D'une manière générale, il s'agissait de découper le trait de côte en segments homogènes du point de vue de leur dynamique sédimentaire et de leur géomorphologie et de prendre en compte les reculs jugés prendre en compte le plus de processus, c'est-à-dire d'une manière générale « l'extrapolation des tendances historiques avec un ajustement pour tenir compte de l'accélération de l'élévation du niveau marin ». Cependant, ce recul a été moyenné sur les segments découpés afin d'éviter de prendre en compte des hautes fréquences peu réalistes.

Résultats

L'utilisation de ces cinq méthodes pour évaluer l'érosion et la submersion de la zone côtière donne des résultats assez divers (Tableau 17 ; Figure 35).

L'hypothèse de l'évolution du trait de côte	Permet l'érosion et/ou l'accrétion	Moyenne	Ecart type	Maximum érosion	Minimum érosion (ou accrétion)
Zone tampon de 500m	E	-500 m	±0 m	-500 m	-500 m
La loi de Bruun	E	-90 m	±22 m	-59 m	-164 m
L'extrapolation des tendances historiques	E/A	-60 m	±168 m	-470 m	+479 m
L'extrapolation des tendances historiques avec un ajustement pour l'accélération de l'élévation du niveau marin	E/A	-128 m	±167 m	-555 m	+427 m
Le dire d'experts	E/A	-117 m	±53 m	-191 m	-20 m

Tableau 17 : Résumé des résultats du mouvement du trait de côte suivant les 5 hypothèses d'évolution long terme : si l'hypothèse permet l'érosion (E) ou l'accrétion (A) et le moyen, l'écart type, le minimum et le maximum mouvement du trait de côte (- est érosion et + est accrétion).

Dès lors que le trait de côte est connu avec suffisamment de précision, l'approche qui paraît se démarquer le plus des autres est celle qui consiste à appliquer une zone tampon de 500 m (EuroSION, 2004). Par rapport aux autres approches, elle surestime en effet assez largement les surfaces potentiellement affectées par l'érosion, et ne tient pas compte de la variabilité observée le long la côte.

¹⁰ D'une manière générale, ce que nous appelons ici le « dire d'expert » est implicitement intégré au traitement effectué lorsque des études sont effectuées, par exemple pour extrapoler les tendances historiques. Ici, nous avons appliqué les approches strictement telles qu'elles sont décrites de manière à limiter la subjectivité des résultats.

Les quatre autres méthodes donnent des résultats variables le long la côte. Avec l'application de la loi de Bruun, la zone affectée par l'érosion varie entre 60 m et 160 m, avec une moyenne d'environ 90 m de recul. Cette formulation ne permet pas d'avoir de zones d'accrétion. Elle ne tient compte que du recul du trait de côte engendrée par l'élévation du niveau marin et néglige les autres processus comme le transport longshore et l'apport de sédiments.

L'extrapolation des tendances historiques tient compte des effets observés pendant la période de mesures. Elle permet d'identifier les zones qui sont actuellement très susceptibles à l'érosion ou qui sont en accrétion. Les résultats dépendent cependant fortement de la période d'observations, et il existe beaucoup de variabilité le long du trait de côte (écart type de 168 m, avec une érosion maximale d'environ 470 m et une accrétion pouvant aller jusqu'à 479 m). Ceci se traduit par des zones en érosion juxtaposées à des zones en accrétion (exemple : Figure 35) qui engendrent un trait de côte très inhomogène (donc pas réaliste) si on extrapole les tendances sur 100 années.

Hypothèses de l'évolution du trait de côte	Surfaces érodées	Surfaces accrétées
Zone tampon de 500 m	14 km ² (44 %)	-
La loi de Bruun avec 1 m d'élévation du niveau marin	2,5 km ² (8 %)	-
L'extrapolation des tendances historiques	1.9 km ² (6 %)	0,6 km ² (2 %)
L'extrapolation des tendances historiques avec un ajustement pour l'accélération de l'élévation du niveau marin	3,2 km ² (10 %)	0,2 km ² (0,7 %)
Le dire d'experts	3 km ² (10 %)	-

Tableau 18 : Surfaces érodées et accrétées suivant les 5 hypothèses d'évolution du trait de côte (les pourcentages de la zone de l'étude sont entre parenthèses).

La quatrième méthode considérée ici permet de tenir compte par ailleurs de l'accélération de la hausse niveau marin. C'est donc a priori l'analyse empirique la plus complète puisqu'elle prend en compte le plus de processus connus : elle combine tendances historiques avec une meilleure prise en compte des phénomènes d'érosion dus à l'augmentation de la vitesse d'élévation du niveau marin. Mais les résultats obtenus présentent eux aussi une forte variabilité le long du trait de côte (écart type de 167 m, avec une érosion maximale d'environ 555 m et une accrétion pouvant aller jusqu'à 427 m), qui se traduit par des transitions abruptes irréalistes entre les zones en érosion et les zones en accrétion.

Le recours au « dire d'expert » permet de tracer des zones potentiellement affectées par l'érosion et l'accrétion, mais en supprimant les hautes fréquences liés aux échantillonnages spatiaux et temporels des données.

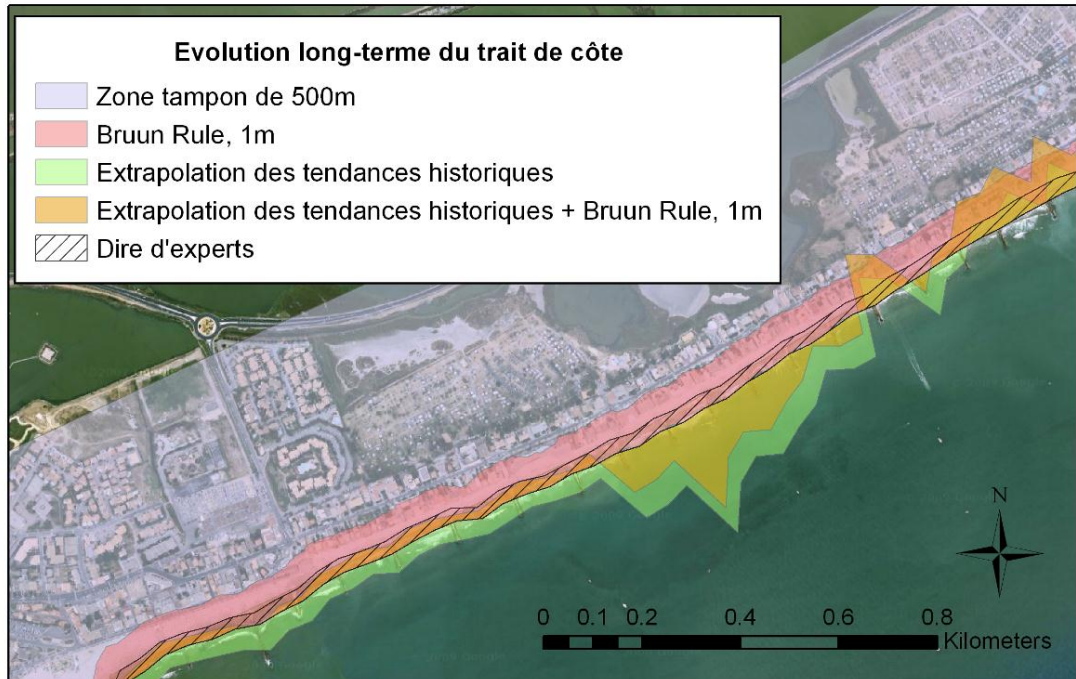


Figure 35 : Un exemple d'évolution long terme du trait de côte suivant les 5 méthodes d'analyse : une zone tampon de 500 m, la loi de Bruun avec une élévation du niveau marin de 1 m en 2100, l'extrapolation des tendances historiques, l'extrapolation des tendances historiques avec une accélération de l'élévation du niveau marin de 7 mm/an, et le dire d'experts.

5.3.2. L'évaluation de l'aléa submersion

Les aléas submersion permanente et submersion temporaire sont évalués en 2100 avec trois niveaux de l'eau :

- la submersion permanente correspond aux zones situées sous +1 m NGF ;
- la submersion temporaire due à un événement décennal touche les régions situées entre +1 et +2 m NGF ;
- la submersion temporaire due à un événement centennal touche les régions situées sous +3 m NGF.

L'estimation des surfaces submergées est calculée à partir de ces trois niveaux d'eau, et les surfaces érodées sont soustraites des surfaces submergées pour éviter de compter deux fois les mêmes surfaces. Ne connaissant par l'altitude des zones considérées (on ne dispose pas de modèle permettant de déterminer l'évolution des plages), on fait l'hypothèse qu'il s'agit de zones basses soumises à la submersion permanente à l'échéance de temps considérée.

Dans le cas de l'hypothèse forte d'un recul du trait de côte de 500 m (en appliquant une zone tampon), les zones affectées par la submersion sont très réduites. En effet,

une part importante des zones basses est alors considérée comme érodée. Les trois autres modèles donnent en revanche des surfaces comparables (Tableau 19).

Hypothèse de l'évolution du trait de côte	Submersion permanente	Submersion temporaire, événement décennal	Submersion temporaire, événement centennal
Zone tampon de 500 m	0,9 km ² (3 %)	0,2 km ² (0.5 %)	0,3 km ² (0.1 %)
La loi de Bruun avec 1 m d'élévation du niveau marin	3,5 km ² (11 %)	2,5 km ² (8 %)	1,0 km ² (3 %)
L'extrapolation des tendances historiques	3,6 km ² (12 %)	2,9 km ² (9 %)	1,1 km ² (4 %)
L'extrapolation des tendances historiques avec un ajustement pour l'accélération de l'élévation du niveau marin	3,2 km ² (10 %)	2,4 km ² (8 %)	0,9 km ² (3 %)
Le dire d'experts	3,2 km ² (10 %)	2,3 km ² (7 %)	0,9 km ² (3 %)

Tableau 19 : Les surfaces affectées par la submersion permanente (entre 0 et +1 m NGF), la submersion temporaire à cause d'un événement décennal (entre +1 et +2 m NGF) et la submersion temporaire causée par un événement centennal (entre +2 et +3 m NGF) selon les 5 hypothèses d'évolution du trait de côte.

Les surfaces érodées sont soustraites des surfaces submergées (les pourcentages de la zone de l'étude sont en parenthèse).

5.3.3. Estimation des impacts potentiels

Occupation du sol

Les distributions des types de l'occupation du sol montrent des fortes différences selon que l'on a recours à une zone tampon de 500 m ou à une autre méthode permettant d'évaluer les zones érodées et submergées (Figure 36). Avec cette première méthode d'évaluation, une grande partie de la zone d'étude est affectée par l'érosion, donc les surfaces affectées par la submersion sont très petites.

Les autres hypothèses d'évolution du trait de côte montrent des résultats différents pour les distributions d'occupation des sols affectées par l'érosion : l'érosion calculée avec la loi de Bruun affecte plus de zones urbanisées, alors que l'extrapolation des tendances historiques affecte des zones avec de la végétation (plus loin de la côte).

De manière évidente, ceci est lié aux effets des ouvrages sur les 20/30 dernières années. La question serait maintenant de savoir si, à des échéances de temps centennales, la stratégie consistant à placer des ouvrages de protection est tenable, auquel cas la prise en compte des tendances historiques serait plus pertinente, ou bien si on suppose qu'à long terme les déficits sédimentaires sont trop importants pour que les ouvrages soient efficaces, auquel cas la loi de Bruun serait plus pertinente. Enfin, la méthode reprenant le dire d'expert peut être considérée comme une synthèse assimilant la connaissance disponible et supprimant les hautes fréquences de la variabilité de l'évolution du trait de côte.

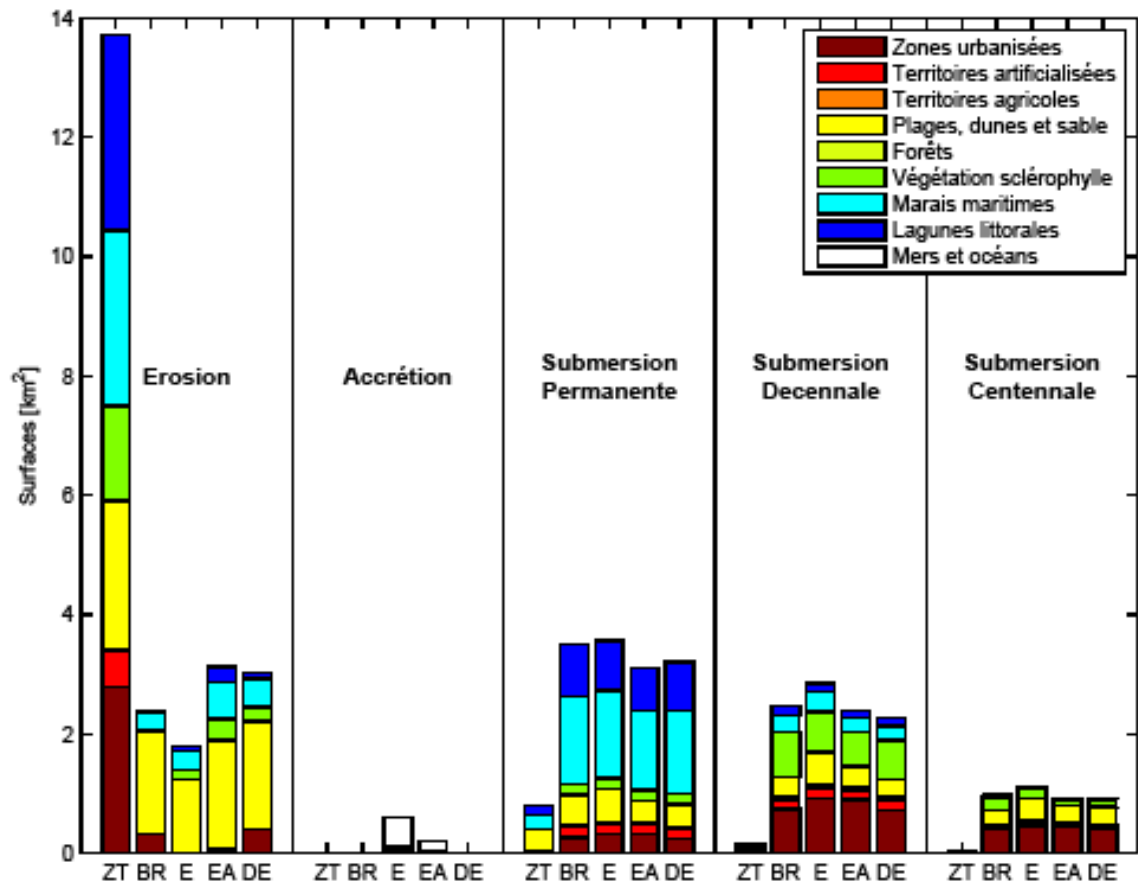


Figure 36 : Distributions d'occupation du sol dans les zones affectées par l'érosion, l'accrétion, la submersion permanente, la submersion décennale et la submersion centennale, suivant les 5 hypothèses d'évolution du trait de côte : une zone tampon de 500 m (ZT), l'application de la loi de Bruun (BR), l'extrapolation des tendances historiques (E), l'extrapolation des tendances historiques avec un ajustement pour tenir compte de l'accélération de l'élévation du niveau marin (EA), et le dire d'experts (DE).

Domages potentiels aux bâtiments

Le Tableau 20 présente le nombre de bâtiments potentiellement affectés par les différents aléas selon l'approche choisie pour représenter l'érosion.

Méthode d'évaluation de l'érosion, pour un mètre d'élévation du niveau marin et un MNT Lidar	Nombre de bâtiments inclus dans la zone concernée par :			
	l'érosion	la submersion permanente	la submersion temporaire décennale	la submersion temporaire centennale*
Une zone tampon de 500 m	5 399	2	8	0
La loi de Bruun	710	637	1 812	1 019
L'extrapolation des tendances historiques	106	772	2 158	1 160
L'extrapolation des tendances historiques avec la loi de Bruun pour tenir compte de l'accélération du niveau marin	333	739	2 072	1 059
Le dire d'experts	571	583	1 878	1 142

Tableau 20 : Nombre de bâtiments potentiellement affectés selon les représentations de l'érosion (Données BD Topo Pays).

*par convention, les bâtiments dénombrés dans cette colonne excluent ceux qui sont contenus dans la zone concernée par la submersion temporaire décennale.

5.3.4. Analyse des résultats

Les résultats de l'étude de sensibilité montrent une variabilité importante selon les approches utilisées. Il ne s'agit pas ici de prétendre que telle ou telle méthode est meilleure qu'une autre (ce qui nécessiterait de procéder à des travaux de validation des différentes lois), mais de constater qu'elles donnent des résultats différents et ont chacune des avantages et inconvénients.

En conclusion, on peut retenir que :

- l'approche de la création d'une zone tampon de 500 m se démarque des autres approches. Pour la rejeter définitivement, il faudrait disposer d'éléments de validation des autres lois. Lorsque le trait de côte est mal connu (*i.e.* avec des erreurs > 50 m dans sa précision), cette approche nous paraît pertinente non pour une évaluation des coûts, mais pour délimiter l'emprise maximum des phénomènes côtiers dans le contexte du changement climatique. Cette approche peut permettre ainsi un premier zonage sur de grandes emprises. Ce zonage sera presque partout maximisant et est facile à mettre en œuvre, même avec peu de données,
- l'approche de la loi de Bruun, bien que non validée, reste la seule disponible à ces échelles de temps lorsque peu de données sur l'évolution du trait de côte historique sont disponibles,
- l'approche utilisant les tendances historiques suppose que les processus observés resteront les mêmes à l'avenir : autrement dit se pose la question de la représentativité de la période prise en compte pour les évolutions, surtout lorsque des ouvrages de protection ont été mis en place, ou bien lorsqu'un événement extrême a affecté la région d'étude au cours de la période d'observations. En pratique, les lacunes des données et l'évolution rapide du littoral et des aménagements permettent rarement de définir des taux correspondant à des situations homogènes du point de vue de l'évolution du littoral. Il est alors nécessaire de procéder à une supervision (dire d'expert). Il est par ailleurs

recommandé de ne pas les extrapoler sur des durées trop longues (i.e. excédant quelques décennies),

- l'approche combinée loi de Bruun/tendances historiques a l'avantage de prendre en compte davantage de processus. Appliquée sans prétraitement des données de trait de côte historique, elle fait cependant apparaître des hautes fréquences dans la variabilité de l'évolution du trait de côte historique qui sont irréalistes,
- l'approche par « dire d'expert » telle qu'elle est appliquée ici, c'est-à-dire en appliquant la méthode précédente sur des entités considérées comme homogènes géomorphologiquement et du point de vue de la dynamique côtière, permet de supprimer ces hautes fréquences. C'est cette approche que nous appliquons plus bas dans le cadre de l'amélioration de la méthode RNACC.

En réalité, l'approche « dire d'expert » exposée ici correspond à une supervision des tendances issue des différentes approches. En pratique, cette approche est menée systématiquement. Cependant, on souhaite ici appliquer les approches existantes strictement afin de limiter la subjectivité du résultat final.

Ainsi, d'une manière générale, dès lors qu'un trait de côte précis existe, nous proposons d'appliquer :

- l'approche par extrapolation du trait de côte historique et Bruun modifié si des traits de côte historiques existent. C'est cette approche qui est retenue par la suite dans cette étude,
- l'approche Bruun simple s'il n'existe pas de données historiques

Dans tous les cas, les résultats de ces approches seront supervisés en prenant en compte l'expertise locale. S'il n'existe pas de trait de côte précis, il demeure possible de procéder par expertise.

6. Agrégation et hiérarchisation des incertitudes

Les trois analyses de sensibilité ont montré qu'il existait de grandes différences entre les résultats selon la méthode appliquée. Cette diversité se traduit non seulement en termes de surface des zones potentiellement impactées par les aléas érosion et submersion, mais aussi en termes de nature des sols concernés (lié à la géométrie des surfaces).

Ce chapitre propose une synthèse des résultats précédents en hiérarchisant les sources d'incertitudes identifiées.

Les différentes sources d'incertitudes ne s'agrègent pas de manière linéaire. La démarche présentée ci-dessous est une approche, « au premier ordre » pour quantifier les incertitudes.

Seuls les résultats de cette analyse sont présentés. Les annexes 4 et 5 détaillent la méthode de hiérarchisation de ces incertitudes et sa mise en œuvre.

6.1. CRITERE N° 1 : SURFACES IMPACTÉES

Le premier critère que nous utilisons est celui des surfaces potentiellement impactées (en km²). Il ne s'agit pas de savoir si les zones délimitées correspondent à la réalité du terrain ou non, mais si les erreurs commises localement se compensent à une échelle agrégée. Dans cette première partie, nous cherchons donc à savoir quelle importance prennent les différentes sources d'incertitude pour l'estimation des surfaces potentiellement impactées (en km²). Le Tableau 21 propose une hiérarchisation des sources d'incertitudes pour le critère n° 1 (surfaces potentiellement impactées, en km²). Dans cette synthèse, nous considérons que chaque aléa érosion, submersion permanente et submersion temporaire prend une importance équivalente pour ce critère n°1. Sous ces hypothèses les incertitudes sont liées :

- en premier lieu (pour plus d'un tiers) aux limites de notre connaissance de l'élévation du niveau marin,
- en second lieu (pour plus d'un quart chacun) à la qualité des données altimétriques et à la connaissance des processus,
- de manière mineure à la connaissance du trait de côte.

Ainsi, si l'objectif d'une approche déterministe pour évaluer les conséquences possibles du changement climatique sur les espaces côtiers est l'estimation des surfaces potentiellement impactées (en km²), il faut retenir de cette analyse que les 3 principales sources d'incertitudes (élévation du niveau marin, qualité des données altimétriques et connaissance des processus) doivent être réduites. Connaître parfaitement l'un ou l'autre de ces paramètres ne permettrait pas d'aboutir.

	Érosion	Submersion permanente	Submersion temporaire (10)	Submersion temporaire (100)	Priorités
	0,33	0,33	0,17	0,17	
Choix de l'hypothèse d'élévation du niveau marin	0,25	0,29	0,60	0,58	37,6 %
Qualité des données altimétriques	0,05	0,57	0,14	0,30	27,9 %
Connaissance des processus d'érosion	0,59	0,10	0,22	0,08	28,2 %
Précision du trait de côte	0,10	0,04	0,04	0,04	6,3 %

Tableau 21 : Synthèse du jugement pour le critère n° 1 : surfaces impactées.

En revanche, les analyses précédentes montrent que :

- une meilleure connaissance de l'élévation du niveau marin permettrait de mieux quantifier les surfaces potentiellement impactées par aléa de submersion temporaire,
- une meilleure connaissance de la topographie permettrait de mieux quantifier l'aléa de submersion permanente, étant entendu que l'on néglige ici les adaptations naturelles du milieu (exemple : captation des sédiments par les plantes des marais),
- une meilleure connaissance des processus permettrait de réduire de façon importante les incertitudes liées à l'estimation de l'aléa érosion.

Cette analyse vaut uniquement pour la zone étudiée ici. Comme on l'a fait remarquer précédemment, le fait qu'une meilleure connaissance de la topographie ne change pas beaucoup le résultat final pour ce qui concerne la submersion temporaire est probablement très spécifique au site d'étude. Les conclusions qui sont annoncées ici ne devraient pas être transposées sur d'autres lieux. En revanche, il serait aisé, sous réserve de disponibilité de données, de reproduire cette approche : la méthode est reproductible et applicable à d'autres secteurs et sites côtiers.

6.2. CRITÈRE N° 2 : TERRITOIRES URBANISÉS ET ARTIFICIALISÉS POTENTIELLEMENT IMPACTÉS

Le second critère utilisé ici est celui des surfaces urbanisées et artificialisées potentiellement impactées (en km²).

La première source d'incertitudes à ce stade est l'occupation des sols en 2100 : ceci a été discuté dans le rapport RNACC-1 (2009). Nous n'y revenons que pour rappeler que l'hypothèse selon laquelle les enjeux demeureraient constants ne résiste pas à l'épreuve de la confrontation avec les tendances actuelles.

De la même manière que précédemment, nous ne cherchons pas à savoir si les zones urbanisées potentiellement impactées sont les bonnes ou non, mais si les différentes

méthodes existantes produisent finalement des résultats proches. En d'autres termes, nous cherchons à vérifier l'hypothèse selon laquelle les erreurs commises localement se compensent à une échelle agrégée, pour ce qui concerne les territoires urbanisés. Cette analyse est donc effectuée en utilisant les Figure 36, Figure 24 et Figure 32.

Le Tableau 22 propose une hiérarchisation des sources d'incertitudes pour le critère n° 1 (surfaces urbanisées et artificialisées potentiellement impactées, en km²). Dans cette synthèse, nous considérons comme précédemment que chaque aléa érosion, submersion permanente et submersion temporaire prend une importance équivalente pour ce critère n°1. Sous ces hypothèses les incertitudes sont liées :

- en premier lieu (pour plus d'un tiers) aux limites de notre connaissance de l'élévation du niveau marin,
- en second lieu (pour plus d'un quart chacun) à la qualité des données altimétriques et à la connaissance des processus,
- de manière mineure à la précision de la localisation du trait de côte.

	Érosion	Submersion permanente	Submersion temporaire (10)	Submersion temporaire (100)	Priorités
	0,33	0,33	0,17	0,17	
Choix de l'hypothèse d'élévation du niveau marin	0,13	0,55	0,44	0,58	39,4 %
Qualité des données altimétriques	0,13	0,31	0,41	0,30	26,2 %
Connaissance des processus d'érosion	0,63	0,09	0,12	0,08	27,4 %
Précision du trait de côte	0,13	0,05	0,04	0,04	7,1 %

Tableau 22 : Synthèse du jugement pour le critère n° 2 : surfaces urbanisées et artificialisées potentiellement impactées.

Ces résultats sont très comparables à ceux obtenus pour le critère n° 1.

En revanche, les analyses précédentes montrent que :

- une meilleure connaissance de l'élévation du niveau marin et de la topographie permettrait de mieux quantifier les surfaces potentiellement impactées par les aléas de submersion temporaire et permanente, étant entendu que l'on néglige ici les adaptations naturelles du milieu,
- une meilleure connaissance des processus permettrait de réduire de façon importante les incertitudes liées à l'estimation de l'aléa érosion.

De la même manière que précédemment, cette analyse vaut uniquement pour la zone étudiée ici.

6.3. SYNTHÈSE

L'analyse des incertitudes a été réalisée pour deux critères :

- les surfaces potentiellement affectées par les différents aléas,
- et les surfaces urbanisées et artificialisées potentiellement affectées par les différents aléas.

Elle conclut que les différentes sources d'incertitudes revêtent une importance comparable pour les deux critères : les incertitudes sont liées en premier lieu (pour environ un tiers) aux limites de notre connaissance de l'élévation du niveau marin, en second lieu mais de manière importante (pour plus d'un quart chacun) à la qualité des données altimétriques et à la connaissance des processus, et de manière mineure à la connaissance du trait de côte.

Une meilleure connaissance de la topographie et de l'élévation du niveau marin permettrait de réduire significativement les incertitudes liées aux différents aléas de submersion. D'autre part, pour ce qui concerne la mise en œuvre des lois semi-empiriques représentant l'aléa d'érosion marine, il est important d'avoir une bonne représentation du trait de côte, mais il faudrait également améliorer la connaissance des processus d'érosion long terme.

Ces résultats sont conformes à l'intuition et ne sont pas surprenants. Ils peuvent cependant être gardés en mémoire afin de bien mesurer quelles avancées pourraient effectivement être attendues suite à l'amélioration significative, par exemple, des données topographiques existantes.

7. Amélioration de la méthode RNACC : mise en oeuvre sur la région Languedoc-Roussillon et actualisation des résultats du RNACC

Nous avons vu dans les chapitres précédents que les méthodes visant à quantifier directement l'impact de l'élévation du niveau marin sur les risques érosion et submersion dans la région Languedoc-Roussillon se heurtent à des limites importantes, liées aux incertitudes concernant l'élévation du niveau marin, les processus en jeu, la connaissance de la topographie et la précision du trait de côte. De toutes ces sources d'incertitudes, les deux dernières sont les seules qui peuvent être réduites de manière importante à court terme en procédant à des levés de nouvelles données.

7.1. PROPOSITION D'AMÉLIORATION DE LA MÉTHODE RNACC-1 (2009)

L'amélioration de la méthode RNACC suit les étapes suivantes :

- conservation du **scénario de 1 m d'élévation du niveau marin** pour tenir compte des différentes observations et estimations actuelles, de l'accélération de la remontée du niveau marin liée à une accélération de la fonte des glaciers et de la variabilité à l'échelle locale (Hulme *et al.*, 2002) ;
- estimation de **l'évolution du trait de côte suivant le dire d'experts** : ceci consiste à définir des zones homogènes sur le plan géomorphologique et de la dynamique sédimentaire, puis, reprenant les conclusions du chapitre 5, à combiner l'extrapolation des tendances historiques observées et la loi de Bruun¹¹, afin de tenir compte de l'accélération de la montée de la mer sur les zones définies ;
- estimation des **zones potentiellement submergées** suivant les recommandations de la DREAL – Languedoc-Roussillon pour établir les PPR, avec le choix d'une hauteur d'eau de +1 m NGF pour un événement avec une période de retour de 10 ans, et +2 m NGF pour un événement avec une période de retour de 100 ans ;
- utilisation de la meilleure donnée altimétrique disponible à l'échelle de la Région : ici, le **MNT de l'IGN pour les données topographiques**, seules données disponibles à l'échelle régionale dans l'attente de la distribution des données LITTO3D.

¹¹ Comme cela a été indiqué dans le chapitre 5, cette approche peut être critiquée – elle n'est notamment pas validée – mais elle est celle qui prend en compte le plus de processus. Les limites de la loi de Bruun sont indiquées dans le chapitre 4, et on pourra se référer à Cooper et Pilkey (2004) pour une liste exhaustive des doutes existants concernant son application systématique.

Le décompte des **bâtiments potentiellement affectés** dans chaque zone d'aléa en utilisant la base de donnée BD Topo Pays (couche : « bâtiments Indifférenciés »).

Les améliorations proposées dans ce rapport ne sont applicables qu'aux sites où suffisamment de données sont disponibles.

7.2. MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE DES ALÉAS CÔTIERS DANS LE CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Il s'agit d'appliquer une approche simplifiée pour représenter quatre aléas : érosion, submersion permanente (jusqu'à +1 m NGF en Languedoc-Roussillon), submersion temporaire décennale (de +1 m NGF à +2 m NGF), et submersion temporaire centennale (de +2 m NGF à +3 m NGF).

Dans l'attente de données Litto3D, le trait de côte choisi est celui de Corine Land Cover 2006. Cette étude montre en effet que les données CLC 2006 sont meilleures que les données du MNT de l'IGN et comparables aux données Histolitt en moyenne à l'échelle spatiale considérée. Il n'est pas nécessaire d'utiliser les données Histolitt, bien que de meilleure résolution, dans cette approche qui demeure à l'approche régionale. Au contraire, cela complexifierait le traitement car elles incluent tous les aménagements dans la délimitation du trait de côte. Ce choix pourrait être revu pour des études à des échelles plus locales.

7.2.1. Évaluation de l'érosion potentielle en 2100

Le dire d'experts est utilisé pour améliorer l'estimation du mouvement du trait de côte. En pratique, il s'agit de déterminer des zones relativement homogènes sur le plan de la dynamique sédimentaire et de la géomorphologie, puis de combiner l'extrapolation des tendances historiques avec un ajustement supplémentaire (Loi de Bruun) pour tenir compte de l'accélération du niveau marin.

Les observations de la position du trait de côte de la DREAL-Languedoc-Roussillon depuis les années 1850 sont utilisées pour estimer l'évolution historique de long terme du trait de côte. Le programme DSAS (Thieler *et al.*, 2009) est utilisé pour estimer les taux du mouvement de trait de côte le long de profils cross-shore définis avec un pas de 50m le long la côte de la région. Comme nous l'avons vu précédemment, la variabilité spatiale et temporelle des observations créent une forte variabilité longshore qui n'est pas réaliste. Le dire d'experts est utilisé pour identifier des zones homogènes sur le plan de la géologie, la géomorphologie et la dynamique sédimentaire (base de données EUROSION ; Brunel, 2010), les aménagements (de la base de données EUROSION et des images satellitaires de Google Earth) et la direction du transport longshore (Brunel, 2010). Ceci est effectué en prenant en compte les observations du mouvement du trait de côte. Les zones de falaises ou roches dures sont considérées stables et les zones artificialisées sont considérées fixées contre la pression de l'élévation du niveau marin. Les estuaires sont aussi considérés stables dans cette analyse de l'évolution de trait de côte. À partir de ces éléments, le trait de côte de la région de Languedoc Roussillon a été découpé en 30 zones relativement

homogènes du point de vue de la dynamique sédimentaire et de la géomorphologie. Pour chacune de ces 30 zones, un taux moyen d'évolution de trait de côte est calculé. Aux contacts entre deux zones, une transition linéaire est appliquée pour éviter des sauts de rythme d'érosion entre les zones. La Figure 37 montre les taux retenus.

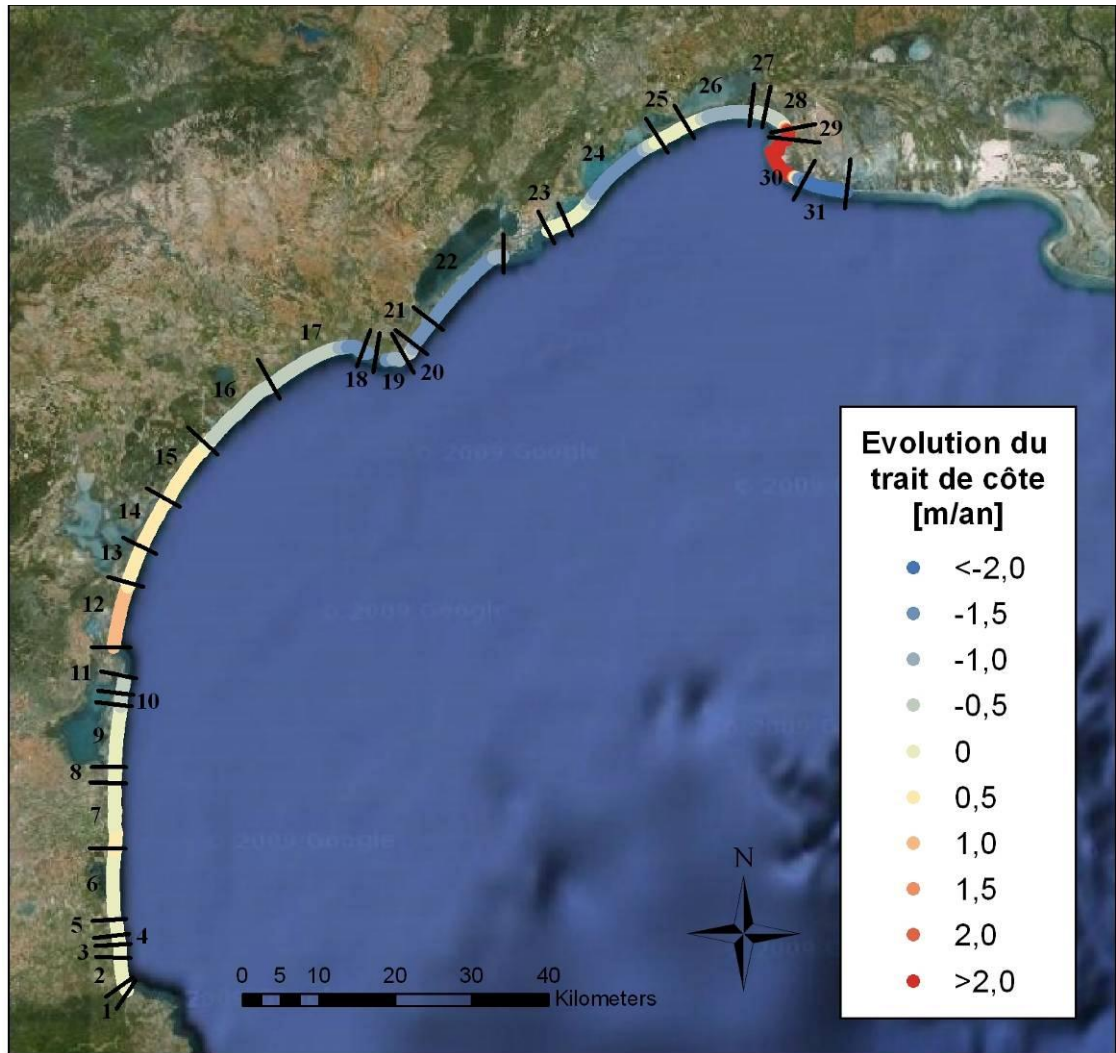


Figure 37 : Taux d'évolution du trait de côte retenus pour les 30 entités définies en Languedoc-Roussillon.

Ces taux d'évolution du trait de côte varient généralement entre -1 et +1 m par an, avec quelques exceptions près du Grau-du-Roi. Le taux d'érosion peut dépasser -2 m/an dans la zone d'érosion à l'est, à la limite du Languedoc-Roussillon où la dérive longshore déplace les sédiments vers l'ouest. Le taux d'accrétion dans les zones d'accumulation des sédiments peut dépasser +7 m/an à la Pointe de L'Espiguette.

Pour tenir compte de l'accélération de l'élévation du niveau marin, la loi de Bruun est appliquée, en prenant en compte la différence entre le scénario choisi (+1 m en 2100) et l'extrapolation des observations récentes en Languedoc-Roussillon (2,9 mm/an soit

environ 0,3 m en 2100). L'accélération de l'élévation du niveau marin représenterait sous ces hypothèses 0,7 m (cf. 0). En l'absence de données topographiques précises pour déterminer la pente de la côte pour chaque profil, la pente de côte moyenne calculée avec les données Lidar dans la zone de l'étude (0,012) est utilisée. La loi de Bruun, prédit alors un recul supplémentaire de 58 m du trait de côte en raison de l'accélération de la hausse du niveau marin. Ce recul s'ajoute donc aux tendances observées selon lesquelles le trait de côte reculerait en moyenne de 48m, avec un écart type d'environ 150 m (principalement à cause de la zone d'érosion et d'accrétion extrême près du Grau-du-Roi).

7.2.2. Évaluation de la submersion potentielle en 2100

Les données topographiques du MNT de l'IGN sont utilisées pour définir les zones potentiellement submergées suivant les trois hypothèses : submersion permanente (jusqu'à +1 m), submersion temporaire décennale (jusqu'à +2 m), submersion temporaire centennale (jusqu'à +3 m). Les zones submergées sont identifiées en croisant des données topographiques avec le niveau maximal pour chaque type de submersion. Les zones qui ne sont pas connectées à la mer sont exclues. Le traitement est fait de telle sorte que les zones représentant les différents types de submersion sont finalement disjointes.

En plus de ce traitement des données, il faut également gérer manuellement le fait que le trait de côte CLC 2006 et les données du MNT de l'IGN ne sont pas parfaitement connectées. Il existe des zones où les données de l'IGN ne s'étend pas jusqu'au trait de côte des données CLC2006, créant des surfaces qui devraient probablement être submergées. Pour améliorer cette analyse, ces surfaces sont ajoutées manuellement à la zone de submersion permanente, considérant l'hypothèse que ces zones sont entre 0 et 1 m d'altitude (Figure 38).

7.3. COMPARAISON AVEC D'AUTRES ÉVALUATIONS EN LANGUEDOC-ROUSSILLON

L'analyse menée ci-dessus permet une première cartographie des aléas côtiers dans le contexte du changement climatique en 2100 en Languedoc-Roussillon. Pour les raisons déjà citées, cette cartographie a de hauts niveaux d'incertitude. Aussi, nous comparons dans cette section les résultats avec d'autres études déjà menées dans la région, qui, même si elles ne suivent pas les mêmes approches, permettent de vérifier la consistance des différentes représentations.

7.3.1. Comparaison avec la cartographie réalisée dans le cadre du projet MISSEVA

La zone de submersion estimée dans l'étude MISSEVA est assez similaire aux zones d'aléas de submersion évaluées dans le présent projet (Figure 38). La cartographie MISSEVA propose une surface affectée par la submersion de 10 % inférieure à celle de la présente étude. Par exemple, à Palavas-les-Flots (Figure 39), la différence de la délimitation entre les deux zones est environ 200 m.

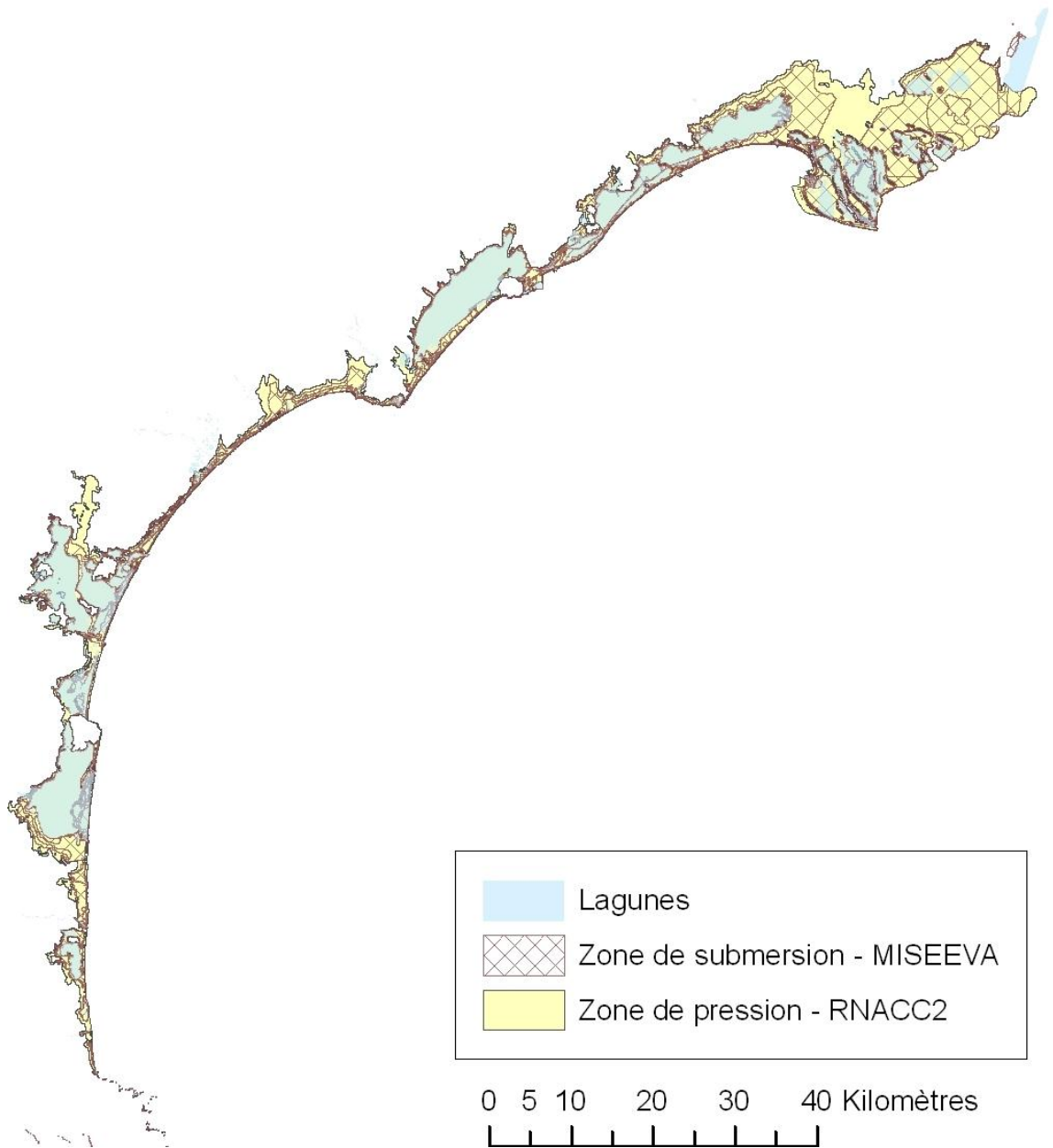


Figure 38 : Comparaison de la zone de pression évaluée dans cette étude avec la zone de submersion définie dans l'étude MISEEVA à l'échelle régionale.

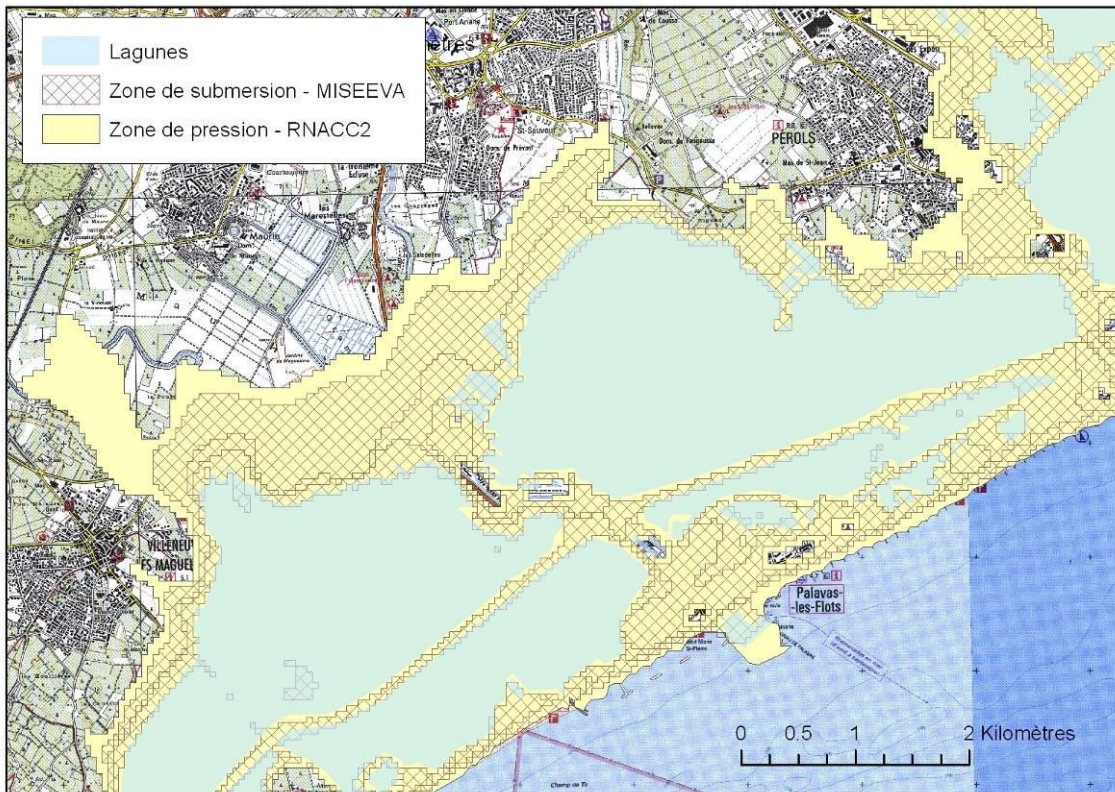


Figure 39 : Comparaison de la zone de pression évaluée dans cette étude avec la zone de submersion définie dans l'étude MISEEVA à l'échelle locale à Palavas-les-Flots.

7.3.2. Comparaison avec la cartographie AZISM (Atlas des Zones Inondables - Submersion Marine)

La comparaison entre la cartographie AZISM et la cartographie de cette étude (Figure 40) présente quelques grandes différences, mais restent cohérentes dans l'ensemble. Dans l'étude présentée ici, la limite de la submersion était située à 3 m NGF ou en limite de zone d'érosion (située ici presque toujours dans des zones en deçà de cette altitude). L'extension de la zone potentiellement affectée jusqu'à 5 m représente une augmentation de 32 % de la surface en comparaison avec la présente étude (Tableau 23). L'exemple à Palavas-les-Flots (Figure 41) montre une différence entre les deux cartographies de plus de 2 km dans les zones d'altitude basse, alors que la différence est de moins de 100 m dans d'autres zones avec une pente plus forte.

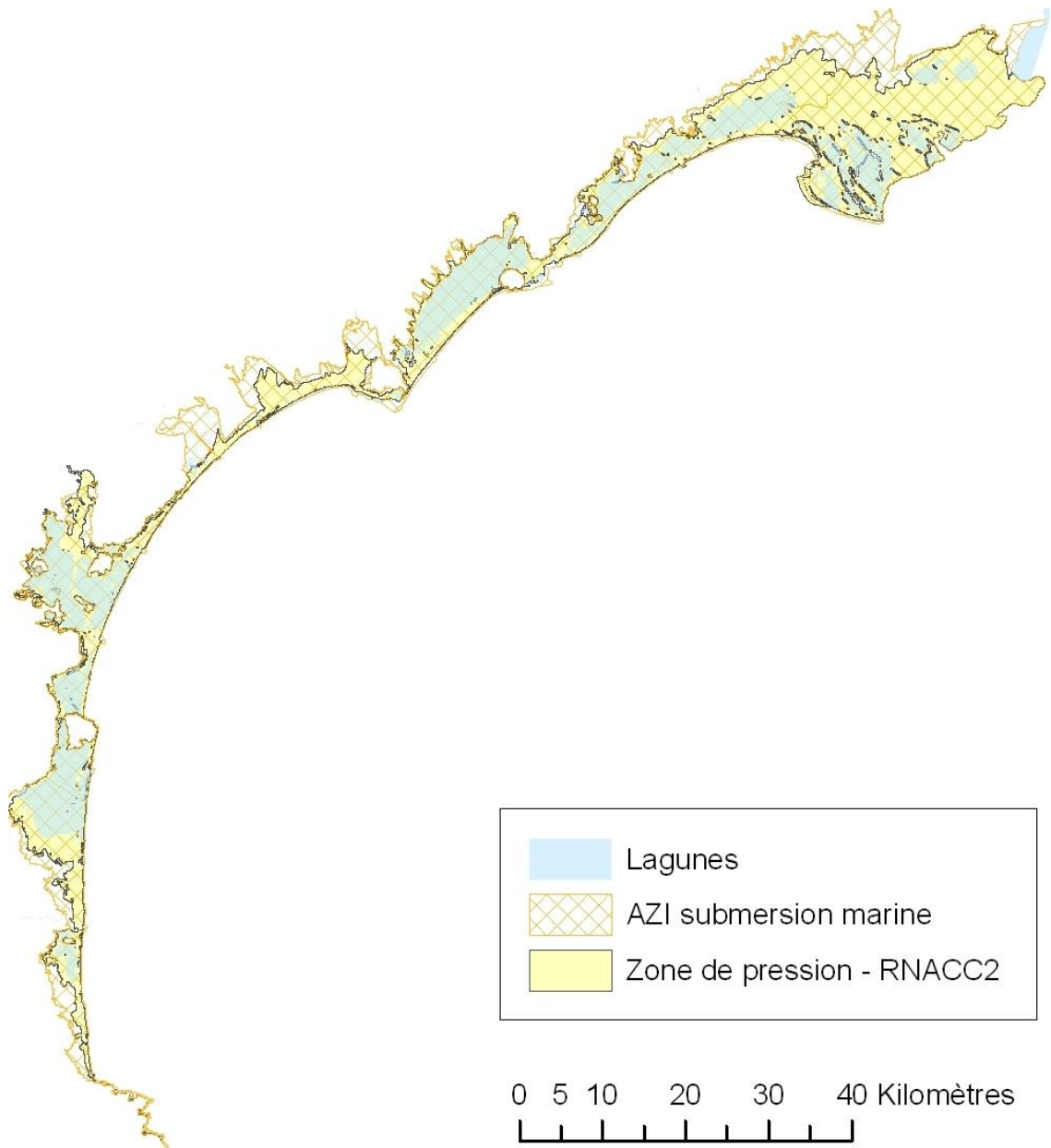


Figure 40 : Comparaison de la zone de pression évaluée dans cette étude avec la cartographie de l’AZI submersion marine à l’échelle régionale.

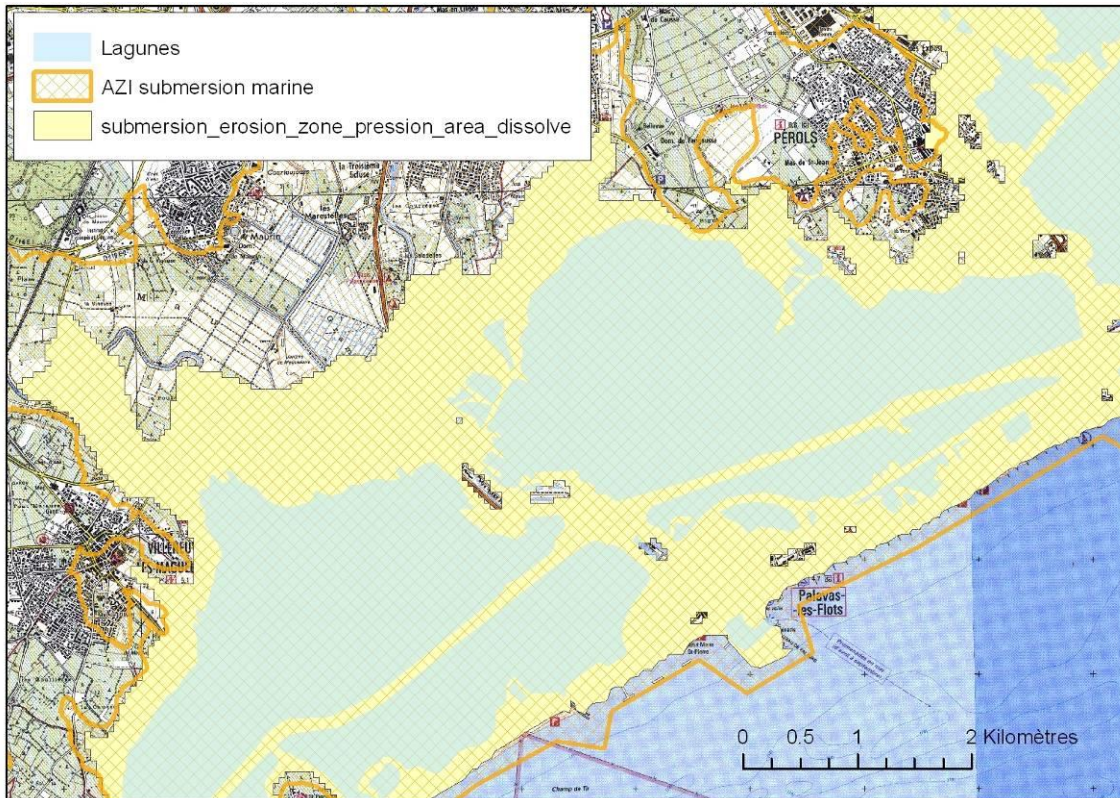


Figure 41 : Comparaison de la zone de pression évaluée dans cette étude avec la cartographie de l'AZI submersion marine à l'échelle locale de Palavas-les-Flots (à droite).

7.3.3. Limites de l'exercice de comparaison

Les différentes approches présentées ici sont différentes. La relative cohérence trouvée entre ces différentes cartographies ne doit pas faire oublier qu'elles bénéficieraient toutes de l'existence de données topographiques précises.

Cartographie des zones représentant les aléas de submersion marine temporaires et permanente	Surface affectée	Pourcentage différence avec l'étude actuelle
Présente étude	960 km ²	-
Cartographie MISEEVA (+ lagunes)	450 km ² (+420 km ²)	-10 %
Cartographie AZISM	1 270 km ²	+32 %

Tableau 23 : Les surfaces considérées potentiellement affectées par la submersion ou par l'érosion suivant les trois analyses, et pourcentage différence entre les autres cartographies et l'étude présente.

7.4. DÉNOMBREMENT DES BÂTIMENTS POTENTIELLEMENT AFFECTÉS

Il s'agit simplement de croiser la couche « Bâtiments Indifférenciés » de la BD-Topo avec les surfaces délimités pour chaque aléa. Dès que le niveau de l'eau ou la limite d'érosion affecte une partie d'un bâtiment, le bâtiment est considéré comme impacté.

Une procédure géomatique permet de garantir que chaque bâtiment n'est compté qu'une seule fois. Au total, plus de 70 000 bâtiments sont situés dans la zone concernée en Languedoc-Roussillon (Tableau 24). La zone la plus affectée en termes de nombre bâtiments est la zone de submersion temporaire décennale (entre +1 et +2 m NGF), avec environ 32 000 bâtiments.

Zones de pression	Nombre des bâtiments
<i>Zone d'érosion et de submersion permanente</i>	20 000
<i>Zone de submersion temporaire décennale</i>	32 000
<i>Zone de submersion temporaire centennale</i>	19 000
Total	71 000

Tableau 24 : Le nombre de bâtiments dans les zones de pression sur le Languedoc-Roussillon, selon la méthode proposée.

Dans l'étude RNACC-1 (2009), les logements étaient dénombrés alors que ce sont ici les bâtiments. Ceci conduit à minorer les coûts des dommages potentiels obtenus.

7.5. DISCUSSION : COMMENT S'EXPLIQUENT LES DIFFÉRENCES ENTRE L'ÉVALUATION DE 2009 ET LA PRÉSENTE ÉVALUATION ?

Les différences entre l'évaluation de 2009 et la présente évaluation sont très importantes. Lors de l'évaluation RNACC de 2009, le rapport mentionnait qu'il « n'était pas déraisonnable d'associer un facteur 10 d'incertitudes aux chiffres proposés ». L'analyse menée dans le chapitre 6 nous semble même indiquer que cette fourchette pourrait être dépassée.

Les différences constatées peuvent s'expliquer de la manière suivante :

- en premier lieu, la zone concernée par l'érosion a été considérablement réduite, dans la nouvelle approche en prenant en compte une loi combinant extrapolation des tendances historiques, prise en compte de l'élévation du niveau marin et expertise,
- de manière mécanique, la réduction de la zone concernée par l'érosion a conduit à augmenter celle concernée par les aléas de submersion temporaire et surtout permanente,
- la référence pour le dénombrement des bâtiments n'est pas la même dans les deux approches : l'une utilise les logements au sens INSEE, l'autre les bâtiments de la BD Topo Pays.

Comme cela a été indiqué plus haut, des incertitudes importantes demeurent sur l'évaluation des aléas.

Ces incertitudes importantes doivent être prises en compte s'il faut mener des analyses « coûts/bénéfices » pour évaluer la pertinence de mesures d'adaptation au changement climatique dans les zones côtières et orienter les choix de décideurs.

7.6. CONCLUSION : COMMENT UTILISER LES MÉTHODES DÉTERMINISTES PRÉSENTÉES DANS LA PRÉSENTE ÉTUDE ?

La nouvelle mise en œuvre de l'exercice « RNACC » a permis une actualisation de ses résultats. L'espérance mathématique des coûts des dommages potentiels est réduite d'un facteur 7 pour les aléas irréversibles d'érosion et de submersion permanente. Elle est augmentée d'un facteur 3 pour l'aléa de submersion temporaire. Ces résultats restent dans la fourchette d'incertitude annoncée dans le rapport du groupe de travail risques côtiers du RNACC-1 (2009).

L'exercice mené dans la présente étude n'invalide pas les travaux menés dans l'étude RNACC-1 (2009) : il invite en revanche à communiquer davantage sur les forts niveaux d'incertitudes qui sont associés avec la mise en œuvre de ce type d'approches. Ceci avait déjà été recommandé de manière insistante dans l'étude de 2009.

Le principal changement dans cette nouvelle évaluation est une prise en compte différente de l'aléa d'érosion : il est important de noter qu'aucune étude de validation des différentes lois existantes pour cartographier l'érosion ne permet de dire qu'une loi est meilleure qu'une autre. La loi retenue ici combine extrapolation des tendances historiques, prise en compte de l'élévation du niveau marin et expertise. Cette loi a le mérite de prendre en compte plus de processus. Le dire d'expert permet ici de supprimer les hautes fréquences de la variabilité du trait de côte. C'est une phase essentielle du traitement.

Dans des travaux ultérieurs, il sera possible d'améliorer cette approche sur les deux aspects suivants :

- concernant la submersion : la cartographie de la submersion pourra être améliorée lorsque les données Litto3D seront disponibles. Il sera alors pertinent de tenir compte des différents processus hydrodynamiques conduisant à la submersion, et ce pour un jeu de tempêtes représentatif, homogène et probabilisé ;
- concernant l'érosion : une topographie plus précise de la plage permettra un calcul de la pente de la plage plus réaliste et un ajustement de la loi présentée ici.

En conclusion, si l'approche présentée ici ne nous semble pas permettre de mener à bien une analyse coût/bénéfices fiable, elle contribue aux efforts menés pour améliorer la quantification des impacts potentiels du changement climatique sur les aléas érosion et submersion côtière. Elle contribue surtout à une meilleure compréhension des incertitudes associées à ces approches.

8. Conclusion et perspectives

Les analyses de risques associés au changement climatique (et plus précisément à l'élévation du niveau marin) donnent des résultats qui dépendent fortement du scénario adopté pour décrire l'évolution du climat. Depuis les dernières décennies, de nombreuses études ont été menées par la communauté scientifique pour répondre à ces questions. La création du GIEC en 1988 a permis de synthétiser la majorité des résultats obtenus dans des rapports scientifiques et publics. Les recommandations des rapports du GIEC sont considérées comme les sources d'information les plus fiables sur les changements climatiques.

Cette étude met en évidence que des sources d'incertitudes importantes demeurent lorsque des approches déterministes sont mises en œuvre. Ces sources d'incertitudes sont principalement liées aux limites de notre connaissance de l'élévation du niveau marin future, de la topographie, des processus d'érosion de long terme, mais aussi au positionnement du trait de côte.

Les paragraphes suivants synthétisent les principaux résultats issus de cette étude et évoquent quelques perspectives pour des études ultérieures.

• Données et choix d'un site d'étude

Le choix d'un site d'étude est conditionné à l'existence de données précises, notamment en altimétrie. À la date de mise en œuvre de cette étude, le site d'étude possible est délimité par la zone dans laquelle un levé Lidar effectué en 2007 a été effectué. Ceci constitue une limite dans la mesure où les zones situées en arrière des étangs n'avaient pas été levées. **Il sera cependant aisé de reproduire les méthodes présentées ici lorsque davantage de données Lidar seront disponibles**, notamment avec le programme Litto-3D du SHOM et de l'IGN. Par ailleurs, il serait important de disposer d'une **notice technique permettant à l'utilisateur d'évaluer la qualité du MNT Lidar disponible.**

• Choix d'une hypothèse d'élévation du niveau marin

L'analyse de sensibilité des résultats à l'élévation du niveau marin a été menée en considérant quatre scénarios différents : une élévation de 0 m, 0,5 m, 1 m et 1,5 m en 2100. Suivant la recommandation de Hulme (2002), **nous recommandons de prendre en compte dans tous les cas une hypothèse d'élévation du niveau marin supérieure de 50 % environ à la prévision globale**, soit 1 m d'élévation du niveau marin en 2100.

• Modèles numériques de terrain

Cette étude met en évidence l'intérêt de **disposer de données de MNT de bonne qualité**, non seulement pour évaluer les zones potentiellement submergées, mais

aussi pour détecter le trait de côte et pour évaluer la pente de la plage qui est un indicateur important de la capacité de résilience de la plage. Les résultats de l'étude montrent que, sans surprise, le MNT Intermap est plus précis que le MNT de l'IGN. Pour les applications en zone côtière cependant, il est souhaitable de disposer d'un MNT Lidar, perspective offerte par le programme Litto2D du SHOM et de l'IGN.

L'étude montre ainsi qu'il est possible d'améliorer les évaluations en mettant à disposition des données topographiques précises et justes (perspective offerte par Litto3D à relativement court terme), mais cela ne suffira pas à réduire suffisamment les incertitudes pour cartographier de manière juste et déterministe les conséquences du changement climatique en termes d'érosion et de submersion.

• **Méthodes d'évaluation des impacts potentiels du changement climatique en termes d'érosion**

Différentes approches pour cartographier l'érosion ont été mises en œuvre. L'approche de la création d'une zone tampon de 500 m se démarque des autres approches. Pour la rejeter définitivement, il faudrait disposer d'éléments de validation des autres lois. Cette approche peut permettre ainsi un premier zonage sur de grandes emprises. Ce zonage sera presque partout maximisant et est facile à mettre en œuvre, même avec peu de données.

Dès lors qu'un trait de côte précis existe, nous recommandons d'appliquer :

- l'approche par **extrapolation du trait de côte historique et Bruun modifié** si des traits de côte historiques existent,
- l'approche Bruun simple s'il n'existe pas de données historiques.

Dans tous les cas, les résultats de ces approches seront supervisés en prenant en compte l'expertise locale. S'il n'existe pas de trait de côte précis, il demeure possible de procéder par expertise.

Comme cela a été indiqué dans le chapitre 5, ces approches, basées sur la loi de Bruun, peuvent être critiquées – elles ne sont notamment pas validées. L'approche intégrant loi de Bruun et extrapolation des traits de côte historique sont cependant celles qui prennent en compte le plus de processus. Les limites de la loi de Bruun sont indiquées dans le chapitre 4, et on pourra se référer à Cooper et Pilkey (2004) pour une liste exhaustive des doutes existants concernant son application systématique.

• **Résultats des analyses de sensibilité**

Les résultats de l'étude de sensibilité montrent une variabilité importante selon les approches utilisées. **Les incertitudes apparaissent finalement liées en premier lieu au choix d'une hypothèse d'élévation du niveau marin, en second lieu mais de manière importante à la qualité des données altimétriques et à la connaissance des processus, et de manière mineure à la connaissance du trait de côte.**

Si l'on compare l'importance que prend chacune de ces sources d'incertitudes dans l'évaluation des coûts, il apparaît que le choix d'une hypothèse d'élévation du niveau

marin domine largement, alors que le choix d'une loi pour représenter l'érosion joue peu. Ce résultat nous semble être spécifique au site d'étude choisi. En particulier, le fait que le site d'étude soit plus petit que de la zone concernée par les aléas submersion et érosion nous semble être une limite importante de ce résultat.

Une meilleure connaissance de la topographie et de l'élévation du niveau marin permettrait de réduire significativement les incertitudes liées aux différents aléas de submersion. D'autre part, pour ce qui concerne la mise en œuvre des lois semi-empiriques représentant l'aléa d'érosion marine, il est important d'avoir une bonne représentation du trait de côte, mais il faudrait également améliorer la connaissance des processus d'érosion long terme.

La présente étude contribue ainsi aux efforts menés pour améliorer la quantification des impacts potentiels du changement climatique sur les aléas érosion et submersion côtière, suivant les approches déterministes menées notamment par Hinkel *et al.* (2009). Elle contribue surtout à une meilleure compréhension des incertitudes associées à ces approches et pourrait être intégrée dans des outils d'évaluation déterministes des conséquences du changement climatique pour en évaluer les incertitudes. Lorsque davantage de données Lidar seront disponibles, il sera possible d'enrichir ces conclusions avec la mise en œuvre du même type d'approches sur des zones plus vastes.

9. Remerciements

Nous remercions Intermap pour la fourniture gracieuse de données de MNT, la DREAL Languedoc-Roussillon pour de nombreuses données géoréférencées et Charlotte Vinchon et le projet MISSEVA pour la mise à disposition de leurs données de modélisation. Sylvie de Smedt, Cyril Vanroye, Céline Péhrerin, Céline Magnier, Frédérique Janvier, Sébastien Colas, Rachel Maire et Manuel Garcin sont remerciés pour les remarques ayant conduit à améliorer ce document.

10. Bibliographie

Albain M., Cazenave A., Valladeau G. et Guinehut S. (2009) - A new assessment of the error budget of global mean sea level rate estimated by satellite altimetry over 1993-2008. *Ocean Sci.*, 5, p. 193-201.

Alley R., Spencer M. and Anandakrishnan A. (2007) - Ice sheet mass balance, assessment, attribution and prognosis. *Annals Glaciology*, 46, p. 1-7.

Bélaïr C. (2007) - « Conséquences de l'élévation du niveau marin sur le patrimoine naturel en Languedoc-Roussillon. » Master I thèse, 42 p. Université de Montpellier II, Montpellier, France.

Boruff B.J., Emrich C. and Cutter S.L. (2005) - Erosion Hazard Vulnerability of US Coastal Counties. *J. Coast. Res.*, 21(5), p. 932-942.

Brunel C. (2010) - Evolution seculaire de l'avant-côte de la Méditerranée Française, Impact de l'élévation du niveau de la mer et des tempêtes. PhD thèse. Université Aix-Marseille I – Université de Provence, Marseille, France.

Bruun P. (1962) - Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal Waterways and Harbours Division*, 88(1-3), p. 117-130.

Carton J.A. et Giese B.S. (2008) - A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). *Month Weather Rev.* 136, p. 2999–3017.

Cazenave A., Lombard A. et Llovel W. (2008) - Present-day sea level rise: A synthesis. *C. R. Geoscience, Oceanography*. 340, 761-770, doi: 10.1016/j.crte.2008.07.008.

Cazenave A. et Llovel W. (2010) - Contemporary Sea Level Rise. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 2, 145-173, doi : 10.1146/annurev-marine-120308-081105.

Cooper J.A.G. and Pilkey O.H. (2004) - Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule. *Global and Planetary Change*, 43, p. 157-171.

Cowell P.J., Thom B.G., Jones R.A., Everts C.H. and Simanovic D. (2006) - Management of Uncertainty in Predicting Climate-Change Impacts on Beaches. *J. Coast. Res.*, 22(1), p. 232-245.

Domingues C.M., Church J.A., White N.J., Glecker P.J., Wijffels S.E., Barker P.M. et Dunn J.R. (2008) - Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature Letters*, 453(19), 1090-1094, doi: 10.1038/nature07080.

Durand P. and Heurtefeux H. (2006) - Impact de l'élévation du niveau marin sur l'évolution future d'un cordon littoral lagunaire : une méthode d'évaluation : Exemple

des étangs de Vic et de Pierre Blanche (littoral méditerranéen, France). *Zeitschrift Fur Geomorphologie*, p. 221-244.

Ericson J.P., Vörösmarty C.J., Dingman S.L., Ward L.G. and Meybeck M. (2006) - Effective sea-level rise and deltas: Causes of change and human dimension implications. *Glob. and Planetary Change*, 50, p. 63-82.

EUROSION (2004a) - Living with coastal erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability. Part III – Methodology for assessing regional indicators, 42 p.

EUROSION (2004b) - Vivre avec l'érosion côtière en Europe : Espaces et Sable pour un développement durable. Document traduit de l'anglais, 31 p.

GIEC (2007) - Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A.]. GIEC, Genève, Suisse, 103 p.

Garcin M., Desprats J.F., Fontaine M., Pedreros R., Attanayake N., Fernando S., Siriwardana C.H.E.R., De Silva U., Poisson B. (2008) - Integrated approach for coastal hazards and risks in Sri Lanka, *Natural Hazards and Earth Systems science*

Grinsted A., Morre J.C. and Jevrejeva S. (2010) - Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. *Clim. Dyn.*, 34, 461-472, DOI: 10.1007/s00382-008-0507-2.

German Advisory Council on Global Change (2006) - "The future oceans: warming up, rising high, turning sour," (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen Special Report, Berlin, 2006), 123 p.

Gornitz V.M., Daniels R.C., White T.W. and Birdwell K.R. (1994) - The Development of a Coastal Risk Assessment Database: Vulnerability to Sea-Level Rise in the U.S. Southeast. *J. Coast. Res.*, 12, p. 327-338.

Hinkel J. and Klein R.J.T. (2009) - Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise: The development of the DIVA tool. *Global Env. Change*, 19, p. 384-395.

Hinton C., Townend I.H., Nicholls R.J. (2007) - Coastal Processes. Chapter 9. In: Thorne CR, Evans EP, Penning-Roswell EC (eds). *Future Flooding and Coastal Erosion Risk*. Thomas Telford Publishing: London. 528 p.

Hulme M., Jenkins G.J., Lu X., Tumpenny J.R., Mitchell T.D., Jones R.G., Lowe J., Murphy J.M. and Co-authors (2002) - Climate Change Scenarios for the United Kingdom : The UKCIP02 Scientific Report. Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich, Norfolk, 120 p.

Krinner G. and Julien J. (2007) - High-resolution simulation of the surface mass balance of Greenland at the end of this century. *The Cryosphere Discuss.*, 1, p. 351-383.

Le Cozannet G., Lenôtre N., Nacass P., Colas S., Perherin C., Vanroye C., Peinturier C., Hajji C., Poupat B., Azzam C., Chemitte J. and Pons F. (2009) - Impacts du Changement Climatique, Adaptation et coûts associés en France pour les Risques Côtiers ; Rapport du Groupe de Travail « Risques Naturels, Assurances et Adaptation au Changement Climatique », BRGM/RP-57141-FR, Avril 2009.

List J.H., Sallenger A.H., Hansen M.E. and Jaffe B.E. (1997) - Accelerated relative sea-level rise and rapid coastal erosion: testing a causal relationship for the Louisiana barrier islands. *Marine Geology*, 140, p. 347-365.

Lombard A. (2005) - Les variations actuelles du niveau de la mer: Observations et causes. Thèse de Doctorat, 159 p., Université Toulouse III, Toulouse, France.

Meehl G.A., Stocker T.F., Collins W.D., Friedlingstein P., Gaye A.T., Gregory J.M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J.M., Noda A., Raper S.C.B., Watterson I.G., Weaver A.J. and Zhao Z.-C. (2007) - Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

MICORE (2009) - « Review of Climate Change Impacts on Storm Occurrence. » Eds. Ferreira, O., M. Vousdoukas, and P. Ciavola. Technical Report, 125 p.

Nerem R.S., Leuliette E. et Cazenave A. (2006) - Present-day sea-level change. *C.R. Geoscience, External Geophysics, Climate and Environment*. 338, p. 1077-1083, doi: 10.1016/j.crte.2006.09.001.

Nicholls R.J., Wong P.P., Burkett V.R., Codignotto J.O., Hay J.E., McLean R.F., Ragoonaden S. and Woodroffe C.D. (2007) - Coastal systems and low-lying areas. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 315-356.

Nicholls R.J. et Cazenave A. (2010) - Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science*, 328, 1517, doi: 10.1126/jscience.1185782.

Pilkey O.H. and Davis T.W. (1987) - An analysis of coastal recession models: North Carolina coast. In: Nummedal D, Pilkey OH, Howard JD (eds) *Sea-level fluctuation and coastal evolution*. SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication No. 41, Tulsa, Oklahoma, p. 59-68.

Pilkey O.H., Young R.S., Riggs S.R., Smith A.W.S., Wu H. et Pilkey W.D. (1993) - The Concept of Shoreface Profile of Equilibrium: A Critical Review. *J. Coast. Res.*, 9(1), p. 255-278.

Pilkey O.H. and Cooper J.A.G. (2004) - Society and Sea Level Rise. *Science*, 303, p. 1781-1782.

Rahmstorf S. (2007) - A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 215, p. 368-369.

Rignot E., Bamber J.L., Van Den Broeke M.R., Davis C., LI Y. (2008) - Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling, *Nature*, doi:10.1038/ngeo102.

Ross T., Garrett C. et Le Traon P.-Y. (2000) - Western Mediterranean sea-level rise : changing exchange flow through the Strait of Gibraltar. *Geophys. Res. Lett.*, 27(18), p. 2949-2952.

Saaty T.L. (2008) - 'Decisions making with the analytic hierarchy process', *Int. J. Services Sciences*, Vol. 1, No. 1, p. 83-98.

Samat O. (2007) - Efficacité et Impact des ouvrages en enrochement sur les plages microtidales. Le cas du Languedoc et du delta du Rhône. Thèse du Doctorat, Université Aix-Marseille 1, Marseille, France, 369 p.

Shaw J., Taylor R.B., Solomon S., Christian H.A. and Forbes D.L. (1998) - Potential Impacts of Global Sea-Level Rise on Canadian Coasts. *The Canadian Geographer*, 42(4), p. 365-379.

Snoussi M., Ouchani T., Khouakhi A. and Niang-Diop I. (2009) - Impacts of sea-level rise on the Moroccan coastal zone: Quantifying coastal erosion and flooding in Tangier Bay. *Geomorphology*, 107, p. 32-40.

Stockdon H.F., Holman R.A., Howd P.A. and Sallenger A.H. (2006) - Empirical parameterization of setup, swash, and runoff. *Coast. Eng.*, 53, p. 573-588.

Suarez S., Prosper-Laget V. et Provansal M. (1997) - Variation relative du niveau marin dans le delta du Rhône, implications tectoniques et/ou climatiques. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 324, série I1 a, p. 639-646.

Thieler E.R., Himmelstoss E.A., Zichichi J.L. and Ergul Ayhan (2009) - Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.

Tsimplis M.N., Marcos M. and Somot S. (2008) - 21st century Mediterranean sea level rise: Steric and atmospheric pressure contributions from a regional model. *Global and Planetary Change*, 63, p. 105-111.

Ullman A., Pirazzoli P.A., Tomasin A. (2007) - Sea surges in Camargue: Trends over the 20th century. *Continental Shelf Research*, 27, p. 922-934.

Vermeer M. and Rahmstorf S. (2009) - Global sea level linked to global temperature. *PNAS*, 106(51), p. 21527-21532.

Vinchon C., Idier D., Garcin M., Balouin Y., Mallet C., Aubié S., Closset L., with the collaboration of **Oliveros C., Pedreros R. and Lenôtre N.** (2006) - Response of the Coastline to Climate Change. Specific Report for the RESPONSE Project LIFE–Environment programm: Evolution of coastal risk (erosion and marine flooding) on the Aquitaine and Languedoc- Roussillon pilot regions. Final report. BRGM/RP-54718-FR. 153 p., 27 figs, 19 tables, 9 app., 1 CD-ROM.

Wright L.D., Boon J.D., Kim S.C. et List J.H. (1991) - Modes of cross-shore sediment transport on the shoreface of the Middle Atlantic Bight. *Marine Geology*, 96, p. 19-51.

Wunsch C., Ponte R.M. et Heimbach P. (2007) - Decadal Trends in Sea Level Patterns : 1993-2004. *J. Clim.*, 20, p. 5889-5911, doi:10.1175/2007JCLI1840.1.

Zhang K., Douglas B.C. and Leatherman S.P. (2004) - Global Warming and Coastal Erosion, *Climatic Change*, 64, p. 41-58.

Annexe 1

**Article étendu présenté à la conférence
« Littoral 2010 », Londres, 8-9 septembre 2010**

Climate change impact, adaptation and associated costs for coastal risks in France

Gonéri Le Cozannet, Nicole Lenôtre, Marissa Yates Michelin, Philippe Nacass, , Bastien Colas, Céline Perherin, Cédric Peinturier, Cyril Vanroye, Chadi Hajji, Bernard Poupat, Catherine Azzam, Jérôme Chemitte, Frédéric Pons.

ABSTRACT

As part of the French climate plan, an inter-ministerial working group called “climate change impacts, adaptations, and associated costs in France” was created to evaluate potential damages caused by climate change and to identify possible mitigation measures. Seven thematic committees were organized, including the “natural risks, insurance and adaptation to climate change” committee, within which the coastal risks working group focused on the impacts of erosion and coastal inundation. This paper presents the methodology, results, and recommendation of this working group.

A risk estimation methodology - where risk is considered as a combination of hazard and the vulnerability of the exposed assets – was developed at a regional scale for Languedoc-Roussillon in 2100. Sea level rise and hazard evolution scenarios were used to estimate the costs of damages to exposed assets. The results serve as a rough estimate of the direct and indirect tangible costs potentially induced by coastal erosion and inundation in the 21st century. This paper discusses the results, addressing the uncertainties in each step of the assessment, specifically identifying the factors that were not taken into account and the limitations of the data sets. Finally, recommendations of adaptation measures, spatial planning, and short-term risk management were produced.

Keywords: *erosion, inundation, risk analysis, Languedoc-Roussillon*

Cet article est accessible sur l'archive ouverte du BRGM.

Acknowledgement

This study was partly funded under the BRGM/MEEDDAT/DGPR/SRNH convention 0001337, action 6.1. For BRGM, the directorate for Research is gratefully acknowledged for support under the Riscote research framework. We thank Dr. S. Hallegatte, E. Romieu, and Dr. Y. Balouin for their useful comments and contributions.

Annexe 2

**Article accepté dans Journal of Coastal
Research ; Proceedings of the 11th International
Coastal Symposium, Szczecin, Poland, June 2011**

Quantifying Errors in Long-term Coastal Erosion and Inundation Hazard Assessments

M. Yates-Michelin, G. Le Cozannet et N. Lenôtre

ABSTRACT

As assessments of long-term coastal erosion and inundation hazards become more widespread due to observations of climate change impacts, the methods used to make these assessments are coming under increased scrutiny. Using observations from the Languedoc-Roussillon region of southern France, this study estimates errors associated with the evaluation of potential coastal erosion and inundation due to sea level rise. Three independent error analyses are completed addressing the impacts of variability in sea level rise predictions, evaluations of long-term coastal evolution, and the quality of available topographic data. The results are presented for the Languedoc-Roussillon site, demonstrating the need for high resolution topographic data, estimations of a range of probable sea level rise values, and expert evaluation of probable coastal evolution scenarios. The applied methods are generalized to be applicable at additional study sites.

Cet article sera accessible via le site internet de Journal of Coastal Research dès sa publication (abonnement). Il n'est pas possible de le reproduire ici intégralement afin de respecter la politique de publication de l'éditeur.

Acknowledgement

This work is supported by the French Ministry of Ecology, Energy, Sustainable Development, and the Sea (MEEDDM), and the authors thank Cyril Vanroye, Céline Perherin, and Sylvie De Smedt for their useful comments.

Annexe 3

Méthode d'évaluation de la submersion

Cette annexe expose comment cette méthode simplifie les processus en jeu pour cartographier les différents aléas de submersion : submersion « permanente » et submersion « temporaire ».

On peut noter que d'autres approches existent, notamment celle du projet MISEEVA dans laquelle les processus hydrodynamiques sont modélisés et dans lequel un aléa de submersion « récurrente » (correspondant à une submersion plusieurs fois par an) est introduit.

En tout état de cause, la méthode proposée ici est utilisée dans de nombreux projets, même s'il convient de recommander une modélisation des processus hydrodynamique dès que cela est possible (disponibilité de données hydro- et topographiques représentatives, justes et précises).

La submersion permanente

En l'absence de mesures d'adaptation, on suppose que la côte a une réponse passive ou quasi-passive à l'élévation du niveau de la mer. On considère que toutes les zones situées en deçà de l'altitude atteinte par le niveau marin en 2100 sont des zones submergées de manière permanente. Dans le projet RNACC, ce niveau était fixé à +1m NGF. Dans cette étude, on testera cette fois plusieurs scénarios d'élévation du niveau marin.

La submersion temporaire

La submersion temporaire est due à une augmentation de courte durée (par exemple quelques heures) du niveau d'eau, provoquée par des phénomènes comme les tempêtes ou les cyclones. Le niveau maximal atteint par l'eau dépend du niveau moyen de la mer (avec les effets de l'élévation du niveau marin), de l'amplitude de la marée, des surcotes et du jet de rive.

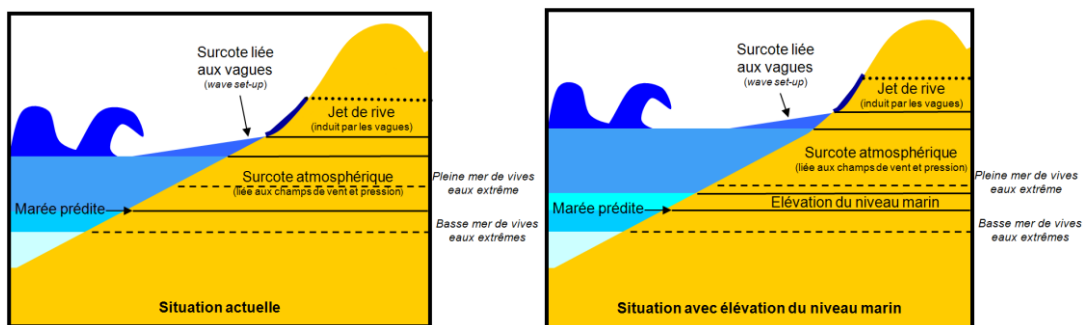


Figure 42 : Schéma des contributions au niveau maximal de l'eau dans la situation actuelle et la situation avec une élévation du niveau marin (ce schéma n'est pas à l'échelle).

Les surcotes et le jet de rive sont liés aux forçages atmosphériques et océaniques. Ils sont plus importants (et provoquent donc des submersions) lors d'évènements

extrêmes comme les tempêtes. Les surcotes contribuent au niveau moyen du plan d'eau. On distingue :

- la surcote atmosphérique, qui est due à deux processus différents :
 - l'effet de la pression atmosphérique (baromètre inverse) : une baisse de la pression atmosphérique cause une hausse du niveau de l'eau (a),
 - l'effet du vent (tensions de radiation) qui pousse des masses d'eau à la côte (b) ;
- la surcote liée au déferlement des vagues (le setup), due à l'excès de quantité de mouvement dans la zone de surf causant une surélévation du plan d'eau (c). Ce phénomène dépend de la bathymétrie et des caractéristiques des vagues et varie fortement aux échelles locales.

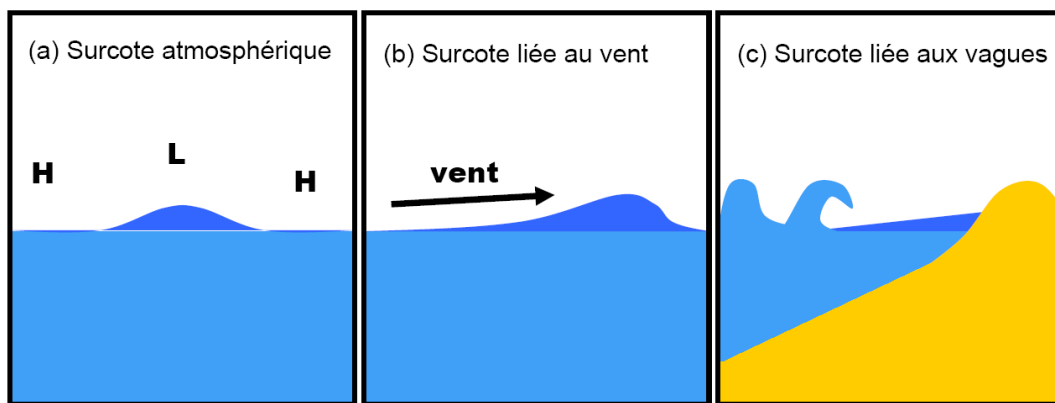


Figure 43 : Schéma de la surcote (bleu foncé) engendrée par trois forçages différents : (a) la surcote due à l'effet de la pression atmosphérique, (b) la surcote due au vent et (c) le setup, la surcote liée au déferlement des vagues (pas à l'échelle).

Le jet de rive s'ajoute à ce niveau moyen pour donner le niveau instantané de la mer. Le jet de rive est la nappe d'eau qui monte sur le rivage d'une plage sous l'impulsion des vagues après leur déferlement (avec l'excès d'énergie). Le niveau d'eau atteint dépend fortement des caractéristiques des vagues, de la bathymétrie, et de la topographie du rivage.

Le groupe de travail sur la révision du guide pour la prévention des risques littoraux (PPRL) considère que dans un certain nombre de situations, ce type d'approche (identification des zones situées sous un niveau marin de référence) est parfaitement adapté. Pour les autres situations, une analyse précise des zones impactées par la submersion requiert une bathymétrie et une topographie fine pour pouvoir modéliser l'ensemble des processus hydrodynamiques qui interviennent lors d'une tempête¹².

Cette étude suit la méthode appliquée dans le projet RNACC-1 (2009) :

¹² Le projet MISEEVA, financé par l'ANR, travaille actuellement sur cet aspect de la modélisation des zones submergées à l'échelle régionale et locale du Languedoc-Roussillon.

- estimation de +1 m pour un événement avec une période de retour de 10 ans,
- +2 m pour un événement avec une période de retour de 100 ans.

Le Guide d'élaboration des Plans de Prévention des Risques (PPR) en Languedoc-Roussillon préconise en effet de considérer un niveau marin centennal de +2 m NGF pour délimiter les zones touchées par les submersions marines (Source : DREAL Languedoc-Roussillon). Le sous-groupe risques côtiers du RNACC a quant à lui retenu la valeur de +1 m NGF pour le niveau marin décennal. Par la suite, suivant la terminologie du RNACC-1 (2009), on utilisera «abusivement» les termes « tempête décennale » et « tempête centennale » pour désigner des tempêtes associées à des niveaux marins de +1 m et +2 m NGF respectivement.

Ainsi, on considérera qu'une tempête décennale et une tempête centennale sont supposées affecter des zones entre 0 et +1 m NGF et 0 et +2 m NGF, respectivement (Figure 44). Dans le cas d'une élévation du niveau de la mer, les altitudes des zones touchées par la submersion sont «décalées» d'une quantité égale à l'élévation du niveau marin (exemple : pour 1 m d'élévation du niveau marin dans le projet RNACC-1 (2009)).

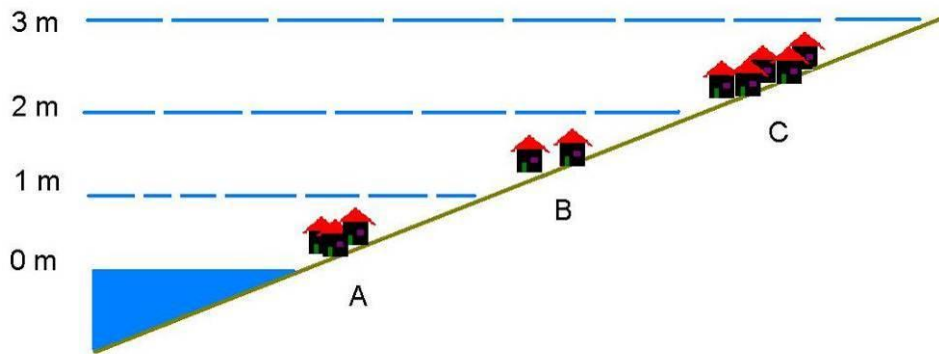


Figure 44 : Un exemple des zones affectées par la submersion temporaire : actuellement la zone A (occurrence décennale) et la zone B (occurrence centennale). Avec un scénario de 1 m d'élévation du niveau marin, il y a une translation verticale de 1 m des submersion temporaires. La submersion permanente affecte la zone A, et les submersion temporaires affectent la zone B (occurrence décennale) et la zone C (occurrence centennale). [source : RNACC-1 (2009)]

Nous appliquerons ces définitions de la submersion permanente et des submersions temporaires dans la suite de cette étude pour calculer les surfaces submergées. S'il est évident que celles-ci sont arbitraires, elles suffisent néanmoins pour l'approche « premier ordre » qui est menée dans cette étude. Une analyse détaillée de la submersion par une modélisation hydrodynamique complète en analysant les différentes périodes de retour dépasserait largement le cadre du projet.

Annexe 4

Méthode d'évaluation des incertitudes

Auteur : Thomas Bulteau.

Cette annexe a été rédigée dans le cadre du projet de recherche financé par le BRGM « Changement Climatique et Risques Côtiers » dans le cadre de travaux préparatoires à une cartographie à l'échelle nationale et régionale de la vulnérabilité physique de la zone côtière. Elle est reprise telle quelle afin de présenter comment sont effectués en pratique les calculs relatifs aux incertitudes dans le chapitre 6.

La méthode AHP permet de décomposer un problème complexe et non structuré en ses éléments constitutants, de modéliser ces éléments sous la forme d'une structure hiérarchique, de quantifier l'importance relative de chaque élément à partir de jugements subjectifs et enfin de synthétiser l'importance relative de chaque élément afin de déterminer des priorités parmi les actions potentielles.

La procédure se résume à 5 étapes :

- décomposer le problème en une structure hiérarchique,
- effectuer les combinaisons binaires (comparaisons par paires),
- déterminer les priorités,
- synthétiser les priorités,
- cohérence des jugements.

Étape 1 : décomposer le problème en une structure hiérarchique

Au sommet de la hiérarchie, on trouve l'objectif du problème décisionnel. Le niveau inférieur contient les éléments permettant d'atteindre cet objectif, et l'on procède ainsi autant de fois que nécessaire. Le dernier niveau hiérarchique contient les actions potentielles que l'on souhaite évaluer.

Étape 2 : effectuer les combinaisons binaires

Il s'agit de procéder à des comparaisons par paire des éléments d'un niveau hiérarchique donné par rapport à l'élément père (niveau hiérarchique immédiatement supérieur) dans la hiérarchie. On forme ainsi des matrices de comparaisons, dont les valeurs sont tirées de l'échelle de Saaty (transformation des jugements en valeurs numériques, voir tableau 1), tout en respectant le principe de réciprocité.

Ces valeurs numériques entières correspondent théoriquement aux plus proches entiers des ratios w_i/w_j où w_i représente l'importance relative de l'élément i par rapport aux autres éléments du même niveau hiérarchique. L'échelle de Saaty trouve une justification « mathématique » dans la loi de Weber-Fechner. Il s'agit d'une fonction de réponse logarithmique psychophysique (Saaty 2008) : $M = a \log(S) + b$, (a non nul). M représente la réponse à un stimulus de magnitude S . De plus le ratio de deux valeurs successives de « plus petite différence discernable » (ΔS , ou jnd en anglais, pour just noticeable difference) est égal au ratio des deux valeurs successives de stimuli (S) correspondants. Autrement dit, $\Delta S / S = r$, constante ne dépendant pas de S (Figueira *et al.* 2005). À partir de ce résultat et de la loi de Weber-Fechner, Saaty

montre que les valeurs entières 1,2,...,n (valeurs de l'échelle fondamentale de la méthode AHP) sont intrinsèques à notre habilité à faire des comparaisons entre deux stimuli (Saaty 2008). De plus, il suggère que nous sommes capables de distinguer de manière ordinale deux éléments entre faible, moyen, fort à un premier niveau et de nouveau à un niveau inférieur entre faible, moyen, fort pour chaque valeur ordinale du premier niveau. Par conséquent, il en découle 9 catégories, la première étant le couple (faible, faible) auquel la valeur entière 1 est associée, et la dernière étant le couple (fort, fort) auquel la valeur 9 est associée.

Étape 3 : déterminer les priorités

Cette étape consiste à déterminer l'importance relative des éléments en calculant le vecteur propre associé à la valeur propre principale de chaque matrice de comparaisons. Il s'agit de retrouver le vecteur $(w_1, \dots, w_n)^T$, à partir de la matrice de comparaisons $A = (a_{ij})$.

Dans le cas idéal où $a_{ij} = w_i / w_j$ (c'est-à-dire dans le cas où la matrice de comparaisons est réciproque et cohérente ($a_{ik} = a_{ij} a_{jk}$)), on peut remarquer que $Aw = nw$. Ce système a une solution non triviale si et seulement si n est une valeur propre de A . Puisque $rg(A)=1$, toutes les valeurs propres de A sont nulles à l'exception d'une seule. La somme des valeurs propres de A étant égale à la trace de A , elle-même égale à n , on en déduit que n est la valeur propre principale de A . w est positif et unique à une constante multiplicative près. En normalisant le vecteur w , il devient unique, et on peut remarquer qu'il s'agit en fait de n'importe quelle colonne de A normalisée (Saaty, 2008).

Degré d'importance	Définition	Explication
1	Importance égale des deux éléments	Deux éléments contribuent autant à la propriété.
3	Faible importance d'un élément par rapport à un autre.	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément à un autre
5	Importance forte ou déterminante d'un élément par rapport à un autre.	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément à un autre
7	Importance attestée d'un élément par rapport à un autre.	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique.
9	Importance absolue d'un élément par rapport à un autre.	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible.
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines.	Un compromis est nécessaire entre deux appréciations.

Tableau 25 : Échelle de Saaty (issue de Hammami, 2003).

Dans le cas plus commun où la matrice A n'est pas nécessairement cohérente, Saaty montre que le problème reste le même, c'est-à-dire que trouver un vecteur de poids w pour les éléments comparés passe par la résolution du problème aux valeurs propres :

$Aw = \lambda_{\max} w$, avec $\lambda_{\max} \geq n$ (avec égalité ssi A est cohérente). L'existence et l'unicité de w dans le cas non-cohérent sont prouvées en utilisant le concept de dominance et les puissances limitantes de A (Saaty, 2008).

Étape 4 : synthétiser les priorités

Il s'agit d'établir la performance relative générale de chacune des actions. Ceci est fait par une méthode additive des différents poids calculés précédemment.

Étape 5 : cohérence des jugements

On calcule d'abord l'indice de cohérence pour chaque matrice de comparaison :

$$IC = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)},$$

où λ_{\max} est la valeur propre principale de la matrice de comparaisons et n le nombre d'éléments comparés.

Cet indice de cohérence est une mesure du degré d'incohérence de la matrice (plus IC est grand, moins la matrice est cohérente). Saaty montre qu'il s'agit en fait de la moyenne des valeurs propres non principales de la matrice (Saaty, 2008). Par conséquent, $IC = 0$ ssi la matrice est cohérente (ce qui se traduit également par $\lambda_{\max} = n$).

On calcule ensuite le ratio de cohérence RC défini par :

$$RC = 100 \frac{IC}{AIC},$$

où AIC est l'indice de cohérence moyen obtenu en générant aléatoirement des matrices de jugement de même taille. Le Tableau 26 donne la correspondance entre l' AIC et n .

Dimension de la matrice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AIC	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Tableau 26 : Indice de cohérence moyen (issu de Hammami, 2003).

Saaty soutient qu'un ratio RC ne devrait pas excéder 10 %. Autrement les comparaisons par paires doivent être révisées pour réduire les incohérences. En outre, Saaty estime que le nombre d'éléments comparés ne devrait pas excéder 7 (au-delà nous ne sommes pas capables de faire des modifications de jugement précises sur plusieurs éléments à la fois) (Saaty, 2008).

Annexe 5

Mise en œuvre de la méthode d'évaluation des incertitudes

CRITÈRE N° 1 : SURFACES IMPACTÉES

Érosion en 2100

Comme le montre la Figure 21, la loi de Bruun indique que le recul en mètres du trait de côte varie linéairement avec l'élévation du niveau marin, avec une variabilité qui dépend de la pente de la côte. Le recul moyen est de 40 m pour 50 cm d'élévation du niveau marin contre 90 m avec 1 m d'élévation du niveau marin. L'incertitude représentée par l'écart type de la variabilité du recul du trait de côte est de l'ordre de ± 10 m pour 50 cm d'élévation du niveau marin et de ± 20 m pour 1 m d'élévation du niveau marin. Ainsi, « *l'expérience favorise fortement un critère par rapport à un autre* », et l'on affecte la valeur 5 pour quantifier la dominance de la justesse de la prédiction de l'élévation du niveau marin sur la connaissance des données altimétriques pour évaluer le recul du trait de côte.

Des analyses similaires permettent de remplir le tableau 27. Ces analyses s'appuient sur les résultats présentés dans :

- la Figure 21 pour caractériser l'importance de l'élévation du niveau marin (entre 1,3 km² et 3,8 km² pour 0,5 et 1,5 m d'élévation du niveau marin),
- le Tableau 15 et la Figure 32 pour caractériser l'importance de la qualité des données altimétriques (entre 2,6 km² et 4,2 km² selon les MNT),
- le Tableau 18 pour caractériser l'importance de la connaissance des processus (surfaces potentiellement érodées entre 1,9 km² et 3,2 km² et jusqu'à 14 km² pour l'approche « EuroSION »),
- le paragraphe 5.2.4 pour caractériser l'importance de l'identification du trait de côte (écart type des différences de l'ordre de 25 m pour Histolitt et Corinne Land Cover par rapport aux données Lidar).

Le spectre des valeurs prises pour chaque surface concernée donne une indication sur l'importance relative des incertitudes associées à chaque source d'incertitudes.

Dans le tableau 27, les incertitudes liées à la connaissance des processus ont une importance très grande. Ceci est justifié par l'absence de validation des lois de recul du trait de côte.

La dernière colonne du tableau indique le niveau d'importance relative de chacune des sources d'incertitudes. La valeur du niveau d'importance n'est pas une donnée d'une grande précision, mais elle permet malgré tout de hiérarchiser les incertitudes. Ainsi, cette analyse conclut que les incertitudes liées à l'évaluation de l'érosion sont liées :

- en premier lieu (pour moitié) à la connaissance des processus,
- en second lieu (pour un quart) à la connaissance de l'élévation du niveau marin,
- pour une faible partie à la connaissance du trait de côte,
- pour une très faible partie à la qualité des données altimétriques.

Érosion en 2100	Elévation du niveau marin	Qualité des données altimétriques	Connaissance des processus	Connaissance du trait de côte	Synthèse
Choix de l'hypothèse d'élévation du niveau marin	1	5	1/3	3	25 %
Qualité des données altimétriques	1/5	1	1/7	1/3	5 %
Connaissance des processus d'érosion	3	7	1	7	59 %
Précision du trait de côte	1/3	3	1/7	1	10 %

Tableau 27 : Importance relative des principales sources d'incertitude pour l'évaluation déterministe de l'érosion potentielle en 2100 (indice de cohérence du jugement : 0,08).

Submersion permanente en 2100

La submersion permanente est appliquée sur les zones situées en-deçà du niveau marin moyen en 2100 et qui n'ont pas déjà été considérées comme érodées. Le tableau 28 est ainsi rempli en s'appuyant sur les résultats présentés dans :

- le Tableau 9 pour caractériser l'importance de l'élévation du niveau marin (entre 2,2 km² et 4,3 km² pour 0,5 et 1,5 m d'élévation du niveau marin),
- le Tableau 15 et la Figure 32 pour caractériser la qualité des données altimétriques (entre 2,3 km² et 7,3 km² pour selon les MNT),
- le Tableau 19 et la Figure 36 pour caractériser l'importance de la connaissance des processus (surfaces potentiellement érodées entre 3,2 km² et 3,6 km², mais 0,9 km² pour l'approche « Eurosion »).

En ce qui concerne la précision de la position du trait de côte, nous considérons que cette source d'incertitude affecte en premier lieu les surfaces potentiellement érodées dans cette analyse. En effet, les zones les plus proches de la côte sont déjà considérées comme érodées (Figure 31).

Le niveau d'importance relative de chacune des sources d'incertitudes est obtenu de la même manière que précédemment. Il est donné dans la dernière colonne du tableau 28. Cette analyse conclut que les incertitudes liées à la submersion permanente sont liées :

- en premier lieu (pour moitié) à la qualité des données altimétriques,
- en second lieu (pour un tiers) aux limites de notre connaissance de l'élévation du niveau marin,
- pour une faible partie aux limites de notre connaissance des processus,
- pour une très faible partie à la connaissance du trait de côte.

En définitive, ce résultat rejoint l'idée selon laquelle la gamme d'élévations du niveau marin possibles induit moins de variabilité dans le résultat final que l'imprécision du MNT.

Submersion permanente en 2100	Élévation du niveau marin	Qualité des données altimétriques	Connaissance des processus	Connaissance du trait de côte	Synthèse
Choix de l'hypothèse d'élévation du niveau marin	1	1/3	4	7	29 %
Qualité des données altimétriques	3	1	5	9	57 %
Connaissance des processus d'érosion	1/4	1/5	1	3	10 %
Précision du trait de côte	1/7	1/9	1/3	1	4 %

Tableau 28 : Importance relative des principales sources d'incertitudes pour l'évaluation déterministe de la submersion permanente en 2100 par rapport à l'état actuel (indice de cohérence du jugement : 0,07).

Submersion temporaire en 2100 (événement décennal)

On procède de la même manière pour la submersion temporaire (événement décennal) en 2100 en utilisant les résultats suivants :

- le Tableau 9 pour caractériser l'importance de l'élévation du niveau marin (entre 1,3 km² et 3,4 km² pour 1,5 et 0,5 m d'élévation du niveau marin respectivement),
- le Tableau 15 et la Figure 32 pour caractériser la qualité des données altimétriques (entre 2,4 km² et 2,6 km² selon les MNT),
- le Tableau 19 et la Figure 36 pour caractériser l'importance de la connaissance des processus (surfaces potentiellement érodées entre 2,3 km² et 2,9 km², mais 0,2 km² pour l'approche « Eurosion »).

De la même manière que précédemment, on considère que la précision de la position du trait de côte affecte en premier lieu les surfaces potentiellement érodées dans cette analyse, et non les surfaces de submersion.

Cette analyse conclut que les incertitudes liées à la submersion temporaire (événement décennal) sont liées :

- en premier lieu (pour moitié) aux limites de notre connaissance de l'élévation du niveau marin,
- en second lieu (pour un cinquième) aux limites de notre connaissance des processus,
- pour une faible partie à la qualité des données altimétriques,
- pour une très faible partie à la connaissance du trait de côte.

La faible importance que prend la qualité des données altimétriques est contre-intuitive. Elle rejoint l'idée selon laquelle les erreurs commises localement se compensent lorsque l'on raisonne à des échelles plus larges. Pourtant, il faut noter que cette hypothèse n'est pas vérifiée pour la submersion centennale et permanente. D'autre part, nous verrons plus bas que la relative cohérence des surfaces potentiellement affectées par un aléa de submersion décennal masque le fait que les surfaces potentiellement impactées ne sont pas les mêmes. Ceci est illustré dans la Figure 32 dans laquelle on peut noter que selon le MNT employé, il y a une grande variabilité des occupations du sol touchées.

En tout état de cause, nous pouvons considérer que ce que nous observons ici est lié à la géomorphologie et à la topographie locale. Cela a des applications pratiques limitées dans la mesure où, *in-fine*, les surfaces délimitées ne sont pas les mêmes selon les MNT.

Submersion temporaire en 2100 (événement décennal)	Élévation du niveau marin	Qualité des données altimétriques	Connaissance des processus	Connaissance du trait de côte	Synthèse
Choix de l'hypothèse d'élévation du niveau marin	1	5	4	9	60 %
Qualité des données altimétriques	1/5	1	1/2	5	14 %
Connaissance des processus d'érosion	1/4	2	1	7	22 %
Précision du trait de côte	1/9	1/5	1/7	1	4 %

Tableau 29 : Importance relative des principales sources d'incertitude pour l'évaluation déterministe de la submersion temporaire (événement centenal) en 2100 par rapport à l'état actuel (indice de cohérence du jugement : 0,10).

Submersion temporaire en 2100 (événement centennial)

On procède de la même manière pour la submersion temporaire (événement centennial) en 2100 en utilisant les résultats suivants :

- le Tableau 9 pour l'importance de l'élévation du niveau marin (entre 0,4 km² et 2 km² pour 1,5 et 0,5 m d'élévation du niveau marin respectivement),
- le Tableau 15 et la Figure 32 pour la qualité des données altimétriques (entre 1 km² et 2,8 km² selon les MNT),
- le Tableau 19 et la Figure 36 pour l'importance de la connaissance des processus (surfaces potentiellement érodées entre 0,9 km² et 1,1 km², mais 0,3 km² pour l'approche « Eurosion »).

De la même manière que précédemment, on considère que la précision de la position du trait de côte affecte en premier lieu les surfaces potentiellement érodées dans cette analyse, et non les surfaces de submersion.

Submersion temporaire en 2100 (événement centennal)	Élévation du niveau marin	Qualité des données altimétriques	Connaissance des processus	Connaissance du trait de côte	Synthèse
Choix de l'hypothèse d'élévation du niveau marin	1	3	7	9	58 %
Qualité des données altimétriques	1/3	1	5	8	30 %
Connaissance des processus d'érosion	1/7	1/5	1	3	8 %
Précision du trait de côte	1/9	1/8	1/3	1	4 %

Tableau 30 : Importance relative des principales sources d'incertitude pour l'évaluation déterministe de la submersion temporaire (événement centenal) en 2100 par rapport à l'état actuel (indice de cohérence du jugement : 0,1).

Cette analyse conclut que les incertitudes liées à la submersion temporaire (événement centenal) sont liées :

- en premier lieu (pour moitié) aux limites de notre connaissance de l'élévation du niveau marin,
- en second lieu (pour un tiers) à la qualité des données altimétriques,
- pour une faible partie aux limites de notre connaissance des processus,
- pour une très faible partie à la connaissance du trait de côte.

CRITÈRE N° 2 : TERRITOIRES URBANISÉS ET ARTIFICIALISÉS POTENTIELLEMENT IMPACTÉS

Érosion en 2100

Le tableau 31 est renseigné de la même manière que précédemment en constatant que :

- selon les scénarios d'élévation du niveau marin, les surfaces urbanisées et artificialisées concernées par l'érosion en 2100 varient entre +0,5 et +1,5 m en 2100, entre 0,2 et 0,6 km² ;
- selon le MNT choisi, les surfaces urbanisées et artificialisées concernées par l'érosion en 2100 varient entre 0,3 et 1 km² ;
- selon la loi choisie pour représenter les processus d'érosion, les surfaces urbanisées et artificialisées concernées par l'érosion en 2100 varient entre 0 et 3,5 km² ;

- l'identification du trait de côte peut induire des erreurs dans la quantification de l'érosion (écart type des différences de l'ordre de 25 m pour Histolitt et Corinne Land Cover par rapport aux données Lidar).

Érosion en 2100	Élévation du niveau marin	Qualité des données altimétriques	Connaissance des processus	Connaissance du trait de côte	Synthèse
Choix de l'hypothèse d'élévation du niveau marin	1	1	1/5	1	13 %
Qualité des données altimétriques	1	1	1/5	1	13 %
Connaissance des processus d'érosion	5	5	1	5	63 %
Précision du trait de côte	1	1	1/5	1	13 %

Tableau 31 : Importance relative des principales sources d'incertitude pour l'évaluation déterministe de l'érosion potentielle en 2100 pour le critère n° 2 (indice de cohérence du jugement : 0).

La connaissance des processus est la source principale d'incertitudes. Le positionnement du trait de côte, la qualité des données altimétriques et la connaissance de l'élévation du niveau marin sont des sources d'incertitudes équivalentes au second ordre.

Submersion permanente en 2100

Le tableau 32 est renseigné de la même manière que précédemment en constatant que :

- selon les scénarios d'élévation du niveau marin, les surfaces urbanisées et artificialisées concernées par la submersion permanente en 2100 varient entre +0,5 et +1,5 m en 2100, entre 0,1 et 0,9 km² sont potentiellement affectés ;
- selon la qualité des données altimétriques, les surfaces urbanisées et artificialisées concernées par la submersion permanente en 2100 varient entre 0,2 et 0,4 km² ;
- selon la loi choisie pour représenter les processus d'érosion, les surfaces urbanisées et artificialisées concernées par la submersion permanente en 2100 varient entre 0 et 0,5 km², mais si l'on excepte l'approche EuroSION (zone tampon), toutes les évaluations sont situées autour de 0,5 km².

Comme précédemment, la position du trait de côte est un paramètre qui influe plus directement l'évaluation de la surface potentiellement érodée.

Pour ce qui concerne la spatialisation de l'aléa de submersion permanente, la connaissance de l'élévation du niveau marin est la source principale d'incertitudes, suivi de la qualité des données altimétriques. La connaissance des processus est une

source d'incertitudes au second ordre. Le positionnement du trait de côte est une source d'incertitudes moins importante.

Érosion en 2100	Élévation du niveau marin	Qualité des données altimétriques	Connaissance des processus	Connaissance du trait de côte	Synthèse
Choix de l'hypothèse d'élévation du niveau marin	1	3	4	9	55 %
Qualité des données altimétriques	1/3	1	5	7	31 %
Connaissance des processus d'érosion	1/4	1/5	1	2	9 %
Précision du trait de côte	1/9	1/7	1/2	1	5 %

Tableau 32 : Importance relative des principales sources d'incertitude pour l'évaluation déterministe de la submersion permanente potentielle en 2100 pour le critère n° 2 (indice de cohérence du jugement : 0,09).

Submersion temporaire en 2100 (événement décennal)

Le tableau 33 est renseigné de la même manière que précédemment en constatant que :

Érosion en 2100	Élévation du niveau marin	Qualité des données altimétriques	Connaissance des processus	Connaissance du trait de côte	Synthèse
Choix de l'hypothèse d'élévation du niveau marin	1	1	5	9	44 %
Qualité des données altimétriques	1	1	4	9	41 %
Connaissance des processus d'érosion	1/5	1/4	1	9	12 %
Précision du trait de côte	1/9	1/9	1/5	1	4 %

Tableau 33 : Importance relative des principales sources d'incertitude pour l'évaluation déterministe de la submersion décennale en 2100 pour le critère n° 2 (indice de cohérence du jugement : 0,06).

- selon les scénarios d'élévation du niveau marin, les surfaces urbanisées et artificialisées concernées par la submersion temporaire décennale en 2100 varient entre 0,5 et 1,1 km² ;
- selon la qualité des données altimétriques, les surfaces urbanisées et artificialisées concernées par la submersion temporaire décennale varient entre 0,5 et 1,1 km² ;

- selon la loi choisie pour représenter les processus d'érosion, les surfaces urbanisées et artificialisées concernées par la submersion temporaire décennale varient entre 0,5 et 0,8 km², mais si l'on excepte l'approche EuroSION (zone tampon), toutes les évaluations sont situées autour de 0,8 km².

Pour ce qui concerne la submersion temporaire décennale, la connaissance de l'élévation du niveau marin et la qualité des données altimétriques sont des sources d'incertitudes d'égale importance. La connaissance des processus d'érosion est une source d'incertitudes au deuxième ordre.

Submersion temporaire en 2100 (événement centennal)

Le tableau 34 est renseigné de la même manière que précédemment en constatant que :

- selon les scénarios d'élévation du niveau marin, les surfaces urbanisées et artificialisées concernées par la submersion temporaire centennale en 2100 varient entre 0,4 et 0,9 km² (1,1 km² pour +0 m d'élévation du niveau marin) ;
- selon la qualité des données altimétriques, les surfaces urbanisées et artificialisées concernées par la submersion temporaire décennale en 2100 varient entre 0,4 et 0,8 km² ;
- selon la loi choisie pour représenter les processus d'érosion, les surfaces urbanisées et artificialisées concernées par la submersion temporaire décennale en 2100 varient entre 0 et 0,5 km², mais si l'on excepte l'approche de type EuroSION, tous les résultats sont proches de 0,5 km².

Érosion en 2100	Élévation du niveau marin	Qualité des données altimétriques	Connaissance des processus	Connaissance du trait de côte	Synthèse
Choix de l'hypothèse d'élévation du niveau marin	1	3	7	9	58 %
Qualité des données altimétriques	1/3	1	5	8	30 %
Connaissance des processus d'érosion	1/7	1/5	1	3	8 %
Précision du trait de côte	1/9	1/8	1/3	1	4 %

Tableau 34 : Importance relative des principales sources d'incertitude pour l'évaluation déterministe de la submersion centennale en 2100 pour le critère n° 2 (indice de cohérence du jugement : 0,08).

Pour ce qui concerne la submersion temporaire centennale, la connaissance de l'élévation du niveau marin, puis la qualité des données altimétriques sont les sources d'incertitudes les plus importantes. La connaissance des processus d'érosion est une source d'incertitudes mineure.



**Centre scientifique et technique
Service risques**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34