

**FUSION DES DONNÉES AÉROPORTÉES
OBTENUES PAR LIDAR TOPOGRAPHIQUE
ET BATHYMÉTRIQUE LORS DES
PROJETS *RES#LON* ET *FUDOTERAM***

Par

Bernard LONG et Régis XHARDÉ

INRS-Eau, Terre et Environnement

Pour

le Ministère des Transports du Québec

Rapport final – version révisée
contrat 33 110 X004.1

Québec, juillet 2009

ISBN : 978-2-89146-758-2

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	2
LISTE DES FIGURES	4
LISTE DES TABLEAUX.....	7
1. HISTORIQUE ET PROBLÉMATIQUE.....	8
2. OBJECTIFS	10
3. LES CAMPAGNES AÉRIENNES.....	11
3.1 Matériel utilisé pour les relevés aériens.....	12
3.2 La plate-forme et les systèmes de positionnement	15
3.3 Les secteurs couverts	16
4. MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL.....	21
4.1 Traitement et analyse des données LiDAR.....	21
4.1.1 Prétraitement des données.....	21
4.1.2 Traitement des données.....	22
4.1.3 Analyse des données	27
4.1.3.1 Variations horizontales du trait de côte	27
4.1.3.2 Variations volumiques	33
4.1.3.3 Géomorphologie côtière.....	33
5 RÉSULTATS.....	34
5.1 Secteur de Saint-Siméon.....	34
5.1.1 Zone du havre de pêche du Ruisseau-Leblanc.....	36
5.1.2 Zone des talus	38
5.1.3 Zone de l'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure	39
5.1.4 Zone du marais de Saint-Siméon	41
5.2 Secteur de Bonaventure	44
5.2.1 Zone de talus.....	45
5.2.2 Zone du barchois de Bonaventure – flèche ouest (pointe Beaubassin)...	47
5.2.3 Zone du barchois de Bonaventure – flèche est (Banc de l'Est)	50
5.3 Secteur de Paspébiac.....	55
5.3.1 Zone de la barrière ouest – plage nord-ouest.....	57
5.3.2 Zone de la barrière ouest – plage sud-ouest.....	59
5.3.3 Zone de la barrière est.....	63
5.3.4 Zone de la plage à Norbert.....	71
5.3.5 Zone des falaises.....	76
5.4 Secteur de Saint-Godefroi.....	80
5.4.1 Zone des falaises.....	81
5.4.2 Zone de la flèche sud-ouest.....	85
5.4.3 Zone de la flèche nord-est.....	88
5.4.4 Zone des talus	90
6. INTERPRÉTATION.....	94
6.1 Secteur de Saint-Siméon et Bonaventure.....	94
6.2 Secteur de Paspébiac.....	111
6.3 Secteur de Saint-Godefroi.....	131
CONCLUSION.....	137

BIBLIOGRAPHIE	143
ANNEXE 1 – DESCRIPTION DES LIVRABLES (DVD)	145
ANNEXE 2 – MNT (Secteurs de Saint-Siméon et Bonaventure)	151
ANNEXE 3 – MNT (Secteurs de Paspébiac et Saint-Godefroi)	166
ANNEXE 4 – CARTES MORPHO-SÉDIMENTAIRES	173
ANNEXE 5 – MNVE 2003-2004 DES TALUS (Saint-Siméon)	179
ANNEXE 5 – MNVE 2003-2004 DES TALUS (Bonaventure)	194
ANNEXE 5 – MNVE 2003-2004 DES TALUS (Saint-Godefroi)	211

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 – Avion bimoteur Navajo ayant été utilisé pour les relevés aériens de 2003 et 2004 .	15
Figure 3.2 – Avion bimoteur Beechcraft King Air A90 ayant été utilisé pour les relevés aériens de 2006.	15
Figure 3.3 – Zone couverte dans le secteur de Saint-Siméon en 2003 et 2004.	17
Figure 3.4 – Zone couverte dans le secteur de Bonaventure en 2003 et 2004.	17
Figure 3.5 – Zone couverte dans le secteur de Paspébiac en 2003 et 2004.	18
Figure 3.6 – Zone couverte dans le secteur de Saint-Godefroi en 2003 et 2004.	18
Figure 3.7 – Zone couverte dans le secteur de Saint-Siméon – Bonaventure en 2006.	20
Figure 3.8 – Zone couverte dans le secteur de Paspébiac – Saint-Godefroi en 2006.	20
Figure 4.1 – Schéma illustrant le problème de positionnement du trait de côte.	28
Figure 4.2 – Influence de la résolution des relevés sur la position du trait de côte (secteur du marais de Saint-Siméon, 2006).	32
Figure 4.3 – Variation de position du trait de côte au niveau du marais côtier de Saint-Siméon selon le mode de relevé utilisé (topographique ou hydrographique "basse densité").	32
Figure 5.1 – Environnements côtiers dans le secteur de Saint-Siméon.	35
Figure 5.2 – Zone du havre de pêche du Ruisseau-Leblanc, secteur de Saint-Siméon.	37
Figure 5.3 – Variations de position du trait de côte sur la plage du Ruisseau, à l'ouest du havre de pêche du Ruisseau-Leblanc, secteur de Saint-Siméon.	37
Figure 5.4 – Variations de position du trait de côte le long des talus, secteur de Saint-Siméon.	38
Figure 5.5 – Variations de position du trait de côte dans la zone de l'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure, secteur de Saint-Siméon.	39
Figure 5.6 – Morphologie de la flèche d'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure en 2003.	40
Figure 5.7 – Morphologie de la flèche d'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure en 2006.	41
Figure 5.8 – Variations de position du trait de côte au niveau de la plage du marais de Saint-Siméon.	42
Figure 5.9 – Variations au niveau de la flèche littorale de graviers du marais de Saint-Siméon.	43
Figure 5.11 – Environnements côtiers dans le secteur de Bonaventure.	45
Figure 5.12 – Variations de position du trait de côte le long des talus, secteur de Bonaventure.	46
Figure 5.13 – Variations de position du trait de côte le long de la flèche littorale occidentale du barachois, secteur de Bonaventure.	47
Figure 5.14 – Bathymétrie devant la flèche littorale ouest du barachois, secteur de Bonaventure.	48
Figure 5.15 – Variations au niveau de la flèche littorale ouest de Bonaventure.	49
Figure 5.16 – Variations au niveau de la flèche littorale est de Bonaventure.	51
Figure 5.17 – Variations de position du trait de côte le long de la flèche littorale est du barachois, secteur de Bonaventure.	51
Figure 5.18 – Variations 2003-2004 au niveau de la flèche littorale est de Bonaventure.	52
Figure 5.19 – Variations 2003-2006 au niveau de la flèche littorale est de Bonaventure.	53
Figure 5.20 – Environnements côtiers dans le secteur de Bonaventure.	56
Figure 5.21 – Variations de position du trait de côte le long de la plage nord-ouest de la barrière occidentale du barachois de Paspébiac.	57
Figure 5.22 – Variations 2003-2004 au niveau de la plage nord-ouest située sur la barrière occidentale du barachois de Paspébiac.	58
Figure 5.23 – Variations de position du trait de côte le long de la plage sud-ouest de la barrière occidentale du barachois de Paspébiac.	60

Figure 5.24 – Modifications morphologiques subies au niveau de la pointe du barchois de Paspébiac entre 2003 et 2004.....	61
Figure 5.25 – Modifications morphologiques subies au niveau de la pointe du barchois de Paspébiac entre 2003 et 2004.....	62
Figure 5.26 – Variations de position du trait de côte le long de la barrière orientale du barchois de Paspébiac.....	63
Figure 5.27 – Variations 2003-2004 au niveau de la partie distale de barrière est du barchois de Paspébiac.....	65
Figure 5.28 – Variations 2003-2004 au niveau du chenal de marée de barrière est du barchois de Paspébiac.....	66
Figure 5.29 – Variations 2003-2006 au niveau du chenal de marée de barrière est du barchois de Paspébiac.....	70
Figure 5.30 – Variations de position du trait de côte le long du secteur de la plage à Norbert. ...	72
Figure 5.31 – Variations 2003-2004 au niveau de la plage à Norbert, secteur de Paspébiac.	73
Figure 5.32 – Profils de la plage située à l’est de l’épi de la plage à Norbert, secteur de Paspébiac	74
Figure 5.33 – Variations de position du trait de côte le long du secteur des falaises de Paspébiac.	77
Figure 5.34 – Variations 2003-2004 au niveau des falaises, est du secteur de Paspébiac.	78
Figure 5.35 – Variations 2003-2004 au niveau des falaises de grès, est du secteur de Paspébiac.	79
Figure 5.36 – Localisation du secteur de Saint-Godefroi – Shigawake.	80
Figure 5.37 – Variations de position du trait de côte le long du secteur des falaises de Saint-Godefroi.	82
Figure 5.38 – Variations 2003-2004 au niveau des falaises de la pointe à Ritchie (zone 1), secteur de Saint-Godefroi.	83
Figure 5.39 – Variations 2003-2004 au niveau des falaises de la pointe à Ritchie (zone 2), secteur de Saint-Godefroi.	85
Figure 5.40 – Variations de position du trait de côte le long de la flèche littorale sud-ouest, secteur de Saint-Godefroi.	86
Figure 5.41 – Variations 2003-2004 au niveau du barchois de Hope Town.....	87
Figure 5.42 – Variations de position du trait de côte le long de la flèche littorale nord-est, secteur de Saint-Godefroi.	88
Figure 5.43 – Profils de la plage située directement au nord-est de la jetée de gabions de l’embouchure de la rivière Le Barchois, secteur de Saint-Godefroi.	89
Figure 5.44 – Variations de position du trait de côte le long de la zone de talus, secteur de Saint-Godefroi.	91
Figure 5.45 – Variations 2003-2004 au niveau des talus de Saint-Godefroi.....	93
Figure 6.1 – Zones d’érosion dans les talus de Saint-Siméon, période 2003-2004.....	97
Figure 6.2 – Variations 2003-2004 de la flèche d’embouchure de la rivière Petite-Bonaventure, secteur de Saint-Siméon.....	100
Figure 6.3 – Variations 2003-2006 de la flèche d’embouchure de la rivière Petite-Bonaventure, secteur de Saint-Siméon.....	101
Figure 6.4 – Modèle numérique de terrain du secteur de la pointe du barchois de Paspébiac, 2004.	113
Figure 6.5 – MNT du barchois de Paspébiac et de la bathymétrie côtière en 2006.....	116
Figure 6.6 – Profil de plage de la barrière orientale du barchois de Paspébiac.....	118
Figure 6.7 – Bathymétrie améliorée pour la détection des très petits fonds le long de la barrière orientale du barchois de Paspébiac.	118

Figure 6.8 – Image vidéo montrant les deux barres d’avant-côte le long de la barrière est du barachois de Paspébiac en 2006.....	119
Figure 6.9 – MNT du barachois de Paspébiac et de la bathymétrie côtière en 2006.....	121
Figure 6.10 – MNT du barachois de Paspébiac et de la bathymétrie côtière en 2006.....	122
Figure 6.11 – Modèle numérique 3D du champs de dunes hydrauliques principal.	125
Figure 6.12 – Profils réalisés au niveau des grandes dunes hydrauliques SE-NO.....	125
Figure 6.13 – Profils réalisés au niveau des grandes dunes hydrauliques SE-NO.....	126
Figure 6.14 – Modèle numérique de terrain de la zone des dunes hydrauliques.	126
Figure 6.15 – Description de la dynamique sédimentaire côtière dans le secteur du barachois de Paspébiac.....	128
Figure 6.16 – Modèle topographique et bathymétrique du secteur de Saint-Godefroi.....	135

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I – Caractéristiques techniques des relevés aériens LiDAR.	13
Tableau II – Caractéristiques techniques des relevés aériens SHOALS.	14
Tableau III – Modes de relevé, paramètres et nombre de lignes de vols effectués pendant la campagne 2003 et 2004 dans la Baie des Chaleurs, Gaspésie, Québec.	16
Tableau IV – Modes de relevé, paramètres et nombre de lignes de vols effectués pendant la campagne 2006 dans la Baie des Chaleurs, Gaspésie, Québec (Cottin, 2008).	19
Tableau V – Erreur de positionnement horizontal du trait de côte en fonction de l'erreur de mesure verticale du LiDAR et de la pente du terrain pour une résolution spatiale de 1 m. .	28
Tableau VI – Erreur de positionnement horizontal du trait de côte en fonction de l'erreur de mesure verticale du LiDAR et de la pente du terrain pour une résolution spatiale de 2 m. .	29
Tableau VII – Erreur de positionnement horizontal du trait de côte en fonction de l'erreur de mesure verticale du LiDAR et de la pente du terrain pour une résolution spatiale de 4 m. .	29
Tableau VIII – Bilan sédimentaire de la flèche littorale de gravier du marais de Saint-Siméon. Les valeurs positives correspondent à une accrétion et les valeurs négatives à une érosion.	104
Tableau IX – Bilan sédimentaire de la flèche orientale du barachois de Bonaventure. Les valeurs positives correspondent à une accrétion et les valeurs négatives à une érosion.	108
Tableau X – Taux de recul annuel de la barrière orientale du barachois de Paspébiac (d'après Renaud, 2001).	112

1. HISTORIQUE ET PROBLÉMATIQUE

Dans le cadre des changements climatiques, la frange côtière représente l'une des zones les plus sensibles, tant au Canada que dans le monde. Cette frange littorale, qui inclut à la fois la zone émergée jusqu'à une altitude de 10 à 15 m et la zone immergée jusqu'à une profondeur de -20 m, représente l'un des plus importants défis actuels de la géomatique car les différents outils disponibles ne peuvent, par eux-mêmes, donner une représentation globale et précise de cette zone. Ces outils sont en effet conçus pour travailler soit dans la partie terrestre soit dans la partie marine du littoral, mais ils ne permettent pas de couvrir simultanément ces deux types d'environnements. Or, cette zone côtière est capitale car elle représente l'une des zones les plus sensibles et les plus convoitées de l'espace naturel par l'action anthropique. De plus, c'est elle qui subit tous les réajustements du niveau marin. Enfin, l'érosion côtière ne se traduit pas uniquement par le recul du trait de côte mais agit sur l'ensemble de la zone côtière, depuis la limite sous-marine de l'action des houles jusqu'à la haute plage.

C'est pourquoi, une mauvaise compréhension de l'une ou l'autre partie du littoral (terrestre ou sous-marine) rend illusoire tout travail de protection ou de restauration du littoral et des habitats sous-marins impliqués (homards..), ainsi que tout développement de sites d'aquaculture ou de mari-culture. Puisque tous les phénomènes qui entrent en jeu dans l'érosion côtière entraînent un réajustement morphologique de ce corridor et perturbent son utilisation naturelle et anthropique, son évolution doit être connue avec précision pour que les décideurs puissent prendre des actions éclairées. La fusion des résultats issus de différentes techniques de mesures terrestres et marines devient donc un enjeu crucial afin d'aboutir à une cartographie intégrée et précise du littoral. Ce n'est qu'à ce stade seulement qu'une évaluation et une quantification exacte de l'érosion côtière pourra être entreprise.

Les côtes de la baie des Chaleurs subissent une évolution constante sous l'effet du réajustement permanent du littoral aux conditions hydrodynamiques et géologiques depuis la fin de la glaciation. Ce réajustement se traduit par une érosion des anciens dépôts mis en place dans un contexte hydrodynamique différent de celui qui prévaut actuellement et d'une construction de nouveaux corps sédimentaires en équilibre avec le milieu hydrodynamique actuel (*Long, 2006*).

Depuis le début de la colonisation, les activités humaines se sont développées le long du littoral en recourant à la mer comme voie de transport, avant que les réseaux routiers et ferroviaires ne prennent le relais et permettent de relier les communautés entre elles. Or, depuis que des aménagements routiers ont commencé à voir le jour au 19^e siècle, l'érosion marine a constamment menacé les infrastructures routières installées le long des littoraux gaspésiens, ainsi que l'ensemble des infrastructures humaines côtières de la région. Dès les années 1950 et 1960, la route 132 a ainsi dû être confortée, et même reconstruite en plusieurs endroits, car l'ancienne route avait été endommagée ou même emportée lors d'épisodes de tempête. Depuis la reconstruction de la route, ces phénomènes perdurent et il devient urgent d'entreprendre des opérations importantes de confortement pour contrer les problèmes majeurs liés à l'érosion littorale (*Long, 2006*).

En de nombreux points, la route a été construite le long du littoral, sur le front d'érosion du delta fluvio-glaciaire, le cordon dunaire ou sur la haute plage. Or, ces types d'environnements sont sujets à une érosion intensive qui est due au réajustement naturel du littoral et à une augmentation de la récurrence des tempêtes qui bouleversent considérablement les conditions hydrodynamiques du secteur. Ceci a pour conséquence un accroissement du transport sédimentaire vers le large ou le long du littoral, une érosion des plages et des pieds de falaises. L'ensemble de ces facteurs provoque une détérioration considérable du littoral et des installations (routes, bâtiments, escaliers, etc.) situées à proximité (*Long, 2006*).

2. OBJECTIFS

Ce projet reprend les résultats du projet RES#LON, ou « Tailored Geomatics...for geohazard and georesources » et financé par le MTQ, ainsi que ceux du projet GEOIDE suivant, le projet FUDOTERAM (Fusion des Données Terrestres et Marines). Le premier projet avait pour but de déterminer l'érosion côtière le long de la baie des Chaleurs en 2003 et 2004 à partir de mesures aéroportées effectuées au moyen de deux systèmes de relevés terrestres : la vidéogrammétrie et le système aéroporté altimétrique laser LiDAR. Néanmoins, un certain nombre de problèmes techniques empêchait de développer, avec ce seul projet, un système intégré parfait au niveau de la cartographie des faciès côtiers terrestres et marins car la combinaison des systèmes vidéographique et LiDAR ne permettait pas d'appréhender la partie sous marine de la zone côtière alors que celle-ci constitue la zone de réponse de l'érosion et le siège d'un très important habitat faunique. Le deuxième projet était, pour sa part, la continuité du projet RES#LON et utilisait un LiDAR bathymétrique, ou SHOALS (*Scanning Hydrographic Operational Airborne LiDAR Survey*), qui permet de couvrir à la fois la partie émergée du littoral et la partie sous-marine, jusqu'à une profondeur d'environ -20 m. Ce second projet a donc permis de cartographier en 2006 la zone sensible du littoral le long de deux portions de côte gaspésienne (secteurs de Saint-Siméon – Bonaventure et de Paspébiac – Saint-Godefroi) en intégrant à la fois la partie terrestre et la partie marine mais sans étudier la problématique de l'érosion côtière et de sa dynamique.

À travers ce nouveau projet, nous projetons donc de remédier à cela en intégrant les données altimétriques et bathymétriques SHOALS de 2006 aux données altimétriques LiDAR de 2003 et 2004, pour les secteurs de Saint-Siméon – Bonaventure et de Paspébiac – Saint-Godefroi, afin d'avoir un aperçu plus complet et fiable de l'évolution de ces systèmes côtiers durant la période 2003-2006 ainsi que des phénomènes impliqués (transport littoral...). Ce projet permettra ainsi de développer et d'utiliser des outils géomatiques dont les retombées économiques et sociales se feront ressentir dans les domaines des géosciences en général, ainsi que dans le domaine de la protection des côtes et des infrastructures côtières qui sont particulièrement vulnérables dans l'est du

Québec. Le domaine de la gestion des ressources et infrastructures devrait en bénéficier, en augmentant la connaissance des faciès sédimentaires côtiers et en déterminant les niveaux d'érosion de ces faciès sédimentaires et des substrats rocheux.

Les objectifs de ce projet sont donc:

- De développer de nouvelles classes de fusion de données par l'intégration de méthodes convergentes de LiDAR et du SHOALS en particulier au niveau de l'érosion côtière.
- D'harmoniser les réponses des appareils provenant de technologies différentes pour une meilleure application des résultats dans des domaines sensibles, tels que l'analyse de la vulnérabilité des infrastructures de transport et la préservation des habitats.
- De développer une approche interprétative intégrée pour répondre aux impacts des changements climatiques dans le but de réduire les impacts environnementaux et mieux gérer les risques lors de la planification des projets routiers, la construction ou la réfection d'ouvrages de protection contre la mer, d'installations portuaires, ainsi que pour les demandes d'autorisation d'intervention dans l'habitat du poisson.

3. LES CAMPAGNES AÉRIENNES

Trois campagnes aériennes ont été réalisées sur une période de 3 ans, entre 2003 et 2006, afin d'étudier la dynamique côtière de la région. Les sites ayant fait l'objet de ce suivi inter-annuel de 3 ans sont les sites de Saint-Siméon, Bonaventure, Paspébiac et Saint-Godefroi.

Le mois de mai a été retenu pour les deux premiers relevés car c'est le moment le plus favorable pour la réalisation de relevés topographiques dans cette région, la couverture de glace et de neige ayant déjà disparu mais la végétation n'ayant pas encore eu le temps de se développer, ce qui permet une bonne pénétration du laser dans le couvert végétal.

Par contre, les relevés topographiques et bathymétriques par laser aéroporté de 2006 ont été réalisés en juillet, période pendant laquelle les eaux sont moins turbides, afin de bénéficier d'une meilleure pénétration optique du laser dans la colonne d'eau. Cependant, à cette période, le couvert végétal terrestre est déjà très développé et dense, de sorte que la quantité de données acquises dans les talus et au sommet des falaises est plus réduite. En outre, le couvert herbeux dans les zones de talus induit un biais dans les mesures topographiques laser qui rend très problématique toute comparaison avec les données LiDAR antérieures. C'est pourquoi seules les variations mesurées au niveau des plages et des estrans seront discutées dans cette étude.

Chaque relevé topographique a été effectué lors de la marée basse des marées de vives-eaux afin d'englober une plus grande zone côtière, excepté pour les relevés de 2006. Le premier relevé a eu lieu les 17 et 18 mai 2003, le second relevé a été réalisé les 6 et 8 mai 2004 et le dernier s'est déroulé du 1 au 4 juillet 2006.

3.1 Matériel utilisé pour les relevés aériens

Les relevés LiDAR de 2003 et 2004 ont été réalisés par la société Lasermat Image Plus au moyen d'un système laser *ALTM-2050* d'Optech Inc. utilisant un laser infrarouge pulsé ayant une longueur d'onde de 1064 nm. La fréquence d'émission des impulsions laser était de 50 kHz, soit 50000 mesures par seconde. La fréquence de balayage était fixée à 17 Hz et l'angle maximal de balayage à 15° la première année et 20° la seconde (tableau I).

Compte tenu de l'altitude moyenne de vol, ces paramètres permettaient ainsi de couvrir une zone d'environ 200 mètres de part et d'autre de la ligne de vol en 2003, et d'environ 300 mètres en 2004. Pour chaque impulsion laser émise, les coordonnées géographiques (x, y, z) du premier et du dernier écho ainsi que l'intensité de chacun de ces deux signaux de retour ont été enregistrés (*Xhardé, 2007*).

Tableau I – Caractéristiques techniques des relevés aériens LiDAR.

Paramètres	Valeurs
Longueur d'onde laser	1064 nm
Énergie moyenne des impulsions laser	110 μ J
Durée de l'impulsion laser	6 ns
Fréquence d'émissions des impulsions	50 kHz
Angle d'incidence maximal en 2003	15°
Angle d'incidence maximal en 2004	20°
Hauteur de vol	~ 800 m
Largeur du couloir en 2003	~ 430 m
Largeur du couloir en 2004	~ 580 m
Diamètre de l'empreinte laser au sol	0,16 m
Résolution spatiale moyenne	0,3 x 1,5 m

Les relevés de 2006 ont été réalisés, pour leur part, au moyen d'un système aéroporté SHOALS-3000T d'Optech Inc. Ce système est constitué de deux laser pulsés: un laser topographique infrarouge de longueur d'onde 1064 nm, similaire à celui des systèmes LiDAR topographiques utilisés lors des relevés précédents, et un laser hydrographique. Ce dernier est spécifiquement dédié aux relevés bathymétriques et consiste en un laser de type Nd:YAG produisant deux faisceaux colinéaires de longueurs d'ondes différentes (*Guenther et al., 1996*). La longueur d'onde fondamentale de ce laser est, ici encore, de 1064 nm. Un cristal générateur de deuxième harmonique produit simultanément une deuxième longueur d'onde qui est la moitié de la précédente, soit 532 nm (*Cottin, 2008*). Cette longueur d'onde correspond au bleu-vert et est beaucoup moins absorbée par le milieu marin que l'infrarouge. Elle est par conséquent dédiée à la détection du fond marin tandis que la composante infrarouge du faisceau est dédiée à la détection de l'interface air-eau.

La fréquence d'émission du laser hydrographique est de 3 kHz et l'énergie totale est de 7,5 mJ répartie de la façon suivante: 4 mJ pour le bleu-vert et 3,5 mJ pour l'infrarouge (tableau II). La durée d'émission de l'impulsion est de 6 ns pour le bleu-vert et inférieure ou égale à 10 ns pour l'infrarouge. La divergence des faisceaux, comprise entre 3,7 et 5 mrad, est une fonction de l'altitude de vol pour assurer une bonne qualité du signal de retour mais également pour être conforme aux normes de sécurité au sol en ce qui concerne une exposition au faisceau laser de la peau et des yeux (*Cottin, 2008*).

En ce qui concerne le laser topographique infrarouge de longueur d'onde 1064 nm, l'énergie maximum des impulsions est de 20 μ J, la fréquence d'émission est de 10 kHz et la durée des impulsions laser est de 8 ns. La divergence du faisceau est constante quelle que soit l'altitude d'opération du SHOALS-3000T et est fixée à 0,5 mrad (Cottin, 2008).

Le SHOALS-3000T opère entre 200 et 800 mètres d'altitude avec une vitesse allant de 125 à 260 nœuds, soit entre 230 et 480 km/h. Le couloir de balayage a une largeur égale à environ 0,58 fois l'altitude de vol. La densité des points de relevé pour le mode hydrographique varie de 2x2 mètres à 5x5 mètres, par accroissement métrique unitaire. Elle est en revanche constante pour le mode topographique (1 x 1,2 mètres). La forme des traces de balayage est en arc de cercle vers l'avant suivant un angle constant de 20° par rapport au nadir et a une fréquence de 16 Hz (Cottin, 2008).

La plus petite épaisseur d'eau pouvant être mesurée est de 0,2 mètres et la plus grande profondeur d'eau atteinte avec ce système est de -50 mètres dans les eaux limpides des Bahamas (Cottin, 2008). Dans le cadre de cette étude cependant, la pénétration maximale atteinte par le système était de -10,23 m pour le secteur de Saint-Siméon – Bonaventure et de -16,7 m pour le secteur de Paspébiac – Saint-Godefroi (Cottin, 2008).

Enfin, pour chaque impulsion laser émise, les coordonnées géographiques (x, y, z) du dernier écho sont enregistrées, aussi bien en mode topographique qu'hydrographique, et la forme entière de l'impulsion de retour est digitalisée avec une résolution de 1 ns lors de l'acquisition en mode hydrographique.

Tableau II – Caractéristiques techniques des relevés aériens SHOALS.

Paramètres	Valeurs (topo)	Valeurs (hydro)
Longueur d'onde laser	1064 nm	532 nm
Énergie moyenne des impulsions laser	20 μ J	7,5 mJ
Durée de l'impulsion laser	8 ns	6-10 ns
Fréquence d'émissions des impulsions	10 kHz	3 kHz
Angle d'incidence maximal	20°	20°
Hauteur de vol	~ 800 m	300-400 m
Largeur du couloir	~ 460 m	~170-230 m
Diamètre de l'empreinte laser au sol	0,16 m	~ 2 m
Résolution spatiale moyenne	1 x 1,2 m	2x2 m et 4x4 m

3.2 La plate-forme et les systèmes de positionnement

Le système topographique laser *ALTM-2050* était installé à bord d'un avion bimoteur de type *Navajo* (figure 3.1) dont la position géographique était déterminée au moyen d'un GPS embarqué *Trimble® 4000 ssi* fonctionnant à 2 Hz et d'une station GPS fixe située au sol sur un repère géodésique et enregistrant à 1 Hz. L'attitude de l'appareil était quant à elle déterminée grâce à une centrale inertielle *POS LV* de marque *Applanix®* fonctionnant à 200 Hz et ayant une précision de mesure angulaire de $0,005^\circ$ pour le roulis et le tangage, et de $0,015^\circ$ pour le cap (*Xhardé, 2007*).



Figure 3.1 – Avion bimoteur Navajo ayant été utilisé pour les relevés aériens de 2003 et 2004. (source : GÉO-3D Inc.)



Figure 3.2 – Avion bimoteur Beechcraft King Air A90 ayant été utilisé pour les relevés aériens de 2006. (source : Fugro Inc.)

Le système hydrographique *SHOALS-3000T* était installé, pour sa part, dans un *Beechcraft King Air A90* (figure 3.2) opéré par *Aviation Dynamics* et équipé des deux systèmes de positionnement suivants (*Cottin, 2008*): un DGPS (*Differential Global Positioning System*) et un K-GPS (*Kinematic Global Positioning System*). La précision du premier est estimée à environ 20 cm tandis que le second est inférieure à 5 cm, à condition de disposer d'une station au sol positionnée sur un repère géodésique comme pour les premiers relevés LiDAR. L'attitude de la plate-forme était mesurée, quant à elle, au moyen d'une centrale inertielle *POS AV* de marque *Applanix®* fonctionnant entre 200 et 300 Hz et ayant une précision de mesure angulaire d'environ $0,005^\circ$ pour le roulis et le tangage, et de $0,008^\circ$ pour le cap.

3.3 *Les secteurs couverts*

La position des lignes de vol ainsi que l'altitude utilisées lors des relevés topographiques de 2003 et 2004 ont été déterminées de façon à ce que le corridor balayé par le laser couvre à la fois les environnements côtiers étudiés mais aussi la route nationale 132 qui longe la côte. Une altitude de vol de 800 mètres et une largeur de corridor d'environ 400 mètres ont été retenus. Lors du premier relevé, en mai 2003, un seul survol par zone a été effectué. En 2004, les lignes de vol réalisées lors de la première campagne ont été à nouveau couvertes afin de disposer de données topographiques sur les mêmes zones à une année d'intervalle (*Xhardé, 2007*). A cela, de nouvelles lignes de vols, parallèles aux premières mais décalées d'environ 125 mètres vers le large, ont été ajoutées afin de permettre un meilleur balayage par le laser des parois verticales dans les falaises. Des lignes de vol perpendiculaires au trait de côte ont également été ajoutées sur certaines plages afin d'étalonner les intensités du signal de retour (*Boucher, 2007*).

Tableau III – Modes de relevé, paramètres et nombre de lignes de vols effectués pendant la campagne 2003 et 2004 dans la Baie des Chaleurs, Gaspésie, Québec.

<i>Lieux</i>	<i>Mode de relevé</i>	<i>Altitude de vol</i>	<i>Densité</i>	<i>Nombre de lignes</i>
Saint-Siméon	Topographique	800 m	0,3 x 1,5 m	2
Bonaventure	Topographique	800 m	0,3 x 1,5 m	2
Paspébiac	Topographique	800 m	0,3 x 1,5 m	4
Saint-Godefroi	Topographique	800 m	0,3 x 1,5 m	4

Les secteurs couverts en 2003 et 2004 sont donc les suivants:

- de l'embouchure du Ruisseau Leblanc au marais de Saint-Siméon (figure 3.3).
- du marais de Saint-Siméon au barchois de la rivière Bonaventure (figure 3.4).
- de la pointe Jacques à la pointe Huntington pour le secteur de Paspébiac (figure 3.5).
- de la pointe à Ritchie jusqu'à l'anse à Sullivan pour le secteur de Saint-Godefroi (figure 3.6).



Figure 3.3 – Zone couverte dans le secteur de Saint-Siméon en 2003 et 2004. Le système de référence de toutes les cartes qui suivent est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).



Figure 3.4 – Zone couverte dans le secteur de Bonaventure en 2003 et 2004.

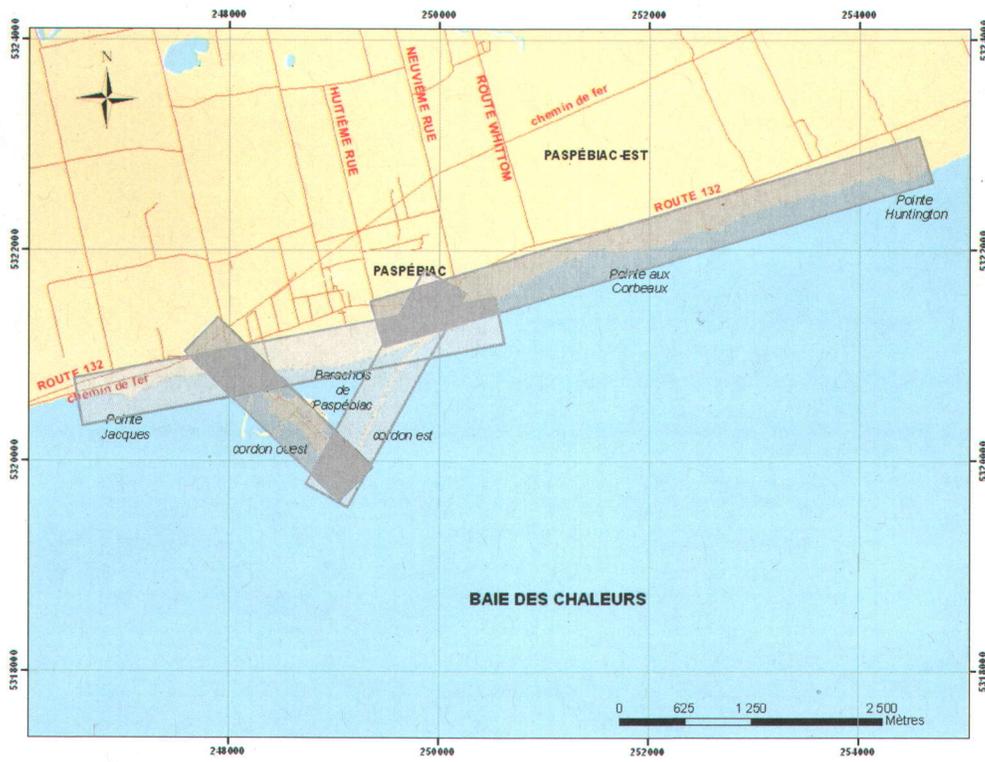


Figure 3.5 – Zone couverte dans le secteur de Paspébiac en 2003 et 2004.

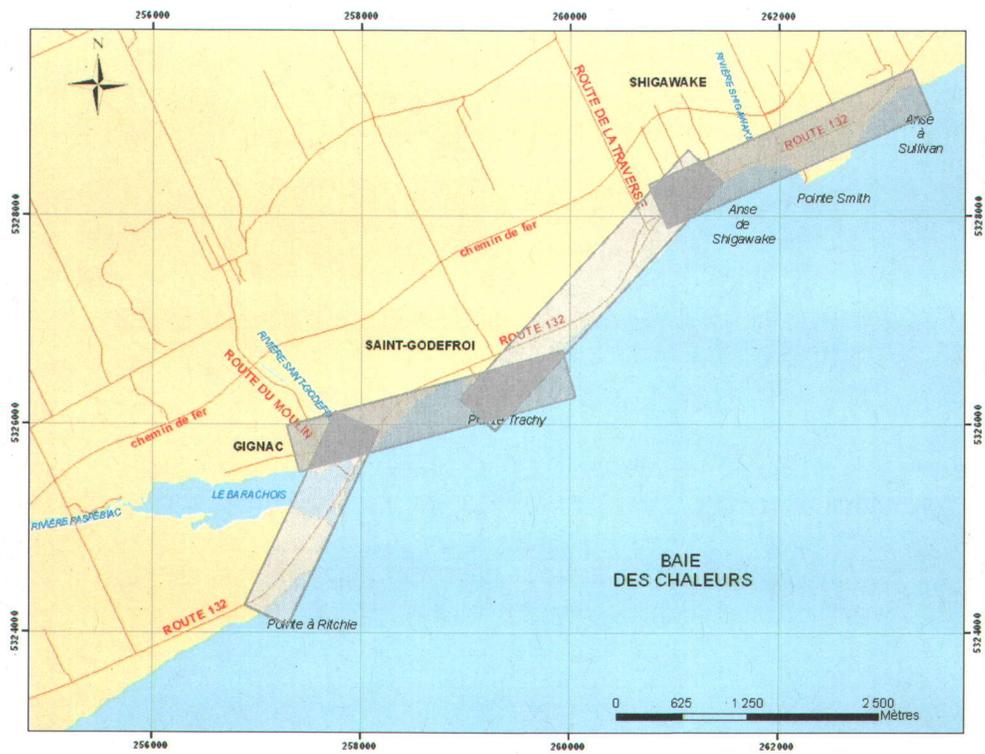


Figure 3.6 – Zone couverte dans le secteur de Saint-Godefroi en 2003 et 2004.

Lors des relevés topographiques et bathymétriques de 2006, un total de 104 lignes de vol (Tableau IV) a été réalisé pendant les quatre jours de relevé, ce qui représente une surface totale couverte de 37,5 km² pour le secteur de Saint-Siméon – Bonaventure (figure 3.7) et de 37 km² pour le secteur de Paspébiac – Saint-Godefroi (figure 3.8). Trois modes de relevés ont été utilisés (Cottin, 2008):

- Deux relevés en mode hydrographique :

- Haute densité : altitude de vol de 300 mètres avec une densité de points au sol de 2x2 mètres.
- Faible densité : altitude de vol de 400 mètres avec une densité de points au sol de 4x4 mètres.

- Un relevé en mode topographique :

- vol à 800 mètres d'altitude avec une densité de point au sol de 1x1,2 mètres.

Ce dernier n'a été réalisé que sur la portion de littoral s'étendant entre l'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure, située juste à l'ouest du marais de Saint-Siméon, et le barachois de Bonaventure qui constitue la partie orientale de ce secteur d'étude (figure 3.7, zone en pointillés blancs).

Tableau IV – Modes de relevé, paramètres et nombre de lignes de vols effectués pendant la campagne 2006 dans la Baie des Chaleurs, Gaspésie, Québec (Cottin, 2008).

<i>Lieux</i>	<i>Mode de relevé</i>	<i>Altitude de vol</i>	<i>Densité</i>	<i>Nombre de lignes</i>
<i>Paspébiac – Saint-Godefroi</i>	<i>Hydrographique</i>	400 m	4 x 4 m	22
		300 m	2 x 2 m	16
<i>Saint-Siméon – Bonaventure</i>	<i>Hydrographique</i>	400 m	4 x 4 m	29
		300 m	2 x 2 m	27
<i>Saint-Siméon – Bonaventure</i>	<i>Topographique</i>	800 m	1 x 1,2 m	10

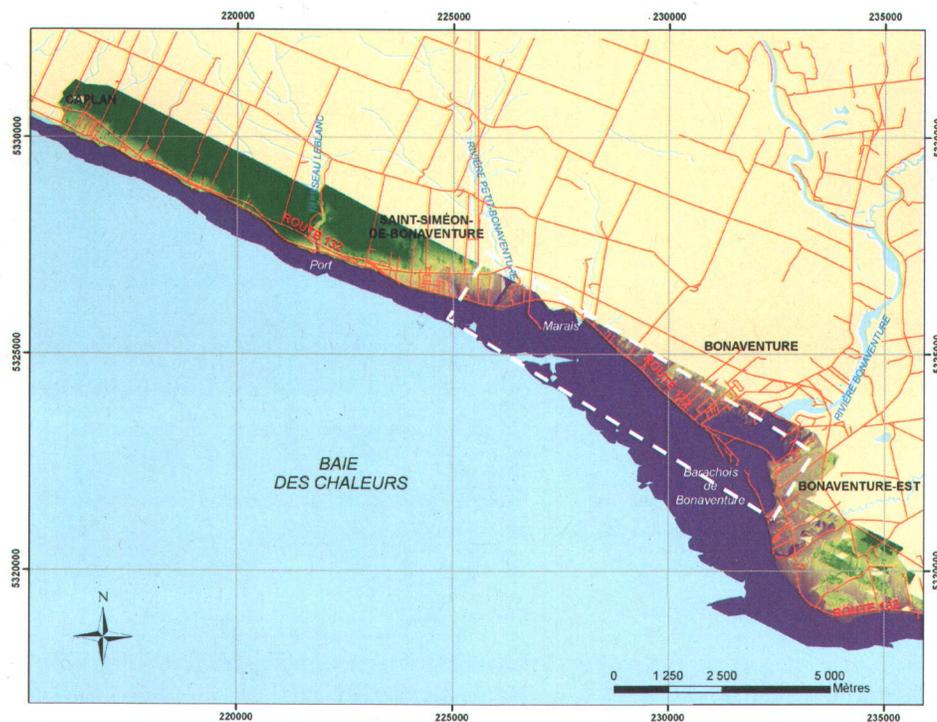


Figure 3.7 – Zone couverte dans le secteur de Saint-Siméon – Bonaventure en 2006. *Le système de référence de toutes les cartes qui suivent est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). La zone encadrée délimite la zone couverte par les relevés topographiques.*

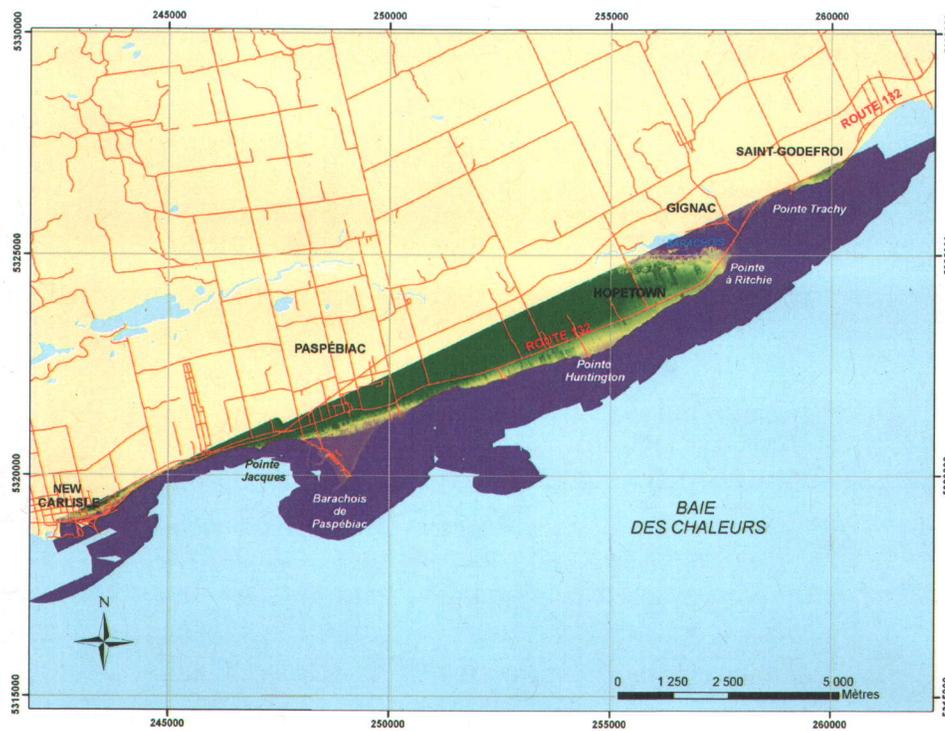


Figure 3.8 – Zone couverte dans le secteur de Paspébiac – Saint-Godefroi en 2006.

4. MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL

4.1 *Traitement et analyse des données LiDAR*

4.1.1 Prétraitement des données

Une fois les relevés aéroportés terminés, les sociétés en charge des relevés (Lasermap Image Plus pour les 2 premiers et Optech Inc. pour le dernier) se sont chargées du prétraitement des données LiDAR. Lors de cette étape, il s'agit d'améliorer la précision des positionnements du GPS installé dans l'avion en utilisant les données d'une station de base et d'effectuer une classification sommaire des points LiDAR. Cette classification avait pour but de séparer le sol de la végétation (incluant également les bâtiments et autre infrastructures humaines) dans le cas des relevés topographiques laser de 2003 et 2004. Cette classification est généralement effectuée de façon automatique à l'aide d'algorithmes basés sur les variations rapides d'élévation et de pente. Ces algorithmes ont cependant révélé leurs limites dans les falaises et une classification manuelle a été nécessaire dans ces secteurs (*Xhardé, 2007*). Par contre, en 2006, ce post-traitement avait seulement pour but de séparer les données « fond » des données pour lesquelles le fond n'avait pas pu être détecté. Aucun filtrage de la végétation terrestre n'a été effectué par Optech Inc.

Les données ont finalement été livrées sous forme de fichiers ASCII contenant les coordonnées géographiques x, y et z ainsi qu'une valeur d'intensité codée i comprise entre 1 et 4096 pour chaque écho laser (pour 2003 et 2004) ainsi que sous forme de fichiers .LAS (fichier binaire propre aux données laser contenant les coordonnées géographiques x, y et z de chaque retour) et .INW (contenant l'impulsion laser de retour complète digitalisée). Le système géographique utilisé était le MTM zone 5 en 2003 et 2004 tandis que les données de 2006 étaient fournies en degrés de latitude et de longitude. La surface de référence pour les élévations était lui aussi différent: il s'agissait du niveau moyen des mers, modélisé par la surface du géoïde WGS84 (*World Geodetic Survey 1984*) en 2003 et 2004, et des hauteurs par rapport à l'ellipsoïde NAD83 (*North American Datum 1983*) en 2006.

4.1.2 Traitement des données

La première étape du travail a consisté à importer les fichiers de données géographiques (ASCII et .LAS) dans un logiciel de traitement et d'analyse spécialisé (*ArcGIS* et *ENVI*). Il a fallu ensuite exprimer toutes les élévations par rapport à un même référentiel afin de pouvoir comparer les données d'une année à l'autre. Comme l'essentiel de ce travail porte sur les variations topographiques des environnements côtiers aériens, le zéro topographique a été choisi comme niveau de référence. Celui-ci correspond au niveau moyen des mers, modélisé par le géoïde. Pour convertir des hauteurs ellipsoïdales en hauteurs orthométriques, il est donc nécessaire de connaître l'ondulation du géoïde au niveau des zones concernées. Celle-ci peut être obtenue facilement via le programme *GPS-H*, disponible sur le site du ministère des ressources naturelles du Canada (http://www.geod.rncan.gc.ca/apps/gpsh/gpsh_f.php). L'ondulation est estimée à -19,61 m pour le secteur de Saint-Siméon – Bonaventure et à -19,41 m pour le secteur de Paspébiac – Saint-Godefroi (*Keramoal, 2008*). Par conséquent, une correction de +19,61 m et +19,41 m ont été apportées aux données laser collectées en 2006 respectivement à Saint-Siméon – Bonaventure et à Paspébiac – Saint-Godefroi. Ensuite, trois produits ont été réalisés pour chaque secteur d'étude et pour chaque année.

- Les **MNT** (acronyme de Modèle Numérique de Terrain) : il s'agit d'une représentation sous forme numérique du relief d'une zone géographique. Ce modèle numérique se présente sous la forme d'une image matricielle composée de cellules (pixels) régulièrement espacées. Chaque cellule est localisée par ses coordonnées planimétriques (x, y) et une valeur numérique représentant l'élévation du terrain à cet endroit lui est attribuée. Cette élévation peut ensuite être traduite visuellement par un code couleur.

Comme les mesures laser présentent un espacement moyen au sol d'environ 1 mètre, les MNT ont été réalisés avec une résolution spatiale similaire (soit 1 mètre) afin de tirer parti de la grande densité de mesures topographiques et bathymétriques acquises au cours de ces relevés.

- Les **MNVE** (acronyme de Modèle Numérique de Variation d'Élévation): il s'agit d'une représentation sous forme numérique des variations verticales d'une zone géographique. Ce modèle numérique se présente sous la forme d'une image matricielle composée de cellules (pixels) régulièrement espacées. Chaque cellule est localisée par ses coordonnées planimétriques (x, y) et une valeur numérique représentant la différence d'élévation du terrain (dz) à cet endroit lui est attribuée. Cette variation d'élévation est calculée en effectuant une simple soustraction algébrique entre les pixels homologues de deux MNT. Cette variation d'élévation peut ensuite être traduite visuellement par un code couleur.
- Les **courbes de niveaux** (ou **isolignes**): à partir de chaque MNT, des courbes de niveaux ont été générées automatiquement, à intervalle régulier de 1 m en élévation, pour chaque année et chaque secteur d'étude. Des courbes de niveaux bathymétriques ont également été créées à partir des données bathymétriques collectées en 2006. Toutes ces courbes topographiques et bathymétriques se présentent au format .SHP.
- Les **traits de côte**: à partir de chaque MNT, la courbe de niveau correspondant à la cote d'élévation de 0 m a été générée automatiquement pour chaque année et chaque secteur et enregistrée au format .SHP.

À ces trois sortes de produits s'ajoute des **cartes de relief en ombre portée** (*hillshade illumination maps*). Il s'agit d'une représentation sous forme numérique du relief d'une zone géographique pour laquelle des valeurs d'ombrage sont calculées en fonction d'un angle d'illumination donné. Cette représentation permet ainsi de simuler un éclairage par une source lumineuse qui souligne les reliefs et renforce les contrastes topographiques et bathymétriques du terrain. Dans le cadre de cette étude, la source d'illumination est considérée comme étant à l'infini et un angle d'incidence de 20° a été retenu afin de simuler un éclairage rasant et d'obtenir ainsi une forte accentuation des reliefs. Ce modèle numérique se présente sous la forme d'une image matricielle composite tri-bandes formée de cellules (pixels) régulièrement espacées. Chaque cellule est localisée par ses coordonnées planimétriques (x, y) et l'élévation est traduite visuellement par un code couleur pour chacune des trois couches (rouge, vert et bleu). Ces cartes ont été réalisées uniquement pour les données topographiques et bathymétriques de 2006.

Enfin, des **cartes morpho-sédimentaires numériques** ont été réalisées à partir des données laser de 2006, et ce pour chacun des secteurs d'étude, par Cottin (2008) et Collin (2009). Il s'agit d'une représentation sous forme numérique de la nature sédimentaire ou biologique du fond marin d'une zone géographique. Ce modèle numérique se présente sous la forme d'une image matricielle composée de cellules (pixels) régulièrement espacées. Chaque cellule est localisée par ses coordonnées planimétriques (x , y) et une valeur numérique discrète représentant le type de fond à cet endroit lui est attribuée. Cette information peut ensuite être traduite visuellement par un code couleur. Plusieurs approches cartographiques ont été utilisées pour produire ces cartes. Cottin (2008) a ainsi utilisé une double approche basée exclusivement sur l'analyse du signal laser rétrodiffusé par les fonds marins et combinant une modélisation par mixture gaussienne du signal de retour du fond et une analyse morphologique de ce même signal. La première approche permet d'extraire 3 paramètres statistiques significatifs à partir de la gaussienne modélisant le signal du fond: la moyenne (μ), l'écart-type (σ) et le poids de la gaussienne dans le mélange. La seconde approche permet d'extraire 11 paramètres morpho-statistiques à partir du signal de retour du fond, de la forme d'onde complète du signal et de la répartition spatiale des données laser: le coefficient d'asymétrie (*skewness*), le coefficient d'aplatissement (*kurtosis*), l'amplitude du signal, la longueur totale du signal, la longueur du côté gauche du signal, l'angle du côté gauche du signal, la longueur du côté droit du signal, l'angle du côté droit du signal, le rapport entre l'amplitude du signal de surface et du signal de fond, la densité de points de mesure au sol et la rugosité de la topographie (Cottin, 2008). De ces 11 paramètres morpho-statistiques, seuls les 3 plus significatifs sont retenus après analyse en composantes principales. Il s'agit du coefficient d'asymétrie, du coefficient d'aplatissement et de l'angle droit du signal. Deux images tri-bandes, combinant respectivement les 3 premiers paramètres statistiques de la première approche (μ , σ , poids) et les 3 paramètres morpho-statistiques de la seconde, ont ensuite été générées. Une classification supervisée a enfin été réalisée pour chacune de ces deux images et validée au moyen de données de terrain diverses (images vidéographiques sous-marines à haute résolution, relevés de géophysique marine, sonar, échantillonnages par benne). Une fusion des deux cartes classifiées est enfin réalisée afin d'intégrer les points forts de chaque modèle et de corriger les erreurs et dérives de ces

derniers à l'aide d'autres modèles complémentaires (Cottin, 2008). Trois cartes morpho-sédimentaires sont ainsi proposées par Cottin:

- une carte complète et détaillée couvrant le secteur de Paspébiac – Saint-Godefroi
- une carte simplifiée de ce même secteur
- une carte simplifiée du secteur de Saint-Siméon – Bonaventure.

Celles-ci figurent dans l'annexe 4 de la présente étude. Le nombre de classes et le degré de qualité offerts par ces cartes sont néanmoins variables. La première propose 9 classes de fonds différents pour une fiabilité globale, estimée par matrices de confusion, d'à peine 45 %. La seconde a été simplifiée et ne représente plus que 5 grands environnements morpho-sédimentaires avec une fiabilité globale de 53 %. Enfin, la carte simplifiée du secteur de Saint-Siméon et Bonaventure décrit 3 types d'environnements sous-marins avec une fiabilité globale estimée à 55 %.

Collin (2009), pour sa part, a adopté une approche différente bien qu'une partie de sa classification fasse également appel à certaines variables statistiques du signal de retour. Celui-ci a tout d'abord réalisé une déconvolution du signal de retour laser au moyen d'un filtre passe-bas afin d'éliminer le bruit dû à l'environnement et au matériel électronique ayant servi à l'acquisition des données SHOALS. Ensuite, une régression non-linéaire basée sur un modèle des moindres carrés a été appliquée aux formes d'onde du signal de retour laser afin de corriger l'atténuation du signal dans la colonne d'eau et d'éliminer les variations d'intensités qui en résultent. Une fois ces pré-traitements effectués, 12 variables statistiques descriptives caractérisant la signature laser de l'habitat benthique ont été déterminées. Il s'agit de (Collin, 2009): la moyenne, la variance, l'asymétrie, l'aplatissement, la médiane, la déviation absolue moyenne, l'aire sous la courbe, l'amplitude entre les pics de surface et du fond, ainsi que la moyenne, la variance, l'asymétrie et l'aplatissement issus de la courbe entre la fin du signal de la colonne d'eau et le début du signal du fond. Par la suite, le nombre de variables permettant de décrire l'onde de forme du signal de retour laser a été porté à 21 afin de prendre en compte les cas où le pic de retour de surface et le pic de retour du fond étaient non dissociés. Ces 21

variables statistiques sont composées des 7 premiers paramètres statistiques déjà énoncés précédemment auxquels s'ajoutent: le minimum, le maximum, les temps et intensités correspondant à 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 % de l'énergie de la forme d'onde, ainsi que la différence de temps et d'intensité entre 0 % et 100 % (Collin, 2009). Ces variables statistiques régressées non-linéairement en fonction de la profondeur ont ensuite subi une analyse en composantes principales afin d'identifier les variables les moins corrélées entre elles et renfermant le maximum d'informations non redondantes. Enfin, une classification supervisée basée sur l'algorithme de la vraisemblance maximale (*Maximum Likelihood*) a été réalisée à partir de ces diverses variables statistiques et validée au moyen d'images vidéographiques sous-marines à haute résolution acquises durant les relevés de 2006. Trois cartes morpho-sédimentaires majeures, couvrant la partie du secteur de Saint-Siméon et Bonaventure ayant bénéficié d'une couverture hydrographique de haute densité, sont ainsi proposées par Collin:

- une carte des habitats benthiques basée sur l'analyse des 12 variables statistiques ainsi que sur l'utilisation de statistiques spatiales locales et de filtres de texture afin d'améliorer les performances de discrimination des habitats et donc la classification benthique.
- une carte des habitats terrestres et intertidaux basée sur un indice de végétation déduit des intensités LiDAR dans le rouge et l'infrarouge.
- une carte détaillée des habitats terrestres et benthiques dans le secteur du marais de Saint-Siméon.

Celles-ci figurent dans l'annexe 4 de la présente étude. Le nombre de classes utilisées par Collin (2009) reste variable mais le degré de qualité offert par ces cartes est nettement supérieur à celui des cartes produites par Cottin (2008). La première présente 4 types de fonds différents pour une fiabilité globale, estimée par matrices de confusion, de 95,2 %. La seconde décrit la répartition de 17 classes d'habitats différents avec une fiabilité globale de 91,2 %. Enfin, la dernière carte représente 19 habitats terrestres et sous-marins avec une fiabilité globale estimée à 90,1 %.

4.1.3 Analyse des données

4.1.1.1 Variations horizontales du trait de côte

Les traits de côte ont été comparés et les variations horizontales ont été mesurées tout les 10 m. La position de 2003 a été utilisée comme trait de côte de référence, et les variations horizontales sont exprimées par rapport à lui. Cependant, il faut remarquer que certains secteurs n'ont été couverts que par des relevés en mode hydrographique basse densité, c'est à dire avec une résolution spatiale de seulement 4 x 4 m. D'autres zones ont été couvertes en mode hydrographique à plus haute résolution (soit 2 x 2 m). Seule la portion de côte s'étendant de l'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure jusqu'au système de barachois de Bonaventure a été couverte en mode topographique et offre donc une résolution spatiale de 1 x 1,2 m. Or, la précision du positionnement du trait de côte est fortement influencée par la résolution des données disponible comme l'a montré Xhardé (2007).

En effet, la précision du positionnement horizontal des indicateurs de trait de côte peut être déterminée à partir de l'erreur de mesure verticale, de l'erreur de mesure horizontale, de la résolution spatiale et de la pente de l'estran (figure 4.1) selon la relation théorique:

$$e_x^{côte} = e_x^{LiDAR} + \left[\frac{f_L}{2f_b H \operatorname{tg}(i_{\max})} \right] + \left[\frac{e_z^{LiDAR}}{\operatorname{tg}(\beta)} \right] \quad (\text{éq. 1})$$

Le second terme du membre de droite représente la résolution spatiale moyenne du système LiDAR, qui est fonction de la fréquence d'émission f_L , de la fréquence de balayage f_b , de la hauteur de vol H et de l'angle d'incidence maximal i_{\max} , tandis que le troisième terme représente l'erreur de positionnement induite par une erreur de mesure verticale e_z^{LiDAR} en fonction de l'angle de pente β (figure 4.1). Pour des pentes relativement faibles, l'influence de la résolution et de l'erreur verticale est prédominante et génère des erreurs de positionnement du trait de côte importantes (tableaux V, VI et VII).

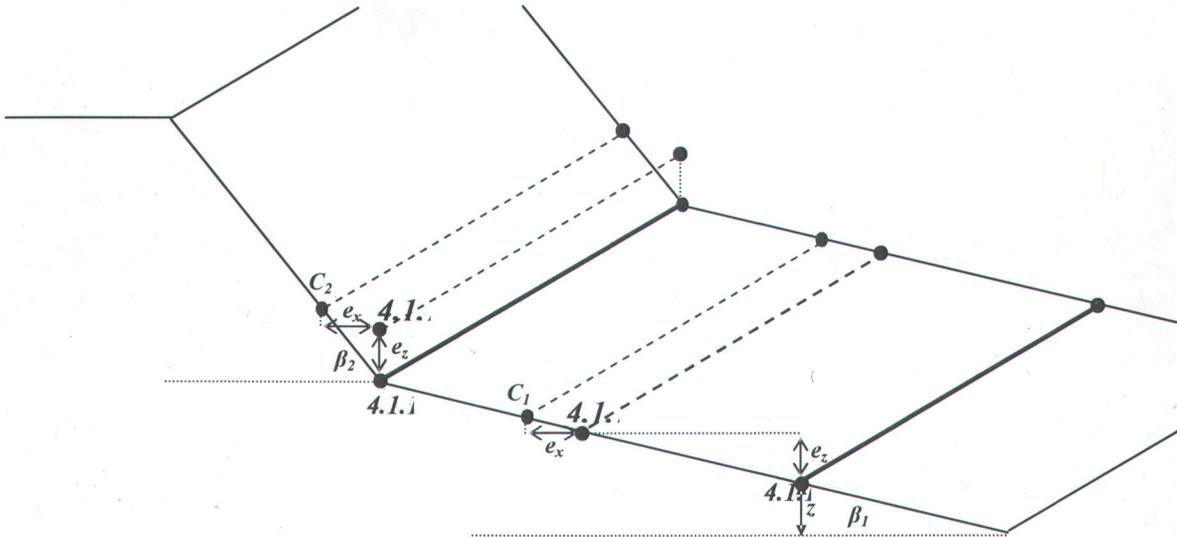


Figure 4.1 – Schéma illustrant le problème de positionnement du trait de côte. Le schéma décrit l'imprécision du positionnement dans le cas où l'indicateur de trait de côte est donné par une cote d'élévation z (A_1) ainsi que dans le cas où l'indicateur est donné par un changement physiographique (A_2). Une erreur verticale e_z déplace le trait de côte de A en B tandis qu'une erreur horizontale e_x le déplace en C.

Tableau V – Erreur de positionnement horizontal du trait de côte en fonction de l'erreur de mesure verticale du LiDAR et de la pente du terrain pour une résolution spatiale de 1 m.

pente (°)	pente (rad)	e_x^{LiDAR} (m)	e_z^{LiDAR} (m)	Résol. sp. (m)	$e_x^{côte}$ (m)
1	0,017	0,13	0,15	1	9,7
2	0,035	0,13	0,15	1	5,4
3	0,052	0,13	0,15	1	4,0
4	0,070	0,13	0,15	1	3,3
5	0,087	0,13	0,15	1	2,8
6	0,105	0,13	0,15	1	2,6
7	0,122	0,13	0,15	1	2,4
8	0,140	0,13	0,15	1	2,2
9	0,157	0,13	0,15	1	2,1
10	0,175	0,13	0,15	1	2,0
15	0,262	0,13	0,15	1	1,7
20	0,349	0,13	0,15	1	1,5
25	0,436	0,13	0,15	1	1,5
30	0,524	0,13	0,15	1	1,4
35	0,611	0,13	0,15	1	1,3
40	0,698	0,13	0,15	1	1,3
45	0,785	0,13	0,15	1	1,3
50	0,873	0,13	0,15	1	1,3
55	0,960	0,13	0,15	1	1,2

Tableau VI – Erreur de positionnement horizontal du trait de côte en fonction de l'erreur de mesure verticale du LiDAR et de la pente du terrain pour une résolution spatiale de 2 m.

<i>pente (°)</i>	<i>pente (rad)</i>	$e_x^{LiDAR} (m)$	$e_z^{LiDAR} (m)$	<i>Rés. sp. (m)</i>	$e_x^{côte} (m)$
1	0,017	0,13	0,25	2	16,5
2	0,035	0,13	0,25	2	9,3
3	0,052	0,13	0,25	2	6,9
4	0,070	0,13	0,25	2	5,7
5	0,087	0,13	0,25	2	5,0
6	0,105	0,13	0,25	2	4,5
7	0,122	0,13	0,25	2	4,2
8	0,140	0,13	0,25	2	3,9
9	0,157	0,13	0,25	2	3,7
10	0,175	0,13	0,25	2	3,5
15	0,262	0,13	0,25	2	3,1
20	0,349	0,13	0,25	2	2,8
25	0,436	0,13	0,25	2	2,7
30	0,524	0,13	0,25	2	2,6
35	0,611	0,13	0,25	2	2,5
40	0,698	0,13	0,25	2	2,4
45	0,785	0,13	0,25	2	2,4
50	0,873	0,13	0,25	2	2,3
55	0,960	0,13	0,25	2	2,3

Tableau VII – Erreur de positionnement horizontal du trait de côte en fonction de l'erreur de mesure verticale du LiDAR et de la pente du terrain pour une résolution spatiale de 4 m.

<i>pente (°)</i>	<i>pente (rad)</i>	$e_x^{LiDAR} (m)$	$e_z^{LiDAR} (m)$	<i>Résol. sp. (m)</i>	$e_x^{côte} (m)$
1	0,017	0,13	0,25	4	18,5
2	0,035	0,13	0,25	4	11,3
3	0,052	0,13	0,25	4	8,9
4	0,070	0,13	0,25	4	7,7
5	0,087	0,13	0,25	4	7,0
6	0,105	0,13	0,25	4	6,5
7	0,122	0,13	0,25	4	6,2
8	0,140	0,13	0,25	4	5,9
9	0,157	0,13	0,25	4	5,7
10	0,175	0,13	0,25	4	5,5
15	0,262	0,13	0,25	4	5,1
20	0,349	0,13	0,25	4	4,8
25	0,436	0,13	0,25	4	4,7
30	0,524	0,13	0,25	4	4,6
35	0,611	0,13	0,25	4	4,5
40	0,698	0,13	0,25	4	4,4
45	0,785	0,13	0,25	4	4,4
50	0,873	0,13	0,25	4	4,3
55	0,960	0,13	0,25	4	4,3

Ainsi, pour des angles de pente caractéristiques des plages (entre 5° pour les plages de sable moyen et 10° pour les plages de graviers et galets), les erreurs de positionnement sont comprises entre 47 et 82 cm pour une résolution spatiale de 0,3 m (*Xhardé, 2007*), entre 2,0 et 2,8 m pour une résolution spatiale de 1 m (mode topographique), entre 3,5 et 5,0 m pour une résolution de 2 m (mode hydrographique "haute densité") et entre 5,5 et 7,0 m pour une résolution de 4 m (mode hydrographique "basse densité").

Pour des angles plus grands, les erreurs de positionnement du trait de côte diminuent progressivement pour atteindre la résolution spatiale du système LiDAR lorsque l'angle de pente dépasse 60°. Ce dernier cas se rencontre principalement dans les secteurs de falaises où les plages sont peu développées ou inexistantes, de sorte que le niveau de marée considéré comme indicateur se retrouve situé dans la falaise elle-même (*Xhardé, 2007*).

D'après ce qui précède, la précision du positionnement des traits de côte mesurés dans le cadre de cette étude est estimée entre:

- **0,5 m et 1 m** en 2003 et 2004 ;
- **1 m et 2,5 m** pour le secteur ayant bénéficié d'une couverture en mode topographique en 2006 (secteur s'étendant entre le marais de Saint-Siméon et Bonaventure) ;
- **2 m et 4 m** pour les secteurs ayant été couverts par un relevé bathymétrique "haute densité" (secteur s'étendant entre le marais de Saint-Siméon et Bonaventure ; secteur de Paspébiac)
- **4 m et 6 m** pour les secteurs n'ayant été couverts que par des relevés bathymétriques "basse densité" (secteur entre Caplan et l'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure ; secteur entre la pointe Huntington et Saint-Godefroi).

Par conséquent, tout changement inférieur à la limite inférieure de précision (soit respectivement 0,5 m, 1 m, 2 m et 4 m) sera considéré comme non significatif. Tout changement compris entre la limite inférieure et la limite supérieure de précision sera considéré comme significatif en terme de tendance (érosion ou accrétion) mais la valeur

mesurée devra être prise avec prudence et considérée comme un ordre de grandeur du changement mesuré. Enfin, tout changement supérieur à la limite supérieure de précision (soit respectivement 1 m, 2,5 m, 4 m et 6 m) sera considéré comme significatif, aussi bien en terme de tendance que d'un point de vue quantitatif.

Il faut cependant remarquer que ces précisions ne correspondent qu'à des précisions moyennes et que, localement, les erreurs peuvent être plus importantes. C'est notamment le cas dans les zones présentant de très faibles pentes comme les estuaires, les deltas et les marais intertidaux côtiers. Pour ce type d'environnement, la relation théorique utilisée précédemment (éq. 1) montre que les erreurs de positionnement du trait de côte peuvent dépasser les 10 mètres. Afin de vérifier cette estimation, une comparaison a été faite entre les données acquises en 2006 en mode topographique et en mode hydrographique "basse densité". La position du trait de côte fourni par ces deux jeux de données a été comparée dans le secteur du marais côtier de Saint-Siméon et les différences mesurées tout les 10 m. Les résultats sont présentés dans les figures 4.2 et 4.3.

Si les différences ne sont pas significatives au niveau de la plage, l'erreur horizontale moyenne étant de $-1,1 \pm 1,3$ m, celle-ci monte à $-13,3 \pm 10,5$ m au niveau de la flèche de graviers qui ferme partiellement le marais et les différences atteignent, localement, -47 m. La raison de telles différences est que certaines extensions sableuses particulièrement peu élevées de cette flèche littorale ne sont pas détectées par les relevés bathymétriques à faible résolution alors qu'elles sont clairement présentes sur les relevés en mode topographique (figure 4.2). Le même problème s'observe au niveau de l'embouchure des petits ruisseaux qui se jettent dans le marais, où des décalages de l'ordre de -10 à -18 m existent localement entre les traits de côte mesurés en 2006 en mode topographique et hydrographique "basse densité".

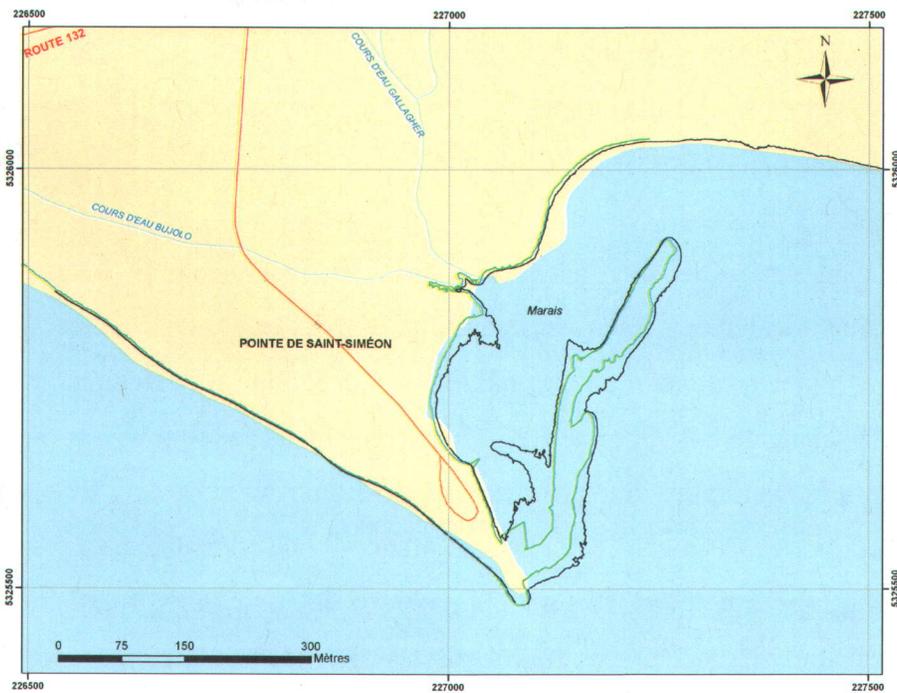


Figure 4.2 – Influence de la résolution des relevés sur la position du trait de côte (secteur du marais de Saint-Siméon, 2006). Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Le trait noir représente le trait de côte mesuré en mode topographique en 2006 tandis que le trait vert représente ce même trait de côte mesuré à partir des données hydrographiques "basse densité".

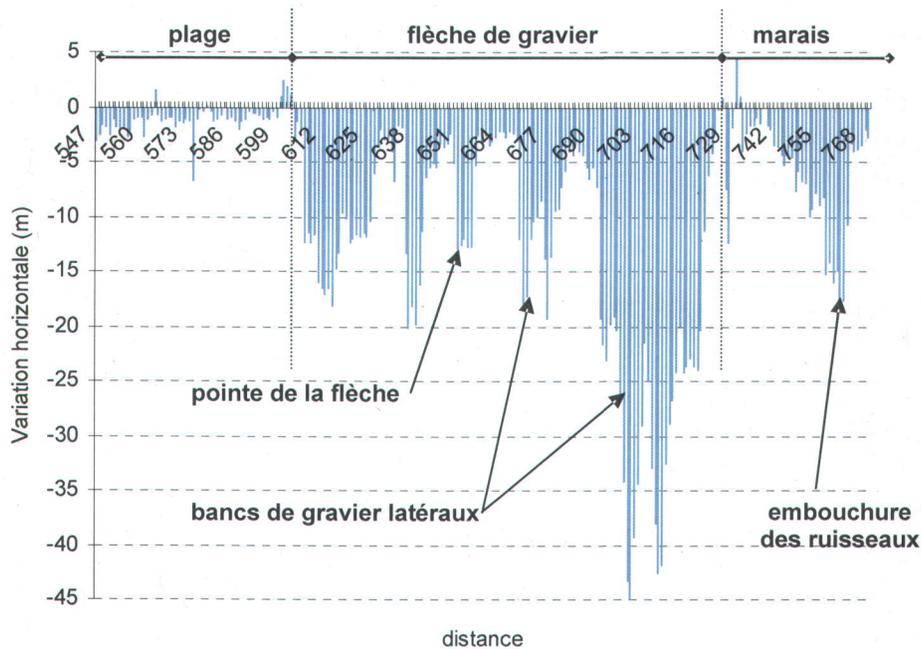


Figure 4.3 – Variation de position du trait de côte au niveau du marais côtier de Saint-Siméon selon le mode de relevé utilisé (topographique ou hydrographique "basse densité").

4.1.1.2 Variations volumiques

Les volumes ont été calculés à partir des MNVE. Pour ce faire, les isolignes de variations verticales ont été générées à intervalles réguliers de 0,25 m pour 2003-2004 et de 0,50 m pour 2003-2006, puis converties en surfaces. L'aire de chaque surface, exprimée en m², a ensuite été calculée de façon automatique puis multipliée par la valeur moyenne de dz correspondant à l'aire considérée. Le résultat de cette opération fournit le volume moyen déplacé, exprimé en m³, dans l'aire considérée. Pour ces calculs, la précision verticale des mesures altimétriques laser a été estimée à 15 cm pour les relevés topographiques de 2003, 2004 et 2006 (*Xhardé, 2007*) et à 25 cm pour les relevés de 2006 réalisés en mode hydrographique (*Cottin, 2008*). L'imprécision de mesure des volumes calculés a ainsi pu être déterminée.

4.1.1.3 Géomorphologie côtière

Une analyse de la géomorphologie côtière de l'avant-côte sous-marine a été réalisée en complément de cette étude afin d'aider à la compréhension de la dynamique sédimentaire littorale et à l'interprétation des changements mesurés au niveau des rivages pour les périodes concernées. Cette analyse s'est appuyée essentiellement sur une interprétation descriptive de la bathymétrie et des structures sédimentaires sous-marines au moyen des cartes de relief avec ombre portée, ainsi que sur des mesures de profils synthétiques générés à partir des modèles numériques de terrain LiDAR des années considérées.

5 RÉSULTATS

5.1 Secteur de Saint-Siméon

Ce secteur est situé dans la MRC de Bonaventure et correspond à une côte plus ou moins rectiligne d'environ 6 km de long et orientée nord-ouest – sud-est. Il est limité à l'ouest par l'embouchure du Ruisseau Leblanc et à l'est par le marais de Saint-Siméon. Dans la partie occidentale du secteur, la route longe des falaises vives d'une hauteur moyenne de 12 mètres et formées de grès et de silts de la formation de Bonaventure. La plage qui les borde est généralement étroite et le haut de plage inexistant.

Plus à l'est, les falaises de grès font place à une succession de hauts talus constitués en majeure partie de matériaux non cohésifs et granulaires tels que sable et graviers. Les plages sablo-graveleuses restent étroites et n'offrent aucune protection contre l'action des vagues. Cependant, de nombreux ouvrages de protection sont présent à la base des talus. La hauteur des talus diminue ensuite progressivement vers l'est jusqu'à l'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure, le principal cours d'eau de ce secteur, où les talus font place à un ancien cordon dunaire fortement urbanisé. L'embouchure de cette rivière est barrée par une flèche sédimentaire bien développée qui dévie les apports sédimentaires fluviaux. Les plages sont essentiellement constituées de graviers et de galets tandis que l'avant-plage est occupée par un important système de bancs de sables (*Morneau et al, 2001a*). La partie orientale du site se caractérise par la présence d'un marais côtier qui constitue désormais le seul site naturel de ce secteur permettant un accès à la mer.

Les vestiges d'anciens quais abandonnés et à moitié détruits sont visibles le long du littoral de Saint-Siméon. Ils se présentent sous la forme d'amoncellements de galets s'étendant perpendiculairement au rivage, entre la plage et le large, ou parallèles à la plage plus au large.

Ce secteur peut donc être subdivisé approximativement en 4 grands environnements côtiers (figure 5.1):

- La zone de plage située à l'ouest de l'ancien port de pêche, à l'extrême ouest de ce secteur d'étude et connue sous le nom du havre de pêche du Ruisseau-Leblanc.
- La zone des talus, qui constitue la majeure partie du site.
- La zone de l'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure.
- La zone du marais côtier de Saint-Siméon.

Les résultats pour chacun de ces quatre environnements sont présentés ci-dessous.

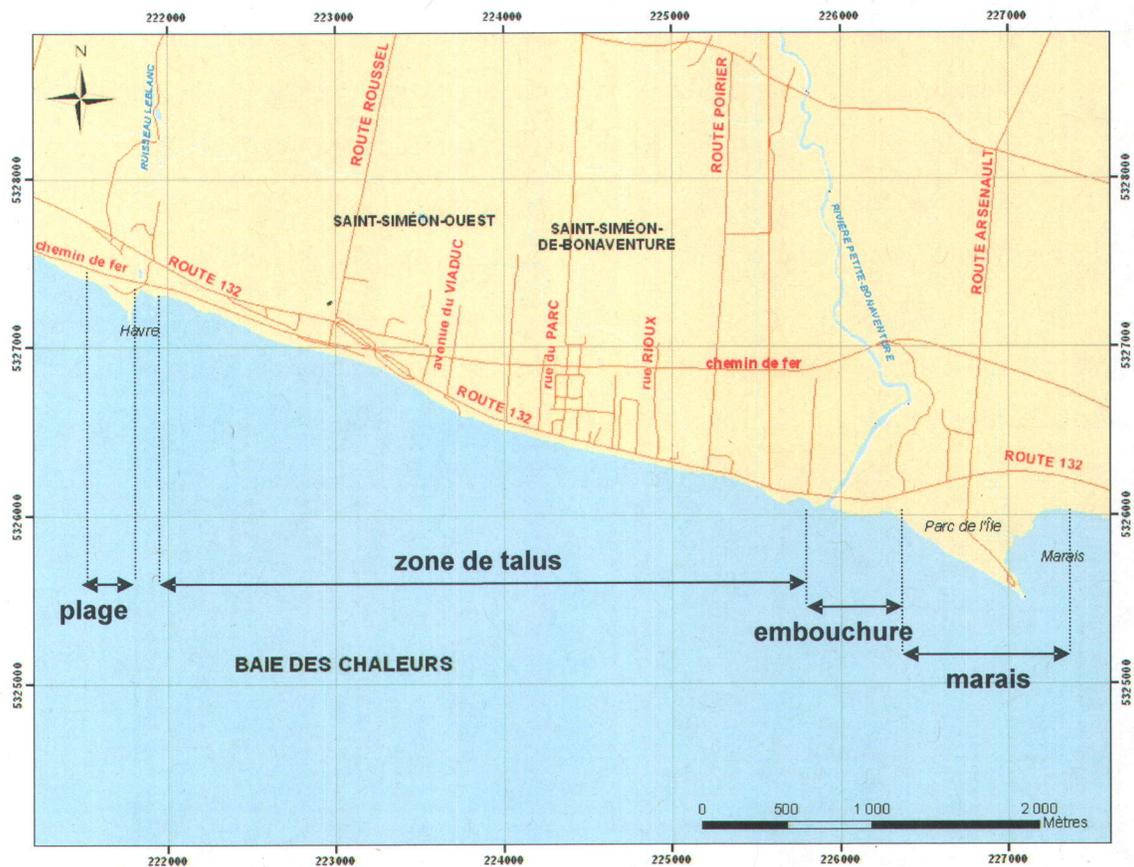


Figure 5.1 – Environnements côtiers dans le secteur de Saint-Siméon. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

5.1.1 Zone du havre de pêche du Ruisseau-Leblanc

La plage du Ruisseau est située directement à l'ouest du havre de pêche et résulte de l'arrêt de la dérive sédimentaire littorale, orientée d'ouest en est dans ce secteur, par la jetée occidentale du port (figure 5.2). Cette plage présente une avancée moyenne du trait de côte de $2,0 \pm 0,7$ m entre 2003 et 2004, excepté à proximité de la jetée ouest où un retrait moyen de $-3,5 \pm 1,7$ m est observé le long d'une portion de plage d'environ 90m (figure 5.3). Cela correspond à une accrétion d'environ 385 ± 313 m³ sur la partie ouest et à une érosion de -1166 ± 635 m³ sur la partie est de la plage entre 2003 et 2004.

Ces tendances semblent être confirmées pour la période 2003-2006. La partie ouest de la plage subit une progradation du trait de côte de $1,6 \pm 1,0$ m durant cette période tandis que la partie proche de la jetée recule de $-3,4 \pm 2,2$ m. Dans le même temps, une accrétion de 4849 ± 4808 m³ est mesurée sur la partie ouest et une érosion de -668 ± 322 m³ est observée sur la partie est de la plage. Cependant, comme seules des données collectées en mode hydrographique basse densité sont disponibles pour 2006 dans ce secteur, ces valeurs peuvent difficilement être considérées comme significatives car elles sont situées en-deçà de l'imprécision théorique calculée au § 4.1.3.

En ce qui concerne l'avant-plage située immédiatement à l'est du port, une accrétion de 718 ± 578 m³ y est observée entre 2003-2004 tandis qu'une érosion de -4341 ± 2315 m³ est mesurée au même endroit pour la période 2003-2006.

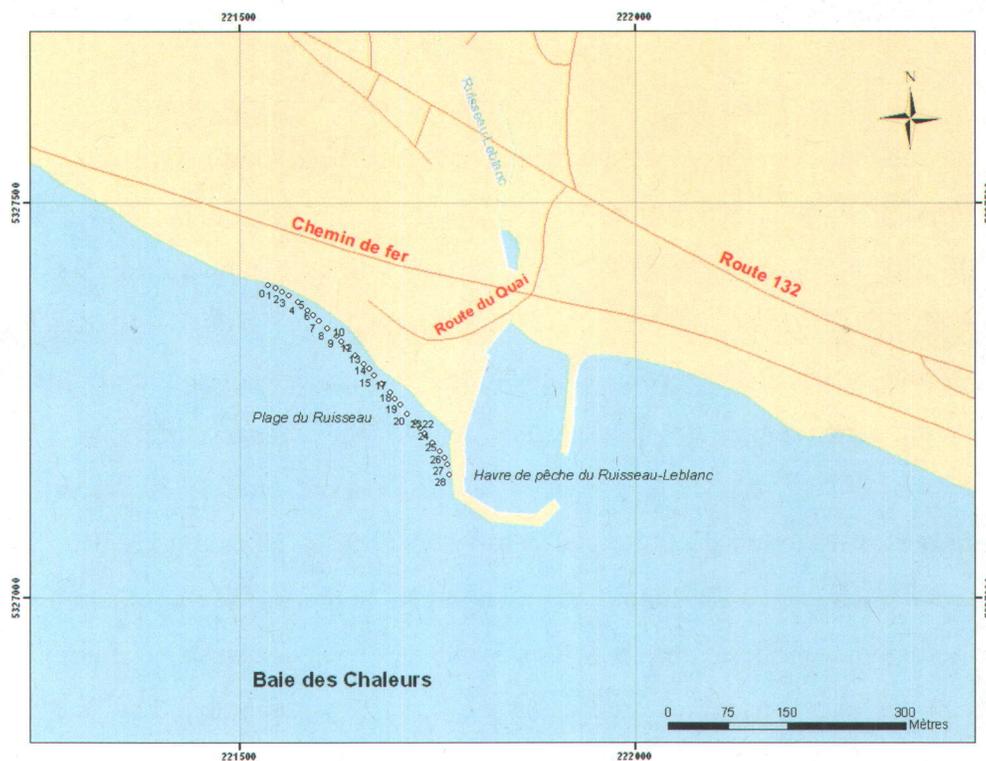


Figure 5.2 – Zone du havre de pêche du Ruisseau-Leblanc, secteur de Saint-Siméon. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

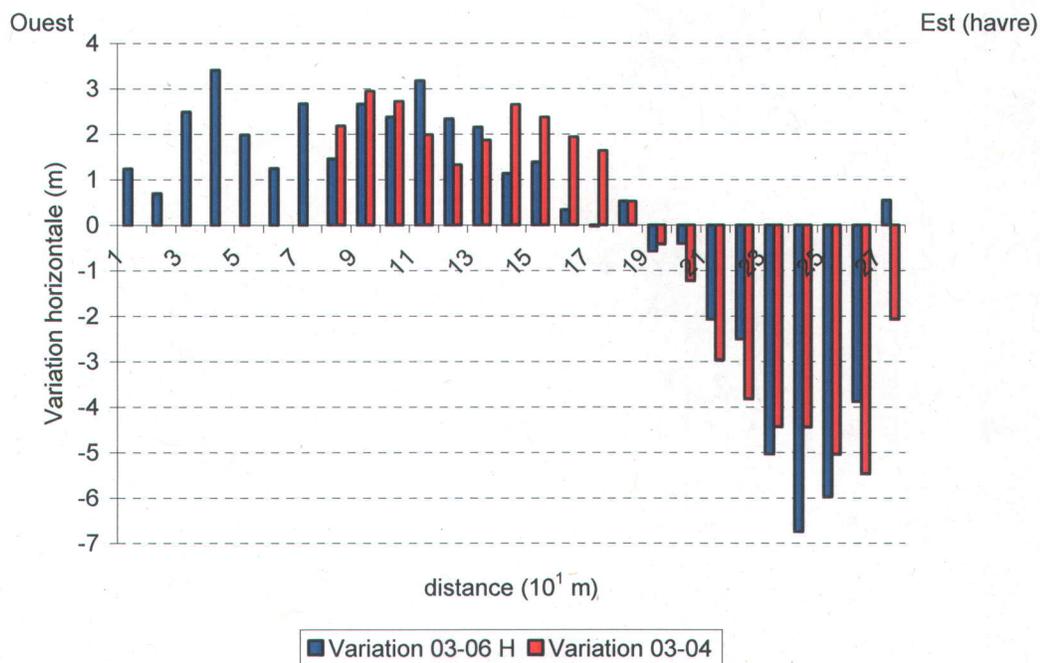


Figure 5.3 – Variations de position du trait de côte sur la plage du Ruisseau, à l'ouest du havre de pêche du Ruisseau-Leblanc, secteur de Saint-Siméon. *La distance est exprimées en dizaine de mètres par rapport à l'origine de la zone.*

5.1.2 Zone des talus

Cette zone s'étend sur une longueur d'environ 4 km et se caractérise par des plages de graviers très peu développées situées au pied de talus meubles. Tout le long de cette zone, aucune variation significative du trait de côte n'a pu être mesurée, aussi bien en 2004 qu'en 2006 (figure 5.4). En effet, la variation moyenne du trait de côte n'est que de $0,1 \pm 0,7$ m pour la période 2003-2004 et de $-3,3 \pm 1,2$ m pour 2003-2006. Des zones éparses d'accrétion sont néanmoins observées en 2004 sur l'avant-plage bordant le pied des talus. Ces zones sont généralement de petites tailles, leur longueur restant inférieure à 100 m, et elles se caractérisent par des variations verticales de l'ordre de 25-30 cm seulement, soit à la limite de détection des systèmes aéroportés LiDAR. Elles totalisent un volume estimé à 1648 ± 1318 m³. En 2006, cette avant-plage se caractérise au contraire par la présence de petites surfaces d'érosion, qui s'étendent sur des distances d'environ 100 m et présentent des variations verticales d'environ 60 cm. Le volume total érodé sur l'avant-plage des talus entre 2003 et 2006 est estimé à seulement -411 ± 219 m³.

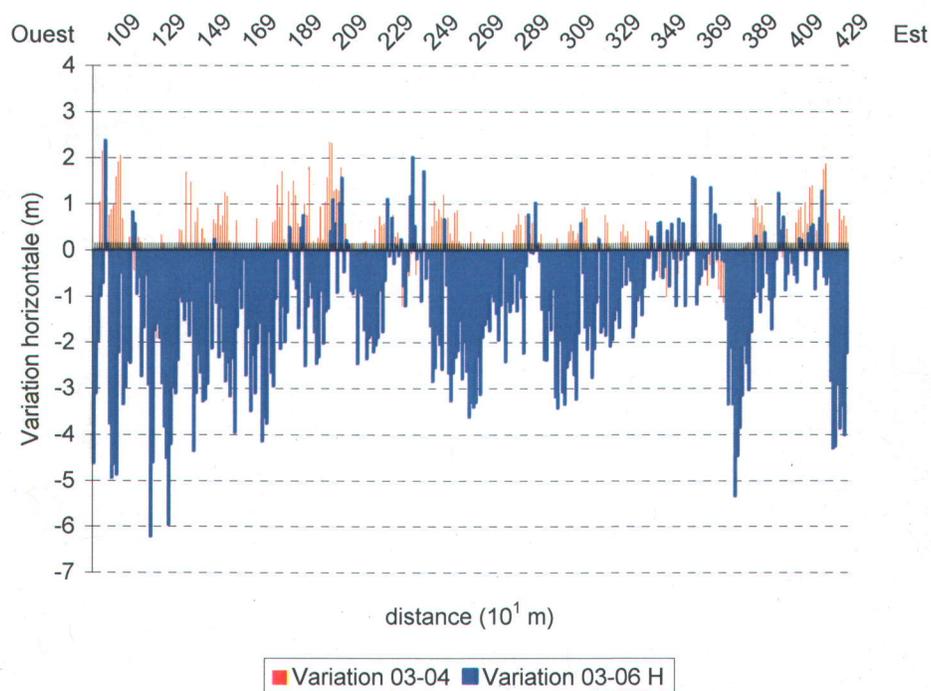


Figure 5.4 – Variations de position du trait de côte le long des talus, secteur de Saint-Siméon. La distance est exprimées en dizaine de mètres par rapport à l'origine de la zone.

5.1.3 Zone de l'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure

Cette zone s'étend sur une longueur d'environ 600 m et se caractérise par la présence d'une flèche d'embouchure très dynamique. Cette structure sédimentaire a subi un recul moyen de son trait de côte de $-1,2 \pm 1,8$ m entre 2003 et 2004 et de $-2,6 \pm 3,7$ m entre 2003 et 2006 (figure 5.5). Localement, l'érosion a atteint $-2,4 \pm 0,2$ m et $-3,3 \pm 0,4$ m le long de certaines portions de la flèche en 2004 et $-5,3 \pm 2,2$ m en 2006. Cela correspond à une perte de -1773 ± 1250 m³ de sédiments pour la seule année 2003-2004 et à une perte de -8234 ± 4337 m³ pour la période 2003-2006. Dans le même temps, la partie distale de la flèche a progradé vers l'est d'environ 90 m sous l'effet du transport sédimentaire littoral en 2004, ce qui correspond à une accumulation de sédiments estimée à 2757 ± 717 m³.

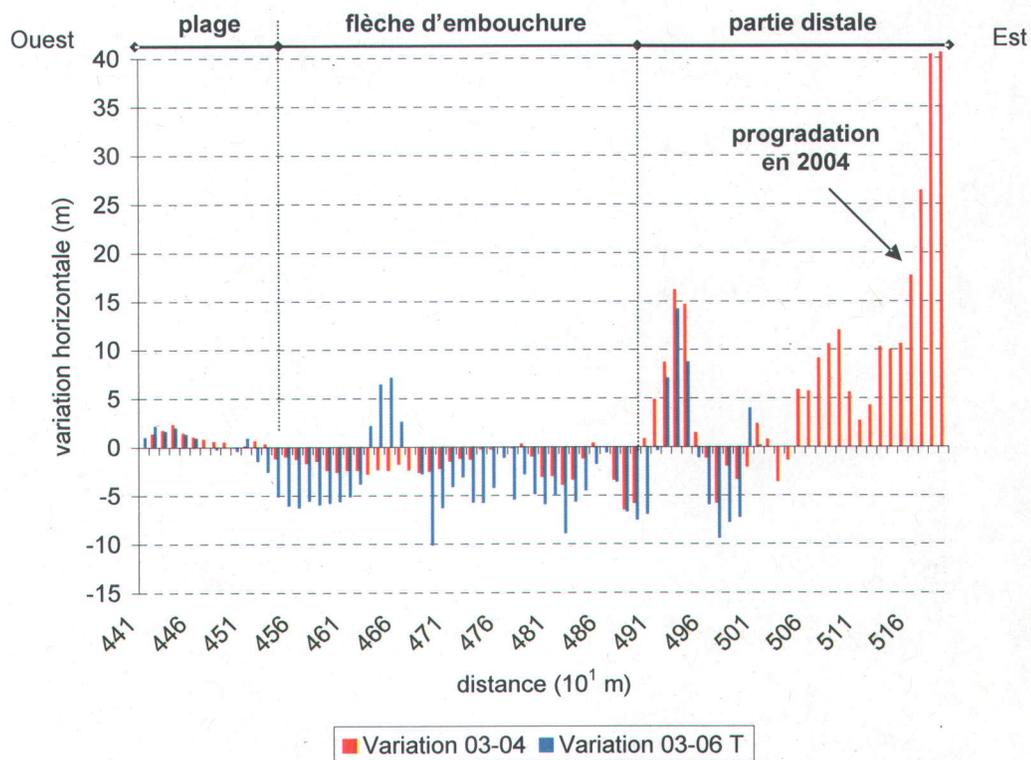


Figure 5.5 – Variations de position du trait de côte dans la zone de l'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure, secteur de Saint-Siméon. La distance est exprimées en dizaine de mètres par rapport à l'origine de la zone.

En 2006, la progradation en direction de l'est s'est poursuivie sur environ 50 m de plus jusqu'à ce que la pointe de la flèche littorale se retrouve rattachée à la côte. Cela correspond à une accrétion totale, au niveau de la partie distale de la flèche, de $7460 \pm 1612 \text{ m}^3$ depuis 2003.

Suite au rattachement de la flèche à la côte, l'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure s'est retrouvée complètement obstruée et une nouvelle passe s'est créée dans la barrière, environ 250 m à l'ouest de l'embouchure existant en 2003 (figures 5.6 et 5.7), afin de permettre l'écoulement des eaux de la rivière. Ces modifications géomorphologiques ont provoqué un certain nombre de changements dans la dynamique sédimentaire côtière locale. Ceux-ci seront explicités plus en détails dans la partie consacrée à la discussion (§ 6.1).

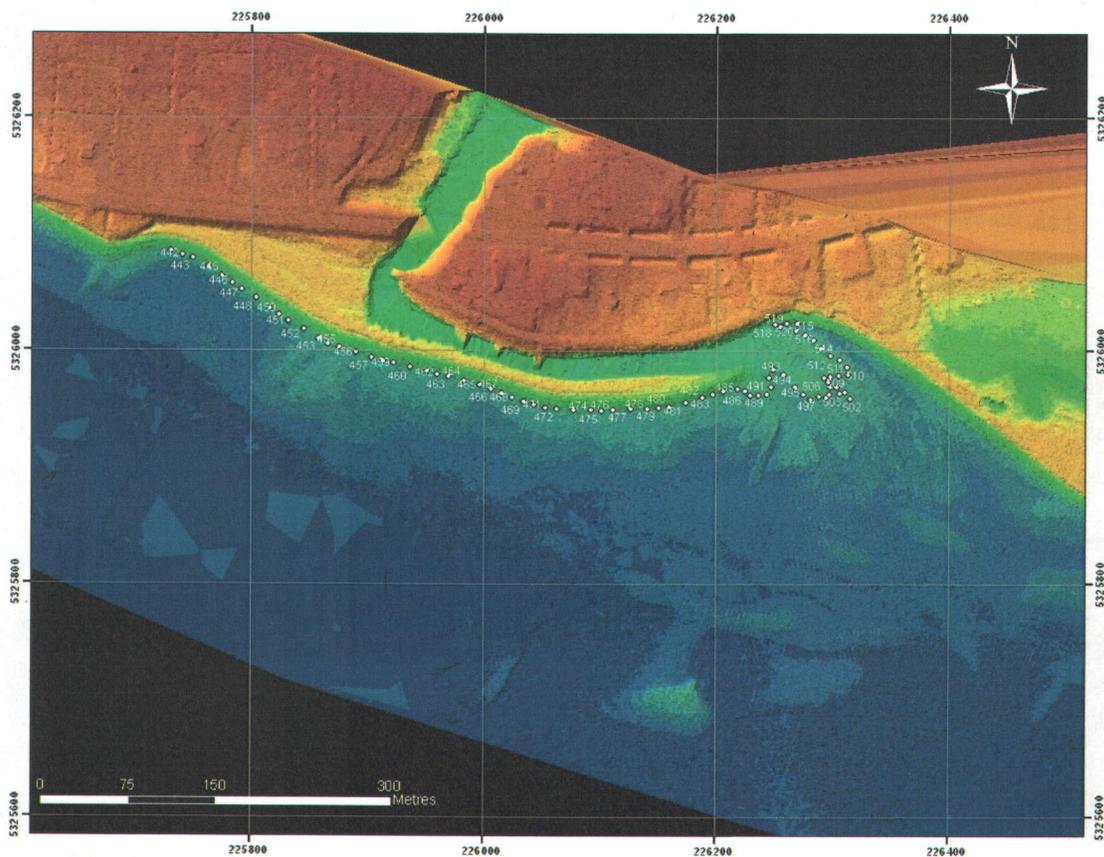


Figure 5.6 – Morphologie de la flèche d'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure en 2003. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

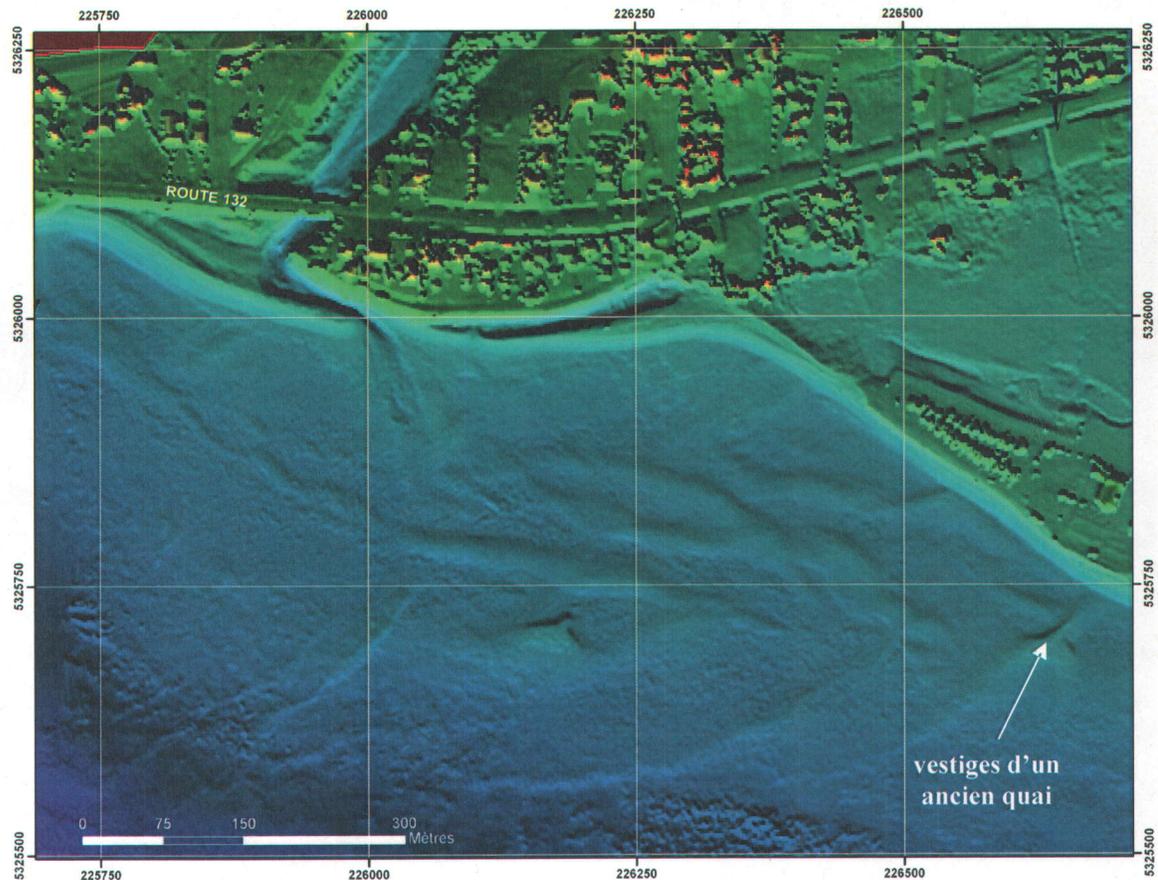


Figure 5.7 – Morphologie de la flèche d'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure en 2006. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

5.1.4 Zone du marais de Saint-Siméon

Cette zone correspond à une avancée sablo-graveleuse de faible élévation sur laquelle a été développé un centre récréatif de plein air (le parc de l'île) et qui délimite un marais intertidal côtier. Une flèche littorale de gravier peu structurée est présente au niveau de la pointe et sépare la zone de marais proprement dite de la pleine mer. Cette zone présente surtout un attrait touristique et de loisir.

La plage bordant la partie sud-ouest de cette structure a expérimenté un recul moyen de $-0,4 \pm 1,4$ m en 2004 et de $-1,4 \pm 1,8$ m entre 2003 et 2006. Cependant, des variations peuvent être observées le long de ce littoral d'environ 1 km de longueur (figure 5.8). Au niveau de la partie ouest de cette plage, située à hauteur de l'ancienne embouchure de la

rivière Petite-Bonaventure, un recul moyen du trait de côte de $-0,6 \pm 0,5$ m et une érosion de -1490 ± 1150 m³ sont mesurés en 2004. Ce recul atteint $-3,3 \pm 2,1$ m entre 2003 et 2006.

Après cette partie en érosion, une zone en accrétion est observée sur une longueur de 120 m. Celle-ci présente une progradation du trait de côte de $2,1 \pm 1,0$ m en 2004, soit un volume accumulé de 340 ± 272 m³. Pour la période 2003-2006, cette zone ne présente pas de tendance claire bien qu'une légère progradation du trait de côte de 1 à 2 m soit observable ponctuellement. Cependant, aucune variation verticale significative ne peut être mesurée à cet endroit en 2006.

Enfin, la portion de plage qui jouxte directement l'épi situé à la pointe du marais de Saint-Siméon connaît une érosion marquée, aussi bien pour la période 2003-2004 que 2003-2006. Le trait de côte recule ainsi de $-1,1 \pm 0,8$ m et $-2,4 \pm 1,3$ m respectivement. Les volumes érodés sur cette zone sont, quant à eux, estimés à -878 ± 684 m³ et -1100 ± 724 m³ pour les mêmes intervalles de temps.

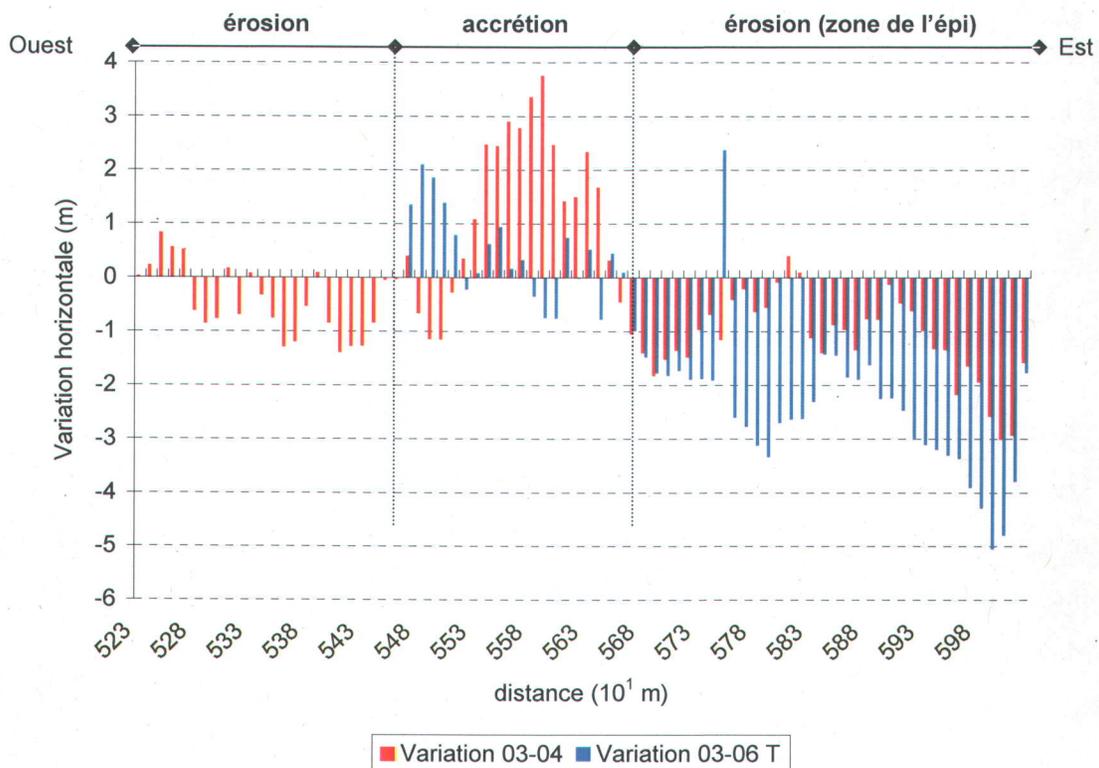


Figure 5.8 – Variations de position du trait de côte au niveau de la plage du marais de Saint-Siméon. La distance est exprimées en dizaine de mètres par rapport à l'origine de la zone.

Les changements les plus importants de cette zone se sont produits au niveau de la flèche littorale de graviers qui s'étend depuis la pointe du marais de Saint-Siméon en direction du nord-est (figure 5.9). Trois sections de cette flèche (identifiées comme les sections E₁, E₂ et E₃) ont subi une érosion importante entre 2003 et 2004 tandis que 4 autres sections (sections A₁ à A₄) ont au contraire subi une accrétion significative, trahissant un changement de morphologie ainsi qu'une progradation de la flèche en direction de l'ouest, sur la vasière du marais.

De façon plus détaillée, en 2004, la section E₁ a subi un recul du trait de côte de $-3,2 \pm 0,8$ m et une perte de volume de -413 ± 355 m³ ; la section E₂ a reculé de $-2,6 \pm 1,3$ m et perdu -1729 ± 1259 m³ et la section E₃ a expérimenté un retrait moyen de $-2,2 \pm 0,6$ m ainsi qu'un amaigrissement de -1008 ± 661 m³.

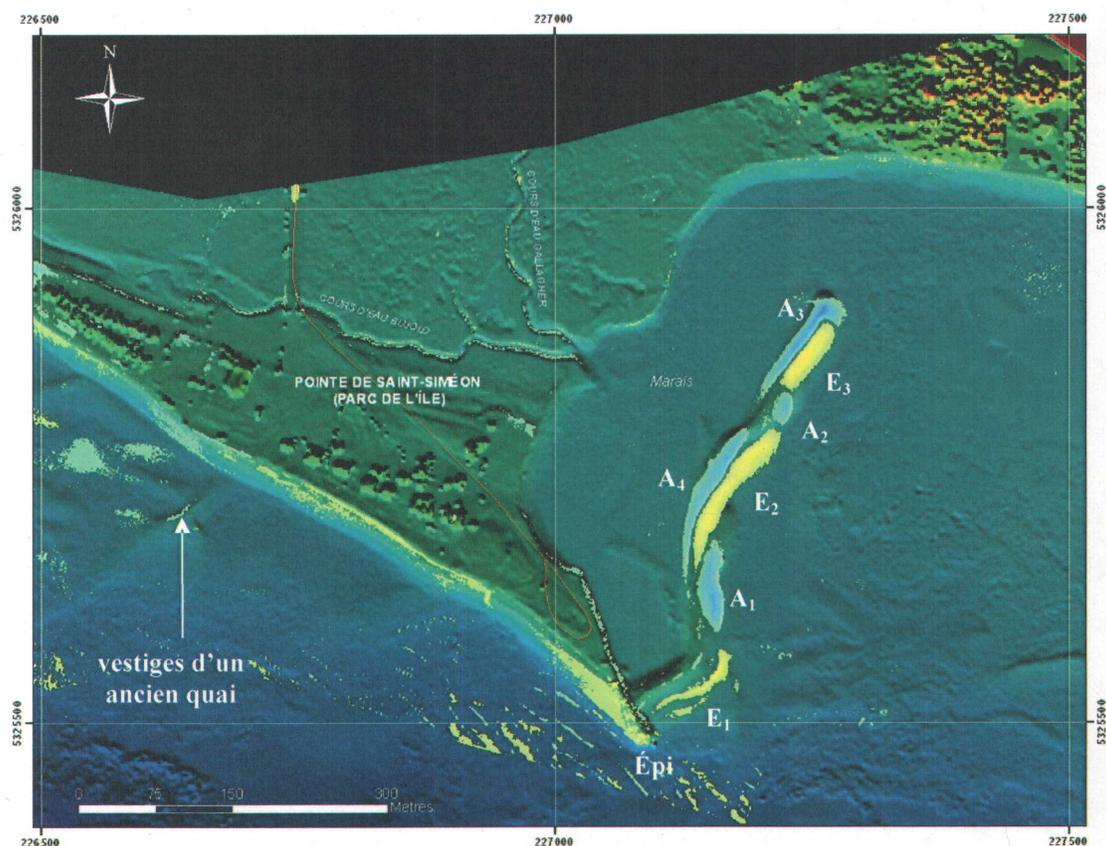


Figure 5.9 – Variations au niveau de la flèche littorale de graviers du marais de Saint-Siméon. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion.*

Dans le même temps, le trait de côte a progradé en moyenne de $6,3 \pm 2,4$ m pour la section A₁, de $5,1 \pm 0,5$ m pour la section A₂, de $8,6 \pm 2,1$ m au niveau de la pointe (section A₃) et de $13,5 \pm 6,2$ m pour la section A₄. Cela correspond respectivement à des accrétions de 1187 ± 531 m³, 278 ± 158 m³, 1265 ± 496 m³ et 1325 ± 581 m³.

Pour la période 2003-2006, les tendances sont confirmées pour chacune des sections de la flèche littorale. Les sections E₁, E₂ et E₃ subissent un recul de leurs traits de côte respectifs de $-5,8 \pm 2,1$ m, $-6,8 \pm 1,6$ m et $-4,6 \pm 1,4$ m pour une perte de sédiments estimée à -1237 ± 743 m³, -2186 ± 870 m³ et -966 ± 580 m³ pour chacune de ces sections. Les sections en accrétion A₁, A₂, A₃ et A₄ ont connu, pour leur part, une progradation moyenne du trait de côte de $11,2 \pm 4,3$ m, $6,6 \pm 2,5$ m, $9,9 \pm 3,3$ m et $16,8 \pm 5,0$ m respectivement durant la même période, ce qui correspond à des volumes déposés de 2093 ± 708 m³, 741 ± 340 m³, 1118 ± 464 m³ et 1479 ± 637 m³ pour chacune de ces sections.

Enfin, le trait de côte intérieur du marais est resté stable, aussi bien durant la période 2003-2004 que 2003-2006. La variation horizontale moyenne de position est estimée à $1,2 \pm 1,2$ m pour la première période de temps et à $1,7 \pm 2,4$ m pour la seconde période.

5.2 Secteur de Bonaventure

Ce secteur peut être subdivisé approximativement en 3 grands environnements côtiers (figure 5.11): la zone des talus, qui constitue la majeure partie du site et est très similaire à celle du secteur de Saint-Siméon ; la zone du barachois occidental de Bonaventure (Pointe de Beaubassin), sur laquelle est construit le port de Bonaventure et qui se caractérise par la présence d'ouvrages de protection et de stabilisation telle la jetée du hâvre de Beaubassin, et la zone du barachois oriental (Banc de l'Est) qui correspond à une flèche sableuse non stabilisée. Ces deux flèches littorales forment le système de barachois qui barre presque entièrement l'estuaire de la rivière Bonaventure. Les résultats pour chacun de ces trois environnements sont présentés ci-dessous.

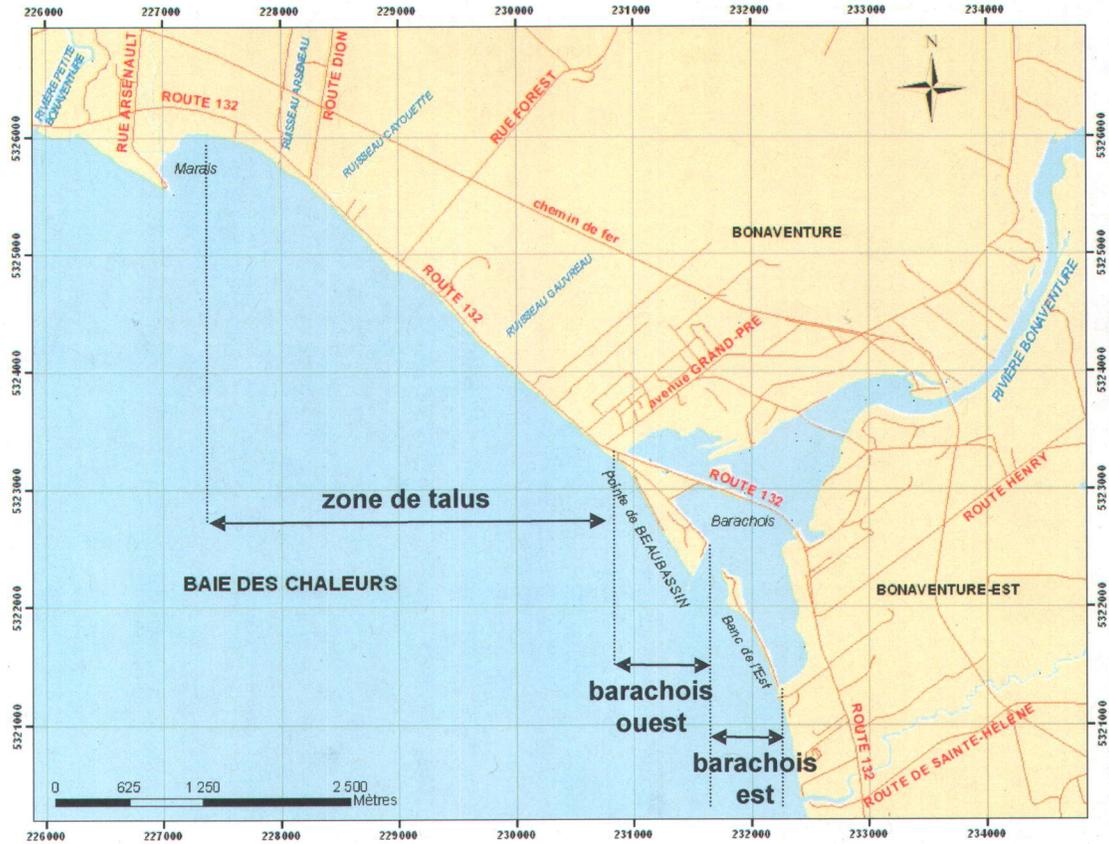


Figure 5.11 – Environnements côtiers dans le secteur de Bonaventure. *Le système de référence de toutes les cartes qui suivent est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

5.2.1 Zone de talus

Cette zone s'étend sur une longueur d'environ 4,5 km et se caractérise par des plages de graviers très peu développées situées au pied de talus meubles. Durant la période 2003-2004, le trait de côte ne présente aucune variation significative dans ce secteur (figure 5.12), l'écart moyen entre 2003 et 2004 n'excédant pas $0,46 \pm 0,88$ m. Néanmoins, une accrétion est observée sur l'avant-plage. Ces zones sont surtout localisées au niveau des anciens quais (figure 5.13) et présentent des variations verticales qui ne dépassent pas 25 à 30 cm. Leurs volumes cumulés totalisent environ 2842 ± 2341 m³.

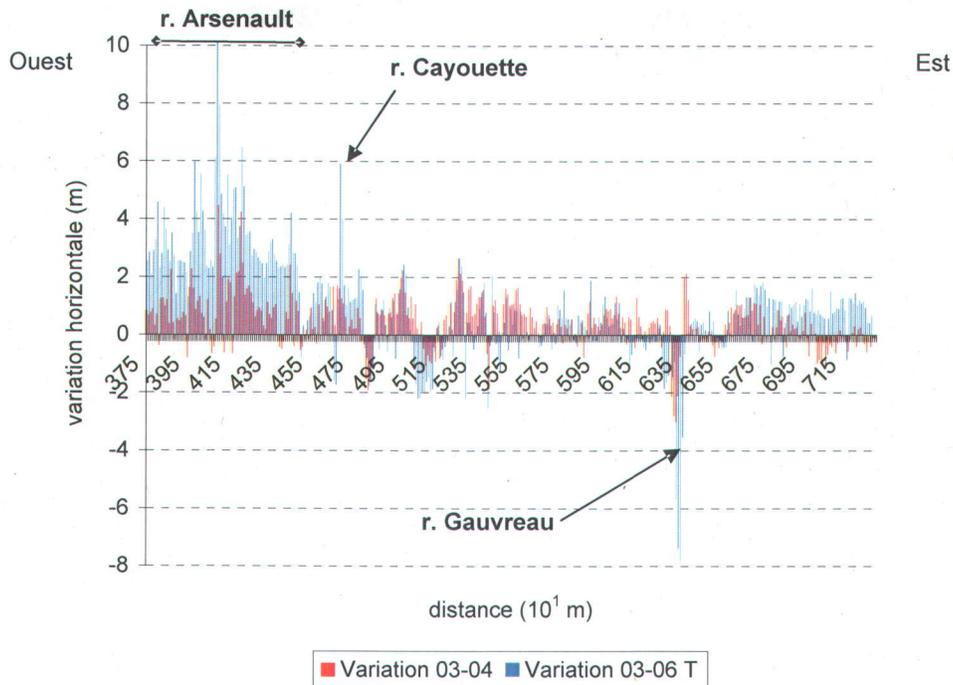


Figure 5.12 – Variations de position du trait de côte le long des talus, secteur de Bonaventure. La distance est exprimées en dizaine de mètres par rapport à l'origine de la zone.

Pour la période 2003-2006, la variation moyenne du trait de côte ne peut pas être considérée comme significative car l'écart moyen de position est d'à peine $0,96 \pm 1,84$ m. Cependant, certaines portions du littoral présentent localement des variations significatives. C'est le cas de la partie est du site, qui fait suite au marais de Saint-Siméon et s'étend devant l'embouchure du ruisseau Arsenault. Cette portion du littoral, d'environ 1 km de long, présente une progradation significative du trait de côte de $3,39 \pm 1,73$ m (figure 5.12). Le volume déposé mesurable est cependant très faible, environ 55 ± 44 m³, ce qui laisse supposer que l'accrétion verticale est inférieure à la limite de détection du LiDAR, soit 30 cm pour les changements verticaux. La zone du delta du ruisseau Cayouette présente, elle aussi, une progradation significative du trait de côte de $2,13 \pm 1,44$ m sur une distance d'environ 20 m, ainsi qu'une accumulation de sédiments sur la plage et l'avant-plage de 72 ± 58 m³. Enfin, un recul significatif du trait de côte de $-3,01 \pm 2,61$ m est observé au niveau de l'embouchure du ruisseau Gauvreau sur une distance d'environ 100 m, ainsi qu'une perte de sédiments estimée à -409 ± 253 m³ entre 2003 et 2006.

5.2.2 Zone du barachois de Bonaventure – flèche ouest (Pointe de Beaubassin)

Cette zone correspond à une flèche littorale sableuse d'environ 1200 m de longueur et de 275 m de largeur présentant de nombreux ouvrages de stabilisation (quais, jetées, murs en bois...) afin de protéger les infrastructures humaines qui sont présentes dans ce secteur (port, habitations, routes...). Elle s'étend de la fin du mur de soutènement de la route 132, au niveau de l'hôtel Château Blanc, jusqu'au chenal d'entrée du port de Bonaventure.

En ce qui concerne les 800 premiers mètres de côte de ce secteur, les variations de position du trait de côte sont généralement de faible ampleur et non significatives, que ce soit pour la période 2003-2004 ou la période 2003-2006 (figure 5.13). La variation moyenne est ainsi évaluée à $0,59 \pm 0,57$ m pour le premier intervalle de temps et à $-0,23 \pm 1,09$ m pour la seconde, ce qui reste en-deçà de la limite de précision de 1m déterminée pour ces jeux de données.

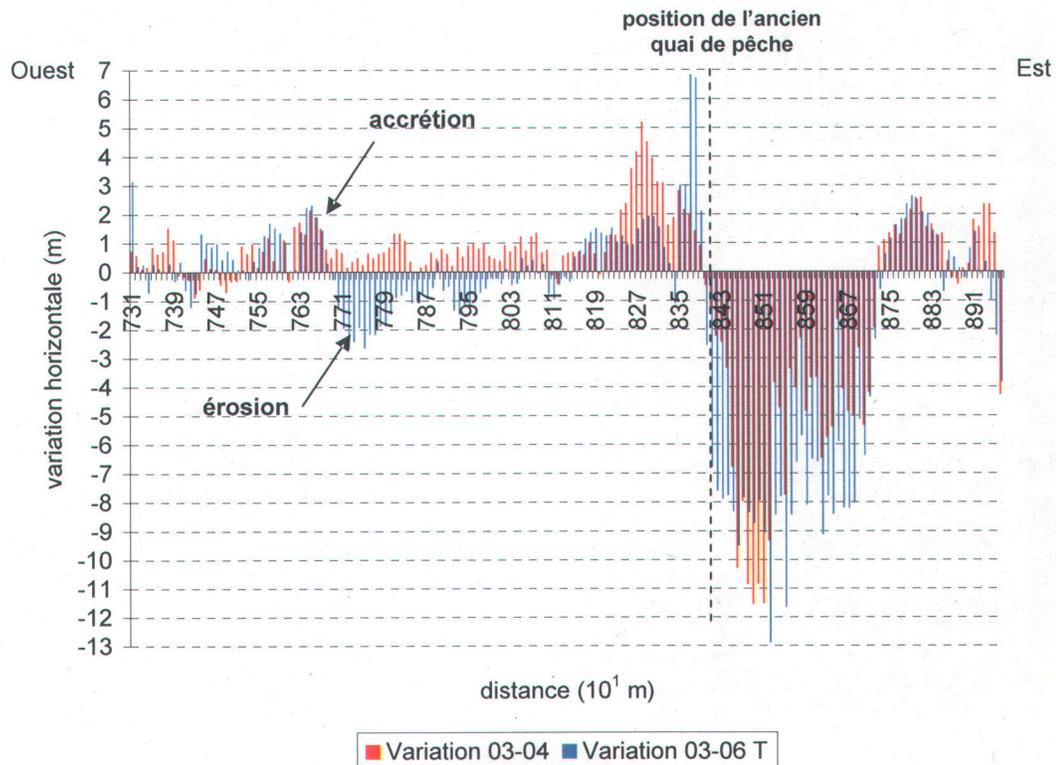


Figure 5.13 – Variations de position du trait de côte le long de la flèche littorale occidentale du barachois, secteur de Bonaventure. La distance est exprimées en dizaine de mètres par rapport à l'origine de la zone.

Néanmoins deux portions de littoral, de 50 m et 100 m de longueur respectivement, présentent des variations plus importantes qui peuvent être considérées comme significatives. La première montre une progradation du trait de côte de $1,71 \pm 0,28$ m entre 2003 et 2004 et de $1,85 \pm 0,39$ m entre 2003 et 2006, soit un volume déposé d'environ 201 ± 161 m³. La seconde montre une érosion du trait de côte de $-2,06 \pm 0,42$ m entre 2003 et 2006, soit une perte de sédiments de -171 ± 137 m³.

La zone qui subit les changements les plus marqués se situe cependant au niveau d'un ancien quai de pêche qui s'étend perpendiculairement au trait de côte sur une longueur d'environ 200 m et se situe à une profondeur variant entre -1 m et -1,5 m (figures 5.14 et 5.15).

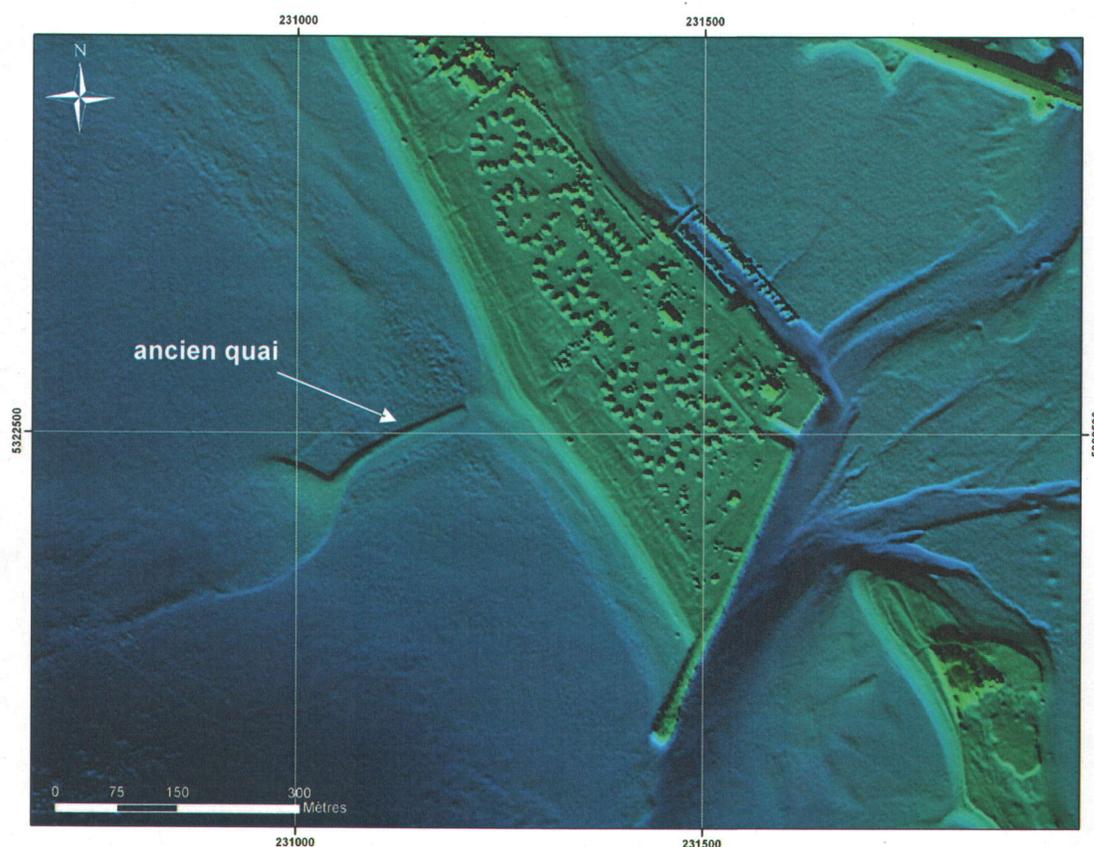


Figure 5.14 – Bathymétrie devant la flèche littorale ouest du barachois, secteur de Bonaventure. La bathymétrie révèle la présence des vestiges d'un ancien quai de pêche sur l'avant-plage sous-marine. Cette structure s'étend perpendiculairement au trait de côte sur une longueur d'environ 200 m et se situe à une profondeur variant entre -1 m et -1,5 m.

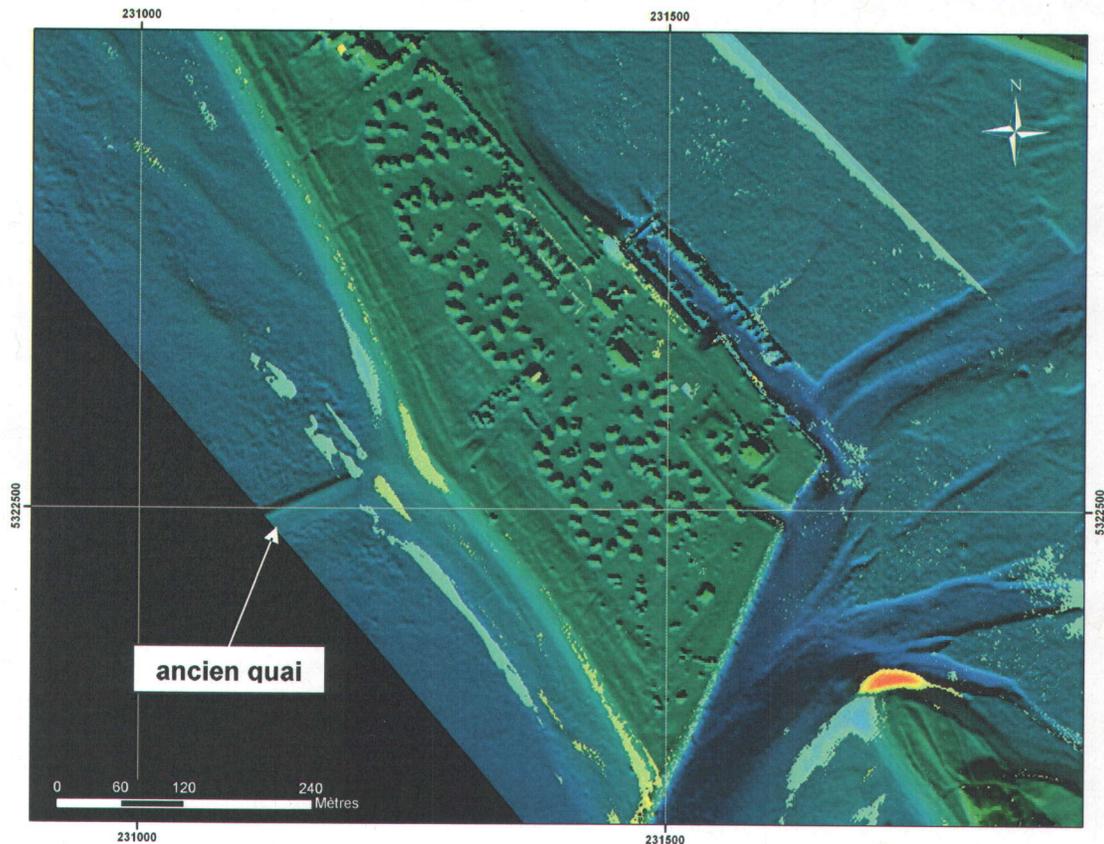


Figure 5.15 – Variations au niveau de la flèche littorale ouest de Bonaventure. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion.*

À cet endroit, une progradation moyenne du trait de côte de $2,54 \pm 1,26$ m, pouvant atteindre localement 5,2 m, est mesurée entre 2003 et 2004, directement à l'ouest des vestiges de cette structure. Le volume déposé durant cette période est estimé, quant à lui, à 448 ± 323 m³.

La progradation moyenne est légèrement inférieure pour la période 2003-2006, avec seulement $1,85 \pm 1,72$ m et un volume déposé estimé à 128 ± 102 m³. Cependant, la progradation du trait de côte peut atteindre localement 6,8 m en 2006, notamment au niveau du quai.

Directement à l'est de cette structure, une forte érosion du trait de côte est observée sur une distance d'environ 350 m, aussi bien en 2004 qu'en 2006. Le recul du trait de côte mesuré pour ces deux intervalles de temps est respectivement de $-5,29 \pm 3,09$ m et $-7,55 \pm 2,06$ m. Les volumes érodés correspondants, pouvant être mesurés par LiDAR, sont estimés, quant à eux à, -558 ± 446 m³ et -353 ± 282 m³. Une fois encore, les faibles volumes mesurés comparés aux changements plus importants du trait de côte semblent indiquer que les variations verticales qui se sont produites dans ce secteur ont une amplitude inférieure à la limite de détection verticale du LiDAR.

À cette zone d'érosion succède ensuite une portion de côte d'environ 150 m présentant un engraissement de 1467 ± 1174 m³ et une progradation moyenne de la côte de $1,63 \pm 0,51$ m entre 2003 et 2004, et de $1,76 \pm 0,59$ m entre 2003 et 2006.

Enfin, les relevés laser montrent que les 30 m de plage situés directement à l'ouest de la jetée d'entrée du port de Bonaventure se caractérisent par une érosion de $-4,2$ m en 2004 et de $-2,37 \pm 1,16$ m en 2006, ce qui correspond respectivement à une perte de sédiments de -664 ± 531 m³ et de -150 ± 120 m³.

5.2.3 Zone du barachois de Bonaventure – flèche est (Banc de l'Est)

Cette zone correspond à une flèche littorale sableuse d'environ 1200 m de long et de 60 m de large. Contrairement à la flèche occidentale du barachois, la flèche orientale ne présente ni structures humaines ni ouvrages de protection et se caractérise donc par une plus grande variabilité de sa morphologie. Néanmoins, des vestiges d'anciens quais de pêche subsistent par endroits (figure 5.16).

Les mesures topographiques laser montrent que les variations subies par le trait de côte le long de cette flèche littorale se caractérisent par une alternance de zones de recul et de progradation, et cela aussi bien pour la période 2003-2004 que pour la période 2003-2006 (figures 5.17, 5.18 et 5.19). Ces zones s'étendent en général sur des distances de 150 à 200 m, bien que 4 d'entre elles aient des longueurs inférieures comprises entre 50 et 100 m seulement. Ces zones sont identifiées, d'est en ouest, par les abréviations Z₁ à Z₆ sur les figures 5.18 et 5.19 et sont décrites de façon plus détaillée ci-après.

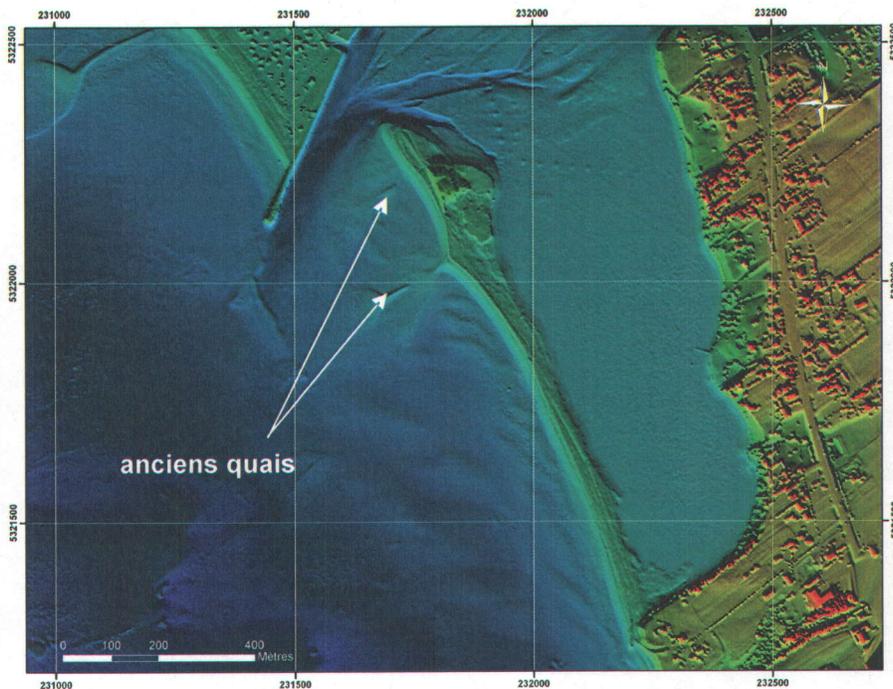


Figure 5.16 – Variations au niveau de la flèche littorale est de Bonaventure. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

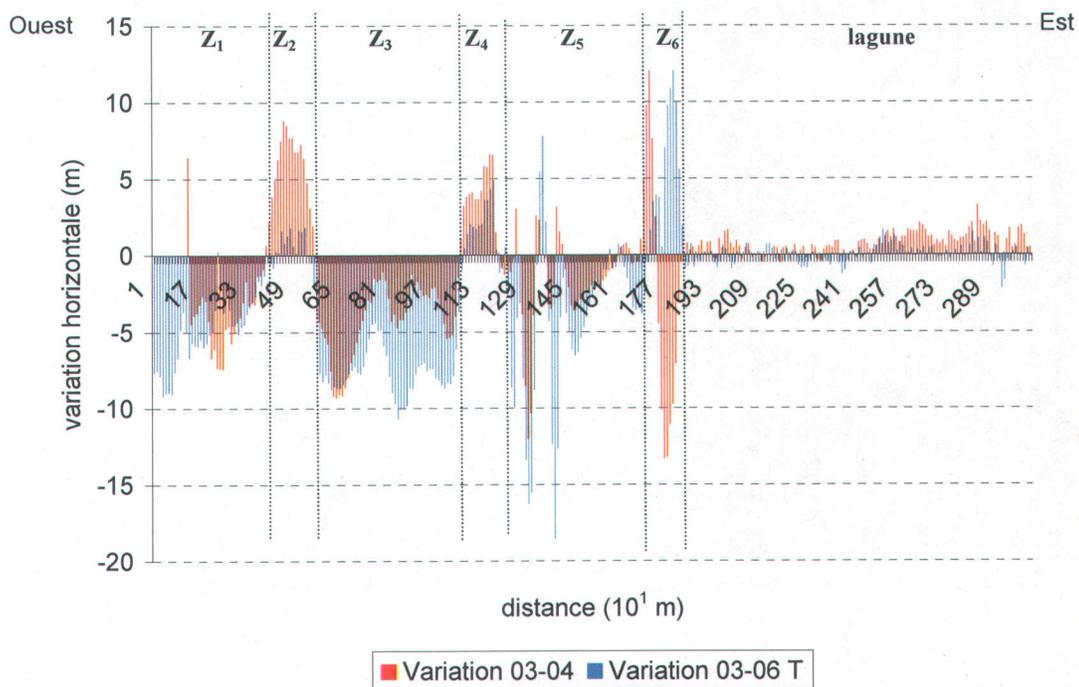


Figure 5.17 – Variations de position du trait de côte le long de la flèche littorale est du barachois, secteur de Bonaventure. *La distance est exprimées en dizaine de mètres par rapport à l'origine de la zone.*

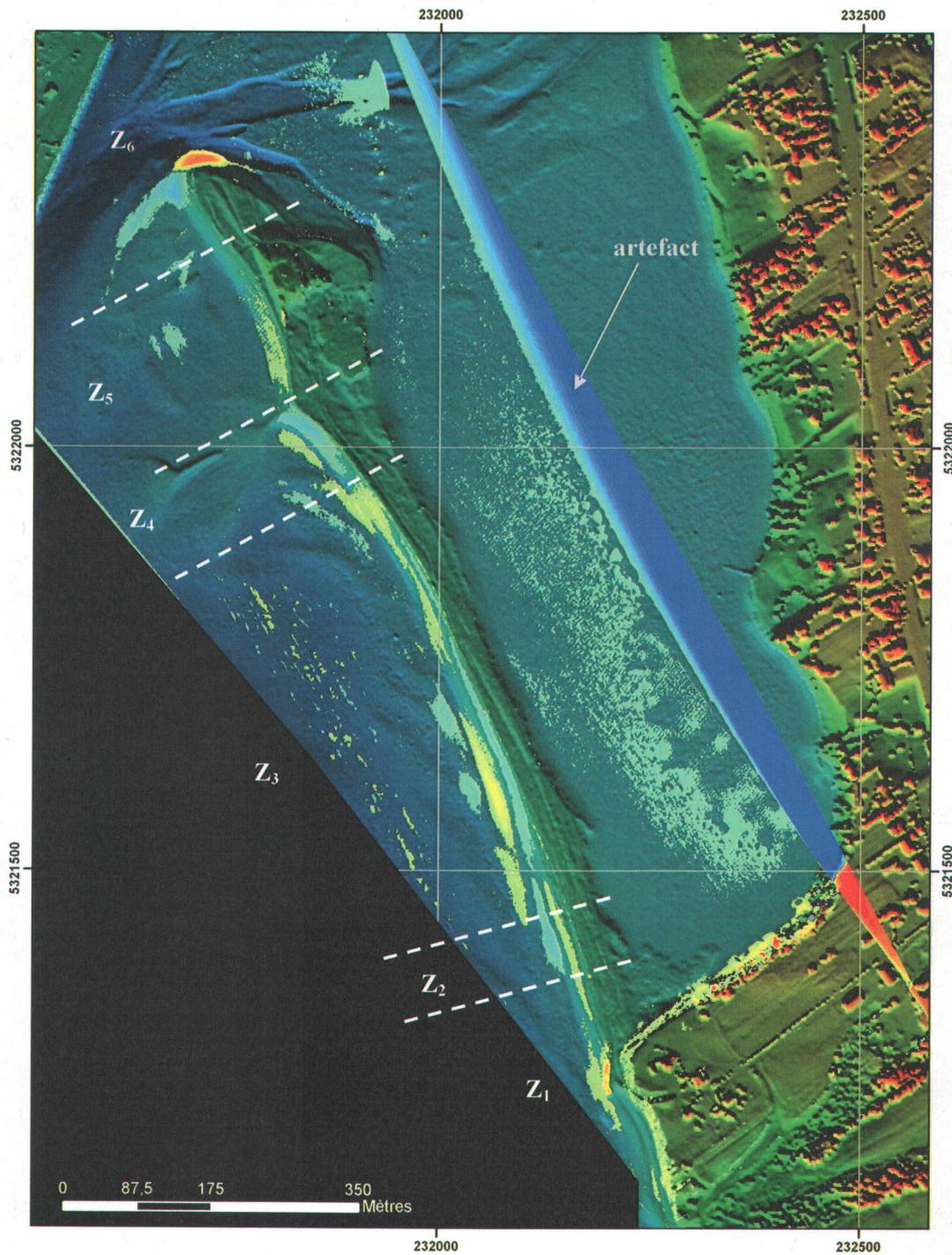


Figure 5.18 – Variations 2003-2004 au niveau de la flèche littorale est de Bonaventure. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion.*

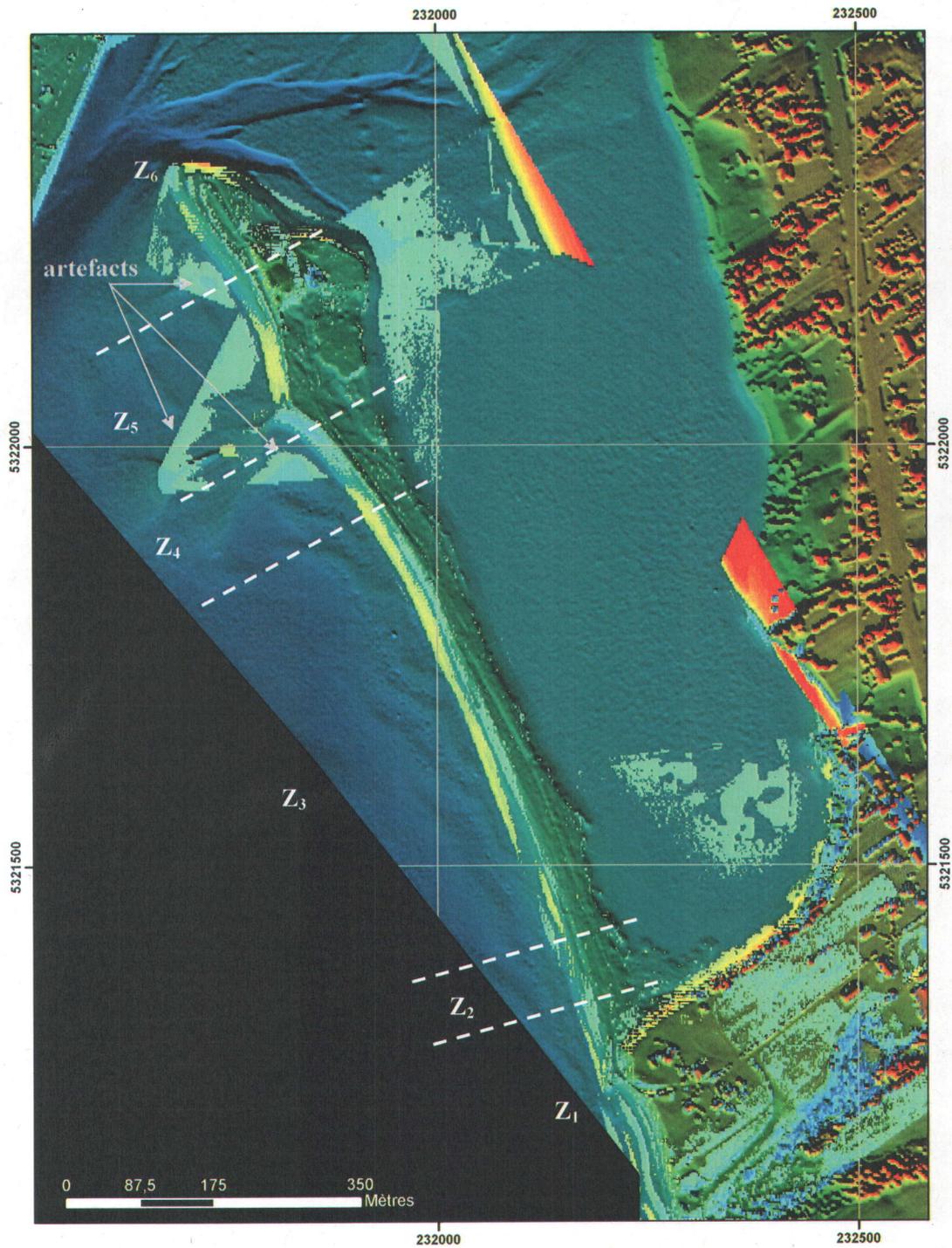


Figure 5.19 – Variations 2003-2006 au niveau de la flèche littorale est de Bonaventure. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion.*

Tout d'abord, à l'extrême est du site (zone Z_1), le trait de côte est soumis à un recul moyen de $-4,23 \pm 1,75$ m entre 2003 et 2004 et de $-5,04 \pm 2,28$ m entre 2003 et 2006. Ce recul concerne une portion de littoral d'environ 400 m qui comprend à la fois la plage située au pied du talus qui jouxte la flèche à l'est et les 60 premiers mètres de la flèche littorale. La perte de sédiments pour ce secteur est estimée respectivement à -995 ± 607 m³ et -517 ± 393 m³ pour ces deux intervalles de temps.

Ce secteur en érosion est suivi par un segment de plage en accrétion (Z_2). Cette portion de littoral s'étend sur une longueur de 160 m en 2004 et de seulement 100 m en 2006. La progradation du trait de côte le long de ce segment de littoral est particulièrement marquée entre 2003 et 2004 avec une avancée moyenne de $5,61 \pm 2,40$ m durant cette seule année et un volume déposé de 655 ± 426 m³. Par contre la progradation de la côte est moins prononcée pour la période 2003-2006 avec une avancée de seulement $1,05 \pm 0,65$ m pour cette période et une accumulation d'environ 310 ± 248 m³.

Après cette zone, le trait de côte subit de nouveau un recul marqué le long d'une portion de littoral d'environ 500 m (Z_3). Le recul mesuré est de $-4,26 \pm 2,31$ m entre 2003 et 2004 et de $-7,69 \pm 1,50$ m entre 2003 et 2006. Le volume perdu sur la plage est estimé respectivement à -3435 ± 2374 m³ et -2709 ± 1717 m³ pour chacune des périodes. Cependant, une accrétion significative de la haute plage est également observée durant les mêmes périodes. Cette accrétion est estimée à 1921 ± 1398 m³ en 2003-2004 et à 2266 ± 1581 m³ en 2003-2006.

À celui-ci fait suite un segment de 120 m, le long duquel une progradation et un engraissement sont observés (Z_4). Cette zone correspond à l'extension latérale sableuse qui s'est développée dans l'axe de l'ancien quai de pêche. Le trait de côte le long de cette avancée sableuse a ainsi progradé de $4,18 \pm 1,65$ m entre 2003 et 2004 et de $2,35 \pm 1,39$ m entre 2003 et 2006. Le volume déposé mesuré est de 911 ± 575 m³ entre 2003 et 2004 et de 949 ± 564 m³ entre 2003 et 2006.

Le segment de côte situé immédiatement après les vestiges de l'ancien quai de pêche (Z_5) constitue, pour sa part, une nouvelle zone en érosion. Elle s'étend sur une longueur de littoral d'environ 350 m et présente un retrait moyen de $-1,95 \pm 3,14$ m entre 2003 et 2004 et de $-6,30 \pm 4,78$ m entre 2003 et 2006. Cependant, le retrait peut atteindre localement des valeurs de 12 m, et même de 18 m pour la période 2003-2006. Le volume

érodé est estimé, pour sa part, respectivement à $-593 \pm 475 \text{ m}^3$ et $-108 \pm 87 \text{ m}^3$.

Enfin, la partie distale de la flèche littorale (Z6) s'est caractérisée, pour la période de 2003-2004, par une forte érosion de la pointe, avec un recul du trait de côte de $-8,07 \pm 4,31 \text{ m}$ et une perte de $-1380 \pm 358 \text{ m}^3$, ainsi que par la formation d'une flèche secondaire en « queue de comète », de 120 m de long et 20 m de large et située dans l'axe du chenal d'entrée (NE-SO). Le volume estimé de cette flèche secondaire est de $2021 \pm 1274 \text{ m}^3$ et produit, au niveau du trait de côte, une progradation de $6,33 \pm 3,91 \text{ m}$. Pour la période 2003-2006, cette flèche secondaire n'est pas visible et seule une érosion de la partie distale de la flèche littorale principale de $-7,20 \pm 3,99 \text{ m}$ est observée. Cela correspond à une perte de $-994 \pm 655 \text{ m}^3$.

Pour conclure, le trait de côte de la partie interne de la flèche littorale n'a pas présenté de variations significatives durant ces intervalles de temps, celles-ci étant estimées à $0,78 \pm 0,68 \text{ m}$ pour 2003-2004 et à $0,01 \pm 0,61 \text{ m}$ pour 2003-2006.

5.3 Secteur de Paspébiac

Ce secteur est localisé à environ 20 km à l'est de Bonaventure. Il s'étend de la pointe Jacques à la pointe Huntington et couvre une zone d'environ 8 km dans la direction ouest-sud-ouest est-nord-est. Sa principale caractéristique provient de la présence d'un vaste barachois sans apport de rivière formé par deux flèches sableuses, d'environ 1500 m de longueur, constituées de sable grossier et de graviers et délimitant une lagune triangulaire dont la dynamique n'est contrôlée que par des processus marins (Logimer, 1984).

Ce littoral cuspidé émergé est prolongé en mer par une flèche sous-marine qui prend appui sur la pointe marine du triangle et s'étend sur environ 300 mètres en direction du sud-ouest. Cette flèche constitue l'aboutissement du transit sédimentaire le long du littoral et prograde sur des sédiments marins plus fins (Renaud, 2001).

Ce système a déjà fait l'objet d'études antérieures, notamment par Renaud (2001) et Xhardé (2007).

Ce secteur peut être divisé approximativement en 4 grands environnements côtiers (figure 5.20):

- la zone du cordon occidental, où la présence d'un port de pêche, formé d'un quai et d'une jetée de protection, et d'aires de récréation perturbent et modifient les transports sédimentaires le long de ce cordon. Celui-ci peut être subdivisé en deux plages distinctes.
- la zone du cordon oriental, qui ne se caractérise que par la présence d'un chenal de marée instable et un taux de recul annuel important (*Renaud, 2001 ; Xhardé, 2007*)
- la zone de la plage à Norbert.
- la zone des falaises qui s'étendent à l'est du barachois.

Les résultats pour chacun de ces environnements côtiers sont présentés ci-dessous.

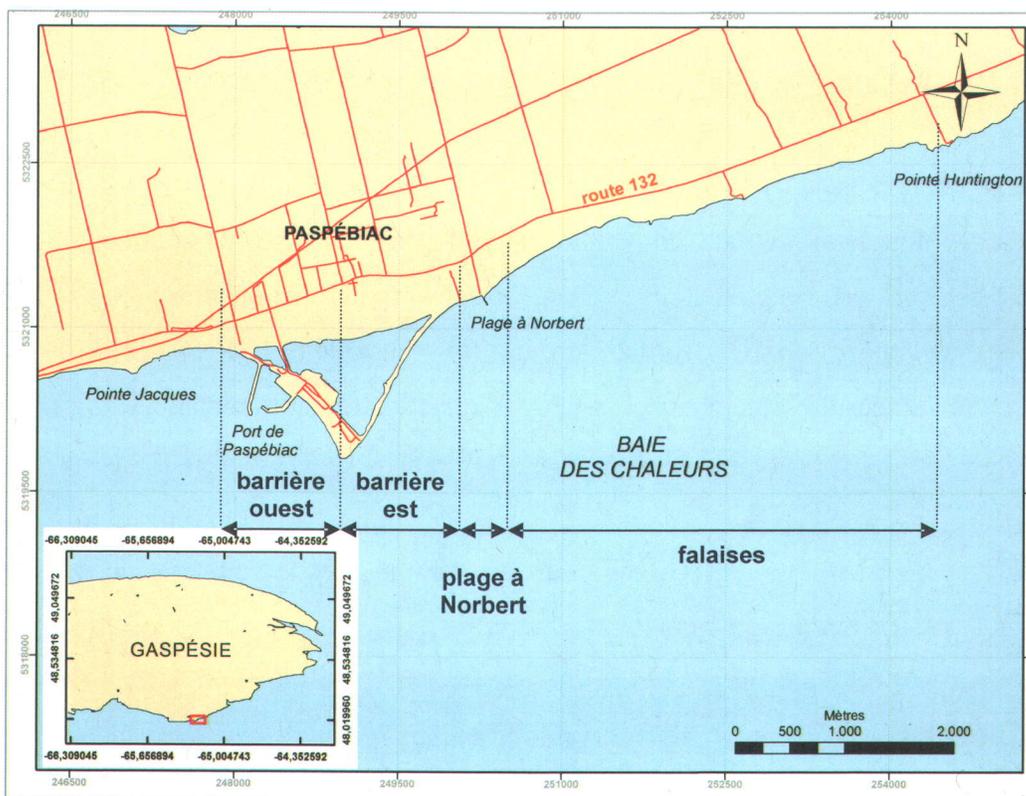


Figure 5.20 – Environnements côtiers dans le secteur de Bonaventure. *Le système de référence de toutes les cartes qui suivent est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Celui de la carte en vignette est en latitude et longitude.*

5.3.1 Zone de la barrière ouest – plage nord-ouest

Cette zone correspond à une plage d'environ 350 m de long limitée au nord par les falaises de grès et limitée au sud par la jetée nord du port de Paspébiac. Cette morphologie peut être identifiée à celle d'une crique ("plage de poche" ou *pocket beach*).

Les relevés topographiques laser menés entre 2003 et 2004 montrent que le trait de côte de cette plage a progradé en moyenne de $2,30 \pm 1,46$ m (figure 5.21). Cependant, la progradation est plus marquée dans la partie nord de la plage, où une section de côte d'environ 130 m de longueur subit une avancée du trait de côte de $4,15 \pm 0,90$ m. Par contre, la progradation du trait de côte n'est que de $1,22 \pm 0,87$ m le long de la section sud de cette plage qui s'étend sur une distance d'environ 220 m.

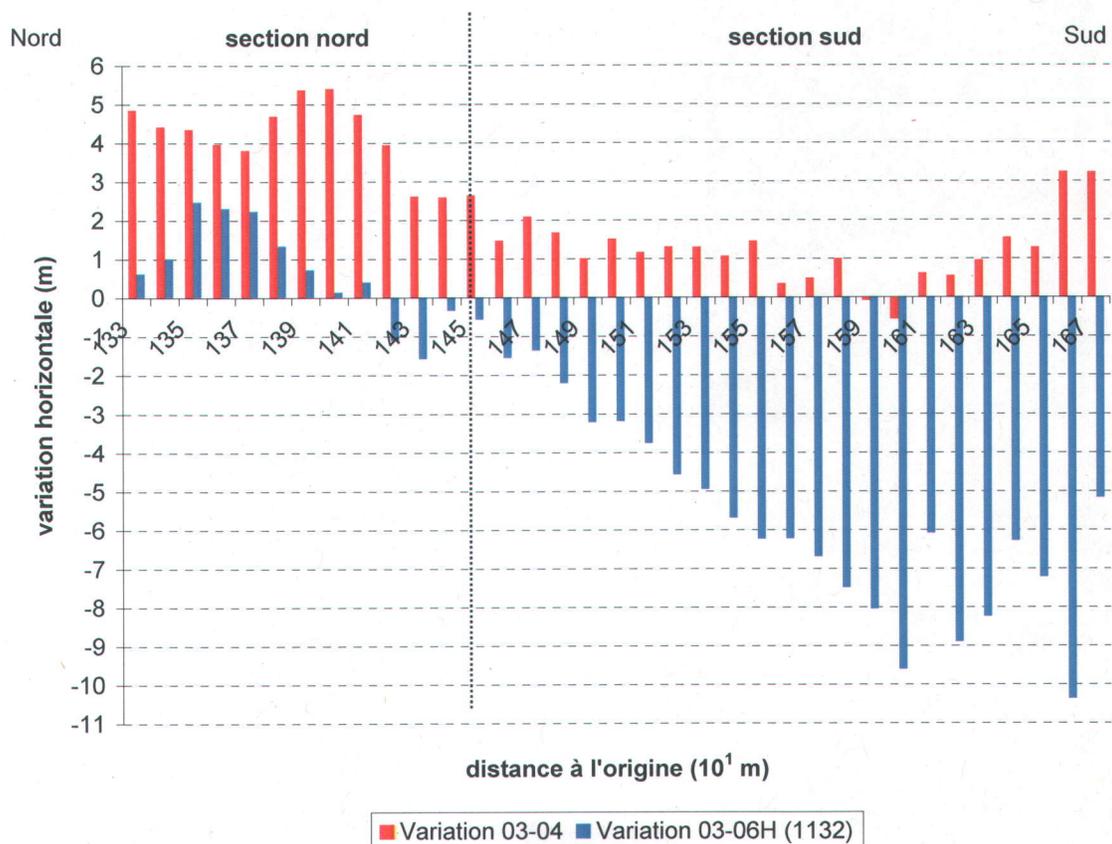


Figure 5.21 – Variations de position du trait de côte le long de la plage nord-ouest de la barrière occidentale du barachois de Paspébiac. La distance est exprimées en dizaine de mètres par rapport à l'origine de la zone.

Les volumes déplacés pour cette période sont estimés, quant à eux, à un gain de $1101 \pm 784 \text{ m}^3$ de sédiments pour la section nord de la plage, une perte de $-484 \pm 388 \text{ m}^3$ sur le haut de plage de la section sud et un gain d'à peine $85 \pm 73 \text{ m}^3$ sur le bas de plage de cette même section (figure 5.22).

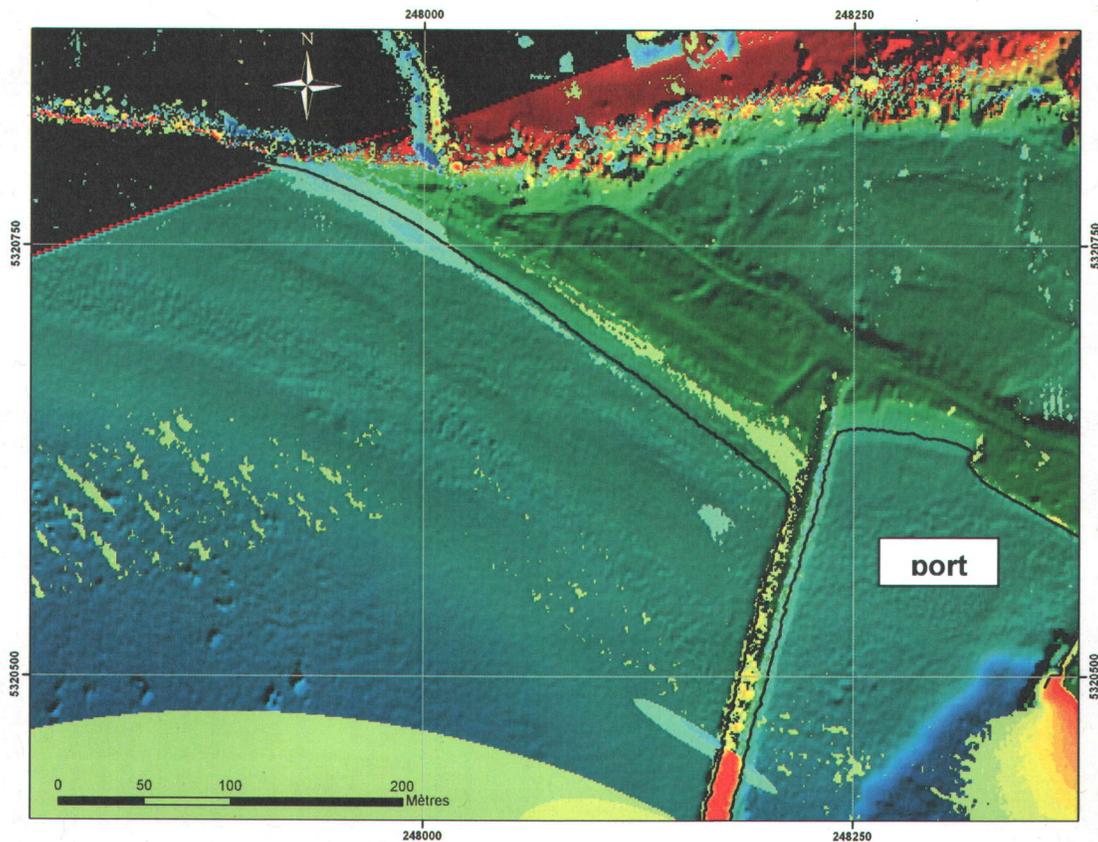


Figure 5.22 – Variations 2003-2004 au niveau de la plage nord-ouest située sur la barrière occidentale du barachois de Paspébiac. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Le trait noir indique la position du trait de côte en 2003.

Durant la période s'étendant de 2003 à 2006, les variations observées sont assez différentes, en particulier sur la portion sud de cette plage (figure 5.21). Cette section subit en effet un recul significatif de $-5,19 \pm 2,82 \text{ m}$ ainsi qu'une perte de sédiments estimée à $-939 \pm 501 \text{ m}^3$, en opposition avec la tendance mesurée entre 2003 et 2004.

Par contre, sur la section nord de la plage, la tendance à une progradation du trait de côte semble être confirmée par les observations de 2003-2006, bien que celle-ci se révèle être bien moindre que pour la période 2003-2004 et à peine significative, compte tenu de l'imprécision des modes de relevé employés en 2006. L'avancée moyenne du trait de côte est ainsi estimée à seulement $1,40 \pm 0,77$ m le long de la section nord de la plage, avec des variations n'atteignant que localement des valeurs significatives de 2,3 et 2,47 m. Quant aux variations verticales, aucun changement significatif d'élévation ne peut être détecté entre 2003 et 2006 sur cette portion de plage, ce qui laisse supposer, une fois encore, que les variations sont soit inexistantes, soit inférieures à la limite de détection des variations verticales des systèmes laser utilisés (0,4 m, soit 0,15 m pour le système LiDAR de 2003 et 0,25 m pour le système SHOALS de 2006).

5.3.2 Zone de la barrière ouest – plage sud-ouest

Cette zone correspond à une plage d'environ 700 m de long délimitée au nord par le quai méridional du port de Paspébiac et, au sud, par la flèche littorale constituant la pointe de la structure triangulaire.

Entre 2003 et 2004, la partie nord de cette plage, située immédiatement après le quai méridional du port de Paspébiac, a subi une progradation de son trait de côte de $1,48 \pm 0,68$ m (figure 5.23), ainsi qu'un engraissement estimé à 903 ± 704 m³. Ces changements se sont produits le long d'un segment de côte d'environ 220 m de long. Ensuite, un léger recul de la côte, de $-0,75 \pm 0,42$ m, est observé le long des 300 m de plage suivants, auquel succède une portion de plage de 120 m dont le trait de côte prograde en moyenne de $0,86 \pm 0,50$ m.

Néanmoins, ces variations de position du trait de côte sont trop faibles pour pouvoir être considérées comme significatives. En ce qui concerne les volumes sédimentaires déplacés, aucune mesure significative ne peut être faite pour cette période, les variations verticales apparaissant trop faibles.

Les mesures effectuées pour la période de 2003 à 2006 confirment, pour leur part, les tendances observées entre 2003 et 2004. Ainsi, une avancée moyenne du trait de côte de $2,16 \pm 1,39$ m, pouvant atteindre localement 5,5 m, est constatée le long des 300 premiers mètres de plage, dans le secteur nord. Les variations verticales dans ce secteur révèlent, quant à elles, une accrétion de 916 ± 492 m³ le long de cette portion de plage. Cette zone en accrétion est suivie ensuite d'une zone présentant une érosion non significative du trait de côte de $-0,55 \pm 0,56$ m, elle-même suivie d'un secteur présentant une progradation non significative de $0,65 \pm 0,85$ m.

Cependant, les résultats non significatifs observés sur la partie sud de la plage doivent être considérés dans une perspective plus large car ils n'incluent pas la flèche littorale qui forme la fin du transit littoral dans ce secteur.

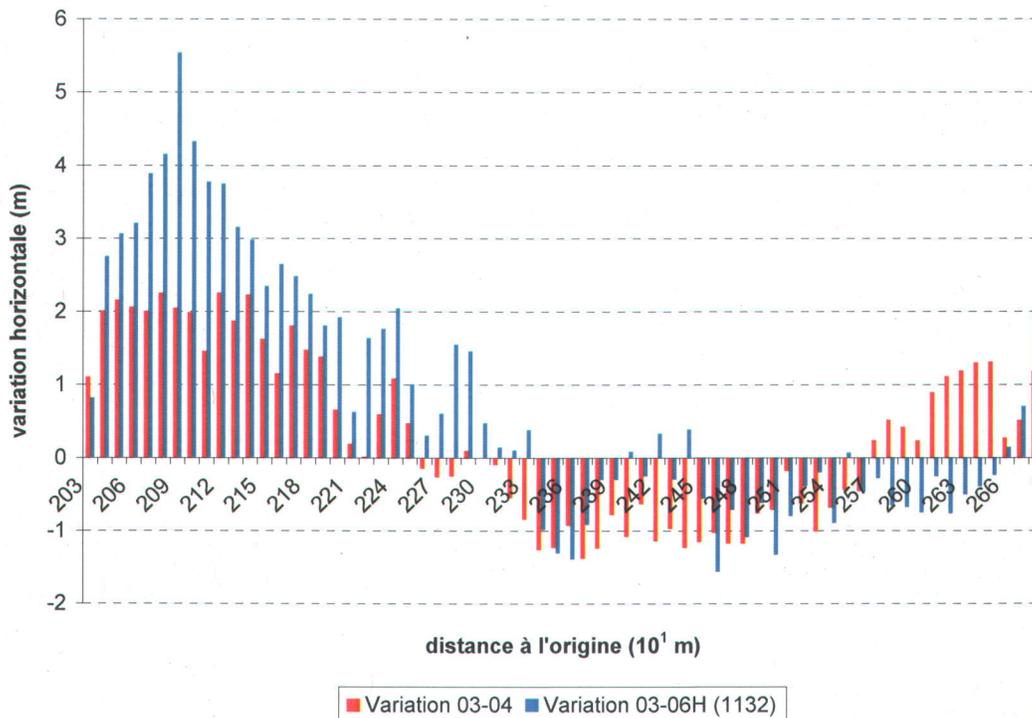


Figure 5.23 – Variations de position du trait de côte le long de la plage sud-ouest de la barrière occidentale du barachois de Paspébiac. La distance est exprimée en dizaine de mètres par rapport à l'origine de la zone.

Or, les changements morphologiques de cette structure sédimentaire montrent que $528 \pm 342 \text{ m}^3$ se sont accumulés sur cette partie de la flèche entre 2003 et 2004, causant une avancée moyenne du trait de côte de $4,07 \pm 2,11 \text{ m}$ à cet endroit (figure 5.24). En outre, un volume estimé à au moins $2311 \pm 1057 \text{ m}^3$ s'est déposé au niveau de l'extrémité de la pointe.

Pour la période 2003-2006, c'est un volume de sédiments de $8252 \pm 2594 \text{ m}^3$ qui s'est accumulé sur cette flèche, entraînant une progradation moyenne de la plage dans ce secteur de $7,90 \pm 2,80 \text{ m}$ et une avancée moyenne de la flèche en mer de $8,93 \pm 4,10 \text{ m}$ par rapport à 2003 (figure 5.25).

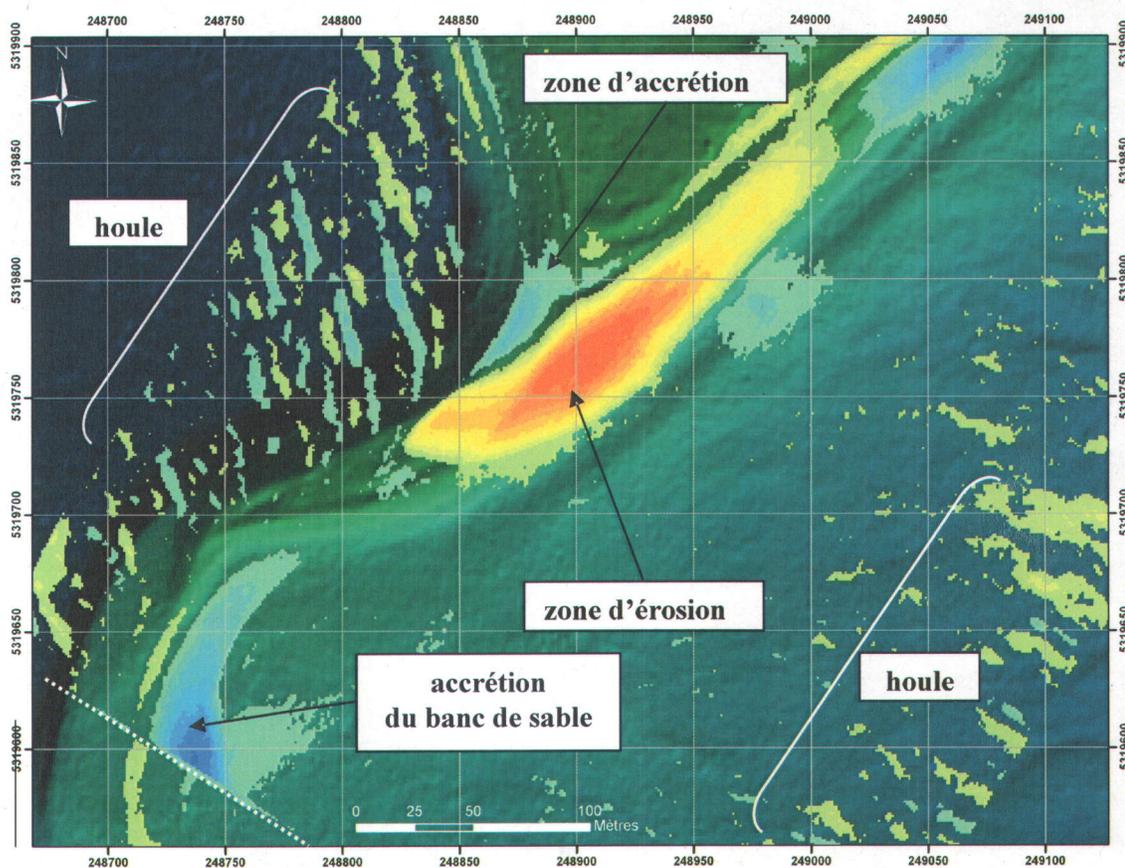


Figure 5.24 – Modifications morphologiques subies au niveau de la pointe du barchois de Paspébiac entre 2003 et 2004. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Cette carte révèle l'importante érosion qui s'est produite au niveau de la pointe du barchois durant l'année 2003-2004, ainsi que l'engraissement marqué du banc de sable situé en mer et qui constitue le prolongement sous-marin de cette structure.

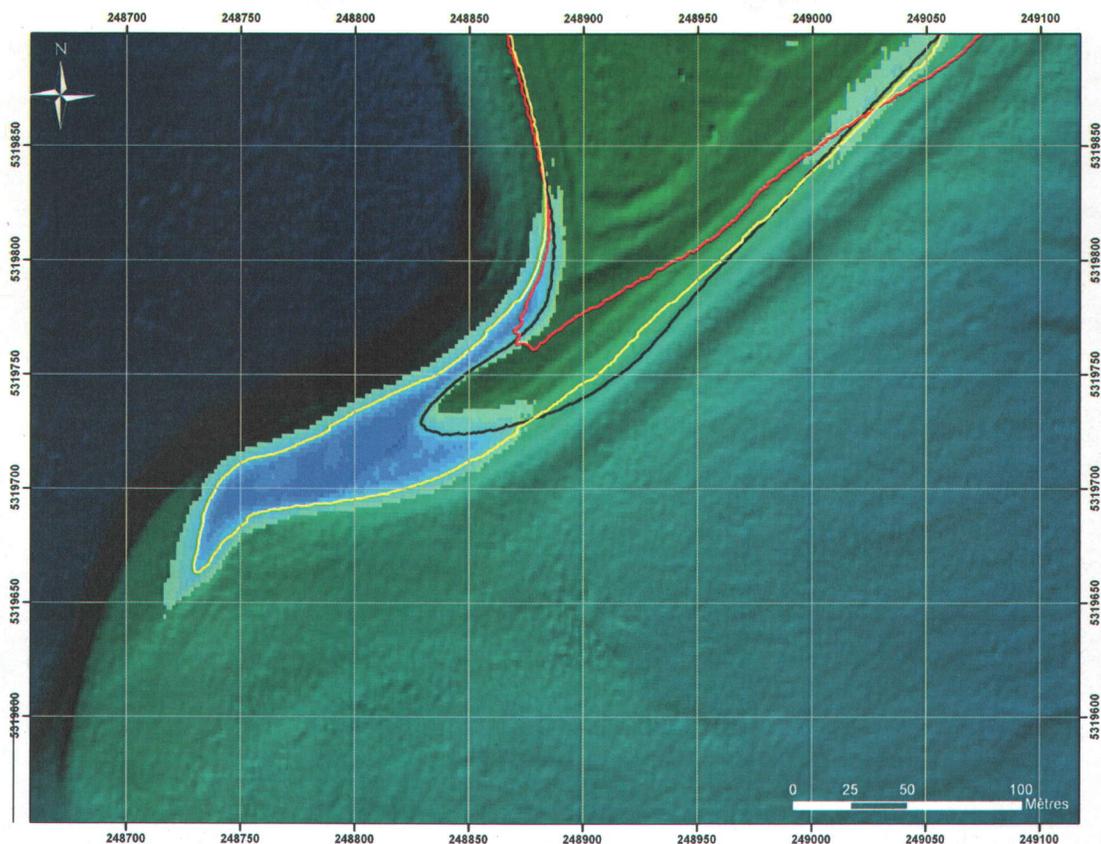


Figure 5.25 – Modifications morphologiques subies au niveau de la pointe du barachois de Paspébiac entre 2003 et 2004. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Le trait noir indique la position du trait de côte en 2003, le trait rouge représente le trait de côte en 2004 et le trait jaune indique le trait de côte en 2006. Cette carte révèle qu'une accrétion importante s'est produite au niveau de la pointe du barachois entre 2003 et 2006.*

Ces résultats indiquent donc que l'érosion observée en 2004 n'était qu'un phénomène temporaire et non une tendance à long terme, et que depuis 2004, la flèche du barachois s'est reconstruite et même développée par rapport à l'année 2003. Les raisons de cette érosion temporaire de la flèche seront discutées plus en détail dans la section § 6.3.

5.3.3 Zone de la barrière est

Cette zone couvre l'entièreté de la barrière orientale du barachois de Paspébiac, depuis sa partie distale représentée par la pointe du barachois, au sud, jusqu'à sa partie proximale située au nord, au niveau de la plage à Norbert. Cette zone s'étend sur une longueur d'environ 1800 m. Les variations de position du trait de côte le long de cette barrière sont présentées sur la figure 5.26.

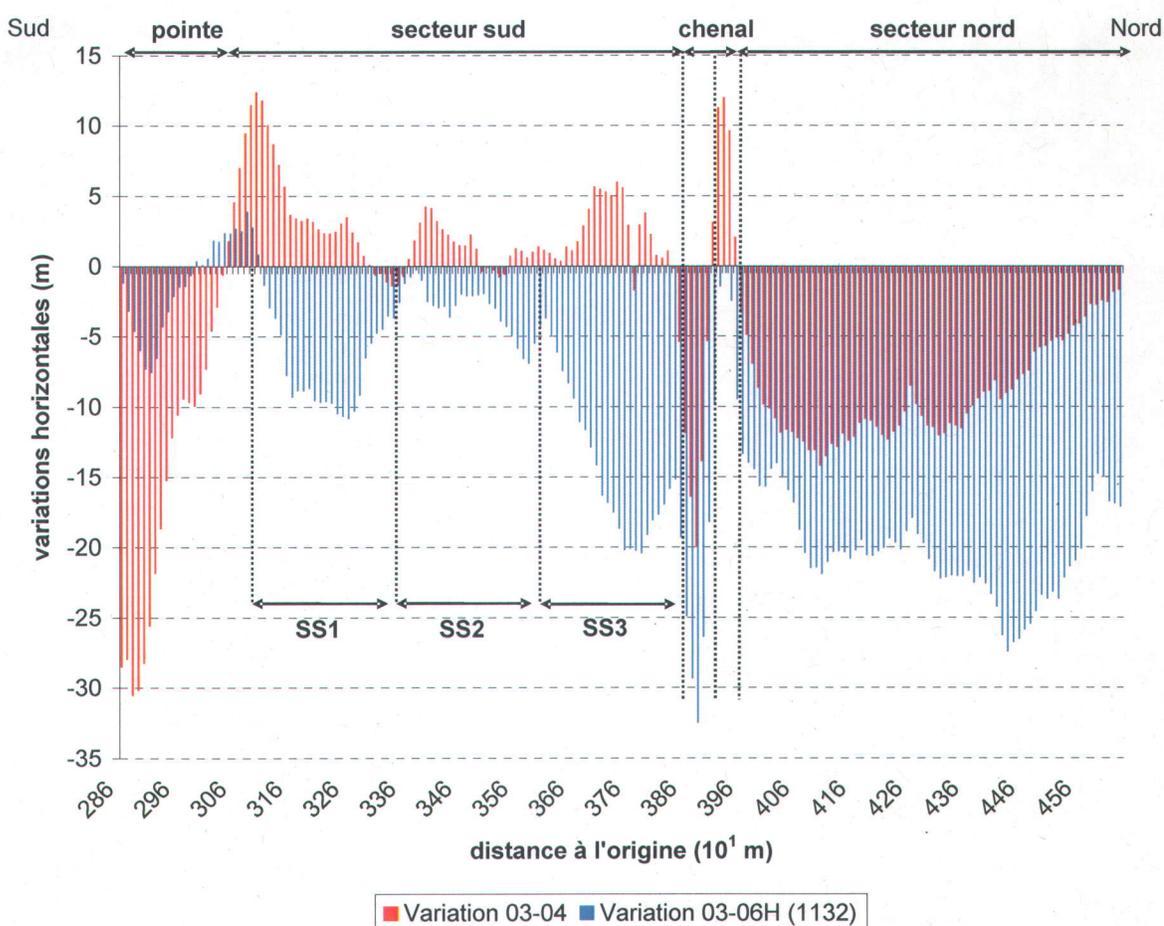


Figure 5.26 – Variations de position du trait de côte le long de la barrière orientale du barachois de Paspébiac. La distance est exprimées en dizaine de mètres par rapport à l'origine de la zone.

Pour la période 2003-2004, les changements suivants sont observés le long du cordon oriental du barachois :

- o La partie distale de la barrière, correspondant à la pointe du barachois, subit une forte érosion le long d'un segment de plage d'environ 130 m. Cette érosion est marquée par un recul moyen du trait de côte de $-11,25 \pm 6,79$ m et une perte de sédiments estimée à -8555 ± 3757 m³. Ces variations peuvent s'expliquer comme la répercussion le long de ce secteur de la barrière de l'érosion subie par la pointe du barachois durant cette période (figure 5.24).
- o À ce segment en érosion succède une portion de littoral d'environ 800 m de long qui subit une accrétion significative. L'avancée moyenne du trait de côte le long de ce segment est estimé à $2,73 \pm 3,04$ m et un engraissement de 5009 ± 3926 m³ est mesuré sur la plage. Cependant, la progradation du trait de côte peut être localement plus importante. C'est le cas en particulier le long des 220 m de plage situés immédiatement au nord de la partie distale en érosion où une avancée moyenne du trait de côte de $5,50 \pm 3,43$ m est mesurée. Celle-ci peut même atteindre localement 12,43 m. L'engraissement observé le long de ces 220 m de plage, et qui est responsable de la progradation importante du trait de côte dans ce secteur, est quant à lui estimé à 2653 ± 1354 m³, ce qui correspond à près de 53 % de l'engraissement total mesuré le long de cette partie de la barrière. Ainsi, plus de la moitié de l'engraissement est concentrée sur une portion de plage d'à peine 220 m de longueur ce qui se traduit par un bourrelet sédimentaire bien visible sur la plage (figure 5.27).
- o À ce segment de côte en accrétion succèdent deux petites zones d'à peine 50 m de long chacune qui présentent respectivement un recul moyen du trait de côte de $-10,45 \pm 6,52$ m et une avancée moyenne de $7,65 \pm 4,18$ m. Ces deux zones de rapides changements topographiques et morphologiques correspondent à la zone du chenal de marée qui perce le cordon oriental du barachois et résultent de la migration du chenal sur une distance de 70 m en direction du sud durant cette période.

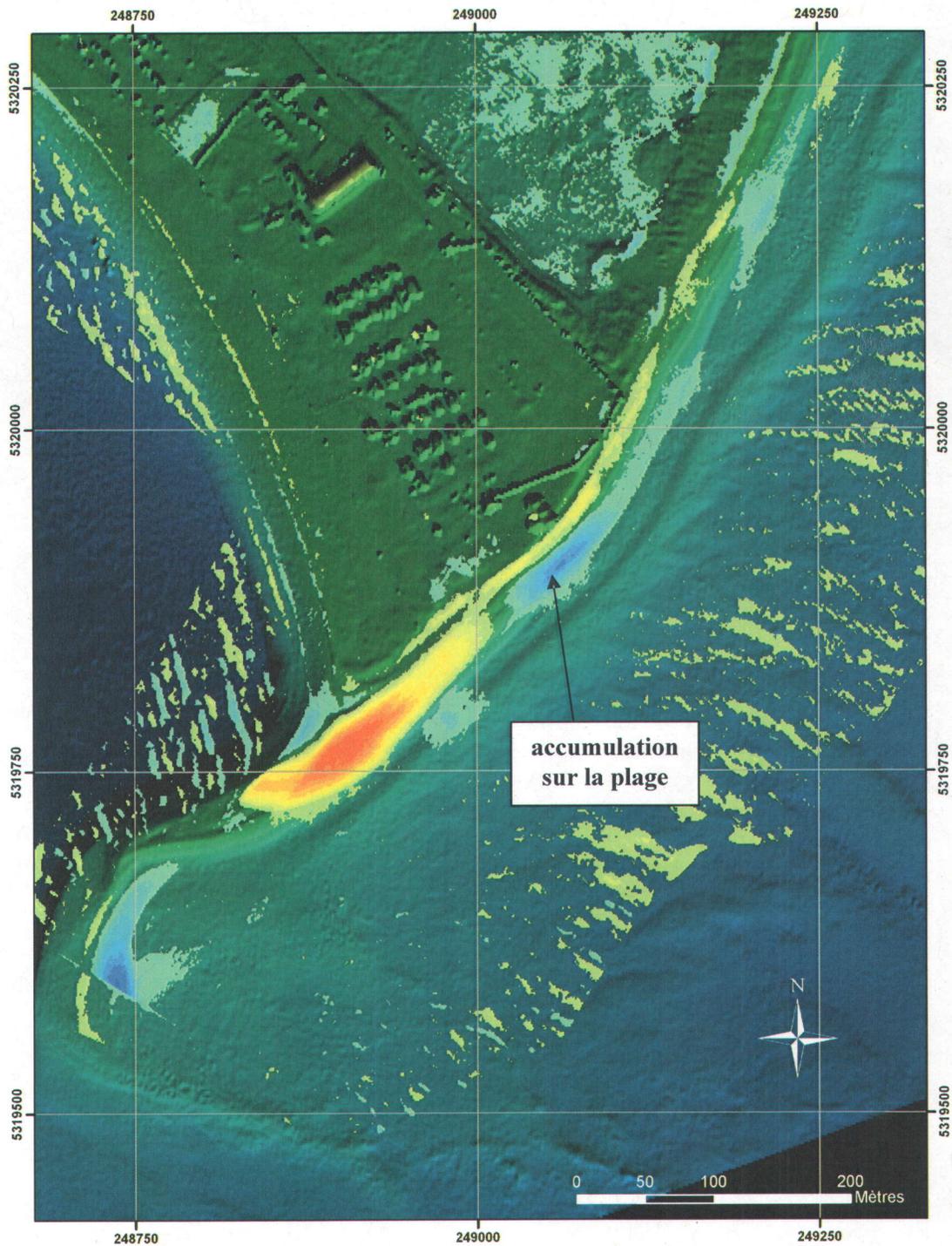


Figure 5.27 – Variations 2003-2004 au niveau de la partie distale de barrière est du barachois de Paspébiac. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion.

Cette migration est évidente sur le modèle numérique d'érosion de 2003-2004 (figure 5.28). Sur cette figure, le chenal de 2003 apparaît en bleu-vert, indiquant ainsi un accroissement de l'élévation à cet endroit et trahissant donc l'ensablement du chenal durant cette période. En face de l'embouchure de l'ancien chenal, une zone d'érosion est visible sur l'estran. Il s'agit de l'ancien delta de jusant qui, n'étant plus alimenté par les apports sédimentaires du marais qui transitaient par le chenal lors des périodes de marées descendantes, a subi un amaigrissement vertical mesurable par LiDAR et variant entre 25 et 50 cm. À gauche de cet ancien chenal ensablé (sud-ouest) apparaît une zone d'érosion d'environ 12 m de large et de 80 m de longueur.

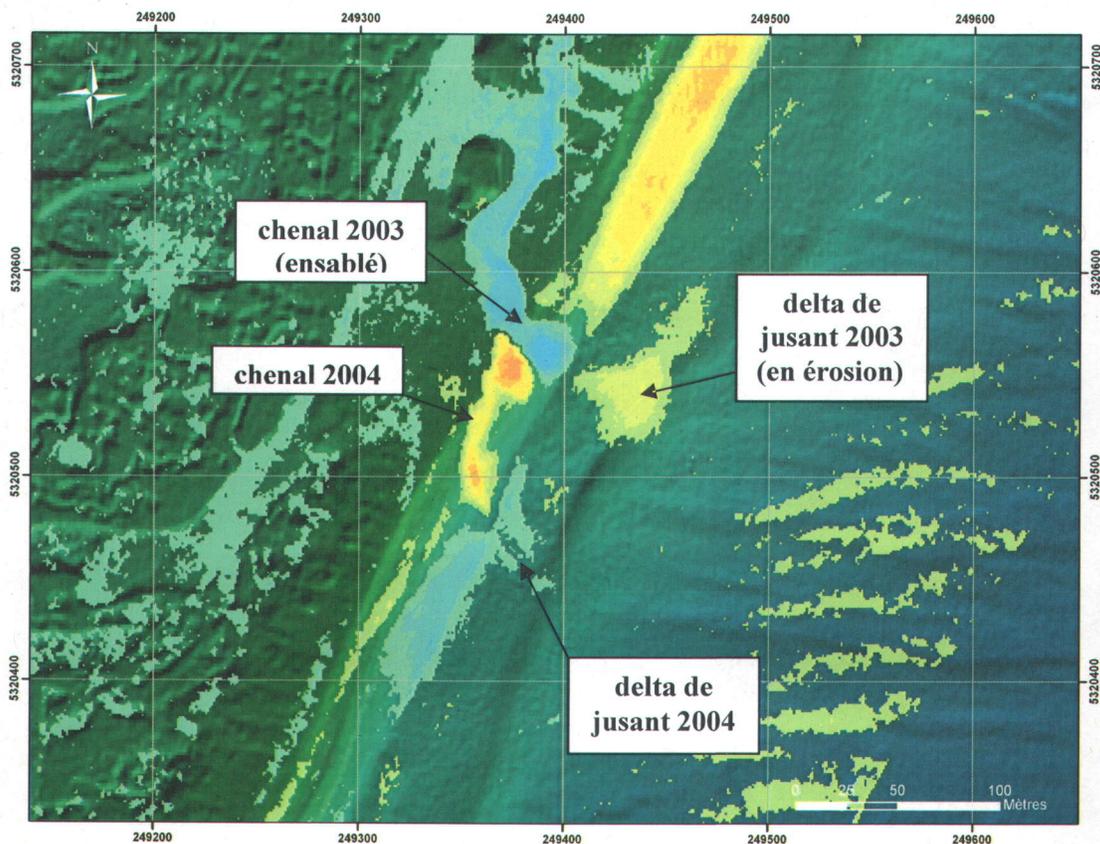


Figure 5.28 – Variations 2003-2004 au niveau du chenal de marée de barrière est du barachois de Paspébiac. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion.

Cette zone correspond au nouveau lit du chenal qui s'est formé dans la barrière entre 2003 et 2004 et dont l'embouchure aboutit 75 m au sud de son ancienne position. Enfin, le MNVE révèle également qu'un nouveau delta de jusant est en formation face de cette nouvelle embouchure grâce aux apports sédimentaires provenant de la lagune intérieure, ce transport sédimentaire lagunaire commençant également à être repris par la dérive littorale et à alimenter la plage située immédiatement en aval (sud-ouest) de la nouvelle embouchure.

- o Au nord de la zone du chenal de marée se trouve enfin une portion de côte qui se caractérise par un important recul de la barrière. Cette section, qui s'étend sur environ 650 m et correspond approximativement à la moitié nord de la barrière, subit un recul moyen du trait de côte de $-9,02 \pm 3,40$ m pour la seule année 2003-2004. Ce taux d'érosion est cependant plus élevé sur les 400 premiers mètres de cette zone, avec un recul moyen de $-11,37 \pm 1,27$ m, relativement uniforme le long de ce segment comme l'indique le faible écart-type. Le taux de recul diminue ensuite progressivement le long des 250 m suivants jusqu'à atteindre $-2,35 \pm 0,42$ m dans sa partie proximale, au niveau des micro-falaises de grès rouge qui constituent le haut de plage dans le secteur de la plage à Norbert. En termes de volumes sédimentaires, ce sont pas moins de 15486 ± 6917 m³ de sable qui ont été perdu le long de cette portion du littoral durant la seule année 2003-2004.

En ce qui concerne la période 2003-2006, les changements observés le long du cordon oriental du barachois confirment les tendances observées entre 2003 et 2004 le long des différentes parties de la barrière, exception faite de la moitié sud qui était en accrétion en 2004. Ainsi, entre 2003 et 2006, les variations morphologiques suivantes sont observées (figure 5.26) :

- o Une érosion de $-3,86 \pm 2,33$ m, correspondant à une perte d'environ -450 ± 240 m³ de sédiment sur la plage, est constatée au niveau de la partie distale de la barrière, à proximité de la pointe du barachois. Cette érosion apparaît cependant nettement inférieure à celle mesurée pour la période 2003-2004, ce qui tend à indiquer que ce secteur est à présent en accrétion et que le trait de côte est en train

de se réajuster aux nouvelles conditions hydrodynamiques locales après avoir subi une perturbation temporaire entre 2003 et 2004. Ce réajustement du trait de côte (correspondant à une progradation effective de 7,4 m entre 2004 et 2006) est à mettre en relation directe avec la reconstruction de la flèche littorale distale et l'engraissement de la pointe du barachois qui ont été observés entre 2004 et 2006 (§ 5.3.2).

- o À cette zone en érosion succède une petite portion de côte d'environ 100 m de longueur en accrétion par rapport à 2003. L'avancée du trait de côte y est estimée à $2,62 \pm 0,60$ m et le volume déposé est estimé à 654 ± 1018 m³. Bien que ces valeurs soient inférieures aux imprécisions de mesure du LiDAR bathymétrique et doivent donc être considérées avec précaution compte tenu de leurs marges d'erreur importantes, ce segment de plage peut néanmoins être corrélé au segment de plage de 220 m de long sur lequel une accumulation importante de sédiments, correspondant à 53 % de l'engraissement total mesuré entre la pointe du barachois et le chenal de marée, était observée entre 2003 et 2004. Cette zone d'accumulation d'à peine 654 m³ en 2006 apparaît ainsi comme un vestige du dépôt sédimentaire de 2653 m³ présent à cet endroit en 2004 et qui a été érodé depuis lors. Il est d'ailleurs possible d'avancer, à la vue de ces résultats, que l'érosion par les vagues de cet important stock sédimentaire a contribué en partie à la reconstruction de la flèche littorale distale située au sud de cette zone en l'alimentant en sédiments sous l'action du courant de dérive littorale local.
- o À ce petit segment de côte en accrétion succède une portion d'environ 730 m de côte subissant un recul moyen de $-8,15 \pm 5,79$ m de son trait de côte et un amaigrissement significatif de -7538 ± 2670 m³. Le recul n'est cependant pas constant tout le long de ce secteur qui peut être subdiviser en 3 sous-secteurs selon les changements topographiques observés. Deux de ces sous-secteurs (SS1 et SS3, figure 5.26) sont caractérisés par une forte érosion du trait de côte, avec des reculs moyens respectifs de $-7,96 \pm 2,73$ m et $-14,80 \pm 4,74$ m et une perte sédimentaire estimée à 3533 ± 1581 m³ et 3707 ± 931 m³ pour chacun de ces sous-secteurs. Ces deux portions de côte peuvent ainsi être assimilées à des zones sensibles (ou "*erosional hotspots*"). Le troisième sous-secteur (SS2) de la zone est

situé entre les deux zones sensibles précédentes et présente, pour sa part, des variations du trait de côte relativement faibles et peu significatives avec un retrait moyen d'à peine $-3,34 \pm 1,61$ m et un amaigrissement de 298 ± 158 m³.

- o À cette portion de côte succèdent de nouveau les deux petites zones de 50 m de long dues à la migration latérale du chenal de marée entre 2003 et 2004. Les variations observées entre 2003 et 2006 sont cependant plus complexes à interpréter que celles observées entre 2003 et 2004 car des interventions humaines ont été réalisées au niveau du chenal après 2004. Ces interventions ont consisté principalement en travaux de dragage, réalisés dans le courant de l'année 2005, afin d'élargir la passe et de permettre ainsi une meilleure oxygénation des eaux de la lagune du barachois. Les conséquences de ce dragage sont visibles sur le MNVE de 2003-2006 sous la forme d'une zone d'environ 20 m de long et de 18 m de large, située entre les deux anciens chenaux de marée (figure 5.29), et présentant une érosion verticale de 1 à 2 m. Cependant, ce nouveau chenal de marée aménagé en 2005 a été rapidement obstrué par des sédiments au cours d'une tempête, entre l'été 2005 et l'été 2006, conduisant à la fermeture complète de la passe. Les variations subies par le trait de côte dans ce secteur reflètent cette évolution complexe du système de chenal entre 2003 et 2006.

Ainsi, le recul moyen du trait de côte mesuré pour cette période au niveau de l'embouchure du chenal de 2004 est estimée à $-22,98 \pm 7,13$ m, soit un retrait annuel moyen de $-7,66 \pm 2,38$ m. Par comparaison, le retrait annuel moyen mesuré entre 2003 et 2004 lors de la création de ce nouveau chenal était estimé à $-10,45 \pm 6,52$ m. Un ralentissement du retrait annuel moyen est donc constaté entre 2004 et 2006 par rapport au retrait observé entre 2003 et 2004. Ce ralentissement peut être expliqué par l'ensablement des chenaux entre 2005 et 2006 qui a conduit à la fermeture de la passe et a causé à cet endroit une avancée relative du trait de côte par rapport à sa position en 2004.

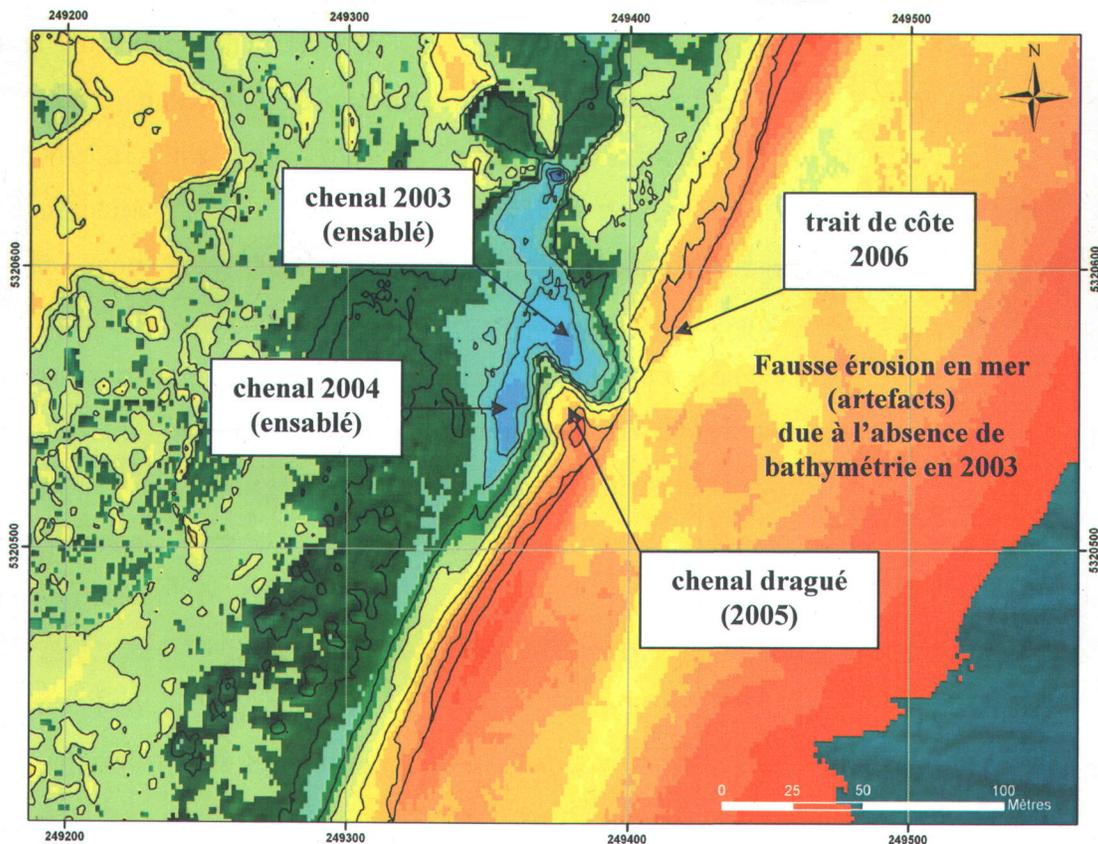


Figure 5.29 – Variations 2003-2006 au niveau du chenal de marée de barrière est du barachois de Paspébiac. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les courbes noires représentent les contours d'érosion ou d'accrétion (isolignes des variations verticales).

De même, la zone qui se caractérisait en 2004 par une progradation importante du trait de côte ($7,65 \pm 4,18$ m), due à l'ensablement du chenal de 2003 à la suite à la migration de l'embouchure 70 m vers le sud, ne présente en 2006 qu'une érosion non significative de son trait de côte ($-1,53 \pm 0,81$ m). Cela correspond donc à un recul net du trait de côte de $-9,18 \pm 4,99$ m à cet endroit pour la période 2004-2006. Ce recul important peut être mis sur le compte de l'érosion naturelle (l'amplitude du retrait à cet endroit étant similaire au recul moyen observé à d'autres endroits de la barrière) ou des activités de dragage conduites entre 2004 et 2005 qui ont eu pour conséquence de ramener le trait de côte à proximité de la

position qu'il occupait en 2003, lorsque le chenal de marée était présent à cet endroit du cordon.

- o Enfin, au nord de la zone du chenal de marée, se retrouve la portion de côte qui se caractérisait déjà en 2004 par un important recul de la barrière. Le recul moyen du trait de côte mesuré le long de cette section de 650 m de longueur est ainsi évalué à $-20,19 \pm 3,61$ m pour la période 2003-2006, soit un recul annuel moyen de $-6,73 \pm 1,20$ m. Contrairement à ce qui était observé entre 2003 et 2004, le taux d'érosion est cette fois relativement constant tout le long des 650 m de côte, et ce, jusqu'aux micro-falaises de grès rouge du secteur de la plage à Norbert. En termes de volumes sédimentaires, il s'agit de -27588 ± 8060 m³ de sédiments qui ont été érodés le long de cette partie de la barrière durant ces trois années.

5.3.4 Zone de la plage à Norbert

Cette zone correspond à une plage sableuse s'étendant le long de la côte sur une distance d'environ 1100 m de long. Elle est située immédiatement à l'est de la barrière orientale du barchois et présente une orientation générale ouest-est. Le haut de plage dans ce secteur est absent et l'arrière plage est constitué de falaises de grès de faible élévation (1,5 m à 2 m).

Cette zone se caractérise surtout par la présence d'un épi rocheux de 100 m de longueur et situé à environ 500 m de la partie proximale de la barrière est. Comme toutes les structures de ce type, cet épi modifie la dynamique sédimentaire en créant une accumulation globale en amont du transport et une érosion en aval du transport (*Komar, 1976 ; U.S. Army Corps of Engineers, 2002*).

Dans ce cas-ci, une accumulation sédimentaire estimée à 26000 m³ s'observe à l'est de l'épi, produisant une plage bien développée tandis qu'une érosion estimée à 3 m/a est mesurée à l'ouest de l'ouvrage (*Long et Renaud, 1999 ; Renaud, 2001*).

Les changements observés le long de ce secteur au cours des périodes 2003-2004 et 2003-2006 sont présentées dans la figure 5.30.

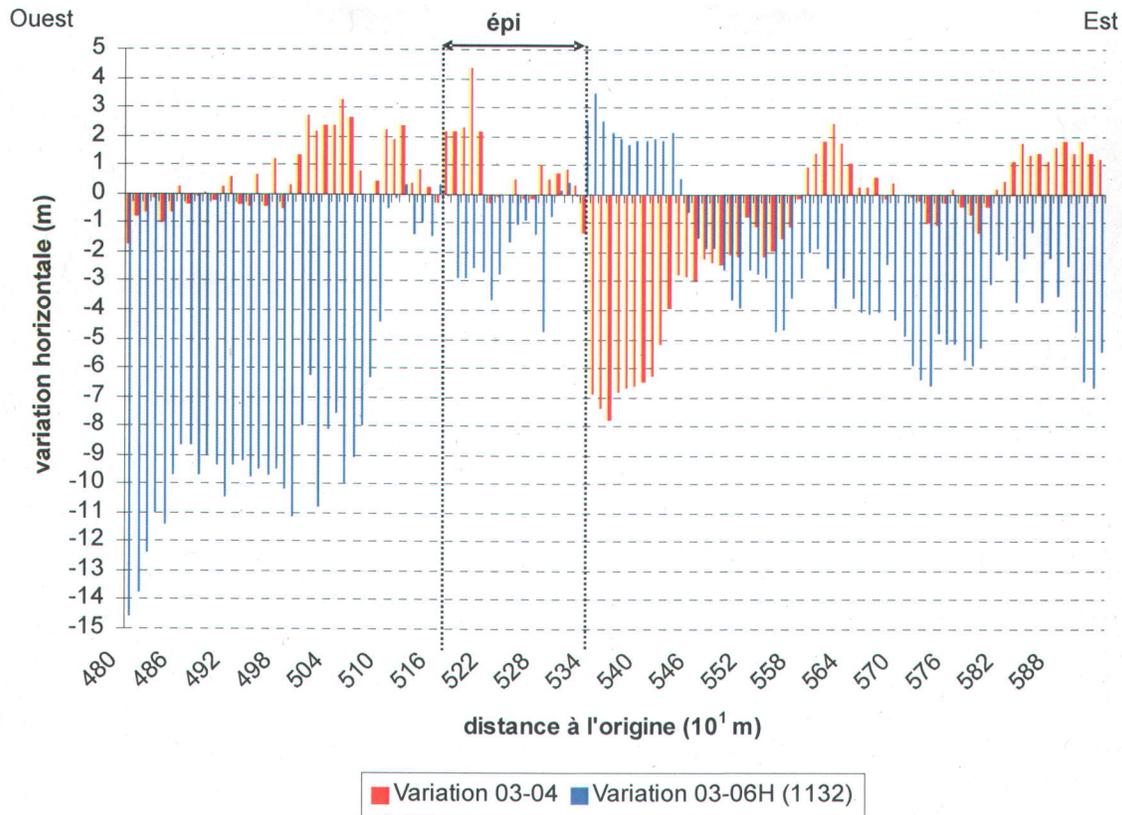


Figure 5.30 – Variations de position du trait de côte le long du secteur de la plage à Norbert. La distance est exprimées en dizaine de mètres par rapport à l'origine de la zone.

Entre 2003 et 2004, peu de changements significatifs se sont produits au niveau du trait de côte de la plage située à l'ouest de l'épi rocheux. Dans la partie la plus occidentale du site, située au niveau de la jonction entre la barrière est du barchois et la côte, un recul significatif de $-2,99 \pm 0,83$ m ainsi qu'un amaigrissement de la plage de -913 ± 690 m³ sont néanmoins observés le long d'un segment de plage d'environ 100 m. Cette érosion est interprétée comme la conséquence directe du recul important subi par la barrière orientale du barchois durant la même période ($-11,37 \pm 1,27$ m).

À cette section en érosion succède une portion de côte de 250 m de long où aucun changement significatif n'est mesuré, le trait de côte ne variant que de $-0,35 \pm 0,69$ m. Le long des 150 m suivants, une avancée du trait de côte de $1,51 \pm 1,07$ m est observée directement à l'ouest de l'épi, celle-ci atteignant même $2,61 \pm 0,35$ m sur un segment de plage de 60 m.

Durant le même intervalle de temps, un engraissement de $1949 \pm 1409 \text{ m}^3$ est mesuré sur l'avant-plage de ce secteur, entre $-0,2 \text{ m}$ et $-0,8 \text{ m}$ d'élévation, tandis que deux zones d'érosion d'environ 30 m de diamètre chacune sont présentes sur le bas de plage (figure 5.31). La première correspond à une perte de $-106 \pm 85 \text{ m}^3$ tandis que la seconde, la plus importante, se situe à moins de 30 m à l'ouest de l'épi rocheux et correspond à un amaigrissement du bas de plage de $-219 \pm 175 \text{ m}^3$.

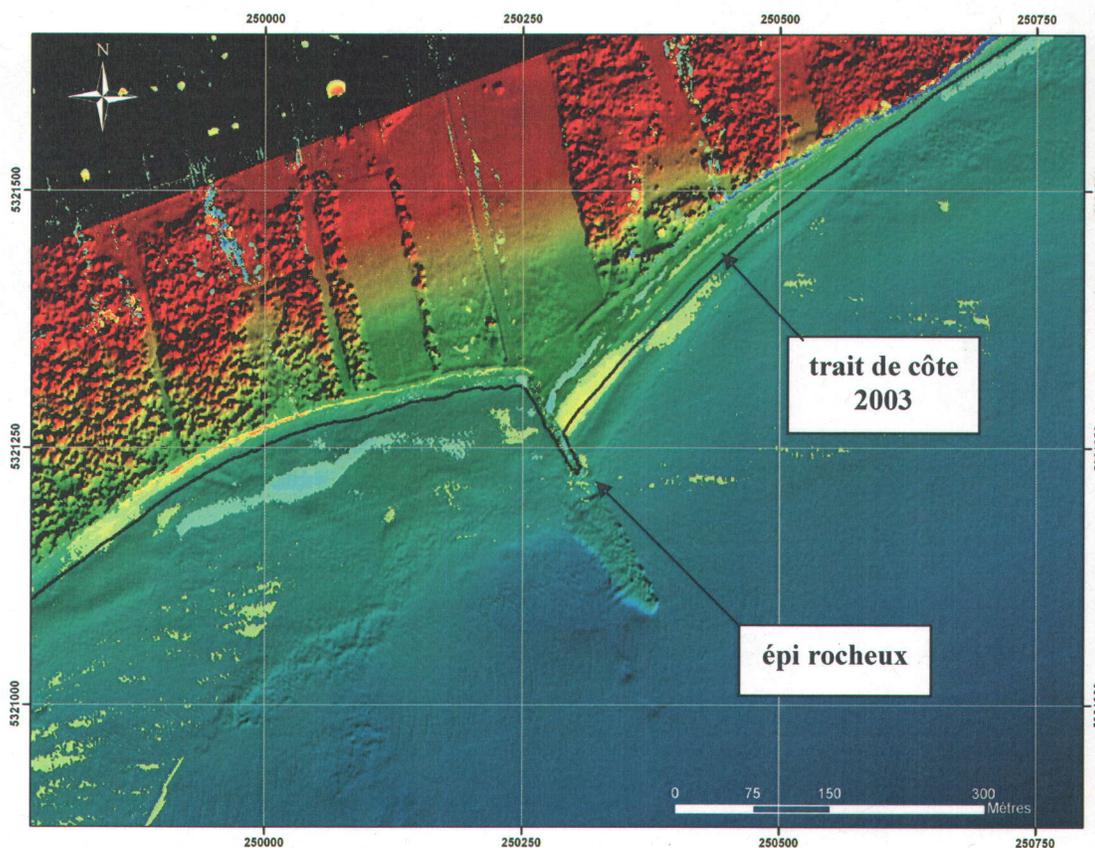


Figure 5.31 – Variations 2003-2004 au niveau de la plage à Norbert, secteur de Paspébiac. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Le trait noir représente le trait de côte de 2003.*

En ce qui concerne la plage située en amont de l'épi (est), les variations mesurées entre 2003 et 2004 restent tout aussi changeantes et localisées que celles observées sur la plage située en aval de l'épi (ouest).

Les 100 premiers mètres de plage situés directement à l'est de l'ouvrage de protection subissent ainsi une érosion importante du trait de côte de $-6,67 \pm 0,69$ m entre 2003 et 2004. Sur les 150 mètres de plage suivants, le recul du trait de côte diminue pour atteindre $-2,16 \pm 0,80$ m. La perte sédimentaire subie sur la plage et l'avant-plage le long de ce secteur en érosion de 250 m est évaluée à -1904 ± 1178 m³. Par contre, un engraissement du haut de plage de 328 ± 240 m³ est également mesuré dans le même temps le long de ce secteur. Ces modifications de topographie sont clairement révélées par la comparaisons de profils de plage à cet endroit (figure 5.32).

À cette zone en érosion succède enfin une portion de côte plus stable où la variation moyenne du trait de côte est estimée à $0,69 \pm 0,96$ m et où une alternance de secteurs faiblement en accrétion et en érosion peut être observée. Chacune de ces zones s'étend sur approximativement 100 m de longueur.

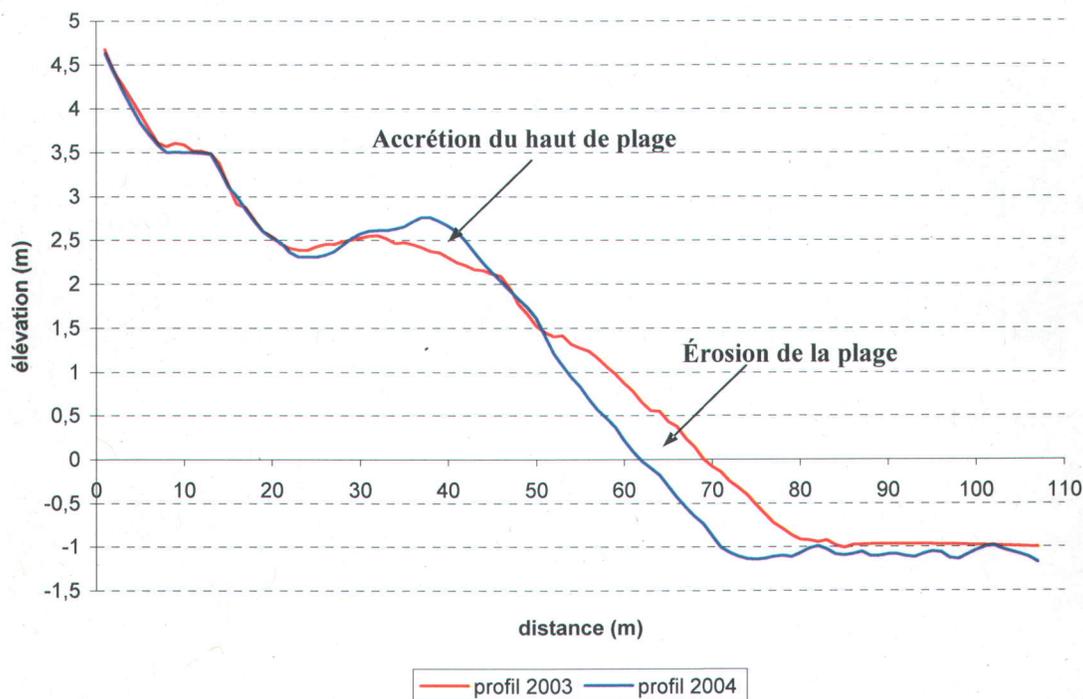


Figure 5.32 – Profils de la plage située à l'est de l'épi de la plage à Norbert, secteur de Paspébiac. Le profil rouge représente le profil topographique de 2003 et le profil bleu représente le profil topographique de 2004. Les élévations sont exprimées par rapport au zéro topographique (niveau moyens des mers).

La première présente une avancée peu significative du trait de côte de $1,18 \pm 0,71$ m et un engraissement de la plage de 148 ± 119 m³, la seconde montre un recul non significatif de $-0,38 \pm 0,48$ m et aucune variation verticale mesurable, et la dernière est caractérisée par une progradation moyenne de $1,30 \pm 0,48$ m et correspond au début d'une zone d'accrétion de 1439 ± 1165 m³ localisée au pied des falaises de grès qui se poursuivent à l'est du site (figure 5.31).

Pour la période comprise entre 2003 et 2006, les variations observées le long de ce secteur sont totalement opposées aux variations enregistrées entre 2003 et 2004. Ainsi, en 2006, la majeure partie de la plage située en aval de l'épi rocheux a subi une érosion importante du trait de côte estimée à $-9,71 \pm 1,82$ m, soit un taux annuel de $-3,24 \pm 0,61$ m (figure 5.30). Seuls les 80 m de plage situés directement à l'ouest de l'épi présentent un retrait du trait de côte plus faible avec un recul de seulement $-0,49 \pm 0,67$ m. Cette valeur est cependant trop faible pour pouvoir être considérée comme significative et ce segment de côte peut donc être considéré comme stable pour cette période. Dans le même temps, ce sont -7631 ± 4266 m³ de sédiments qui ont été perdus sur cette plage. À l'est de l'épi, une progradation du trait de côte de $2,17 \pm 0,50$ m est mesurée le long de la portion de côte située immédiatement en amont de cet ouvrage. Cette avancée est causée par l'accumulation de 1685 ± 2638 m³ de sédiments sur cette partie de la plage sous l'effet du transport sédimentaire littoral. Plus à l'est, le reste de la plage se caractérise par un recul de $-3,79 \pm 1,47$ m, soit $-1,16 \pm 0,49$ m par année, qui, compte tenu des imprécisions de mesure du système SHOALS, peut à peine être considéré comme significatif.

Il apparaît donc, au vu de ces résultats, que les changements morphologiques les plus significatifs dans ce secteur se produisent le long des 100 à 200 m de plage situés immédiatement en amont de l'épi de protection qui caractérise le secteur, ainsi que le long de toute la plage située en aval de l'épi et qui se trouve dans le prolongement de la barrière orientale du barachois.

5.3.5 Zone des falaises

Cette zone s'étend à l'est de la plage à Norbert sur une distance de 2200 m et constitue la partie la plus orientale du secteur d'étude de Paspébiac. Elle est caractérisée par des falaises de grès rouge de la formation de Bonaventure présentant un très faible pendage vers le sud (*Daigneault, 2001*). Le haut de falaise est entaillé en plusieurs endroits par de petits cours d'eau présentant des débits assez faibles et irréguliers. Les plages au pied des falaises sont en général peu développées, sauf aux environs immédiats du barachois, et consistent essentiellement en une mince pellicule de graviers et de galets recouvrant les grès rouges et les conglomérats de la formation de Bonaventure (*Xhardé, 2007*). Des blocs de roche provenant des falaises sont souvent présent sur la plage. Le haut de plage est inexistant et le pied des falaises est soumis à l'action des vagues à marée haute. Des encoches d'abrasion sont souvent présentes.

Compte tenu de la grande hétérogénéité de ce type d'environnement rocheux et des changements topographiques rapides qui peuvent y être observés d'un endroit à l'autre, les variations de trait de côte mesurées dans ce secteur se caractérisent, elles aussi, par une plus grande variabilité (figure 5.33). Ainsi, entre 2003 et 2004, le trait de côte présente une variation moyenne de $1,16 \pm 2,73$ m sur l'ensemble de ce secteur tandis qu'elle n'est que de $-0,23 \pm 3,19$ m pour la période 2003-2006. Cependant, le graphique de la figure 5.33 montre que cette zone se caractérise essentiellement par une succession d'avancées et de retraits, pouvant être par endroits très importants mais ne s'étendant que sur de courtes distances de l'ordre de quelques dizaines de mètres seulement. Parmi ces changements ponctuels, les deux principaux correspondent à deux éboulements qui se sont produits dans la falaise et qui ont provoqués une accumulation significative de débris sur la plage, entraînant une avancée marquée du trait de côte à ces endroits. Le premier éboulement correspond à l'effondrement d'un pan de falaise d'environ 50 m de long et situé entre le lit de deux petits cours d'eau qui entaillent le haut de la falaise (figure 5.34). Cet effondrement a provoqué un recul de 7 m du sommet de la falaise ainsi qu'une accumulation de roches et de débris estimée à 2927 ± 698 m³ sur la plage, entraînant une avancée du trait de côte de $5,92 \pm 3,52$ m entre 2003 et 2004.

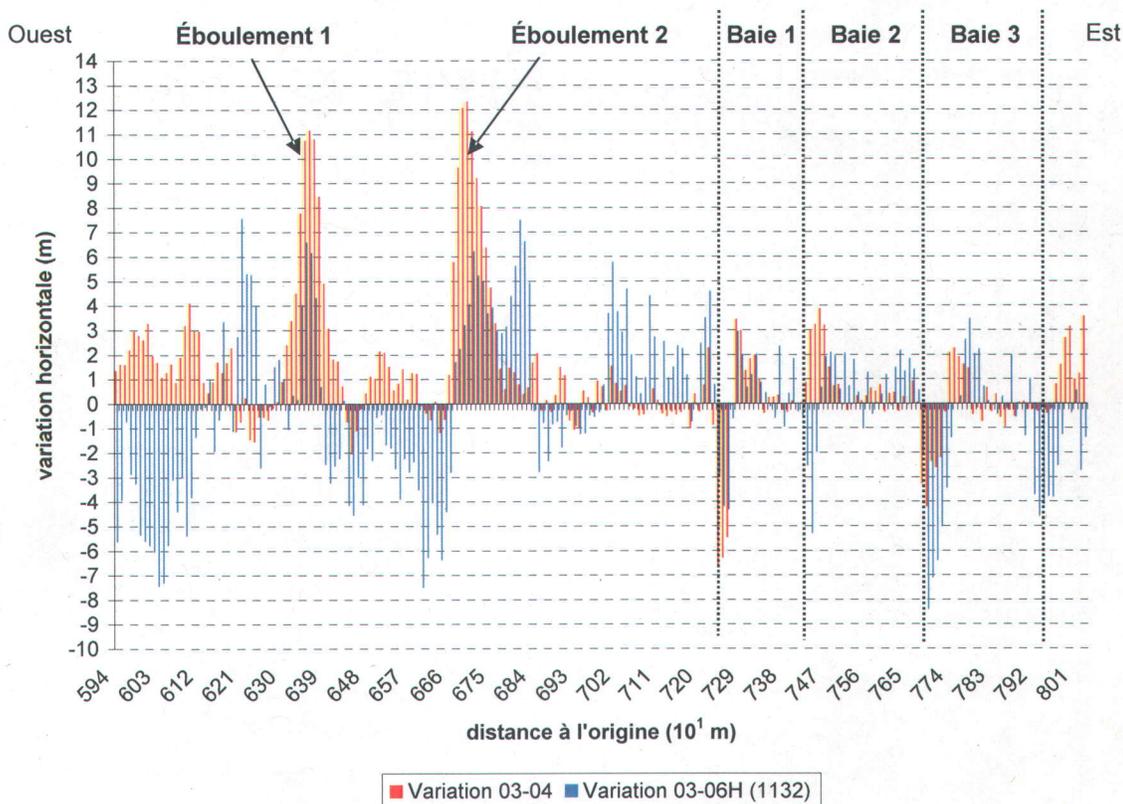


Figure 5.33 – Variations de position du trait de côte le long du secteur des falaises de Paspébiac. La distance est exprimées en dizaine de mètres par rapport à l'origine de la zone.

Le second éboulement correspond, pour sa part, à l'effondrement d'un pan de roche de 45 m de long ayant causé un recul du haut de la falaise à cet endroit de 8 m et une accumulation de $5505 \pm 889 \text{ m}^3$ de sédiments sur la plage, entraînant ainsi une progradation du trait de côte de $8,28 \pm 2,98 \text{ m}$ à cet endroit pour la période 2003-2004. En 2006 cependant, le volume de sédiments présents au pied de la falaise au niveau de ces deux éboulements n'est plus que de $1549 \pm 429 \text{ m}^3$ pour le premier et de $1381 \pm 652 \text{ m}^3$ pour le second. Cela signifie qu'entre 2004 et 2006, 1378 m^3 de sédiments (47 % du volume présent en 2004) ont été érodés par les vagues au niveau du premier éboulement et ont probablement contribué à l'alimentation du transport sédimentaire local. Pour le second éboulement, ce sont près de 75 % des dépôts présents en 2004 (soit 4124 m^3) qui ont été érodés en seulement deux ans, soit un apport annuel total de 2751 m^3 de sédiments pour les deux éboulements cumulés. Ces résultats démontrent l'importance de ce type d'effondrements en tant que sources de sédiments pour le transport littoral local.

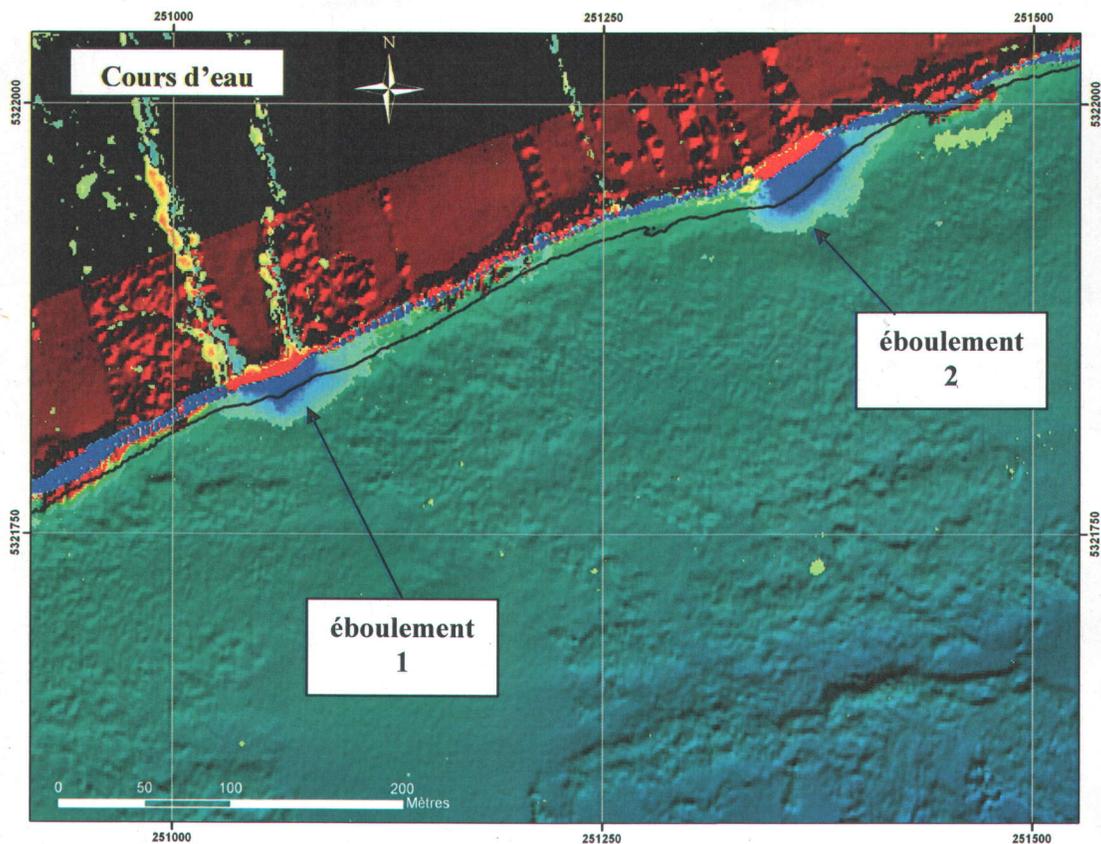


Figure 5.34 – Variations 2003-2004 au niveau des falaises, est du secteur de Paspébiac. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Le trait noir représente le trait de côte de 2003.

Les autres variations de position du trait de côte observées le long de ce secteur de falaises correspondent, pour leur part, à des zones très localisées d'érosion et d'accrétion situées au niveau de petites criques rocheuses du rivage (figure 5.35). Les zones en érosion sont toujours localisées sur le bord ouest des criques et s'étendent sur une distance de 30 à 50 m seulement, tandis que les zones d'accrétion sont généralement situées le long de la partie est des criques et s'étirent sur une longueur comprise entre 50 et 90 m. Ainsi, les variations mesurées entre 2003 et 2004 au niveau de la première crique sont de $-6,11 \pm 0,48$ m pour la partie ouest et de $2,12 \pm 0,86$ m dans la partie est, de $2,97 \pm 0,79$ m dans la seconde crique et de $-2,92 \pm 0,74$ m dans la partie ouest et $1,88 \pm 0,30$ m dans la partie est de la troisième crique.

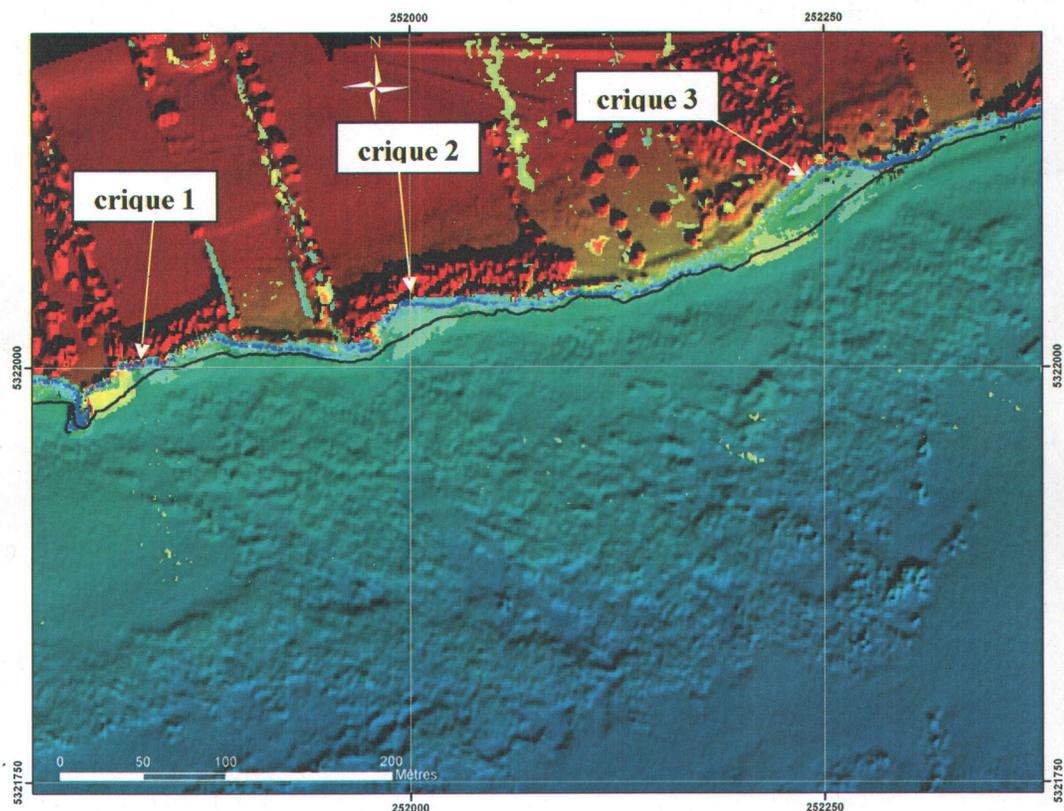


Figure 5.35 – Variations 2003-2004 au niveau des falaises de grès, est du secteur de Paspébiac. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Le trait noir représente le trait de côte de 2003.

Entre 2003 et 2006, ces changements passent respectivement à $-3,86 \pm 0,58$ m et $1,61 \pm 0,79$ m pour la première, $-3,29 \pm 1,45$ m et $1,05 \pm 0,91$ m pour la seconde, et enfin à $-4,85 \pm 2,45$ m et $2,57 \pm 0,55$ m pour la troisième crique analysée (figure 5.33).

Ces résultats semblent indiquer l'existence d'un transport sédimentaire orienté d'ouest en est dans ce secteur, ce qui correspond à un sens de transport inversé par rapport à la direction dominante du transport dans les secteurs de la plage à Norbert et de la barrière orientale du barachois. Cette inversion pourrait s'expliquer soit par la bathymétrie du pied des falaises, qui provoquerait une réfraction des houles et modifierait ainsi l'hydrodynamisme local, soit par des conditions météorologiques et/ou hydrodynamiques particulières qui seraient à l'origine d'une inversion temporaire du transport sédimentaire au niveau des falaises.

5.4 Secteur de Saint-Godefroi

Ce secteur est situé à environ 3 km à l'est du site de Paspébiac et s'étend de la pointe à Ritchie jusqu'à la pointe Trachy (figure 5.36). Il correspond à une côte rocheuse assez découpée présentant de nombreux caps et anses. La longueur de côte couverte dans ce secteur est d'environ 2 km et la zone comprend plusieurs environnements côtiers. À l'est, une flèche littorale sableuse barre l'embouchure de la rivière Le Barchois, formée par la convergence de la rivière Paspébiac, du Ruisseau à Bériault, du cours d'eau Larocque et de la rivière Saint-Godefroi. La flèche a subi une érosion importante au cours des dernières décennies en raison de la destruction d'un quai situé à son extrémité sud-ouest. Auparavant, ce quai constituait un obstacle à la dérive littorale portant à cet endroit au sud-ouest et avait ainsi permis le développement de cette flèche. Depuis sa disparition, la flèche a subi des modifications morphologiques importantes ce qui s'est traduit par un recul de 12 à 14 m du trait de côte entre 1965 et 1992 (Poirier, 2003a).

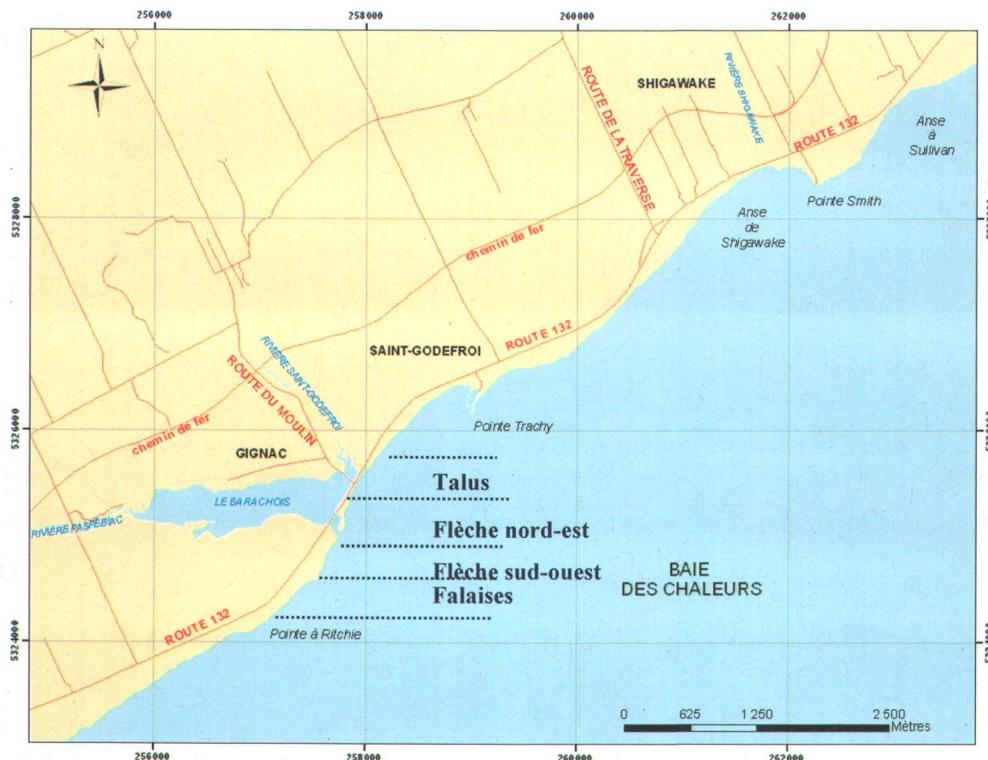


Figure 5.36 – Localisation du secteur de Saint-Godefroi – Shigawake. Le système de référence de la carte principale est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).

Plusieurs aménagements de protection (murs en bois, épis en pieux de cèdre, épis ou jetée en gabions, enrochements) sont depuis présents sur cette flèche afin de limiter son recul et de préserver ainsi la route qui passe dessus.

Ce secteur peut être subdivisé approximativement en 4 grands environnements côtiers (figure 5.36):

- la zone des falaises qui s'étendent à l'ouest du barachois de Hope Town à partir de la pointe à Ritchie.
- la zone de la plage et de la flèche littorale sud-ouest du barachois de Hope Town.
- la zone de la flèche nord-est du barachois, qui ferme presque complètement l'embouchure de la rivière Le Barachois et délimite la lagune du barachois.
- la zone des talus qui s'étendent immédiatement à l'est de l'embouchure de la rivière Le Barachois.

Les résultats pour chacun de ces environnements côtiers sont présentés ci-dessous.

5.4.1 Zone des falaises

Cette zone s'étend à l'ouest du barachois de Hope Town et est caractérisée par des falaises vives de grès rouge de la formation de Bonaventure, très présente dans toute la région. Ces falaises s'étendent sur une distance d'environ 470 m avant de céder la place à une plage sableuse à proximité de l'embouchure de la rivière. De nombreuses encoches d'abrasion ainsi que des surplombs peuvent être observés le long de ce littoral. Tout comme pour le secteur de Paspébiac, les plages situées au pied des falaises consistent, là encore, en de minces placages de sédiments grossiers (graviers ou galets sur sable grossier) jonchés de débris et de blocs provenant de l'érosion et de l'effondrement des parties supérieures de la falaise et qui recouvrent partiellement le socle rocheux affleurant.

Et tout comme pour le secteur des falaises de Paspébiac, les variations de trait de côte mesurées dans ce secteur sont caractérisées par une grande variabilité due à la grande hétérogénéité de ce type d'environnement rocheux et aux changements topographiques rapides qui se produisent au niveau des falaises (figure 5.37). Ainsi, la variation moyenne du trait de côte, au pied des falaises de cet secteur, n'est que de $0,91 \pm 1,26$ m entre 2003 et 2004 et de $0,21 \pm 1,94$ m entre 2003 et 2006. La plupart des variations mesurées le long de cette zone sont ainsi trop faibles pour pouvoir être considérées comme étant significatives vu les imprécisions de mesure des systèmes LiDAR utilisés. Néanmoins, certaines portions de littoral présentent des changements plus importants et significatifs. C'est le cas le long d'un segment de falaise d'environ 150 m (figure 5.37, zone 1) où une avancée moyenne du trait de côte de $1,28 \pm 0,70$ m est mesurée entre 2003 et 2004. Dans le même intervalle de temps, une accumulation de 599 ± 249 m³ est constatée sur la plage. L'analyse du MNVE de cette zone révèle que plusieurs phénomènes géomorphologiques sont responsables de l'avancée observée à cet endroit.

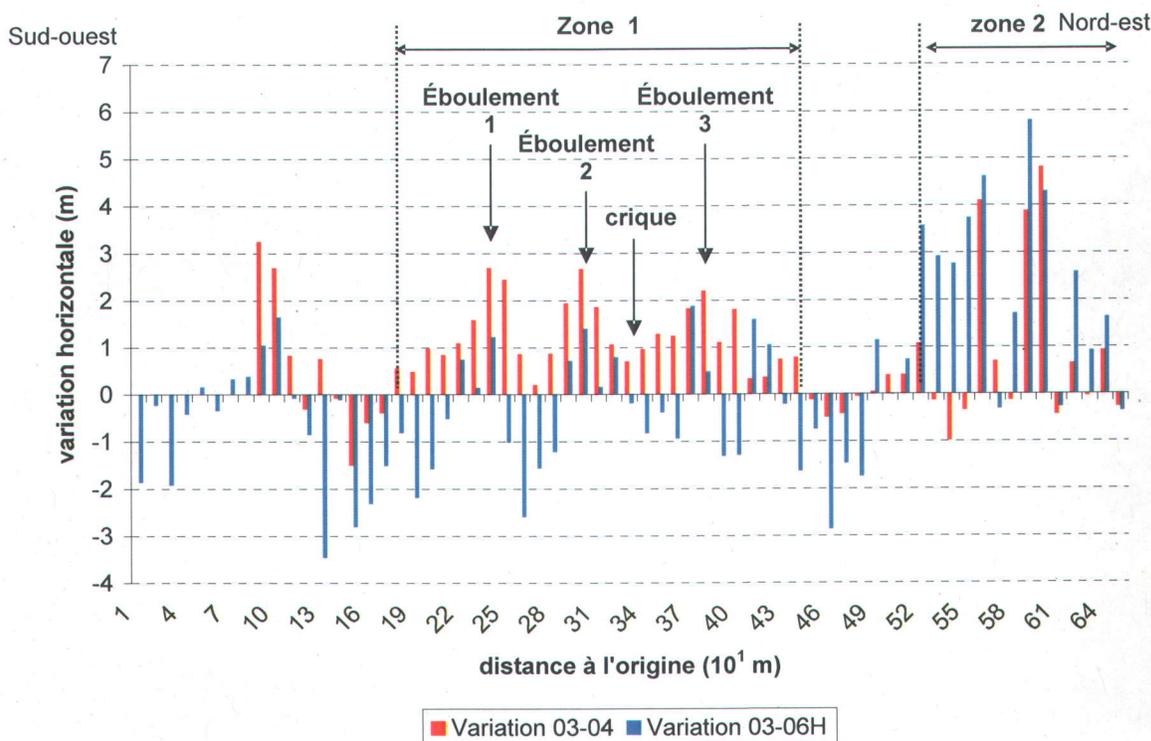


Figure 5.37 – Variations de position du trait de côte le long du secteur des falaises de Saint-Godefroi. La distance est exprimées en dizaine de mètres par rapport à l'origine de la zone.

Tout d'abord, deux effondrements, distants de 20 m l'un de l'autre, se sont produits dans le secteur durant cette période. Le premier (éboulement 1) correspond à la chute d'un pan de falaise de 6 m de long ayant occasionné un recul du haut de la falaise de 4 m tandis que le second (éboulement 2) correspond à la chute d'un pan de 10 m de longueur qui a causé un recul de 3 m du sommet de la falaise. Les volumes déposés sur la plage à la suite de ces deux décrochements de falaise sont estimés respectivement à $413 \pm 210 \text{ m}^3$ et $488 \pm 220 \text{ m}^3$, et sont à l'origine de la progradation du trait de côte constatée sur les 70 premiers mètres de ce segment en accrétion. Vingt mètres au nord-est de ces effondrements rocheux se trouve ensuite une crique dans la falaise, d'environ 50 m de longueur, où une accumulation sédimentaire de $252 \pm 162 \text{ m}^3$ est mesurée.

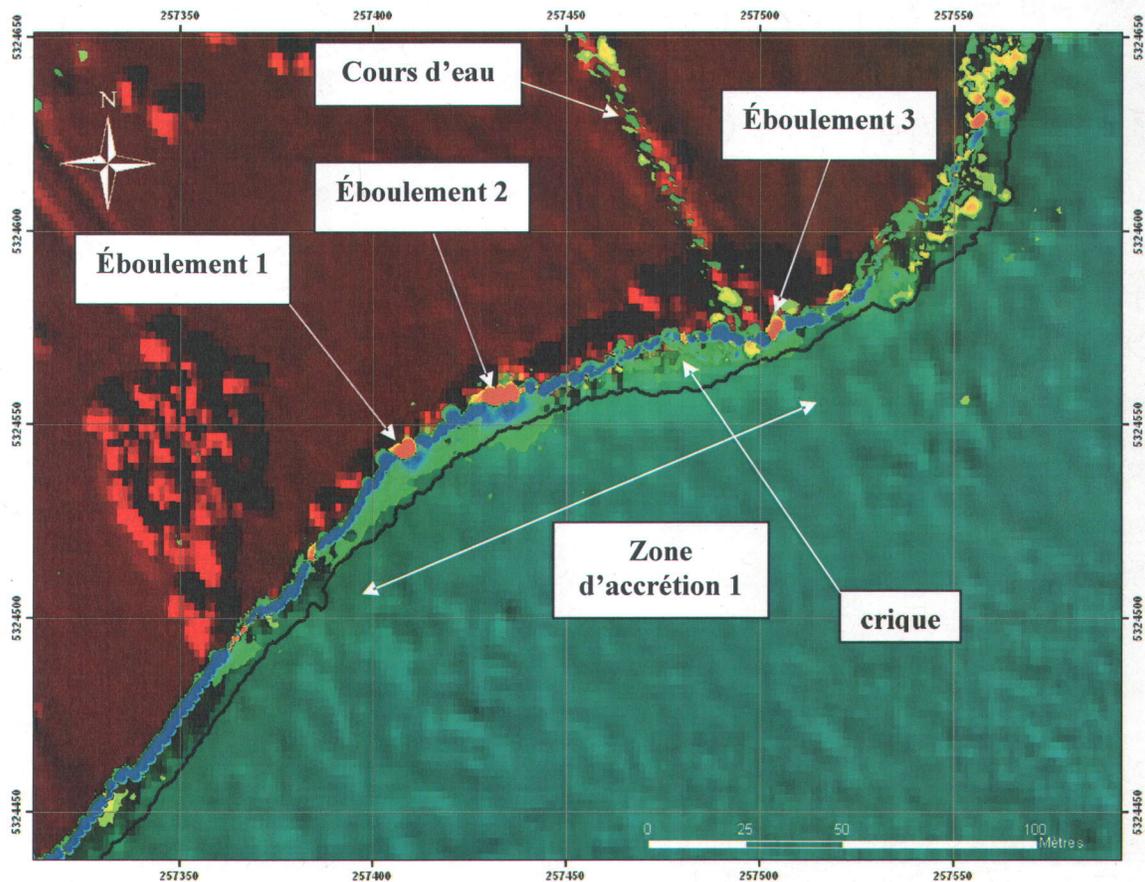


Figure 5.38 – Variations 2003-2004 au niveau des falaises de la pointe à Ritchie (zone 1), secteur de Saint-Godfroi. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Le trait noir représente le trait de côte de 2003. La résolution des données dans ce secteur est d'environ 4 m.

Cette accrétion semble être causée par les apports sédimentaires d'un cours d'eau qui érode et fragilise les dépôts constituant le haut de la falaise. Enfin, un troisième effondrement est observé, 10 m à l'est de cet enfoncement (éboulement 3). Celui-ci correspond au décrochage d'un pan de la paroi rocheuse d'environ 5 m de long qui a occasionné un recul de 3 m du haut de la falaise et une accumulation de sédiments sur la plage qui est responsable de la progradation du trait de côte à cet endroit. La morphologie de tout ces dépôts de plage indique, en outre, l'existence d'un transport sédimentaire côtier orienté du nord-est vers le sud-ouest. Ce sens de transport se révèle conforme aux déductions tirées de l'observation de la morphologie d'autres structures sédimentaires côtières présentes dans le secteur de Saint-Godefroi (*Poirier, 2003a ; Xhardé, 2007 ; Cottin, 2008*).

Par contre, en ce qui concerne la période 2003-2006, aucune modification significative ne peut être observée le long de ce segment de côte de 150 m, que ce soit en termes de trait de côte ou de volumes. Cela est dû à la faible résolution utilisée pour couvrir le site de Saint-Godefroi lors des relevés laser de 2006, puisque seul le mode hydrographique "basse densité" (4 x 4 m) a été utilisé pour couvrir ce secteur.

Cent mètres au nord-est de cette première zone présentant des changements significatifs du trait de côte se trouve une seconde zone qui est caractérisée, elle aussi, par une accrétion importante de la plage (figure 5.37, zone 2). L'avancée moyenne du trait de côte le long de ce second segment de littoral est estimée à $1,94 \pm 2,60$ m entre 2003 et 2004 et à $2,85 \pm 1,88$ m entre 2003 et 2006. La quantité de matériel déposé sur la plage durant la période 2003-2004 est estimée, pour sa part, à 1817 ± 206 m³.

Une fois encore, ces accumulations doivent être mises sur le compte d'effondrements qui se sont produits dans la falaise. Le MNVE de la zone révèle ainsi l'existence de deux effondrements importants au niveau de cette zone d'accrétion, le premier correspondant à un pan de roche de 22 m de long et de 2 m de large, et le second correspondant à un pan de 12 m de long pour 8 m de large (figure 5.39).

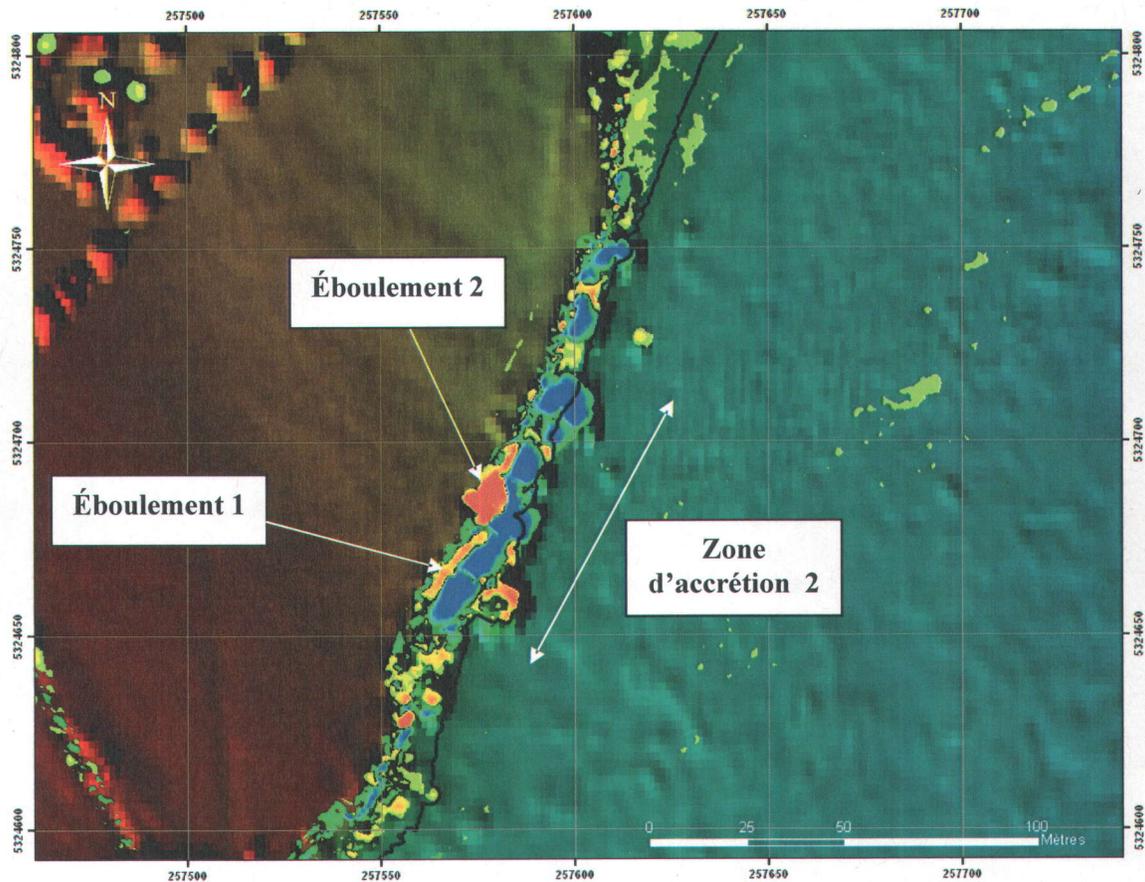


Figure 5.39 – Variations 2003-2004 au niveau des falaises de la pointe à Ritchie (zone 2), secteur de Saint-Godéroi. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Le trait noir représente le trait de côte de 2003. La résolution des données dans ce secteur est d'environ 4 m.

5.4.2 Zone de la flèche sud-ouest

Cette zone correspond à une plage de sable rectiligne de 260 m de long, limitée par les falaises de grès au sud-ouest et par l'embouchure de la rivière Le Barachois au nord-est. Les changements observés dans la position du trait de côte pour les périodes 2003-2004 et 2003-2006 sont présentés ci-après dans la figure 5.40.

Les variations mesurées le long de cette plage restent sensiblement les mêmes pour chacun de ces deux intervalles de temps. Ainsi, les mesures montrent que le trait de côte reste relativement stable dans la partie sud-ouest de la plage avec un recul moyen non significatif de $-1,36 \pm 0,49$ m pour 2003-2004 et de $-0,50 \pm 0,37$ m pour 2003-2006.

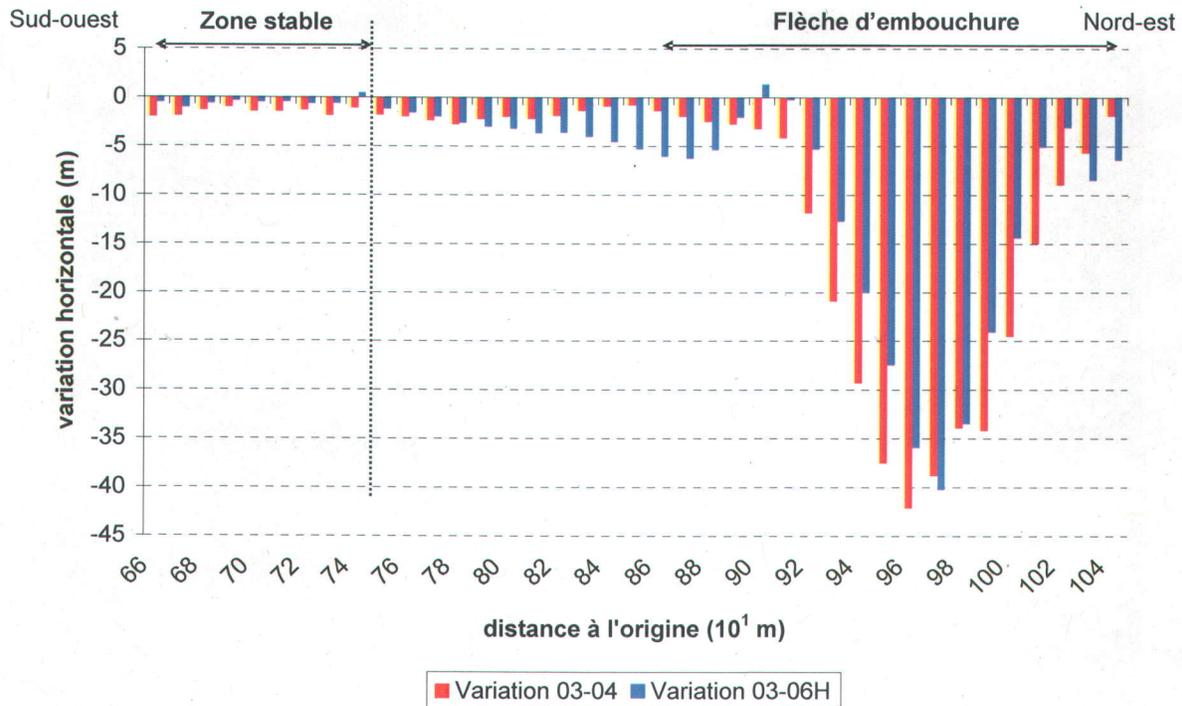


Figure 5.40 – Variations de position du trait de côte le long de la flèche littorale sud-ouest, secteur de Saint-Godefroi. La distance est exprimées en dizaine de mètres par rapport à l'origine de la zone.

Cependant, si le trait de côte ne présente pas de variation significative le long de la partie ouest de la plage, un léger amaigrissement de $-540 \pm 396 \text{ m}^3$ est néanmoins observé au niveau du haut de plage dans cette partie du site (figure 5.41).

À cette section stable succède ensuite une portion de plage d'environ 150 m de longueur qui présente un recul plus important du trait de côte. Ce retrait est de $-1,75 \pm 0,55 \text{ m}$ entre 2003 et 2004, et de $-4,01 \pm 1,39$ entre 2003 et 2006, soit un taux de recul annuel moyen de $-1,33 \pm 0,46 \text{ m}$. Enfin, sur la partie nord-est de cette plage, un retrait particulièrement marqué du trait de côte de $-23,58 \pm 12,87 \text{ m}$ en 2003-2004 et de $-19,21 \pm 12,42 \text{ m}$ en 2003-2006 peut être observé. Ce retrait particulièrement important est dû à l'érosion, entre 2003 et 2004, d'une flèche d'embouchure sableuse d'environ 80 m de longueur et de 18 m de largeur qui était rattachée à la plage à cet endroit et s'étirait perpendiculairement à la plage selon une direction ouest-est. Le volume sédimentaire ainsi érodé correspond à une perte nette de $-816 \pm 511 \text{ m}^3$ de sédiments.

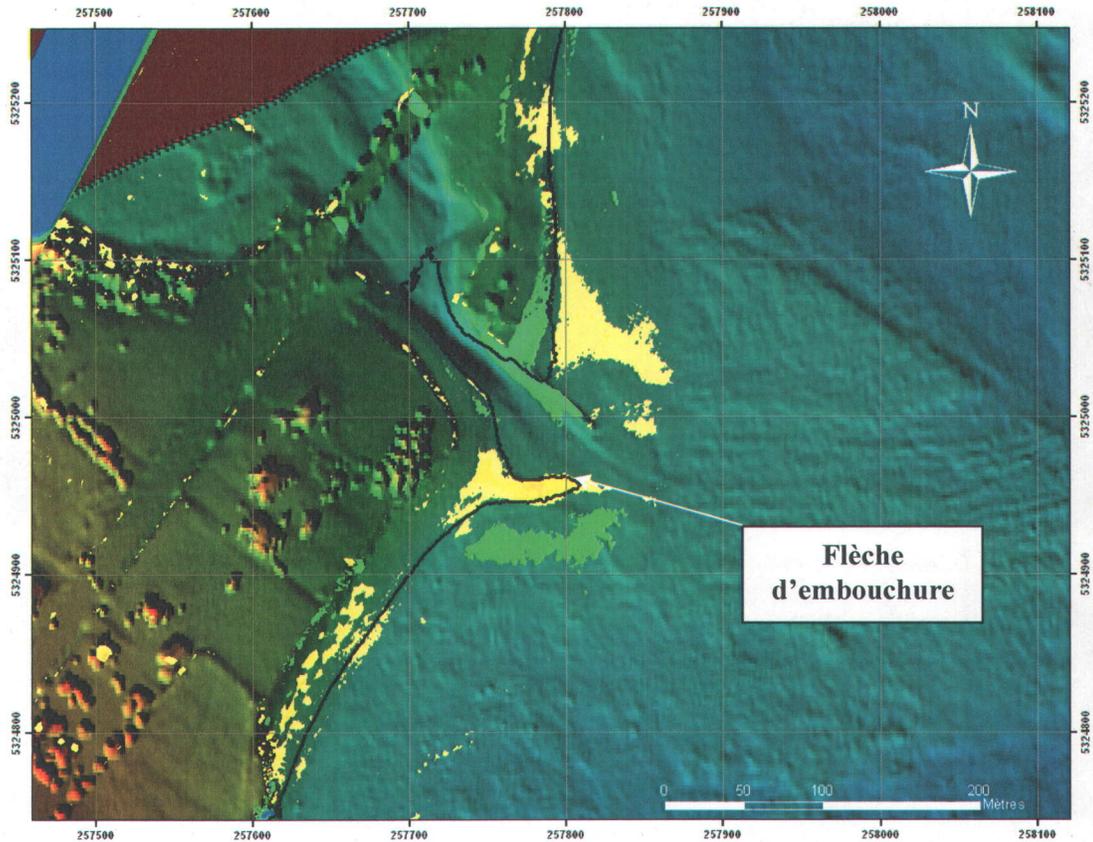


Figure 5.41 – Variations 2003-2004 au niveau du barachois de Hope Town. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Le trait noir représente le trait de côte de 2003.*

Néanmoins, durant le même intervalle de temps, un nouveau dépôt sableux d'environ $706 \pm 560 \text{ m}^3$ est apparu sur le bas de plage, entre $-0,65 \text{ m}$ et $-0,95 \text{ m}$ de profondeur, à seulement 20 m au sud de l'endroit où se situait la flèche d'embouchure qui a été érodée (figure 5.41). L'érosion de cette structure sédimentaire peut ainsi être interprétée comme le résultat d'un réajustement morphologique de la côte suite à une modification des conditions hydrodynamiques locales (comme une tempête), cette flèche d'embouchure s'étant très certainement développée en 2003 durant un période où les conditions hydrodynamiques locales étaient plus calmes. Cela souligne, une fois encore, le caractère particulièrement dynamique des embouchures de rivière ainsi que les changements importants qui peuvent se produire sur de courtes périodes de temps en réponse à des forçages hydrodynamiques temporaires.

5.4.3 Zone de la flèche nord-est

Cette zone correspond à une flèche littorale sableuse de 305 m de long qui s'est développée devant l'embouchure de la rivière Le Barchois sous l'action la dérive littorale, qui porte à cet endroit vers le sud-ouest. Cette flèche a subi une érosion importante au cours des dernières décennies en raison de la destruction d'un quai situé à son extrémité sud-ouest et qui constituait, par le passé, un obstacle à la dérive littorale. Depuis sa disparition, la flèche a subi des modifications morphologiques importantes et un recul de 12 à 14 m du trait de côte entre 1965 et 1992 (Poirier, 2003a), ce qui correspond à une érosion annuelle moyenne d'environ $-0,48$ m/a.

Les relevés LiDAR révèlent cependant que c'est la partie sud-ouest de la plage, située à proximité de la jetée en gabions qui s'étire sur une distance d'environ 60 m et protège l'embouchure de la rivière Le Barchois, qui subit les changements les plus importants (figure 5.42).

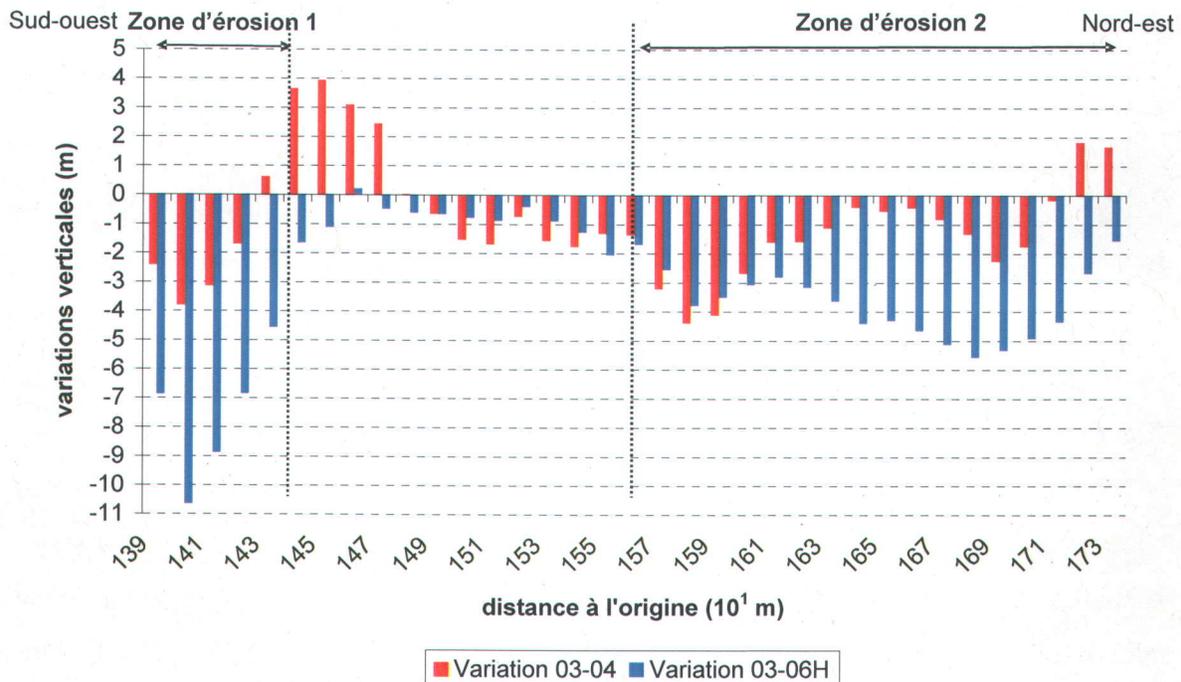


Figure 5.42 – Variations de position du trait de côte le long de la flèche littorale nord-est, secteur de Saint-Godefroi. La distance est exprimée en dizaine de mètres par rapport à l'origine de la zone.

Ainsi, entre 2003 et 2004, un recul du trait de côte de $-2,76 \pm 0,79$ m est observé au sud-ouest, le long d'un segment de plage de 40 m. Ce recul est accompagné d'une perte de -1130 ± 904 m³ de sédiments sur le bas de plage, entre 0 m et $-0,76$ m, tandis qu'un engraissement de 782 ± 473 m³ est mesuré sur la plage, entre 0,30 m et 1,10 m d'élévation, dans le même temps (figures 5.41 et 5.43).

Pour la période 2003-2006, le recul atteint $-7,57 \pm 2,06$ m le long de ce même segment de plage, soit un recul annuel moyen de $-2,52 \pm 0,69$ m, et le volume érodé est estimé à -3745 ± 1710 m³. Les raisons d'une telle érosion à cet endroit sont difficiles à expliquer de prime abord car cette zone, qui constitue l'aboutissement du transport sédimentaire local venant du nord-est, devrait au contraire être en accrétion. L'explication la plus probable est un réajustement du profil de plage aux conditions de tempête qui sévissaient lors des relevés de 2004. Une autre explication pourrait être que la capacité de stockage de la jetée en gabions a atteint sa limite et que les sédiments contournent à présent l'obstacle.

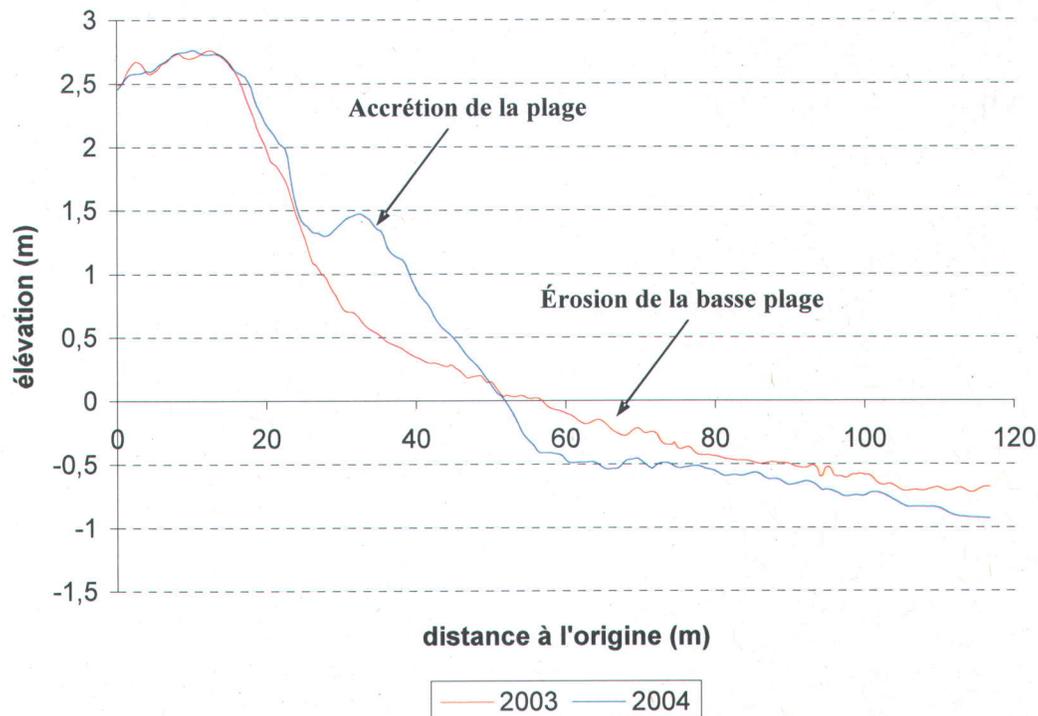


Figure 5.43 – Profils de la plage située directement au nord-est de la jetée de gabions de l'embouchure de la rivière Le Barchois, secteur de Saint-Godefroi. Le profil rouge représente le profil topographique de 2003 et le profil bleu représente le profil topographique de 2004. Les élévations sont exprimées par rapport au zéro topographique (niveau moyens des mers).

En outre, cette zone se caractérise aussi par la présence d'une série d'épis en pieux de cèdre sur la haute plage destinés à lutter contre l'érosion de la plage. Ces épis pourraient contribuer, dans une certaine mesure, à l'érosion observée au niveau du trait de côte et de la basse plage en piégeant les sédiments sur la haute plage et en perturbant le transport sédimentaire côtier local. Enfin, une inversion temporaire de la dérive littorale en raison de conditions hydrodynamiques anormales (tempête), telle celle observée entre 2003 et 2004 au niveau de la partie distale du barachois de Paspébiac (voir les sections § 5.3.3 et § 6.2) pourrait également constituer une explication plausible à ces mesures.

La zone de plage en forte érosion située au sud-ouest se poursuit au nord-est par une zone subissant un recul moins prononcé du trait de côte. Le retrait moyen sur le reste de la flèche littorale n'est ainsi que de $-1,29 \pm 1,38$ m entre 2003 et 2004 et de $-2,88 \pm 1,63$ m entre 2003 et 2006. Cependant, le recul du trait de côte peut atteindre localement des valeurs plus élevées et plus significatives. C'est le cas dans la partie nord-est du site où un recul de $-2,93 \pm 1,10$ m et un amaigrissement de la plage de -471 ± 377 m³ sont observés entre 2003 et 2004 le long d'une portion de plage de 50 m. Ce recul atteint $-3,65 \pm 1,19$ m en 2003-2006 et touche une portion de littoral d'environ 180 m.

Il ressort donc de ces résultats que toute la flèche littorale nord-est de Saint-Godefroi a subi, entre 2003 et 2006, un retrait significatif de son trait de côte, ce recul étant cependant plus marqué au niveau des extrémités sud-ouest et nord-est du secteur.

5.4.4 Zone des talus

Cette zone s'étend au nord-est du barachois et est constituée de talus argileux d'environ 10 mètres de hauteur qui s'étendent sur une distance de 400 mètres. Ceux-ci sont soumis à une érosion marine particulièrement intense, les plages de ce secteur, comme la plupart des plages de la région, n'étant pas suffisamment larges pour offrir une protection efficace contre l'action des vagues (*Poirier, 2003a*). Le pied de ces talus est d'ailleurs empierré sur une distance d'environ 200 m. Ces talus cèdent ensuite progressivement la place à des falaises vives de 20 à 30 mètres de hauteur en moyenne appartenant, elles aussi, à la formation de Bonaventure. Les résultats pour ce secteur sont présentés dans la figure 5.44.

La partie sud-ouest de cette zone ne présente pas de changements topographiques significatifs. Le trait de côte reste stable sur une distance d'environ 380 m en 2003-2004 et de 300 m entre 2003 et 2006, avec une avancée moyenne d'à peine $0,01 \pm 0,52$ m et $0,05 \pm 0,99$ m respectivement.

En 2006, les 80 m de plage suivants montre néanmoins un recul marqué du trait de côte de $-3,64 \pm 1,32$ m, ainsi qu'un amaigrissement significatif sur la basse plage (entre 0,5 m et $-0,75$ m d'élévation) ainsi qu'au niveau des talus (entre 1,5 m et 4,0 m d'élévation). La perte est estimée à -467 ± 211 m³ le long des talus argileux non protégés qui s'étendent sur 120 m au nord-est de la portion de côte empierrée. Le volume exact des pertes n'a cependant pas pu être déterminé compte tenu des imprécisions de mesure et de la faible résolution des données.

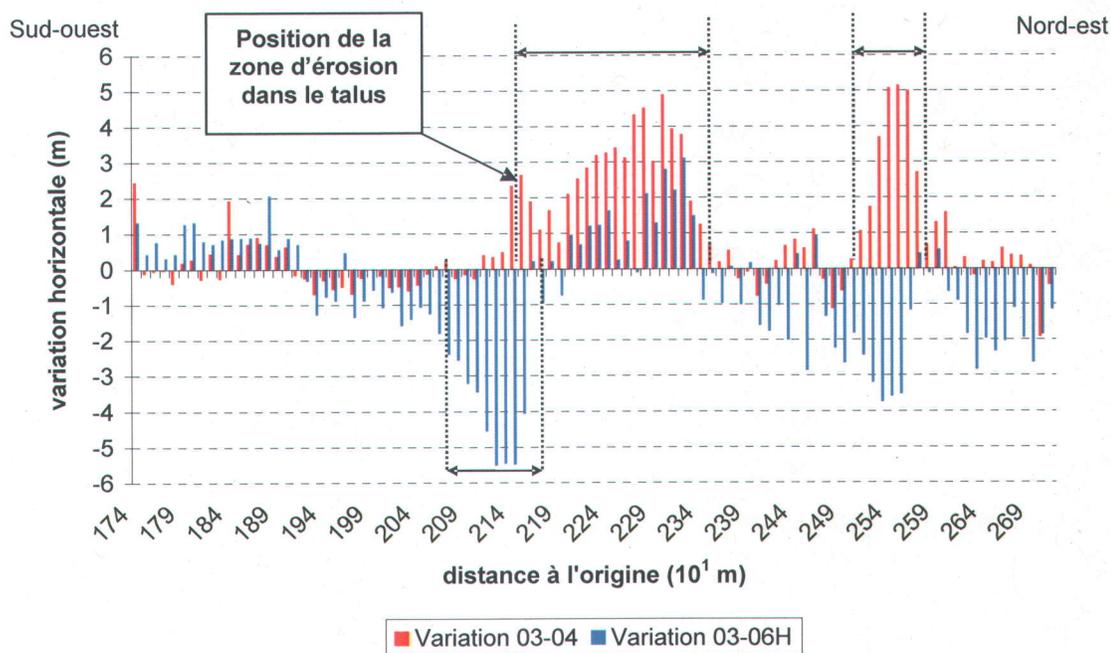


Figure 5.44 – Variations de position du trait de côte le long de la zone de talus, secteur de Saint-Godefroi. La distance est exprimées en dizaine de mètres par rapport à l'origine de la zone.

À cette première portion de plage succède une zone qui subit une accrétion prononcée du trait de côte sur une distance d'environ 200 m. L'avancée mesurée est de $2,87 \pm 1,09$ m pour la période 2003-2004 et de $2,16 \pm 0,65$ m pour la période 2003-2006. Elle semble résulter du dépôt de 236 ± 177 m³ sur la plage à cet endroit. L'apport sédimentaire responsable de l'engraissement de la plage à cet endroit ainsi que de la progradation du trait de côte pourrait avoir été fourni, au moins partiellement, par l'érosion des talus situés sur l'arrière-plage. Le MNVE montre en effet l'existence de petites zones d'érosion dans la zone des talus (figure 5.45). La plus significative est une zone de 22 m de long et de 11 m de large correspondant à un volume érodé de -231 ± 117 m³. Cependant, la zone de dépôt responsable de l'avancée du trait de côte s'étend au nord-est de la position de ce glissement, soit en amont de la dérive littorale, et ne peut donc expliquer qu'imparfaitement cet engraissement. D'autres zones de plus faible érosion doivent également être présentes au niveau des talus mais sans pouvoir être détectées par LiDAR.

Enfin, une seconde zone d'accrétion est également observée sur la plage entre 2003 et 2004 dans la partie nord-est du site. La progradation du trait de côte y est estimé à $4,33 \pm 0,97$ m et le volume déposé à 293 ± 228 m³. Une fois encore, cet engraissement de la plage semble devoir être lié à l'érosion des talus situés sur l'arrière-plage, car une zone de forte érosion de 70 m de long, ayant entraîné un recul de 2,5 m des talus et totalisant -150 ± 70 m³, est visible sur les modèles de terrain (figure 5.45). Pour la période 2003-2006 par contre, c'est un retrait du trait de côte de $-2,74 \pm 0,80$ m qui est mesuré dans ce secteur, soit un retrait total de $-7,07 \pm 1,77$ m en l'espace de seulement deux ans (2004-2006).

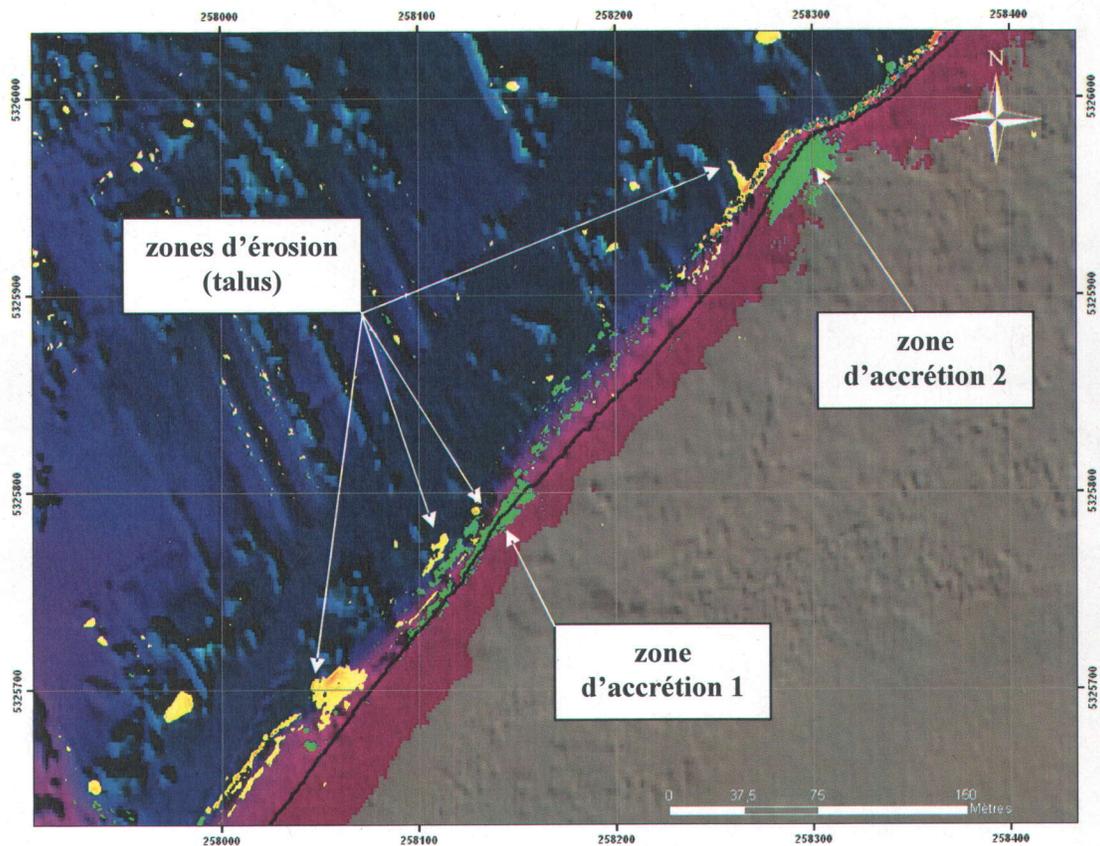


Figure 5.45 – Variations 2003-2004 au niveau des talus de Saint-Godefroi. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Le trait blanc représente le trait de côte de 2003.*

6. INTERPRÉTATION

6.1 Secteur de Saint-Siméon et Bonaventure

Les changements observés entre 2003, 2004 et 2006 sur les littoraux de ces deux secteurs d'étude révèlent une grande variabilité spatiale des processus érosifs côtiers. Ainsi, loin de répondre aux forçage hydrodynamiques locaux de façon homogène, les côtes de Saint-Siméon et de Bonaventure montrent une alternance de zones d'érosion et d'accrétion du trait de côte de faibles dimensions trahissant l'existence de nombreuses petites cellules littorales qui interagissent faiblement entre elles. La taille de ces cellules littorales est généralement comprise entre une centaine de mètres et un kilomètre, rarement plus. Cette fragmentation de la circulation littorale est à mettre, en majeure partie, sur le compte des nombreux ouvrages anthropiques transversaux (quais, jetées, épis d'arrêt) qui parsèment le rivage et perturbent le transport sédimentaire local ainsi que l'hydrodynamisme côtier. À cela s'ajoute la présence de plusieurs cours d'eau et rivières dont les apports terrigènes conduisent à la mise en place de petits deltas sur les plages qui modifient également la dynamique côtière locale des plages adjacentes.

De façon plus détaillée, les changements topographiques présentés aux sections §5.1 et §5.2 peuvent être interprétés comme suit:

- Dans la partie la plus orientale du secteur de Saint-Siméon, la plage du Ruisseau-Leblanc peut être considérée comme stable ou en accrétion. Comme cela a déjà été mentionné précédemment (§5.1.1), cette plage résulte de l'arrêt, par la jetée ouest du havre de pêche, du transport sédimentaire côtier qui se produit sous l'action des houles dominantes de secteur ouest (plus de 40 % du temps selon *Poirier, 2002*). Cette tendance est confirmée par les relevés LiDAR qui montrent un engraissement net de la plage de $4181 \pm 4486 \text{ m}^3$ entre 2003 et 2006, ce qui correspond à une accrétion annuelle de $1394 \text{ m}^3 \pm 1495 \text{ m}^3$. Cependant, comme les seconds termes de ces valeurs l'indiquent, l'imprécision de mesure des volumes calculés dans cette zone est très proche, voire supérieure, aux volumes obtenus. De ce fait, il est par conséquent très difficile d'affirmer avec certitude que cette plage est bien en accrétion. D'après les imprécisions de mesure

déterminées, les variations volumiques mesurées peuvent tout aussi bien être considérées comme non significatives, et la plage du Ruisseau-Leblanc pourrait donc être définie comme présentant un profil stable, sans tendance nette à l'accrétion ou à l'érosion.

Il faut cependant remarquer que, si les changements observés entre 2003 et 2006 peuvent difficilement être considérés comme significatifs en raison de la plus grande imprécision du mode employé pour effectuer les relevés bathymétriques dans ce secteur en 2006 (cf. § 4.1.3.1), il n'en va pas de même des variations mesurées entre 2003 et 2004. Ainsi, la tendance nette à l'érosion constatée le long de cette plage pour cette période est tout à fait significative. Le volume net perdu au cours de cette seule année a été estimé à $-781 \pm 322 \text{ m}^3$, ce qui a occasionné un recul du trait de côte de $-3,5 \pm 1,7 \text{ m}$ et une plus grande variabilité de la pente de la plage qui passe de $7,3^\circ \pm 0,7^\circ$ à $7,2^\circ \pm 1,2^\circ$. Néanmoins, ce comportement n'est pas interprété comme une tendance érosive à long terme de la plage mais comme un ajustement à court terme du profil de la plage en réaction à des conditions hydrodynamiques particulières. Il faut en effet noter que lors du relevé de 2004, les conditions météorologiques se caractérisaient par la présence d'un système dépressionnaire produisant de forts vents du SO au niveau de la zone d'étude ainsi que des houles d'environ 50 cm à proximité des côtes. Ces conditions de tempête sont connues pour provoquer une redistribution des sédiments le long du profil des plages qui se traduit par une érosion de la plage aérienne, un recul du trait de côte, une réduction de la pente ainsi que la formation d'une barre d'avant-côte au niveau de l'avant-plage sous-marine (Komar, 1976 ; Dean, 1991). Le profil de la plage reprend ensuite sa morphologie d'origine lorsque les forçages hydrodynamiques propres aux conditions de tempête disparaissent. Cette interprétation est confirmée par deux observations:

- Les changements mesurés sur la plage du Ruisseau-Leblanc entre 2003 et 2006 indiquent que la plage a récupéré, en 2006, un profil proche de celui qu'elle avait en 2003. Le retrait annuel moyen du trait de côte mesuré pour cette période n'est plus que de $-1,13 \pm 0,73 \text{ m}$ (soit une valeur non significative) contre $-3,5 \pm 1,7 \text{ m}$ en 2004 et le volume perdu n'est plus estimé qu'à -668 m^3 , ce qui indique un gain d'environ 500 m^3 depuis la tempête de mai 2004.

➤ Les changements mesurés au niveau de l'avant-plage située immédiatement à l'est du havre de pêche indiquent eux aussi une accrétion sur le bas de plage en 2004 ($718 \pm 578 \text{ m}^3$), trahissant ainsi le même réajustement de profil aux conditions hydrodynamiques de tempête qui caractérisaient cette année de relevé. Par contre, en 2006, cette zone présente une forte érosion de $-4341 \pm 2315 \text{ m}^3$ de sédiments qui peut s'expliquer par la reprise du transport sédimentaire côtier à cet endroit. Les pertes ne pouvant pas être compensées par les apports provenant de l'amont, celui-ci étant bloqué par la présence de la jetée ouest du port, il en résulte une érosion nette à cet endroit. Il est d'ailleurs intéressant de noter que l'engraissement observé au niveau de la plage du Ruisseau-Leblanc ($+4849 \text{ m}^3$), bien qu'entaché d'une grande imprécision, correspond presque exactement à la perte sédimentaire mesurée en aval du havre de pêche (-4341 m^3) de sorte que sans cet obstacle à la dérive littorale, cette portion de côte devrait être en équilibre sédimentaire.

- La zone de talus qui succède à cette section, et qui constitue l'essentiel de la côte du secteur de Saint-Siméon, présente un trait de côte stable couplé à une érosion verticale de la plage de faible amplitude et localisée. Cette stabilité ne correspond cependant pas à un caractère naturel de la côte et n'est due qu'à la présence de nombreux ouvrages de protection situés au pied des talus meubles qui constituent l'arrière-plage de ce secteur et qui les protègent de l'érosion marine. Malgré cela, de nombreuses zones d'érosion ponctuelles ont pu être mises en évidence dans les talus entre 2003 et 2004 (annexe 5). Ces zones sont généralement de faibles dimensions, entre 10 et 15 m, et correspondent à des sections où les pentes se sont accrues à la suite d'effondrements ou de glissements. Une de ces zones se trouve à l'extrémité est d'un enrochement qui protège une section de talus sur une distance de 70 m, entre la route Roussel et la route Poirier (figure 6.1). Cette zone de 20 m de long correspond à une érosion du talus de $-338 \pm 65 \text{ m}^3$ sous l'effet de la diffraction des houles par l'extrémité de l'enrochement ("effet de pointe").

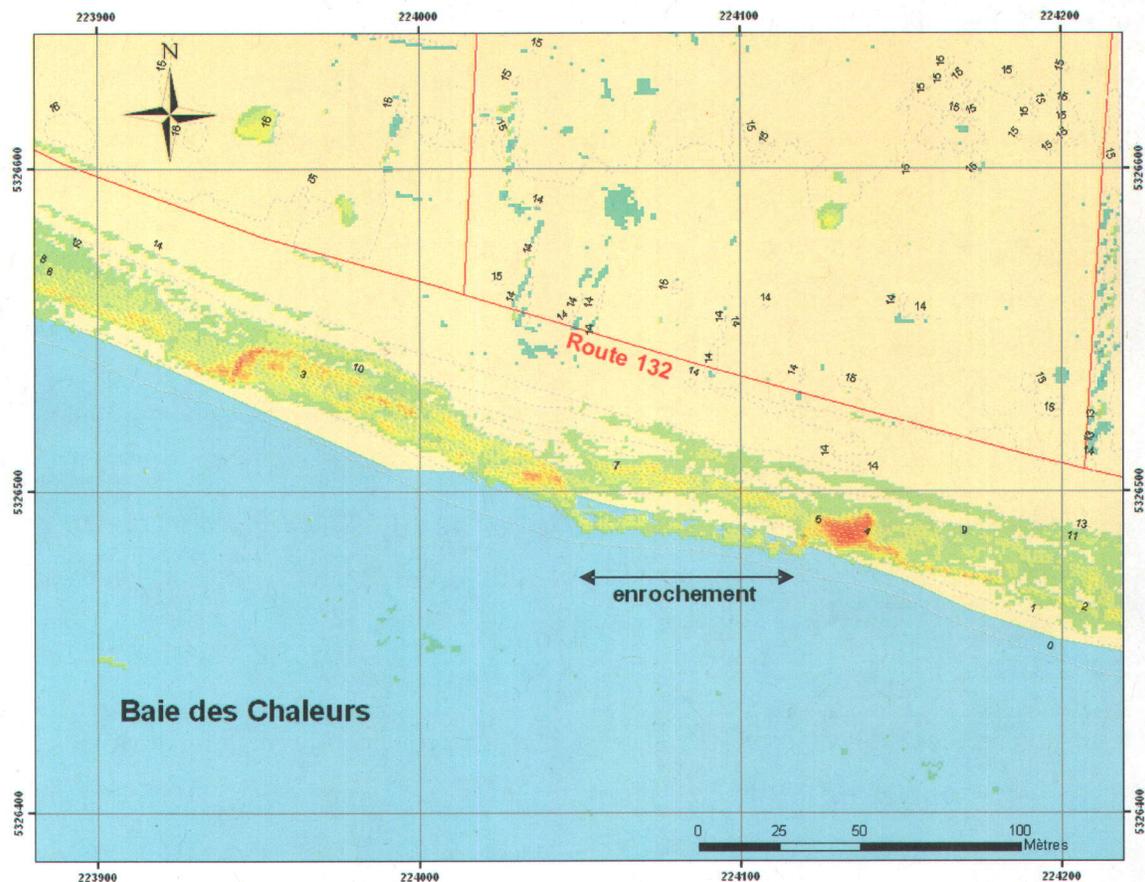


Figure 6.1 – Zones d'érosion dans les talus de Saint-Siméon, période 2003-2004. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les courbes pointillées représentent les courbes d'élévation par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

Au niveau des plages, les accrétions observées entre 2003 et 2004 correspondent une fois de plus à des réajustements sédimentaires à court terme le long du profil de la plage en réponse aux conditions de tempête de 2004. Entre 2003 et 2006, une légère érosion de $-411 \pm 219 \text{ m}^3$ est observée au niveau de l'avant-plage. Cette valeur peut être comparée avec les résultats obtenus par Long (2006) pour ce site à partir de profils topographiques de plage. Entre 2001 et 2004, le volume total déplacé sur le bas de plage est ainsi estimé à -316 m^3 (zones A, B et C de Long, correspondant respectivement à la zone de talus comprise entre l'avenue du Viaduc et la rue du Parc (stations MTQ 24 à 28), la zone en face de la rue du Parc (station MTQ 29) et la zone comprise entre la rue Rioux et la route

Poirier (stations MTQ 30 à 32)). Par contre, pour la même période, une perte estimée à -14158 m^3 est déterminée pour la plage et le haut de plage (Long, 2006) alors que la présente étude ne montre aucun changement significatif pour cette portion de plage.

Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce désaccord entre les résultats des deux études:

- Les pertes sédimentaires sont de faible amplitude mais réparties sur toute la longueur du profil de la plage. Dans ce cas, les variations verticales se situent en-deçà de la limite de détection des LiDAR aéroportés topographiques (15 cm) et bathymétriques (25 cm) et ne peuvent donc être mesurées, entraînant une sous-estimation des stocks sédimentaires déplacés.
- La méthode de calcul utilisée par Long se base sur une interpolation spatiale des valeurs obtenues le long des profils de plage. Autrement dit, les volumes calculés reposent sur l'hypothèse que les variations mesurées le long d'un profil sont constantes sur la partie de plage située entre ce profil et le suivant, soit environ 250 m. Or, les MNVE de cette étude tendent à infirmer cette hypothèse en révélant que les zones d'érosion ou d'accrétion présentent une grande variabilité spatiale ainsi qu'un caractère fortement localisé, en particulier dans la zone des talus où leur taille dépasse rarement 100 m latéralement. Il semble donc probable que les volumes déterminés par Long dans son étude aient été surestimés par la méthode de calcul employée.

Au vu de ces deux explications, il apparaît cependant plus probable que la divergence entre les résultats fournis par la présente étude et celle de Long soit le résultat d'une combinaison de ces deux facteurs, à savoir à la fois une sous-estimation des volumes mesurés par LiDAR et une sur-estimation des volumes calculés par profils de plage. Par conséquent, il est possible d'affirmer, au vu de ces résultats, que les plages situées au pied des talus subissent une érosion verticale pouvant être estimée entre environ 100 m^3 par an (cette étude) et 3500 m^3 par an (Long, 2006).

Cette érosion est à mettre sur le compte des faibles apports sédimentaires qui caractérisent ce secteur. Ainsi, l'absence d'apports sédimentaires fluviaux importants dans cette zone, l'empierrement des talus à des fins protectives qui réduit considérablement les apports sédimentaires par érosion de l'arrière-plage ainsi que la présence d'herbiers de zostères marines sur l'avant-côte qui contribue au piégeage des sédiments fins apportés depuis la plage lors des tempêtes (Long, 2006) sont autant d'éléments qui expliquent et contribuent à l'amaigrissement des plages qui bordent les talus de ce secteur.

- La flèche d'embouchure qui s'étend devant de la rivière Petite-Bonaventure a subi de nombreuses modifications durant la période de relevés. De façon générale, elle se caractérise par une érosion de son trait de côte de $-1,2 \pm 1,8$ m entre 2003 et 2004 et de $-2,6 \pm 3,7$ m entre 2003 et 2006. La partie exposée aux houles marines a ainsi perdu respectivement -1773 ± 1250 m³ et -8234 ± 4337 m³ durant ces deux intervalles de temps (figures 6.2 et 6.3). Cependant, une accumulation de 2757 ± 717 m³ et de 7460 ± 1612 m³ s'est produite dans le même temps au niveau de la partie distale de la flèche, de sorte que le bilan sédimentaire global net de la flèche n'est en déficit que de -774 m³ pour la période 2003-2006 et affiche même un gain de 984 m³ pour la période 2003-2004.

Ces résultats sont conformes aux mesures de Long (2006) dans ce secteur. Ce dernier observait ainsi un dépôt de 1124 m³ sur la plage et une érosion de -1150 m³ sur le bas de plage pour un bilan sédimentaire net de seulement -26 m³. Il faut cependant souligner que les résultats de Long ne se basaient que sur l'analyse de deux profils topographiques localisés au niveau de la partie proximale de la flèche. Aucun profil n'avait été réalisé sur la flèche proprement dite. Ces résultats témoignent néanmoins d'un bilan sédimentaire stable ou en très léger déficit.

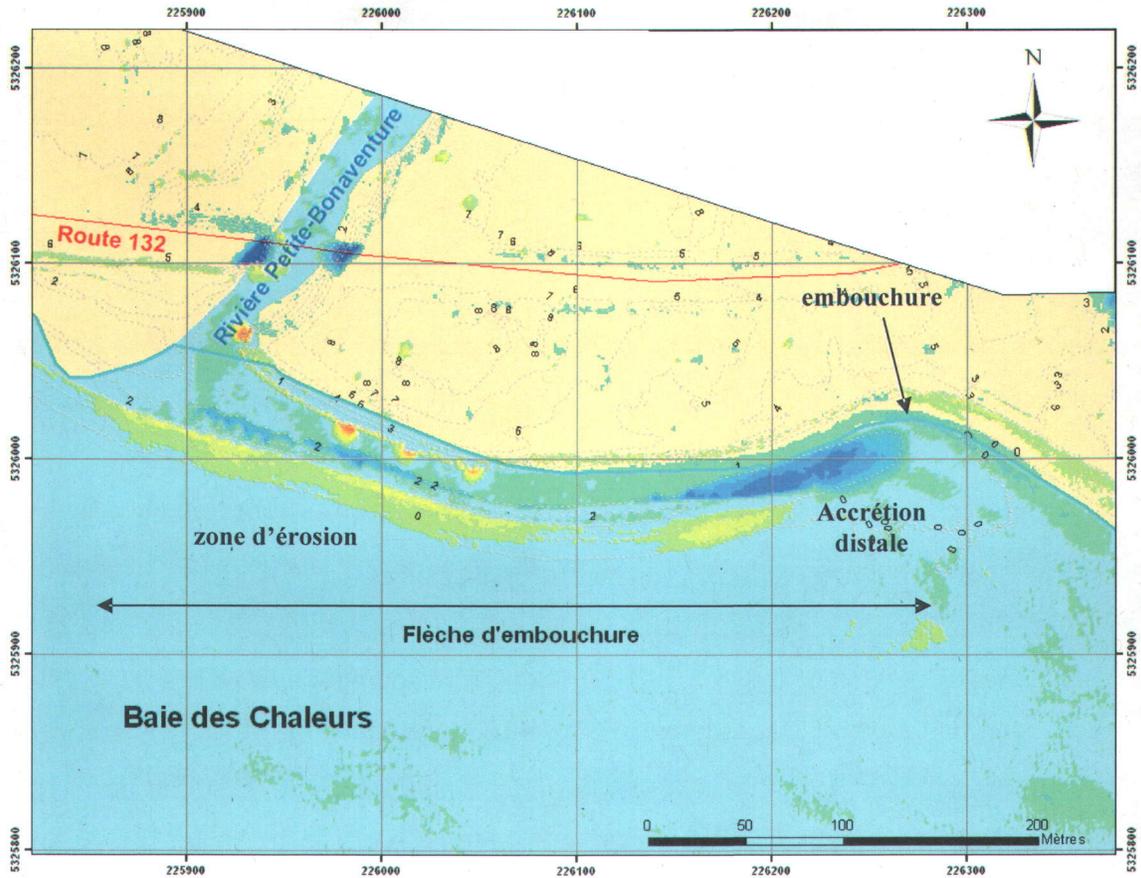


Figure 6.2 – Variations 2003-2004 de la flèche d'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure, secteur de Saint-Siméon. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion.

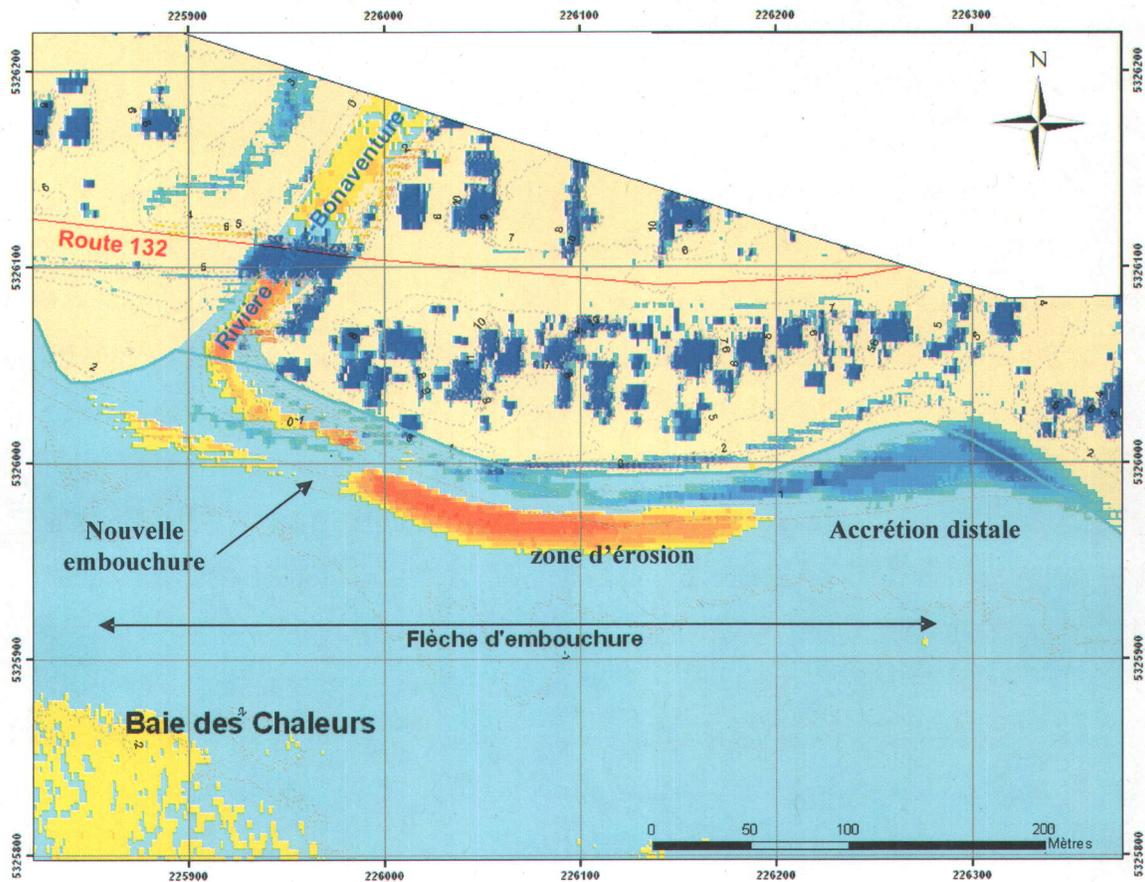


Figure 6.3 – Variations 2003-2006 de la flèche d'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure, secteur de Saint-Siméon. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion.

Les résultats de cette étude confirment donc que le stock sédimentaire constituant la flèche d'embouchure reste relativement stable dans le temps et que les variations importantes observées le long de cette portion de côte ne correspondent pas à une perte nette du système, mais plutôt à une redistribution des sédiments le long de la structure sédimentaire. Ainsi, l'érosion de la plage marine de la flèche a alimenté la dérive littorale locale et a contribué au développement de la partie distale de la flèche. Comme déjà indiqué dans la section § 5.1.3, cette partie distale a ainsi progradé en direction de l'est sur 90 m entre 2003 et 2004, et sur 50 m supplémentaire entre 2004 et 2006 jusqu'à se rattacher à la plage du parc de l'île qui délimite la zone du marais de Saint-Siméon.

L'évolution morphologique de la flèche d'embouchure a eu plusieurs conséquences sur la dynamique de l'embouchure elle-même et des plages adjacentes:

- L'extension de la partie distale de la flèche a eu comme première conséquence de réduire la section hydraulique du chenal d'embouchure, par lequel s'écoulait les eaux de la rivière Petite-Bonaventure. Ce resserrement du chenal a eu pour effet d'accroître la vitesse des courants de sortie et d'accentuer ainsi l'érosion le long du segment de plage situé immédiatement à l'est de l'embouchure. Une perte de $-1490 \pm 1150 \text{ m}^3$ de sédiments a ainsi pu être mesurée le long de cette zone pour la période 2003-2004 et le recul du trait de côte y a atteint $-3,3 \pm 2,1 \text{ m}$. Cependant, le rattachement de la flèche à la plage adjacente et l'abandon de cette embouchure semblent avoir mis fin à l'érosion de ce segment de côte.
- Le rattachement de la partie distale de la flèche à la côte a eu également pour conséquence d'obstruer complètement l'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure, forçant ainsi les eaux fluviales à se frayer un autre chemin à travers la barrière nouvellement formée. Cette nouvelle embouchure est apparue environ 250 m à l'ouest de l'embouchure abandonnée. Ce faisant, les apports sédimentaires fluviaux ont été déviés et ont cessé d'alimenter la plage marine du marais côtier de Saint-Siméon ainsi que le système de bancs sablo-graveleux qui s'était développé sur l'avant-plage à une distance de la côte comprise entre 70 m et 110 m (figure 5.7, page 41). En contrepartie, ces apports ont contribué à l'alimentation d'un système de bancs sableux plus loin sur l'avant-plage, entre 130 m et 230 m de distance. Bien que les sédiments stockés dans ces hauts-fonds représentent une perte estimée à 9750 m^3 pour la plage adjacente du marais de Saint-Siméon et risque donc d'accroître les problèmes liés à l'érosion côtière dans ce secteur, le système de bancs sableux qui se développe sur l'avant-côte contribue également, dans une certaine mesure, à la protection de ce même secteur en favorisant la dissipation de l'énergie des houles incidentes via le déferlement des vagues.

Au vu de ces divers éléments, il apparaît donc possible de conclure que la zone de l'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure, bien qu'ayant été sujette à d'importants changements morphologiques au cours de la période de relevés, présente un caractère relativement stable en terme de bilan sédimentaire. La flèche littorale joue également un rôle important dans la protection des terrains urbanisés qui constituent l'arrière-plage à cet endroit. Cette protection reste cependant limitée en cas de tempêtes en raison de la faible élévation de la flèche (2,3 m au maximum) et comme en témoignent les dépôts de débordement de tempête visibles dans le chenal de la rivière (figure 5.6, page 40).

- La plage du marais de Saint-Siméon adjacente à l'embouchure se caractérise, pour sa part, par une tendance à l'érosion, bien que les valeurs de retrait du trait de côte déterminées par LiDAR ne puissent pas être considérées comme significatives. La perte nette de sédiments sur cette plage est cependant estimée à -2028 m^3 entre 2003 et 2004, et entre -760 m^3 et -1100 m^3 entre 2003 et 2006. L'essentiel de cette érosion se concentre sur deux secteurs de la plage: la partie la plus proche de l'embouchure, pour les raisons déjà explicitées plus haut, et la portion de plage qui jouxte l'épi d'arrêt au niveau de la pointe du marais. L'accrétion constatée sur la partie centrale de la plage s'explique, pour sa part, par la présence des vestiges d'un ancien quai de pêche sur l'avant-plage de cette zone (figures 5.7 et 5.8). Ces vestiges se présentent sous la forme d'un affleurement de graviers s'étendant perpendiculairement au rivage sur une distance de 70 m et présentant une élévation de 20 à 30 cm par rapports aux fonds environnants. Cette structure agit comme un épi d'arrêt et induit une accumulation sédimentaire en amont de la dérive littorale, c'est à dire à l'ouest de l'obstacle dans ce cas précis. Cette accumulation était estimée à $340 \pm 272 \text{ m}^3$ entre 2003 et 2004. Par contre aucune accumulation significative ne peut être observée en 2006. Cela peut être une conséquence secondaire de la migration de l'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure, discutée précédemment. Ainsi, entre 2003 et 2004, l'embouchure alimentait toujours le transport sédimentaire littoral de la plage en sédiments fluviaux qui venaient s'accumuler le long de cet ancien quai. En 2006 cependant, les apports s'étaient considérablement réduits en raison de la migration du chenal d'embouchure de sorte que l'accrétion n'est plus mesurable au niveau de l'ancien quai.

L'interruption du transport sédimentaire côtier par cet ancien quai doit expliquer aussi en grande partie les érosions plus importantes de $-878 \pm 684 \text{ m}^3$ et $-1100 \pm 724 \text{ m}^3$ mesurées en aval, au niveau de la plage de graviers qui forme la partie terminale de ce littoral.

- En ce qui concerne le marais de Saint-Siméon proprement dit, le trait de côte intérieur de la lagune est stable, avec même une légère tendance à l'accrétion au niveau des embouchures des petits cours d'eau Gallagher et Bujold. Cette stabilité s'explique par l'aspect très protégé du marais et les conditions hydrodynamiques de très faible énergie qui en résultent. Les changements les plus importants qui ont pu être observés dans ce marais côtier se sont produits au niveau de la flèche littorale de graviers qui s'étend depuis la pointe du marais de Saint-Siméon en direction du nord-est et protège l'intérieur du marais de l'action des houles marines. Cette barrière de graviers se caractérise ainsi par une alternance de segments en érosion et en accrétion, identifiés respectivement de E_1 à E_3 et de A_1 à A_4 sur la figure 5.9 de la section § 5.1.4. Lorsqu'on s'intéresse au bilan sédimentaire global de cette structure sédimentaire côtière (tableau VIII), on constate néanmoins que ce bilan est positif et que la flèche est en légère accrétion, quelle que soit la période considérée. Le gain est ainsi estimé à 905 m^3 entre 2003 et 2004, et à 1042 m^3 entre 2003 et 2006, cette dernière valeur indiquant que l'essentiel de l'accrétion s'est produit durant la première année de relevé et que la barre est demeurée stable depuis lors.

Tableau VIII – Bilan sédimentaire de la flèche littorale de gravier du marais de Saint-Siméon. *Les valeurs positives correspondent à une accrétion et les valeurs négatives à une érosion.*

<i>Zones</i>	<i>Volume (m³) 2003-2004</i>	<i>Volume (m³) 2003-2006</i>
E_1	-413	-1237
E_2	-1729	-2186
E_3	-1008	-966
A_1	1187	2093
A_2	278	741
A_3	1265	1118
A_4	1325	1479
Total	905	1042

Les variations observées le long de la flèche peuvent donc être interprétées comme les signes de:

- Une transgression de la barrière en direction du marais, le volume accumulé en A_4 correspondant au volume érodé en E_2 et le volume accumulé en A_3 correspondant en majeure partie au volume érodé en E_3 . Ces déplacements sédimentaires trahissent donc bien une migration de la barrière sur la vasière du marais intertidal côtier. Cette migration ne se révèle cependant pas constante dans le temps puisque l'essentiel de cette transgression s'est produite entre 2003 et 2004. Elle apparaît donc plutôt contrôlée par des phénomènes hydrodynamiques épisodiques présentant une période de récurrence relativement longue, d'ordre annuel ou pluri-annuel. Compte tenu de la configuration de la côte à cet endroit, il semble probable que l'agent hydrodynamique responsable de cette transgression marine soit les fortes houles de tempête originaires du secteur est. Ces houles présentent une fréquence d'occurrence plus faible que celles en provenance du secteur ouest à sud-ouest mais peuvent générer des vagues de 2,5 m d'amplitude (Poirier, 2002), capables de provoquer des débordements de tempête au niveau de cette flèche dont l'élévation maximale ne dépasse pas 2,1 m et de la faire prograder sur la vasière.
- Une extension de 12 m de la barrière en direction du nord-est. Cette extension s'est accompagnée d'une redistribution du sédiment le long de la barrière comme en témoigne la zone d'accrétion A_2 , qui provient de la fraction de sédiments érodée en E_2 qui n'a pas migré en A_4 , ainsi que le volume de la zone A_3 , supérieur au volume érodé en E_3 et qui a donc dû recevoir, elle aussi, des apports provenant de la zone E_2 .

- La zone des talus du secteur de Bonaventure, tout comme celle de Saint-Siméon, est caractérisée par un trait de côte artificiellement stabilisé grâce à la présence d'enrochements au niveau du pied des talus. Les variations mesurées lors des relevés aéroportés LiDAR se révèlent ainsi non significatives sur la majeure partie de la côte, avec des

valeurs de l'ordre de $0,46 \pm 0,88$ m et $0,96 \pm 1,84$ m respectivement pour les périodes 2003-2004 et 2003-2006. Et tout comme à Saint-Siméon, l'avant-plage présente des dépôts sédimentaire localisés totalisant 2842 ± 2341 m³ et pouvant s'expliquer par une réponse temporaire du profil de plage aux conditions de tempête qui régnaient lors des relevés de 2004. Les changements les plus significatifs se sont produits aux abords des ruisseaux qui débouchent dans ce secteur, à savoir les ruisseaux Arsenault, Cayouette et Gauvreau. Les segments de plage situés au niveau des embouchures des deux premiers ruisseaux subissent ainsi une progradation marquée de leur trait de côte ainsi qu'une accrétion relativement faible de la plage et de la basse plage. Cette accrétion est estimée respectivement à 55 ± 44 m³ pour le premier et à 72 ± 58 m³ pour le second, témoignant de la très faible contribution de ces ruisseaux au transport sédimentaire littoral. Néanmoins, ces apports permettent malgré tout le développement, sur la plage et la basse plage, de deltas de petites dimensions (~20 m) qui contribuent à la stabilisation des berges situées dans les environs immédiats des embouchures. Les mesures effectuées au niveau de l'embouchure du troisième ruisseau (ruisseau Gauvreau) apparaissent, pour leur part, plus surprenantes car une érosion localisée de -409 ± 253 m³, ainsi qu'un recul de $-3,01 \pm 2,61$ m du trait de côte, est observée à cet endroit. Cette tendance était cependant déjà constatée par Long (2006) puisqu'une perte totale de -2623 m³ était mesurée le long de cette zone (zone I, d'après Long, 2006) entre 2001 et 2004. Ces résultats tendraient donc à démontrer que les apports sédimentaires de ce ruisseau sont extrêmement limités, voire inexistant, au point de ne même pas permettre le maintien d'un système deltaïque à l'embouchure comme cela est le cas pour les deux autres ruisseaux locaux.

- La flèche occidentale du barachois de Bonaventure constitue l'aboutissement naturel du transport sédimentaire littoral qui longe les talus d'ouest en est. De ce fait, le bilan sédimentaire global de cette zone indique une légère accrétion du barachois, avec un gain de 894 m³ entre 2003 et 2004. Pour la période 2003-2006, la variation volumique est estimée entre -546 m³ et 921 m³ compte tenu des imprécisions de mesure un peu plus importantes du système SHOALS. Ces résultats indiquent donc une stabilité ou une faible accrétion de la flèche durant les périodes de relevés considérées.

Une fois de plus, ces valeurs apparaissent en accord avec les résultats obtenus par Long (2006) dans son étude, puisque cette zone (zone J) était présentée comme subissant une légère accrétion, celle-ci étant estimée à 945 m³ entre 2001 et 2004.

Cependant, le transport sédimentaire côtier qui se déroule le long de la flèche occidentale du barchois est perturbé par la présence, sur l'avant-côte, des restes d'anciens quais de pêche, similaires à celui déjà identifié au niveau de la plage du marais de Saint-Siméon. Ces vestiges se présentent, une fois encore, sous la forme de barres graveleuses de 20 à 30 cm de hauteur qui s'étirent perpendiculairement à la côte sur des distances de 100 m à 200 m et qui constituent autant d'obstacles à la dérive littorale. Il en résulte des zones localisées d'accrétion en amont (ouest) et des zones localisées d'érosion en aval (est) de chacun de ces obstacles. C'est notamment le cas au niveau de l'ancien quai situé à 430 m à l'ouest de la jetée ouest du port de Bonaventure, où une progradation du trait de côte, pouvant atteindre localement 5,2 m (2004) et 6,8 m (2006), est visible en amont du quai tandis qu'un recul de -5,29 m (2004) et -7,55 m (2006) est constaté en aval (figure 5.13).

- Enfin, le cordon oriental du barchois de Bonaventure présente un bilan sédimentaire net en érosion avec une perte estimée à -895 m³ entre 2003 et 2004, et à -803 m³ pour la période 2003-2006 (tableau IX). Cette tendance présente cependant une grande variabilité spatiale le long de la structure sédimentaire, des zones localisées d'accrétion alternant parfois avec des zones de forte érosion. Pour une meilleure compréhension, la flèche a ainsi été subdivisée en 6 grandes zones présentant des évolutions morphologiques individuelles relativement homogènes, et les résultats ont été présentés en fonction de ce découpage (§ 5.2.3, figure 5.17). De façon synthétique, il est néanmoins possible de considérer les zones Z₁, Z₂, Z₃ et Z₄ comme faisant partie d'une seule et même cellule littorale dont les variations reflètent des transports sédimentaires transversaux (*across-shore*) et longitu-dinaux (*alongshore*). Ainsi, l'accumulation de 655 m³ observées en 2004 sur la plage de la zone Z₂ peut s'expliquer par l'érosion de la haute plage en réponse aux conditions de tempête de 2004 (figure 5.18). De même, l'érosion de la plage du secteur Z₃ est compensée en grande partie par un engraissement de la haute plage qui correspond respectivement à 56 % et 84 % du volume érodé sur la plage pendant les périodes 2003-2004 et 2003-2006.

Tableau IX – Bilan sédimentaire de la flèche orientale du barachois de Bonaventure. *Les valeurs positives correspondent à une accrétion et les valeurs négatives à une érosion.*

Zones	Volume (m ³) 2003-2004	Volume (m ³) 2003-2006
Z ₁	-995	-517
Z ₂	655	310
Z ₃ (plage)	-3435	-2709
Z ₃ (haute plage)	1921	2266
Z ₄	911	949
Z ₅	-593	-108
Z ₆	-1380	-994
Z ₆ (flèche)	2021	---
Total	-895	-803

En outre, l'accumulation observée en Z₄ résulte une fois encore de l'arrêt du transport sédimentaire littoral local, orienté dans cette zone en direction du nord-ouest au contraire du reste du secteur, par les vestiges d'un ancien quai de pêche qui s'étend à cet endroit sur 140 m perpendiculairement au rivage. Cette accumulation de 911 m³ en 2004 et 949 m³ en 2006 provient donc en grande partie de l'érosion des zones adjacentes, et notamment des zones Z₁, Z₂ et Z₃. Ainsi, un bilan sédimentaire effectué sur ces 4 seules zones révèle une perte de -943 m³ entre 2003 et 2004 mais un gain d'environ 300 m³ pour la période 2003-2006, ce qui semble indiquer un caractère relativement stable de cette portion de la flèche à moyen terme. En ce qui concerne la perte qui reste constatée entre Z₁ et Z₄, l'explication est à chercher, une fois encore, du côté des conditions hydrodynamiques particulières qui caractérisaient les relevés de 2004. Celles-ci induisaient en effet un réajustement du profil de la plage tel que décrit précédemment qui a conduit une partie des sédiments présents sur la plage à migrer sur la basse plage et à alimenter un système de barres d'avant-côte. Il est d'ailleurs intéressant de remarquer que les relevés bathymétriques laser de 2006 ont révélés l'existence d'un système analogue de barres d'avant-côte sur l'avant-plage des zones Z₁ à Z₄. Ces barres, qui sont au nombre de 9 pouvant être clairement identifiées, se présentent sous un angle oblique de 30° à 45° par

rapport à la côte (300° à 315° N). Elles ont une élévation comprise entre 10 cm et 30 cm, une longueur d'onde de 45 m et s'étirent sur l'avant-plage sur une distance moyenne de 146 ± 60 m jusqu'à une profondeur de $-2,5$ m. Ces structures ne sont cependant pas génétiquement semblables aux barres d'avant-côte de tempête et sont interprétées comme résultant d'un transport sédimentaire littoral qui se déroule sur la plage sous-marine de la flèche. L'orientation de ces barres d'avant-côte obliques est d'ailleurs en accord avec la direction de la dérive littorale dans ce secteur, orientée du sud-est vers le nord-ouest.

C'est au niveau de la partie distale de la flèche du barachois (zones Z_5 et Z_6) que ce système semble présenter le déficit le plus net avec une perte respective de -1973 m³ et -1102 m³ pour 2003-2004 et 2003-2006. Cependant, cette perte est compensée en 2004 par la flèche secondaire d'embouchure qui s'est développée dans l'axe du chenal sous l'effet des courants de jusant de la rivière Bonaventure. Cette nouvelle structure sédimentaire, qui s'étire sur une longueur de 120 m totalise 2021 m³, soit un volume sédimentaire équivalant presque exactement au volume érodé au niveau de la partie distale de la flèche principale du barachois. Cette structure n'est cependant plus présente sur les relevés de 2006, attestant ainsi du caractère éphémère et transitoire du phénomène.

- Enfin, les cartes morpho-sédimentaires de Cottin (2008) et Collin (2009) permettent de décrire les faciès sédimentaires et les environnements sous-marins caractérisant l'avant-côte des deux secteurs de Saint-Siméon et de Bonaventure. En ce qui concerne le premier secteur d'étude, seule la carte morpho-sédimentaire simplifiée de Cottin est disponible (figure A.4.3, annexe 4). Celle-ci montre une avant-côte dominée tout d'abord par les faciès sableux à proximité de la côte. La largeur de ce placage de sables varie de 60 m à 180 m entre Caplan et la fin des talus de Saint-Siméon, approximativement à hauteur de la route Poirier, et d'environ 240 m à 350 m au niveau de l'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure et du marais de Saint-Siméon. Plus au large, les sables semblent être remplacés par un faciès étroit et plus grossier de graviers et de galets s'étendant sur environ 50 m auquel succède rapidement le substratum rocheux à partir de l'isobathe de -4 m. La confusion est cependant importante entre ces trois faciès sédimentaires, la fiabilité de la carte de Cottin (2008) atteignant à peine 54,74 %. Cela peut s'expliquer en partie par l'hétérogénéité des faciès sédimentaires dans ce secteur, les sables étant

souvent mélangés aux graviers et aux galets à proximité des côtes tandis que le substratum rocheux est généralement recouvert d'un lag de transgression constitué de matériel grossier, tels que des graviers, des galets et des blocs, résultant de l'érosion directe du toit du substratum rocheux par les houles durant la dernière phase de remontée marine, entre -8000 et -4000 ans (Long, 2006). En outre, ces faciès sont généralement colonisés par des espèces végétales benthiques telles que les zostères marines (*Zostera marina*) pour les sables ou les fucus (*Fucus sp.*) et les laminaires (*Laminaria sp.*) pour les galets et les roches affleurantes (Long, 2006 ; Cottin, 2008). Cette carte présente néanmoins de nombreuses similitudes avec les cartes proposées par Long (2006).

En ce qui concerne le secteur de Bonaventure, la même séquence de trois faciès sédimentaires est proposée par Cottin (2008), bien que le faciès des sables se révèle plus présent et plus étendu qu'à Saint-Siméon dans la partie nord-ouest du site tandis que le faciès du substratum rocheux paraît dominer la zone du barchois de Bonaventure, dans la partie sud-est du site (figure A.3, annexe 4). Les cartes proposées par Collin (2009) semblent toutefois indiquer que la couverture des sables est beaucoup plus restreinte que ne le suggère Cottin dans son étude et que ce faciès est limité à une frange étroite du littorale (figure A.4.4, annexe 4). Le reste de l'avant-côte serait constitué essentiellement de graviers et de galets colonisés par diverses espèces de laminaires. La carte la plus détaillée du secteur proposée par Collin (figure A4.6, annexe 4) révèle néanmoins toute la complexité de la répartition des habitats benthiques de cette région, l'avant-côte sableuse, qui s'étend à l'est du marais côtier de Saint-Siméon sur une distance d'environ 250 m, étant ainsi caractérisée en réalité par une mosaïque d'herbiers de zostères marines et de zones de sables fins à moyens non végétées auxquels se mélangent des affleurements de graviers et de galets épars. Au-delà d'une distance de 250 m par rapport à la côte, les fonds sous-marins sont constitués d'une importante couverture de laminaires entrecoupée d'affleurements galets ou de sable fin à moyen.

6.2 Secteur de Paspébiac

Bien que les barachois de Gaspésie aient fait l'objet de très peu d'études, quelques travaux ont déjà été réalisés par le passé sur le barachois de Paspébiac afin de décrire sa dynamique et de quantifier les variations subies par les deux barrières sablo-graveleuses qui le composent. Ainsi, Bergeron (1995) montre que les taux d'avancées et de reculs du cordon ouest furent peu significatifs durant la période comprise entre 1963 et 1992. Le cordon ouest pour cette période se serait engraisé d'environ 1,1 m/an. Selon la même étude, le cordon est aurait reculé, pour sa part, de 181,3 m entre 1934 et 1992 (Renaud, 2001). Ropars (1997) note, quant à lui, un recul d'un peu plus de 200 m pour la même période en se basant sur l'étude d'une carte représentant l'évolution morphologique des passes de marée situées sur la barrière orientale du barachois.

Renaud (2001) apporte des données supplémentaires sur le recul historique de cette barrière en étendant la période à 1870-1934 grâce à une carte cadastrale du cordon ouest datant de 1870. La comparaison de cette carte cadastrale avec la carte proposée par Ropars (1997) montre qu'en 1870, le cordon oriental était situé encore plus au large et qu'il aurait subi un recul d'environ 100 m entre 1870 et 1934. Cela correspond à un retrait annuel de $-1,56$ m/a (Renaud, 2001). En outre, Renaud (2001) a également estimé le recul de la barrière est pour la période 1992-1998 en recourant à des mesures par profils de plage. Le retrait est ainsi estimé à 25 m pour cette période, ce qui correspond à un recul annuel moyen de $-4,17$ m/a.

Les résultats de la présente étude viennent donc compléter les données antérieures sur la dynamique du barachois de Paspébiac et se révèlent en accord avec les résultats précédents. Comme mentionné à la section § 5.3.3, le recul annuel moyen du cordon est, mesuré par laser aéroporté, est estimé à $-4,87 \pm 9,80$ m/a entre 2003 et 2004, et à $-3,65 \pm 2,97$ m/a pour la période 2003-2006. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles mesurées par Ropars et Renaud et tendent à confirmer l'accroissement du taux de recul au fil du temps mentionné par Renaud dans son étude (Tableau X).

Tableau X – Taux de recul annuel de la barrière orientale du barachois de Paspébiac (d'après Renaud, 2001).

<i>Période</i>	<i>Années</i>	<i>Recul moyen (m)</i>	<i>Taux moyen (m/a)</i>
1870-1934	59	100	-1,56
1934-1992	58	200	-3,45
1992-1998	6	25	-4,16
2003-2004	1	5	-4,87
2003-2006	3	11	-3,65

Ce recul serait ainsi passé de $-1,56$ m/a entre 1870 et 1934 à $-3,45$ m/a entre 1934 et 1992, pour dépasser -4 m/a après 1992. Les plus courts intervalles de temps utilisés pour calculer les taux annuels de retrait après 1992 introduisent néanmoins une plus grande incertitude sur la valeur réelle du taux annuel de retrait à long terme car ces périodes apparaissent trop courtes pour éliminer l'influence des variations morphologiques de courte période. Le taux mesuré pour la période 2003-2006 confirme ce problème puisque le retrait annuel moyen obtenu pour cette période est inférieur à ceux mesurés pour les périodes précédentes de 1992-1998 et 2003-2004 et à peine supérieur aux taux annuel moyen calculé entre 1934 et 1992. Un accroissement de la vitesse de recul de la barrière orientale du barachois ne fait cependant aucun doute.

En outre, la grande précision et surtout la grande densité de mesures laser obtenues au cours de ces relevés aériens ont permis de mettre en évidence l'existence d'une grande variabilité du taux de recul le long de la barrière. Ainsi, contrairement à ce que laissaient supposer les études précédentes, le cordon oriental du barachois ne répond pas aux forçages hydrodynamiques de la même manière sur toute sa longueur. Une grande différence d'évolution est ainsi observée entre la moitié nord du cordon, qui s'étend de la plage à Norbert jusqu'au chenal de marée de 2003, et la moitié sud comprise entre la passe et la partie distale du barachois.

Comme les résultats de cette étude le montrent (cf. § 5.3.3), le retrait annuel moyen de la partie nord de la barrière orientale est de $-9,02$ m/a entre 2003 et 2004, et de $-6,73$ m/a pour la période allant de 2003 à 2006. Cela correspond à un taux de recul près de 2 fois supérieur au taux moyen calculé pour l'ensemble de la barrière. Par contre, contrairement à ce qui est observé sur la moitié nord du cordon, la moitié sud subit une avancée moyenne du trait de côte de $2,73 \pm 3,04$ m/a et un engraissement de 5009 ± 3926 m³ entre 2003 et 2004. Une telle évolution est surprenante connaissant l'évolution passée de ce système côtier. Cependant, comme cela a déjà mentionné auparavant, les relevés réalisés en 2004 se sont déroulés au moment où un système dépressionnaire caractérisé par de forts vents du SO passait sur les zones d'étude. Les relevés LiDAR pour cette année révèlent ainsi que des houles de 50 cm étaient présentes le long des côtes de Paspébiac et atteignaient le barachois en provenance des secteurs SSO à SO (figure 6.4).

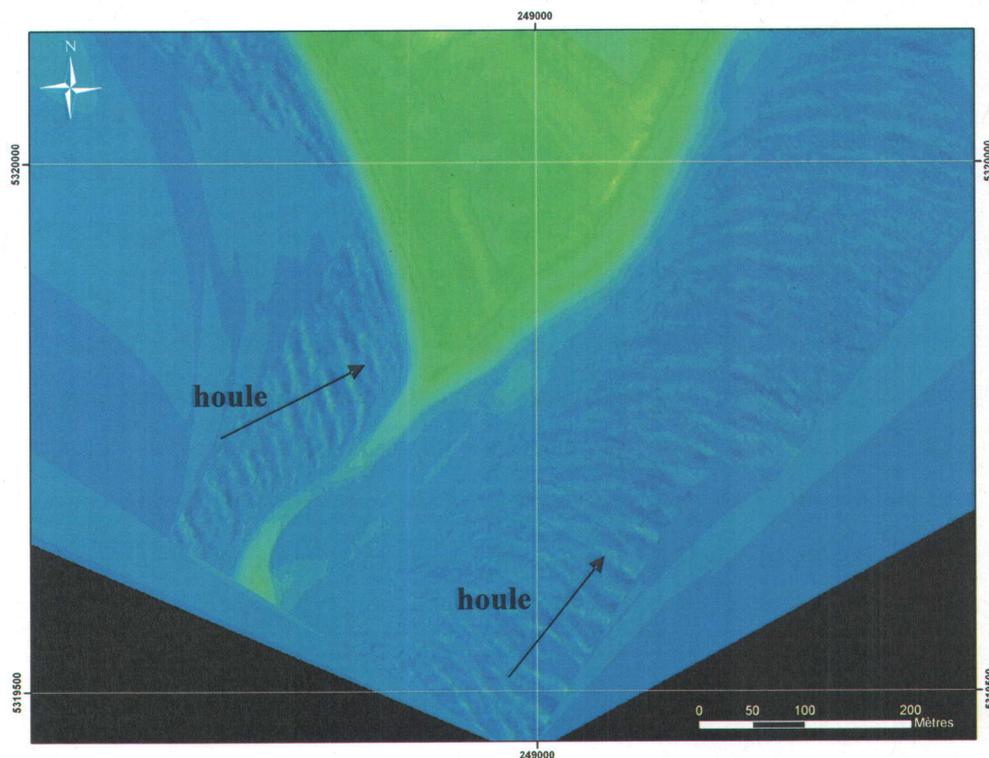


Figure 6.4 – Modèle numérique de terrain du secteur de la pointe du barachois de Paspébiac, 2004. Une houle de 50 cm d'amplitude et de 25 m de longueur d'onde provenant des secteurs sud-sud-ouest et sud-ouest est visible en mer. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).

Compte tenu des conditions météorologiques particulières au moment des relevés de 2004, les variations observées pour la période 2003-2004 sont interprétées comme suit: les houles de tempête provenant du sud-ouest ont attaqué le banc de sable constituant la pointe distale du barachois, conduisant à l'amaigrissement de $-8555 \pm 3757 \text{ m}^3$ observé dans cette zone. Le sédiment ainsi érodé par les vagues de tempête a ensuite commencé à être transporté le long du cordon oriental du barachois en direction du nord-est, c'est à dire à l'opposé du transport sédimentaire côtier normal qui est orienté du nord-est vers le sud-ouest le long de cette barrière (Renaud, 2001 ; Xhardé, 2007). Cette inversion temporaire de la dérive littorale a ainsi conduit à une perturbation du transport sédimentaire sur la plage, produisant une convergence entre le transport sédimentaire littoral normal orienté vers le sud-ouest et le transport sédimentaire en condition de tempête en direction du nord-est. Un indice de cette convergence de deux transports sédimentaires de direction opposées est fourni par la morphologie de la plage à proximité de la partie distale du barachois. Un "bourrelet" sédimentaire est visible sur la plage du cordon oriental du barachois, à hauteur des infrastructures récréatives de la pointe (entre la cote 305 et 330 sur la figure 5.27). L'accumulation de sable à cet endroit est plus importante que partout ailleurs, atteignant $2653 \pm 1354 \text{ m}^3$ le long de ce segment de plage d'à peine 220 m de long, soit 53 % de l'engraissement total mesuré, et provoquant une avancée locale du trait de côte pouvant atteindre 12,43 m.

Il faut cependant noter que l'érosion de la pointe du barachois par les houles de tempête n'alimente pas seulement les plages méridionales du cordon est. Une partie des sédiments remaniés par les vagues alimentent également la plage sud-ouest, sur le cordon occidental du barachois (figure 5.24), où un engraissement de $528 \pm 342 \text{ m}^3$ est observé entre 2003 et 2004.

L'engraissement observé entre 2003 et 2004 sur la moitié sud du cordon oriental du barachois ne doit cependant pas être considéré comme une tendance évolutive à long terme du système mais plutôt comme une réponse à court terme du barachois à des forçages hydrodynamiques particuliers et épisodiques. Les variations observées dans ce secteur au cours d'une plus longue période de temps le démontrent. Ainsi, entre 2003 et

2006, plus aucune accrétion n'est observée sur la plage de cette zone, excepté au niveau du "bourrelet" déjà mentionné plus haut qui est toujours visible, bien qu'il semble avoir subi une érosion depuis 2004. Le volume estimé en 2006 n'est plus que de 654 m³ et la progradation du trait de côte à cet endroit est à peine significative avec une avancée de seulement $2,62 \pm 0,60$ m. Au contraire, les relevés LiDAR indiquent que l'ensemble de la moitié sud de la barrière a subi un recul du trait de côte pendant cet intervalle de temps, avec un retrait annuel moyen estimé à $-2,72 \pm 1,93$ m/a entre 2003 et 2006. Ce retrait ne représente cependant que 40 % de celui observé le long de la moitié nord de la barrière pour la même période ce qui souligne, une fois encore, la différence morphodynamique qui semble exister entre les deux parties de cette barrière.

L'analyse détaillée des variations de position du trait de côte le long de la section sud du cordon oriental entre 2003 et 2006 montre en outre qu'il existe des différences marquées le long de cette section. Ainsi, comme indiqué dans la section § 5.3.3, deux zones présentant une forte érosion du trait de côte (respectivement $-7,96 \pm 2,73$ m et $-14,80 \pm 4,74$ m) encadrent un segment de plage d'environ 250 m de long relativement stable et sur lequel les variations du trait de côte restent relativement faibles comparées aux autres sections de la barrière, avec un retrait moyen d'à peine $-3,34 \pm 1,61$ m. Ces deux zones peuvent donc être considérées comme des "points sensibles" à l'érosion (ou "*erosional hotspots*"). Cependant, les raisons de leur existence à ces endroits précis de la barrière, de même que la grande différence de dynamique entre la partie nord et la partie sud de la barrière, sont très difficiles à expliquer au moyen des seules données topographiques et il est nécessaire de recourir aux données bathymétriques de la plage sous-marine afin de mieux cerner les processus morphodynamiques en cause.

Les relevés bathymétriques laser effectués en 2006 révèlent ainsi la présence d'une barre d'avant-côte le long de la barrière est du barachois. Si l'existence de cette barre était déjà connue grâce aux relevés de terrain réalisés les années précédentes, ni son extension ni sa morphologie exacte n'avaient pas pu être déterminées jusqu'à présent. Grâce aux relevés bathymétriques laser, il est possible à présent de caractériser avec précision la morphologie de cette barre d'avant-côte (figure 6.5).

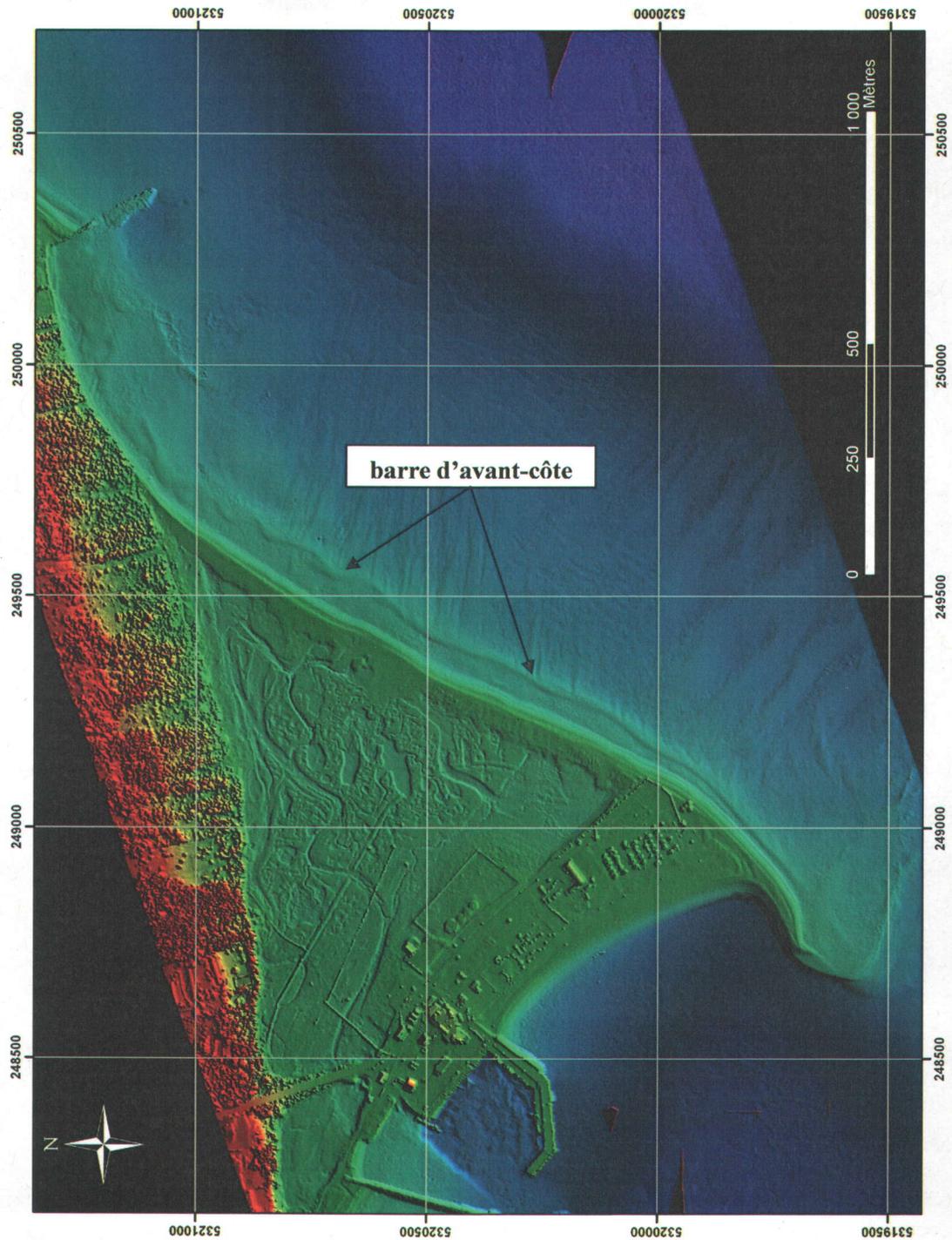


Figure 6.5 – MNT du barachois de Paspébiac et de la bathymétrie côtière en 2006. Une barre d'avant-côte de 50 cm d'élévation s'étend tout le long du cordon oriental du barachois à une distance moyenne d'environ 55 m. Cette barre est moins bien structurée dans la partie nord du site. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).

Cette structure sédimentaire sous-marine s'étend ainsi depuis la pointe du barachois jusqu'à la plage à Norbert à une distance moyenne de $53,5 \pm 16,0$ m de la barrière et à une profondeur variant entre -2 m et -3 m. Elle présente une élévation moyenne de 50 cm. Entre la pointe du barachois et le chenal de marée (partie sud du cordon), elle présente une morphologie relativement linéaire puis se déstructure progressivement au nord du chenal pour former une succession de bancs de sable cuspidés sur l'avant-plage de la partie nord de la barrière. Aucune corrélation ne semble cependant pouvoir être établie entre la morphologie de cette barre d'avant-côte et les variations du recul mesuré sur la plage, les zones sensibles à l'érosion de la barrière ne correspondant à aucun changement significatif dans la morphologie de la barre d'avant-côte.

Cependant, une seconde barre d'avant-côte, inconnue jusqu'alors, a également pu être mise en évidence sur la plage sous-marine grâce à l'analyse statistique de la déformation des formes d'onde des impulsions laser réfléchies par le fond marin (*Keramoal, 2008*). Cette méthode permet d'améliorer de façon significative la détection du fond marin et des structures sédimentaires par très petite profondeur, et a ainsi révélé l'existence d'une seconde barre d'avant-côte située à seulement 20 m du trait de côte et dans des profondeurs d'eau d'à peine $-1,5$ m à -2 m. (figure 6.6). Elle présente une élévation d'environ 20 cm et s'étend entre la pointe du barachois et le chenal de marée.

La morphologie de cette barre d'avant-côte intérieure est particulièrement intéressante car, contrairement à la barre d'avant-côte extérieure décrite plus haut, celle-ci permet d'avancer des explications aux différences morphodynamiques observées le long du cordon oriental du barachois. La figure 6.7, qui représente la bathymétrie améliorée pour les très petits fonds de la zone côtière de la barrière est du barachois, révèle ainsi deux informations morphologiques importantes:

1. La barre d'avant-côte intérieure s'achève 160 m avant le chenal de marée
2. Elle présente une rupture de 35 m de large à 540 m au nord de la pointe du barachois.

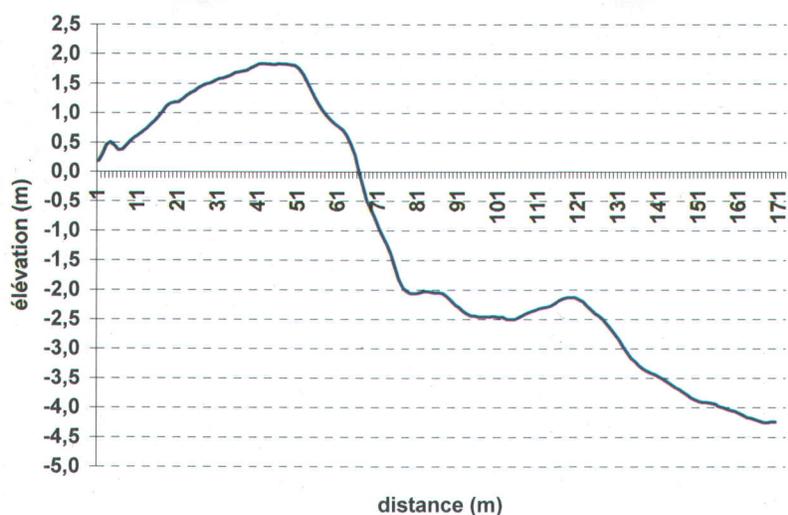


Figure 6.6 – Profil de plage de la barrière orientale du barachois de Paspébiac. Les deux barres d'avant-côte sont visibles sur ce profil. La première présente une amplitude de 10 à 30 cm tandis que la seconde à une amplitude de 50 à 70 cm. Les élévations sont données par rapport au niveau moyen des mers (zéro topographique).

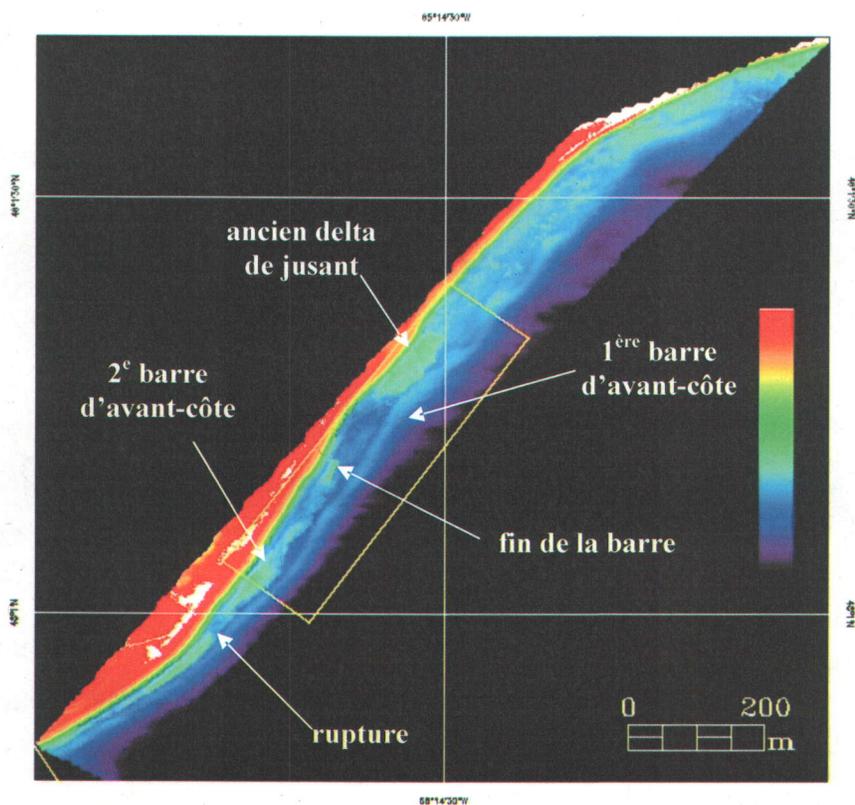


Figure 6.7 – Bathymétrie améliorée pour la détection des très petits fonds le long de la barrière orientale du barachois de Paspébiac. (Source: Keramoal, 2008)

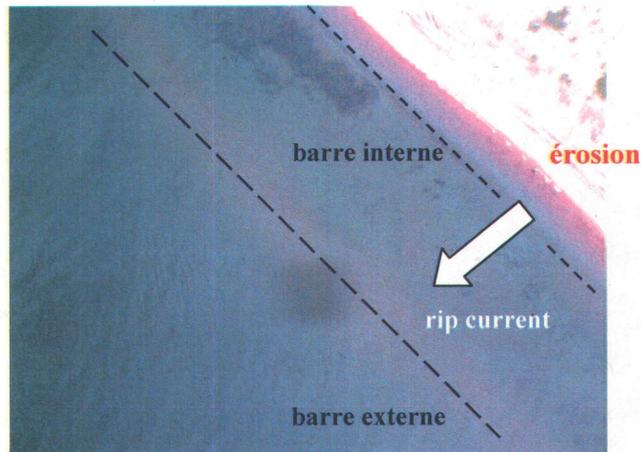


Figure 6.8 – Image vidéo montrant les deux barres d'avant-côte le long de la barrière est du barachois de Paspébiac en 2006. La rupture de la barre d'avant-côte intérieure et la zone de forte érosion de la plage sont visibles.

Or, lorsqu'ils sont comparés aux mesures effectuées sur la plage (figure 5.26), il apparaît que ces deux changements morphologiques coïncident avec les positions des deux zones sensibles d'érosion observées le long de la partie sud de la barrière. Cette corrélation est confirmée par les prises de vue aériennes réalisées au moment des relevés LiDAR de 2006 (figure 6.8). Les interruptions de la barre d'avant-côte intérieure suggèrent ainsi l'existence de courants d'arrachement (ou "*rip currents*") à ces endroits, courants qui se caractérisent par de forts courants marins orientés perpendiculairement à la côte et portant vers le large (*Shepard et al., 1941 ; Bowen, 1967 ; Komar, 1976*). Ces courants sont généralement responsables d'une érosion plus importante de la côte à l'endroit où ils sont présents (*Munk et Traylor, 1947 ; McKenzie, 1958*) et pourraient donc expliquer l'érosion du trait de côte observée sur la partie aérienne de la plage le long de la barrière orientale du barachois. Il faut cependant remarquer que les courants d'arrachements se forment uniquement lorsque des différences d'élévation existent entre les niveaux d'eau moyens le long d'une côte (*Shepard et al., 1941 ; McKenzie, 1958 ; Bowen, 1967 ; Bowen et al., 1968 ; Bowen, 1969 ; Bowen et Inman, 1969 ; Sonu, 1972 ; Dalrymple, 1975 ; Komar, 1976*). Ces différences d'élévations se produisent en général lorsque des houles arrivent sur une côte selon une incidence oblique, ce qui est le cas à Paspébiac étant donné la configuration triangulaire du barachois. Cependant, ces courants ne perdurent pas sur de longues périodes de temps de sorte qu'il est possible d'affirmer que

les zones sensibles observées le long de la barrière orientale du barachois de Paspébiac correspondent à des réponses temporaires de la côte à des conditions hydrodynamiques particulières.

Les informations fournies par les relevés bathymétriques aéroportés laser de 2006 ne se limitent cependant pas à la morphologie des structures sédimentaires de la plage sous-marine. Les relevés ont également fourni une grande quantité de données bathymétriques jusqu'à des profondeurs de 14 m qui ont permis d'obtenir des informations précises et détaillées des structures sédimentaires situées au-delà de la barre d'avant-côte ainsi que de la morphologie générale de la partie sous-marine du barachois. Les modèles bathymétriques révèlent ainsi que le barachois ne constitue que la partie émergée d'une structure sédimentaire plus vaste, s'étendant sur une distance d'environ 3 km depuis la côte, faisant 1,2 km de large et couvrant une surface de 3,6 km² (figure 6.9). Les éléments morphologiques les plus remarquables mis en évidence par les relevés bathymétriques laser sont les suivants:

1. La zone située juste au-delà de la barre d'avant-côte présente une série de structures sédimentaires orientées perpendiculairement à celle-ci et sont identifiées comme des dunes et des dépressions (figure 6.10).

Les dunes sont globalement asymétriques, avec une orientation vers le nord-est (033°), leur amplitude est de 25 à 30 cm et elles sont situées à une profondeur moyenne de -2,7 m (Cottin, 2009). L'asymétrie des dunes sableuses étant un indicateur qualitatif simple de la direction du transport sédimentaire et du sens de migration des dunes, il est possible de déterminer les directions moyennes des courants qui ont formé ces différentes dunes. En outre, ce système est cannibalisé par un ensemble de dunes symétriques et asymétriques mais de direction inverse. Le processus de cannibalisation reste partiel ce qui démontre la brièveté des conditions responsables de ce processus (Cottin, 2009). Ces conditions pourraient donc correspondre soit à des épisodes de tempête, en particulier en provenance du sud-ouest comme c'était le cas lors des relevés aériens de 2004, soit à des courants de marée.

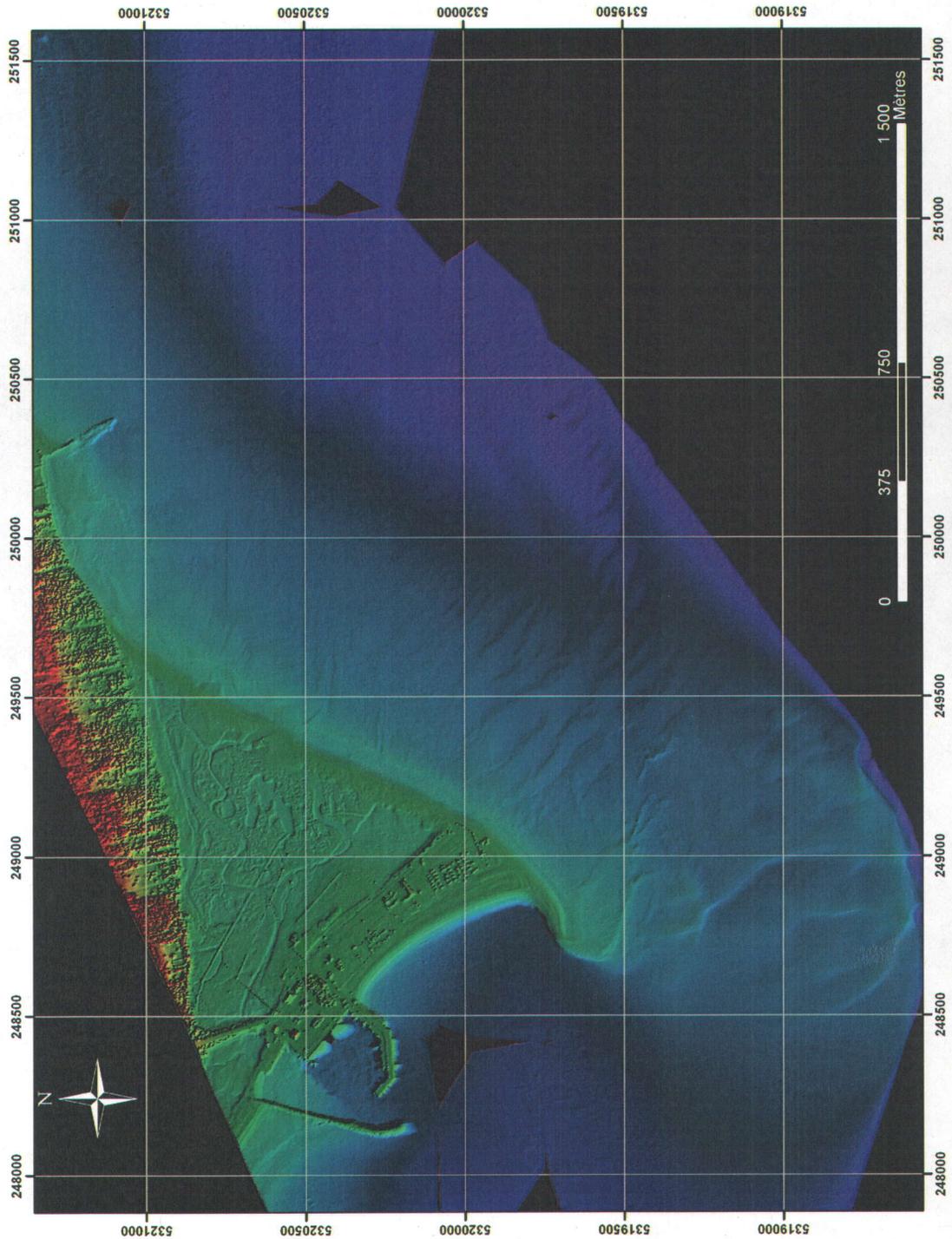


Figure 6.9 – MNT du barachois de Paspébiac et de la bathymétrie côtière en 2006. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).

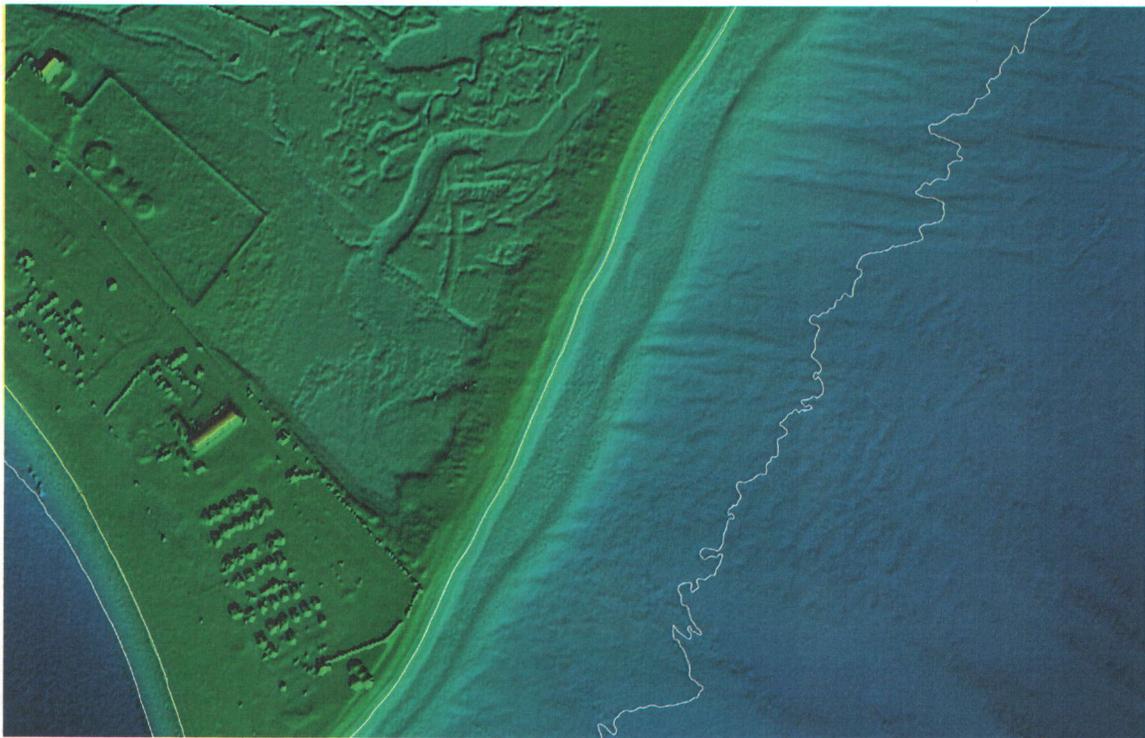


Figure 6.10 – MNT du barachois de Paspébiac et de la bathymétrie côtière en 2006. *Sur ce modèle bathymétrique, des dunes et des chenaux d'érosion orientés perpendiculairement à la barre d'avant-côte sont visibles. Le trait blanc indique l'isobathe de -5 m.*

Les dépressions, quant à elles, présentent en général un dénivelé de l'ordre de 20 à 30 cm par rapport aux fonds environnant et s'étendent sur une distance de 150 à 200 m, entre -3 m et -5 m de profondeur. Elles sont interprétées comme d'anciennes traces d'érosion des fonds marins sous l'action de courants d'arrachement, ceux-ci apparaissant lorsque les conditions hydrodynamiques locales génèrent une accumulation importante d'eau sur le rivage, ce qui conduit à la rupture des barres d'avant-côte. Ces cicatrices témoignent cependant du caractère temporaire et épisodique des ruptures puisque aucune brèche n'est visible à leur niveau, indiquant bien que ces chenaux ne sont plus actifs et que les barres d'avant-côte se sont reformées depuis lors.

2. La partie distale du barachois se caractérise par la présence d'un important lobe constitué de dépôts sédimentaires progradant en direction du sud-ouest. Cette structure est située au niveau de la partie distale du barachois et s'étend sur une distance d'environ 900 m pour 1000 m de large. Elle constitue la fin du transport sédimentaire littoral, la flèche littorale ne représentant que la partie émergée de cette vaste structure. Les dépôts qui la composent se situent entre -6 m et -10 m de profondeur et présentent des signes de remaniements importants, sous l'action des houles et des courants de fond, sous la forme de dunes hydrauliques de 1 à 2 m de hauteur, présentant un profil asymétrique et une orientation en direction du sud-ouest (*Cottin, 2009*).

3. Un important champ de dunes hydrauliques est présent entre -5 m et -10 m de profondeur à l'est du barachois (figure 6.9). L'existence de ces structures sédimentaires avait déjà été mentionnée par des études précédentes (*Renaud, 2001 ; Long, 2006*) qui reposaient sur l'analyse de relevés sonar et sismiques, mais l'étendue et la morphologie exacte du champ restait mal connue. Grâce aux relevés SHOALS, il est maintenant possible d'en préciser les dimensions: ce champ s'étend sur une zone de 600 x 600 m, soit une surface d'environ 360 000 m², et renferme approximativement 200 000 m³ de sédiments, principalement du sable moyen à grossier. La grande précision des données bathymétriques laser a en outre permis de préciser les caractéristiques morphologiques de ces dunes hydrauliques. Ainsi, trois grands morpho-types de dunes ont pu être mis en évidence au sein de ce champ:
 - de grandes dunes asymétriques d'environ 1 m d'amplitude, 70 à 80 m de longueur d'onde, qui indiquent un transport sédimentaire en direction du nord-est.
 - des dunes symétriques et/ou asymétriques de taille moyenne, présentant des amplitudes de 30 à 50 cm et des longueurs d'onde de 50 à 60 m.

- des dunes symétriques et/ou asymétriques de petite taille, caractérisées par des amplitudes de 20 à 30 cm et des longueurs d'ondes comprises entre 12 et 20 m.

Les plus intéressantes se révèlent être les dunes de grande taille car leur asymétrie indiquent clairement l'existence d'un transport sédimentaire de fond en direction du nord-est, c'est à dire, une fois encore, dans le sens contraire de la direction normale du transport sédimentaire côtier.

L'étude détaillée des modèles numériques de terrain de ce secteur a en outre permis de découvrir un autre système de dunes hydrauliques, génétiquement différent du champs principal qui est orienté sud-ouest – nord-est. Ce second champs présente une orientation normale au premier, soit sud-est – nord-ouest, et est caractérisé par la présence, entre –10 m et –14 m, de deux très grandes dunes hydrauliques de 1,5 m à 2 m d'amplitude et de 125 m de longueur d'onde, et renfermant chacune un volume de sédiments d'environ 60 000 m³ (figure 6.11). Les transects effectués dans ce second champs de dunes montrent, là encore, une asymétrie des dunes, indiquant cette fois un transport sédimentaire de fond en direction du nord-ouest (figure 6.12). En outre, les grandes dunes présentent des traces de remaniement et d'érosion dès qu'elles se situent au-dessus de –10 m (figure 6.13), ce qui laisse supposer que cette profondeur constitue la limite d'action des houles dans cette région.

Enfin, l'étude détaillée de la morphologie de cette zone de dunes hydrauliques au moyen des MNT montre que si le champs orienté sud-est – nord-ouest apparaît bien préservé dans sa partie nord-est, la plus profonde, le secteur sud-ouest du champs a été en grande partie remanié et cannibalisé par le champs de dunes principal qui le recoupe selon une direction perpendiculaire (sud-ouest – nord-est) (figure 6.14).

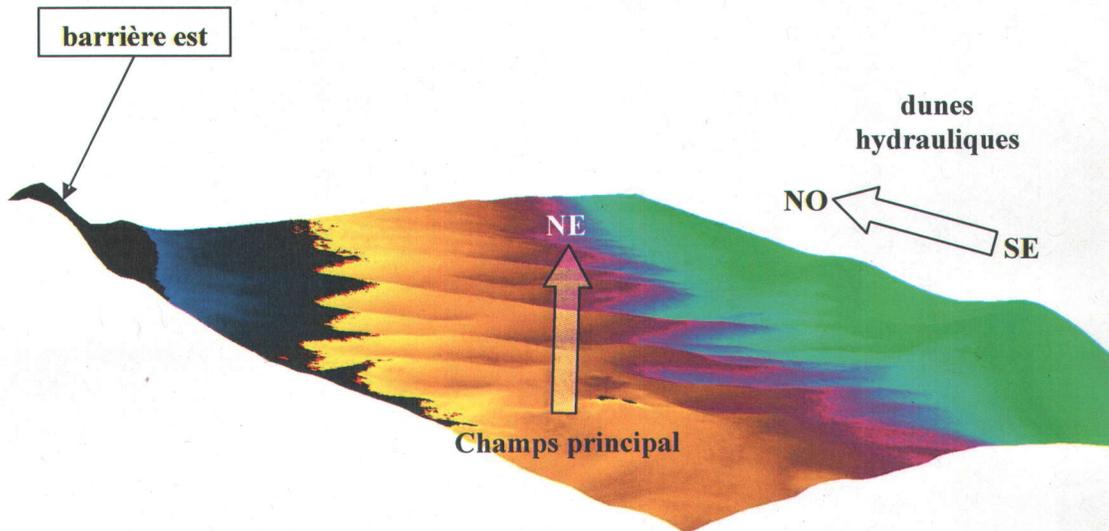


Figure 6.11 – Modèle numérique 3D du champs de dunes hydrauliques principal. Deux larges dunes hydrauliques, présentant une orientation sud-est – nord-ouest qui coupe à angle droit le champs de dunes principal, sont clairement identifiables dans la partie droite de l'image.

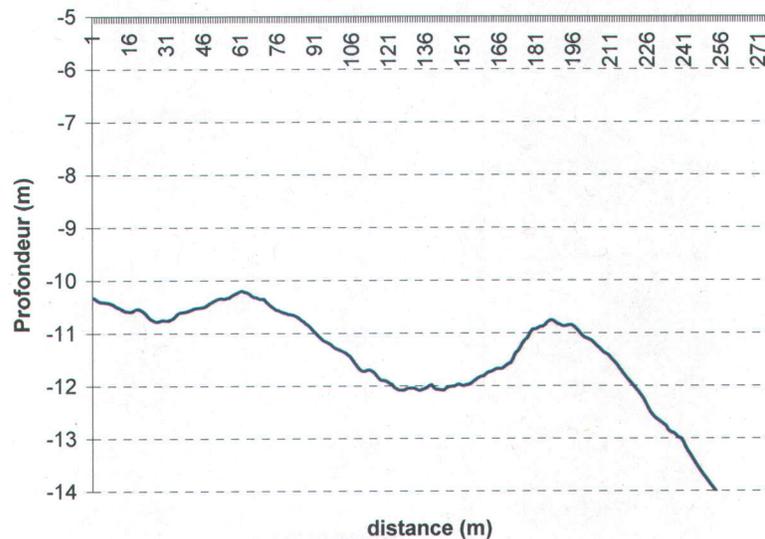


Figure 6.12 – Profils réalisés au niveau des grandes dunes hydrauliques SE-NO. Les dunes présentent un profil asymétrique, indiquant un transport sédimentaire en direction du nord-ouest, ainsi que des signes de remaniement au-dessus d'une profondeur de -10 m.

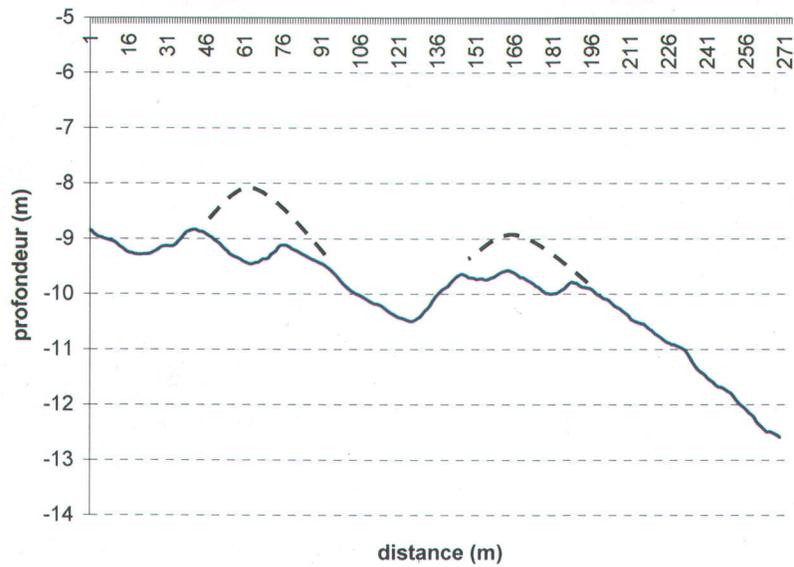


Figure 6.13 – Profils réalisés au niveau des grandes dunes hydrauliques SE-NO. Les dunes présentent un profil asymétrique, indiquant un transport sédimentaire en direction du nord-ouest, ainsi que des signes de remaniement au-dessus d'une profondeur de -10 m. Les traits noirs schématisent le profil originel des dunes avant remaniement par les houles et les courants.

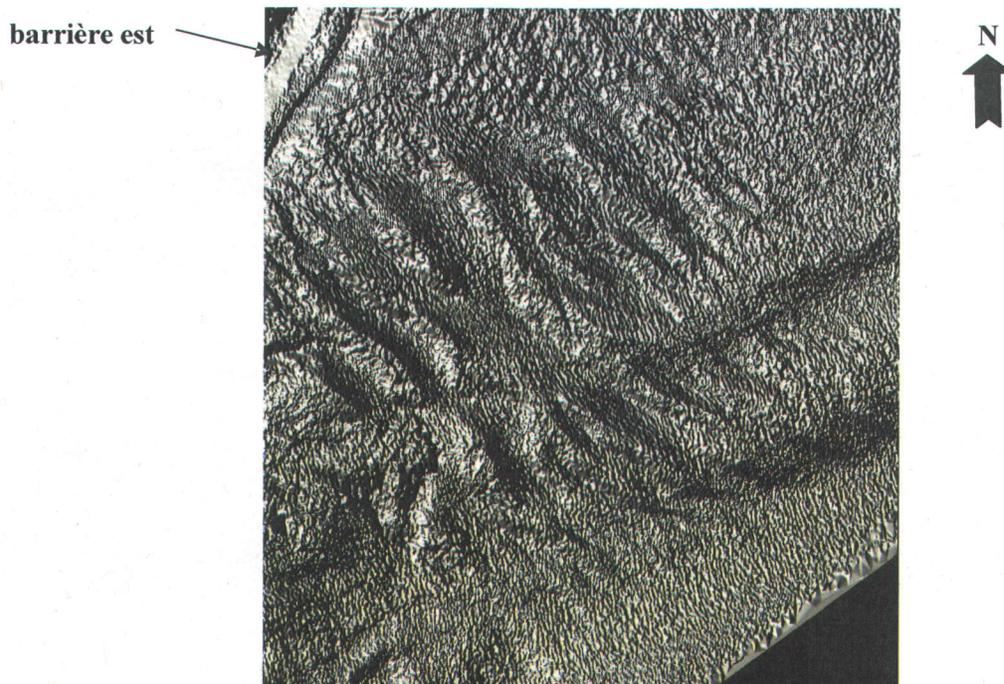


Figure 6.14 – Modèle numérique de terrain de la zone des dunes hydrauliques. L'existence de deux champs de dunes génétiquement différents et présentant des orientations perpendiculaires l'une à l'autre est mise en évidence. La flèche indique le nord.

À partir de ces diverses observations morphologiques et des changements topographiques mesurés au niveau des plages de ce secteur, l'interprétation suivante est avancée pour décrire la dynamique côtière au niveau du barachois de Paspébiac (figure 6.15):

Lors de conditions hydrodynamiques normales, correspondant à des houles dont la période n'excède pas 4 secondes (*Poirier, 2003a*), le transport sédimentaire littoral dominant est orienté d'est en ouest le long de la côte et du nord-est au sud-ouest le long de la barrière orientale du barachois. Ce transport est alimenté en partie par les éboulements qui se produisent dans les falaises situées à l'est du secteurs et qui sont responsables d'importantes accumulations sédimentaires au pied des falaises pouvant atteindre plusieurs milliers de mètres cubes de sédiments. De tels effondrements ont pu être observés en plusieurs endroits de la côte entre 2003 et 2006 et leur contribution au transport sédimentaire a été mise en évidence par l'érosion des dépôts (cf. §5.3.5).

L'épi situé sur la plage à Norbert intercepte une partie de ce transport côtier, provoquant une accrétion importante en amont de l'obstacle et contribuant au développement d'une plage d'environ 26 000 m³ (*Long et Renaud, 1999*). La capacité de rétention de l'épi semble néanmoins être atteinte et une partie du transit sédimentaire contourne l'obstacle pour alimenter le bas de la plage située à l'ouest (*Renaud, 2001*). L'érosion de la plage et des talus situés en aval constitue une source secondaire de sédiments qui contribue à alimenter la barrière orientale du barachois. Cependant, le volume sédimentaire ainsi transporté reste insuffisant pour permettre à la barrière de rester en équilibre de sorte que celle-ci expérimente un recul important de -7 à -9 m/a sur sa partie nord. Ce transport côtier se poursuit tout le long de la barrière en direction du sud-ouest et le sédiment finit par être entraîné vers le large où il prograde sur les dépôts plus anciens et forme le lobe distal de la structure. Sur base des structures sédimentaires observées et de leur morphologie, il est possible d'affirmer que ce transport littoral se produit exclusivement entre 0 m et -5 m de profondeur. Il n'est donc pas responsable des structures sédimentaires plus profondes détectées.

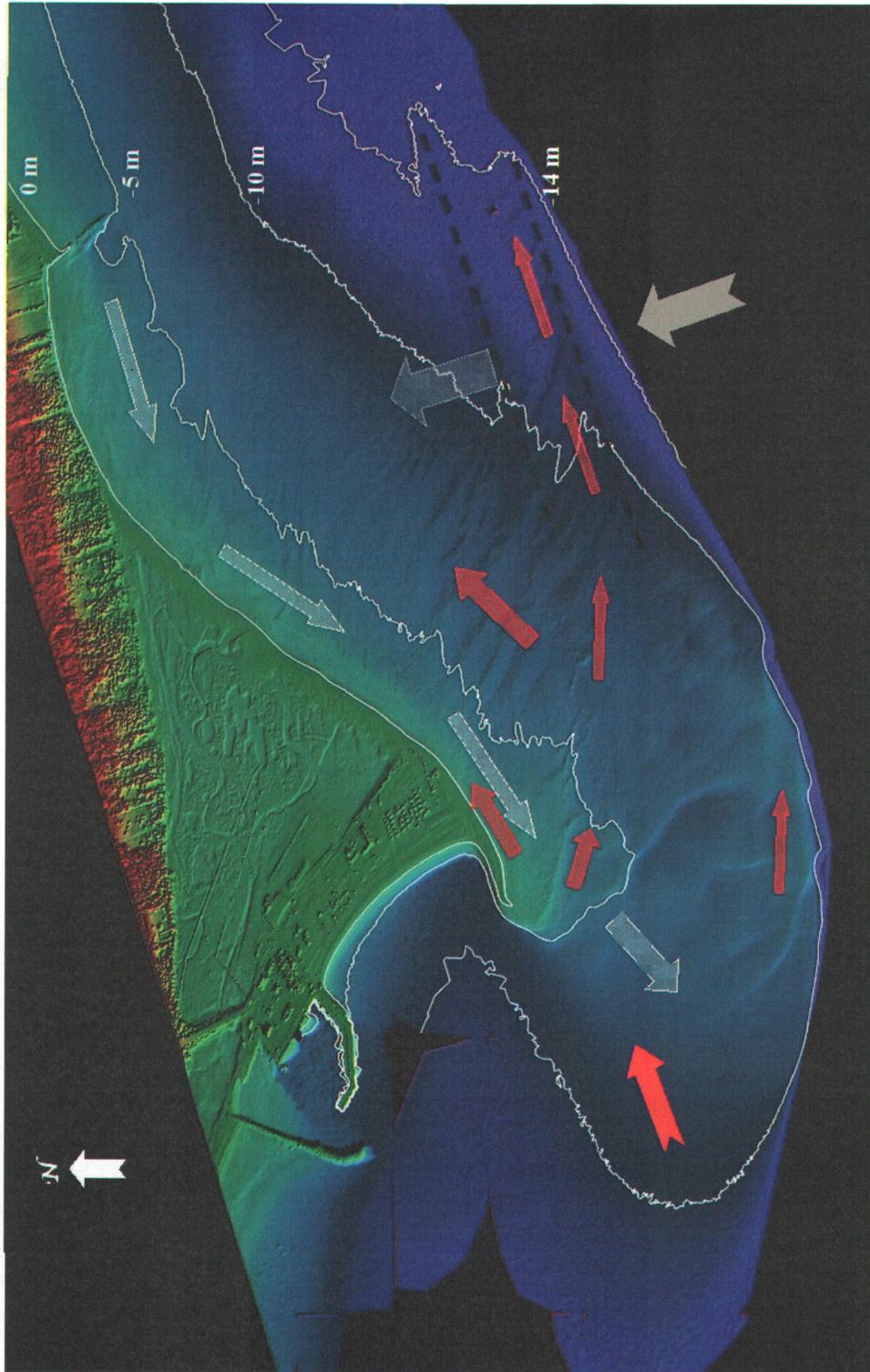


Figure 6.15 – Description de la dynamique sédimentaire côtière dans le secteur du barachois de Paspébiac. Les flèches blanches indiquent le transport littoral en conditions normales (84,8% du temps), les flèches rouges représentent le transport en conditions de tempête du sud-ouest (6,8%) et les flèches grises montrent le transport en conditions de tempête du sud-est (1,7%). Les lignes en pointillés indiquent la position des deux grandes dunes hydrauliques découvertes.

Lors de conditions de tempête du sud-ouest, le site est soumis à des houles de 5 à 7 secondes de période en provenance des secteurs ouest à sud-sud-ouest. D'après les analyses statistiques de vents et de vagues réalisées par Poirier (2003a), de telles conditions se produisent 6,8 % du temps. Dans de telles conditions, une inversion temporaire du transport sédimentaire côtier est observé. Au niveau de la barrière orientale, cela se traduit par une érosion importante de la flèche littorale distale ainsi que par un transport sédimentaire le long de la barrière en direction du nord-est qui va momentanément alimenter en sédiments la moitié sud du cordon, ce qui peut provoquer une accrétion de ce secteur comme celle observée en 2004. Au niveau des plages et des falaises de la côte, cela se traduit par un transport en direction de l'est, induisant une accrétion temporaire à l'ouest de l'épi et une érosion de la plage située à l'est. Au large, les courants induits par les fortes houles du sud-ouest sont capables de remanier les fonds marins jusqu'à une profondeur de -10 m, générant les dunes hydrauliques de taille métrique observées au large de la barrière et provoquant un transport sédimentaire de fond en direction de la côte (NO). Les houles et les courants sont également capables de remanier une partie des dépôts sédimentaires formant le lobe distal et de les transporter vers de plus faibles profondeurs où ils pourront être repris par le transport sédimentaire côtier normal par après.

Enfin, en conditions de tempête du sud-est, le site est soumis à des houles de secteur est à sud-sud-est pouvant atteindre des périodes de 7 à 9 secondes. Si ces houles apparaissent être les plus fortes auxquelles le site peut être soumis, elles sont également les moins fréquentes, avec une fréquence d'occurrence de seulement 1,7 %. Au niveau de la côte, ces houles renforcent le transport sédimentaire en direction de l'ouest et n'entraînent aucune modification significative de la dynamique côtière si ce n'est un renforcement des tendances normales à l'érosion et à l'accrétion. Au large cependant, les courants induits par ces houles sont capables de remanier les fonds jusqu'à des profondeurs de -14 m et sont responsables du champs de dunes hydrauliques orienté sud-est – nord-ouest ainsi que des deux larges dunes identifiées à partir des MNT bathymétriques.

L'analyse des signaux d'intensité de retour des impulsions laser a également permis à Cottin (2008) de réaliser deux cartes morpho-sédimentaires présentant la répartition des différents grands environnements sédimentaires côtiers dans ce secteur (figures A4-1 et A4-2, annexe 4). Ces cartes montrent que le barachois est composé exclusivement de sables, ceux-ci pouvant aller de fin au sommet des dunes hydrauliques à grossier dans les creux. Ces sables peuvent être mélangés par endroits à des galets. La zone des sables s'étend jusqu'à la plage à Norbert (inclue) avant de faire place à des fonds plus rocheux dans le secteur des falaises. Le stock sédimentaire potentiellement disponible au niveau du barachois dans la zone d'action des houles (0-10 m) est ainsi estimé à $29,8 \times 10^6 \text{ m}^3$. Au niveau des falaises, les mêmes séquences que celles observées le long du secteur de Saint-Siméon sont présentes. L'avant-côte est ainsi composée de placages peu épais de sables fins à moyens qui s'étendent sur une distance d'environ 400 à 500 m avant de faire place à une mince laisse de graviers et de galets à laquelle succède enfin le substratum rocheux (Cottin, 2008). Les zones de galets et d'affleurements rocheux sont généralement colonisées par des fucus (*Fucus sp.*) et des laminaires (*Laminaria sp.*) pouvant former de larges champs algaires. Cependant, tout comme la carte morpho-sédimentaire simplifiée de Saint-Siméon, les cartes du secteur de Paspébiac présentent une confusion importante entre les différents faciès sédimentaires, en particulier au niveau des limites (Cottin, 2008) en raison des mélanges pouvant exister entre les sables et les graviers ainsi que de la présence, au niveau du toit du substratum rocheux, d'un lag de transgression identique à celui observé par Long (2006) sur les secteurs de Saint-Siméon et de Bonaventure et composé de débris d'érosion très grossiers (galets, blocs). L'avant-côte de ce secteur se présente donc ainsi comme une mosaïque de fonds sous-marins sablo-graveleux, colonisés localement par des fucus dans la zone intertidale et de laminaires dans la zone infralittorale, de fonds sableux uniformes n'exhibant aucune structure sédimentaire détectable par LiDAR (ces fonds sont surtout présent au droit des épis d'arrêt de la plage à Norbert et de la plage de Hopetown) et d'affleurements rocheux, ces derniers pouvant même être observés très localement dans la zone intertidale comme sur la plage à Norbert, à l'ouest de l'épi, où l'érosion a mis à nu le substratum rocheux.

6.3 Secteur de Saint-Godefroi

Ce secteur a fait l'objet de très peu d'études jusqu'à présent. La seule autre étude portant sur l'érosion côtière à notre disposition dans ce secteur est l'analyse que Poirier (2003a) a réalisée à partir de photographies aériennes de 1965 et 1992 dans le cadre d'une étude hydraulique pour le ministère des transports du Québec. Comme déjà mentionné dans cette étude, ce travail indiquait un transport littoral portant en direction du sud-ouest et responsable de la formation de la flèche littorale sableuse qui barre l'embouchure de la rivière Le Barachois. Cette flèche a subi une érosion importante au cours des dernières décennies suite à la destruction d'un quai situé à son extrémité sud-ouest qui constituait un obstacle à la dérive littorale. Depuis la disparition de ce quai, la flèche a subi des modifications morphologiques importantes qui ont conduit à un recul de 12 à 14 m du trait de côte entre 1965 et 1992 (Poirier, 2003a).

Les résultats de la présente étude confirment l'existence d'un transport littoral orienté du nord-est au sud-ouest. Ce transport n'est cependant pas limité à la zone des talus et du barachois de Hope Town. Comme indiqué dans la section § 5.4.1, la géométrie des dépôts provenant de l'effondrements de pans de falaises, ainsi que la disposition des zones d'accrétion identifiées le long des côtes rocheuses, constituent autant d'indices de l'existence d'un transport littoral orienté vers le sud-ouest à partir de la pointe à Ritchie. Il est d'ailleurs probable que ce transport se poursuive tout le long des falaises jusqu'au secteur de Paspébiac qui en constituerait ainsi l'aboutissement. En outre, tout comme dans le secteur des falaises de Paspébiac, la dérive littorale semble être alimentée en grande partie par l'érosion des dépôts situés au pied des falaises et provenant des effondrements qui se produisent dans les falaises et les talus. De tels dépôts ont pu être mis en évidence grâce aux relevés aéroportés laser.

En ce qui concerne les zones du barachois de Hope Town et des talus qui le prolonge au nord-est, les variations topographiques et morphologiques observées entre les années 2003, 2004 et 2006 au niveau des littoraux sont interprétées comme suit:

- La plage composant la partie sud-ouest du barachois de Hope Town présente un caractère relativement stable durant la période de relevés. Le trait de côte de cette zone du littoral ne présente pas de changements significatifs, ni entre 2003 et 2004 ($-1,36 \pm 0,49$ m) ni entre 2003 et 2006 ($-0,50 \pm 0,37$ m). L'amaigrissement de -540 ± 396 m³ observé entre 2003 et 2004 sur le haut de plage de la partie sud-ouest de la zone peut, une fois encore, s'interpréter comme la conséquence temporaire d'un réajustement du profil de la plage aux conditions hydrodynamiques de tempête qui caractérisaient toute la région lors des relevés de 2004. Cela est confirmé par l'absence de variations volumiques significatives sur cette partie du littoral entre 2003 et 2006. Il en va de même de l'érosion importante constatée sur la basse plage directement au sud-est de l'embouchure de la rivière Paspébiac. Cette perte de -816 ± 511 m³ de sédiments correspond à l'érosion, entre 2003 et 2004, d'une flèche d'embouchure de 80 m de long sur 18 m de large qui s'était développée dans l'axe du chenal sous l'effet des courants de jusant. Cette flèche s'est très certainement mise en place dans des conditions de faible énergie hydrodynamique et sa disparition témoigne du changement d'énergie dans le régime des houles lors des relevés de 2004. Le stock sédimentaire ainsi remobilisé par les vagues a permis la formation d'un nouveau banc de sable de 706 ± 560 m³, à seulement 20 m au sud de la position de la flèche d'embouchure érodée. Au final, le bilan sédimentaire de cette section de plage ne montre un déficit net que de -116 m³, indiquant une légère tendance à l'érosion de cette partie de plage sous l'effet des courants de la rivière Le Barachois.

- La flèche nord-est du barachois présente, pour sa part, une érosion soutenue de $-2,8 \pm 0,8$ m entre 2003 et 2004, et de $-2,5 \pm 0,7$ m/a entre 2003 et 2006. L'essentiel des pertes (-1130 ± 904 m³) s'est produit au niveau de la basse plage adjacente à l'épi d'arrêt en gabions qui empêche l'ensablement du chenal du barachois. Cependant, près de 70 % du volume érodé a été redéposé sur le haut de plage par les vagues de tempête de sorte que le bilan net de la zone ne présente qu'un déficit net de -348 m³ pour l'année 2003-2004. Le reste de la plage présente une tendance similaire avec une perte estimée à -471 ± 377 m³ pour la même période, conduisant à un déficit total du bilan sédimentaire de -819 m³ pour cette plage. Entre 2003 et 2006 cependant, le déficit de la basse plage atteint -3745 m³ et confirme la tendance à l'érosion marquée par cette portion du littoral.

- Malgré l'existence d'une portion de côte stable de 380 m de long et de deux zones d'accrétion sur la plage, la zone des talus doit être considérée comme en érosion. La partie stable du littoral correspond en effet à la section de la route 132 qui passe sur le cordon dunaire et qui est par conséquent empierrée sur une distance d'environ 400 m afin de protéger l'assise de la route de l'action directe des vagues. Il ne s'agit donc pas d'une stabilité naturelle de la côte mais d'une stabilité artificielle due aux ouvrages de protection en place dans ce secteur. Lorsque aucune protection n'est présente, les talus qui constituent l'arrière-plage présentent des cicatrices d'érosion et des pertes évaluées à plusieurs centaines de mètres cubes (-380 m^3 en 2004 et -467 m^3 en 2006). Le recul annuel du trait de côte des zones non protégées est estimé entre $-1,2 \text{ m/a}$ et $-2,4 \text{ m/a}$ bien que des avancées puissent être localement observées. Ces zones d'accrétion masquent en fait l'érosion active des talus dont elles résultent et qui alimente les plages adjacentes en sédiments fins. Ainsi, le dépôt de $236 \pm 177 \text{ m}^3$ observé entre 2003 et 2004 sur une portion de la plage correspond presque exactement au volume sédimentaire perdu par les talus 90 m au sud-ouest ($-231 \pm 117 \text{ m}^3$). La position du dépôt par rapport à la zone d'érosion du talus est néanmoins en contradiction avec le sens connu de la dérive littorale. Cependant, compte tenu de la configuration de la côte à cet endroit et de la position de la zone d'érosion, il est possible d'avancer l'hypothèse d'une inversion temporaire de la dérive littorale lors des tempêtes de SO, comme celle observée sur le site de Paspébiac, l'érosion des talus se produisant par conséquent préférentiellement durant ces épisodes de haute énergie, les surcotes et les vagues de tempête rendant le pied des talus plus vulnérables aux processus érosifs marins.

L'analyse des MNT de ce secteur apporte des informations supplémentaires sur la dynamique côtière locale et l'évolution du site d'étude. Ainsi, les modèles bathymétriques et les cartes morpho-sédimentaires (figures A4.1 et A4.2) révèlent tout d'abord que la quantité de sédiments disponibles pour le transport sédimentaire littoral au niveau de la plage et de l'avant-côte est très limitée. Bien que la couverture sableuse semble s'étendre au-delà de 500 m par rapport au rivage sur les cartes de Cottin, la quantité disponible pour le transport doit être plus faible en raison des erreurs de classifications entre les sables et les autres classes benthiques, la confusion atteignant 42 % pour la carte

morpho-sédimentaire simplifiée (figure A4.2, annexe 4). Au niveau du barachois, les dépôts sableux provenant de l'arrêt de la dérive littorale par l'épi en gabions de l'embouchure de la rivière Le Barachois couvrent une surface estimée à 48000 m² et s'étendent jusqu'à l'isobathe de -2 m, soit un volume sédimentaire théorique d'environ 96000 m³. Au-delà, les cartes morpho-sédimentaires de Cottin (2008) montrent que le substratum rocheux constitue l'essentiel des fonds marins.

Les modèles bathymétriques révèlent également la présence d'un certain nombre de structures sédimentaires remarquables au niveau de l'avant-côte. Parmi celles-ci, les principales sont les deux chenaux sous-marins situés dans le prolongement de l'embouchure actuelle de la rivière (figure 6.16). Ces chenaux présentent tout les deux une morphologie dissymétrique, comme l'a noté Cottin (2008). La pente du flanc oriental de chaque chenal est ainsi beaucoup plus marquée que celle du flanc occidental, avec respectivement des pentes de l'ordre de 11° et 8° pour le chenal est, et de 7° et 3° pour le chenal ouest. La profondeur respective de ces chenaux est de -3,5 m pour le premier et de -2,7 m pour le second. Ils restent observables jusqu'à une profondeur de -15 m, ce qui représente approximativement la limite de pénétration du SHOALS dans ce secteur.

Ces deux chenaux sont interprétés comme les vestiges d'anciens lits de la rivière Le Barachois qui se sont mis en place durant la phase de régression marine forcée qui a succédé à la fin de la dernière glaciation. Ainsi, entre -12000 ans et -8000 ans (Syvitski, 1992), le rebond glacio-isostatique de la masse continentale qui a suivi la disparition de la calotte glaciaire gaspésienne a entraîné une baisse relative du niveau marin estimée à -20 m (Long, 2006). Cela a eu pour conséquence d'exposer les dépôts marins ainsi que le substratum rocheux à l'action érosive des eaux fluviales, et en particulier à celles des cours d'eau locaux tels Le Barachois, la rivière Paspébiac et la rivière Saint-Godefroi. Les deux vallées fluviales incisées durant cette phase de bas niveau marin témoignent ainsi de la migration latérale subie par la rivière au cours du temps. Lors de la dernière transgression marine, qui s'est déroulée entre -8000 ans et -4000 ans (Syvitski, 1992), ces chenaux ont ensuite été comblés progressivement par des dépôts sédimentaires transgressifs (Long, 2006).

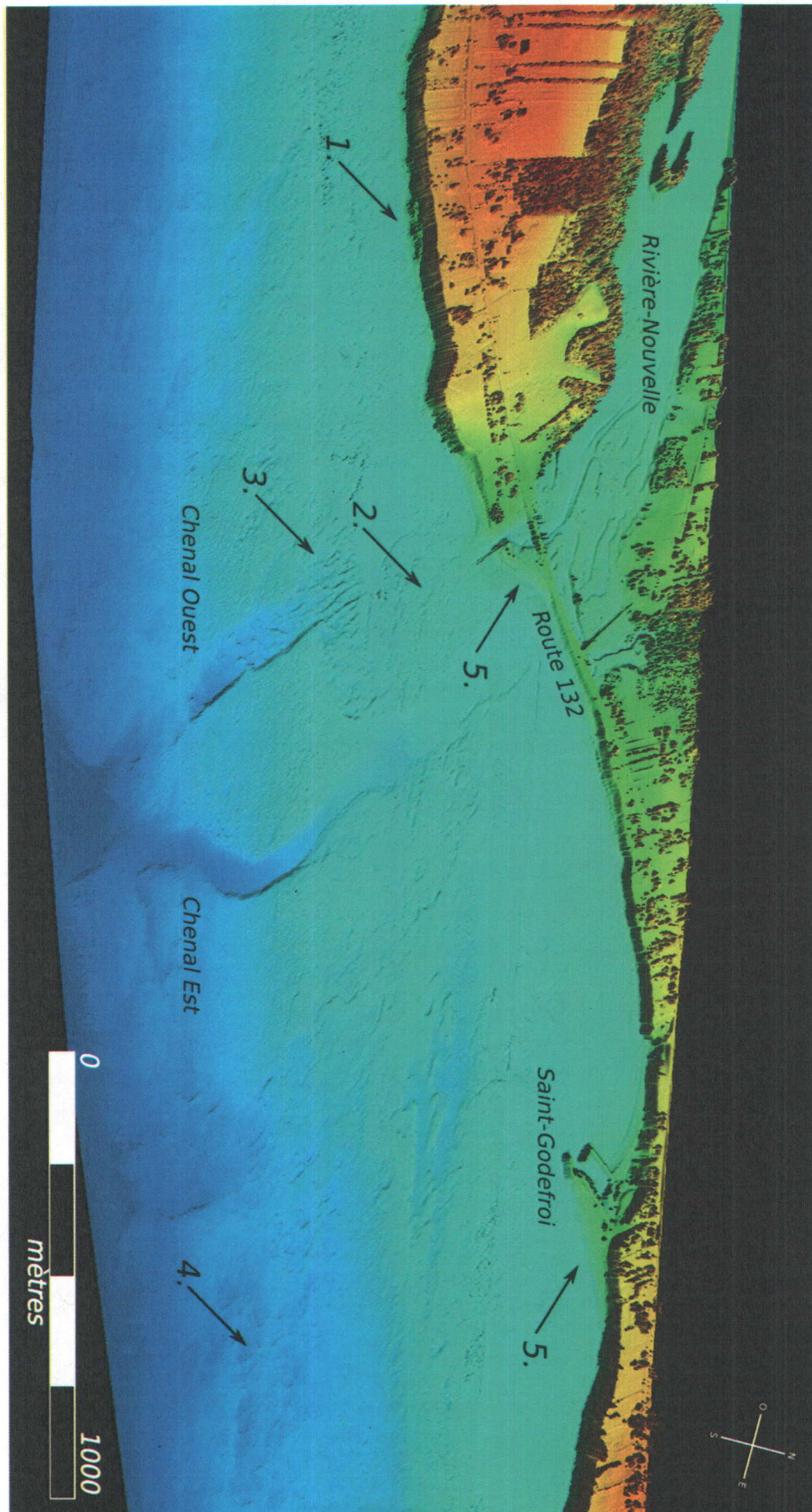


Figure 6.16 – Modèle topographique et bathymétrique du secteur de Saint-Godefroi. Les chiffres indiquent respectivement: 1. un éboulement au pied de la falaise (zone d'accrétion 2 du § 5.4.1) ; 2. affleurement stratifié du substratum rocheux ; 3. chenal sous-marin ouest de la rivière Paspébiac ; 4. affleurements du substratum rocheux ; 5. plages résultant de l'arrêt du transport sédimentaire littoral par des obstacles anthropiques (source: Cottin, 2008).

Cependant, le chenal ouest présente également des structures sédimentaires en forme de bancs dans sa partie nord. Ceux-ci sont situés à une profondeur moyenne de $-6,3$ m et présentent une longueur d'onde moyenne de $36,8$ mètres et une amplitude moyenne de 39 cm (Cottin, 2008). La direction générale des crêtes de ces bancs est parallèle à la direction d'écoulement du chenal sous-marin, soit une orientation nord-ouest – sud-est (135° N). Les bancs peuvent correspondre au dépôt des matériaux directement apportés par les eaux fluviales auxquels s'est ajouté par la suite des sédiments repris par les houles et issus du transport sédimentaire côtier. Leur asymétrie, notée par Cottin (2008), laisse suggérer qu'ils résultent d'apports provenant du nord-est (045°). Cependant, leur profondeur semble trop importante pour que ces structures puissent être le résultat de la dérive littorale actuelle, les observations faites à Paspébiac semblant indiquer que le transport sédimentaire côtier actuel se déroule au-dessus de l'isobathe de -5 m dans ce secteur. Cette constatation montrerait donc qu'un transport sédimentaire venant du nord-est existait déjà à une époque antérieure, où le niveau marin était plus bas, ce qui laisse à penser que la dynamique côtière locale est en place depuis au moins 2000 ans, date à laquelle le niveau marin s'est stabilisé à sa cote actuelle.

CONCLUSION

La frange littorale, qui inclut à la fois la zone émergée jusqu'à une altitude de 10 à 15 m et la zone immergée jusqu'à une profondeur de -20 m, représente l'un des plus importants défis actuels de la géomatique car les différents outils disponibles ne peuvent, par eux-mêmes, donner une représentation globale et précise de cette zone. Ces outils sont en effet conçus pour travailler soit dans la partie terrestre soit dans la partie marine du littoral, mais ils ne permettent pas de couvrir simultanément ces deux types d'environnements. Or, cette zone côtière est capitale car elle représente l'une des zones les plus sensibles et les plus convoitées de l'espace naturel par l'action anthropique. La fusion des résultats issus de différentes techniques de mesures terrestres et marines devient donc un enjeu crucial afin d'aboutir à une cartographie intégrée et précise du littoral. Ce n'est qu'à ce stade seulement qu'une évaluation et une quantification exacte de l'érosion côtière pourra être entreprise.

Cette étude reprend donc les résultats du projet RES#LON, ou « Tailored Geomatics... for geohazard and georesources », ainsi que ceux du projet FUDOTERAM (Fusion des Données Terrestres et Marines). Le premier projet avait pour but de déterminer l'érosion côtière le long de la baie des Chaleurs en 2003 et 2004 à partir de mesures aéroportées effectuées au moyen de deux systèmes de relevés terrestres : la vidéogrammétrie et le système aéroporté altimétrique laser LiDAR. Néanmoins, un certain nombre de problèmes techniques empêchait de développer, avec ce seul projet, un système intégré parfait au niveau de la cartographie des faciès côtiers terrestres et marins car la combinaison des systèmes vidéographique et LiDAR ne permettait pas d'appréhender la partie sous marine de la zone côtière alors que celle-ci constitue la zone de réponse de l'érosion et le siège d'un très important habitat faunique. Le deuxième projet était, pour sa part, la continuité du projet RES#LON et utilisait un LiDAR bathymétrique qui permit de couvrir à la fois la partie émergée du littoral et la partie sous-marine, jusqu'à une profondeur d'environ -20 m. Ce second projet a donc permis de cartographier en 2006 la zone sensible du littoral le long de deux portions de côte gaspésienne (secteurs de Saint-Siméon – Bonaventure et de Paspébiac – Saint-Godefroi) en intégrant à la fois la partie terrestre et la partie marine mais sans étudier la problématique de l'érosion côtière et de sa dynamique.

Cette nouvelle étude a remédié à cela en intégrant les deux jeux de données altimétriques laser et a ainsi permis d'avoir un aperçu plus complet et fiable de l'évolution de ces systèmes côtiers durant la période 2003-2006, ainsi que des phénomènes impliqués dans la dynamique côtière des secteurs de Saint-Siméon – Bonaventure et de Paspébiac – Saint-Godefroi.

Les changements observés entre 2003, 2004 et 2006 sur les littoraux de ces deux secteurs d'étude révèlent une grande variabilité spatiale des processus érosifs côtiers. Ainsi, loin de répondre aux forçage hydrodynamiques locaux de façon homogène, les côtes de Saint-Siméon, de Bonaventure, de Paspébiac et de Saint-Godefroi se caractérisent par une alternance de zones d'érosion et d'accrétion au niveau du trait de côte. Ces zones sont généralement de faibles dimensions et indiquent l'existence de nombreuses petites cellules littorales interagissant faiblement entre elles. La taille de ces cellules littorales est habituellement comprise entre une centaine de mètres et un kilomètre, rarement plus.

Cette fragmentation de la circulation littorale est à mettre, en majeure partie, sur le compte des nombreux ouvrages anthropiques transversaux (quais, jetées, épis d'arrêt) qui parsèment le rivage et perturbent le transport sédimentaire local ainsi que l'hydrodynamisme côtier. À cela s'ajoute la présence de plusieurs cours d'eau et rivières dont les apports terrigènes conduisent à la mise en place de petits deltas sur les plages qui modifient également la dynamique côtière locale des plages adjacentes.

En outre, l'absence d'apports sédimentaires fluviaux importants, l'empierrement des talus à des fins protectives, qui réduit considérablement les apports sédimentaires par érosion de l'arrière-plage dans les secteurs de Saint-Siméon et de Bonaventure, ainsi que la présence d'herbiers de zostères marines et de laminaires sur l'avant-côte des secteurs étudiés, qui contribuent au piégeage des sédiments fins apportés depuis la plage lors des tempêtes, sont autant d'éléments qui contribuent à l'érosion des plages de ces secteurs.

De façon plus détaillée, les résultats de la présente étude ont permis de mettre en évidence les éléments suivants:

- la zone du havre de pêche du Ruisseau-Leblanc (secteur de Saint-Siméon) peut être considérée comme stable ou en légère accrétion à l'ouest du port, et en érosion à l'est du port. Cette érosion est provoquée par la présence du port qui interrompt le transport sédimentaire côtier local d'ouest en est.
- La zone des talus de Saint-Siméon est caractérisée par un trait de côte stabilisé artificiellement, un amaigrissement vertical de l'avant-plage et une instabilité des talus constituant l'arrière-plage. De nombreuses zones de glissement dans les talus de ce secteur sont ainsi révélées par les relevés aéroportés laser de 2004.
- Au niveau de l'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure, le stock sédimentaire constituant la flèche d'embouchure reste relativement stable dans le temps et les variations importantes observées le long de cette portion de côte ne correspondent pas à une érosion nette du système, mais plutôt à une redistribution des sédiments le long de la structure sédimentaire. La flèche n'offre néanmoins qu'une protection limitée contre les houles de tempêtes et l'arrière-plage reste vulnérable.
- Les plages du marais de Saint-Siméon se caractérisent par une tendance générale à l'érosion, bien que la présence des vestiges d'un ancien quai sur l'avant-plage puisse provoquer une accrétion temporaire et très localisée en amont de cette structure.
- Le trait de côte intérieur du marais reste pour sa part stable et présente même par endroits une légère tendance à l'accrétion au niveau de l'embouchure de plusieurs petits ruisseaux.
- La flèche graveleuse qui protège le marais côtier de Saint-Siméon se caractérise par un engraissement significatif et des modifications morphologiques indiquant une transgression de la barrière sur la vasière du marais intertidal. Cette transgression n'apparaît cependant pas constante et semble contrôlée par les houles de tempête provenant du secteur est.
- La zone des talus de Bonaventure, tout comme celle de Saint-Siméon, est caractérisée par un trait de côte artificiellement stabilisé par des empierrements au niveau du pied des talus. Ces derniers apparaissent néanmoins plus stables que ceux de Saint-Siméon car ils ne présentent pas les nombreux affaissements et glissements visibles au niveau des talus de Saint-Siméon. Les seules variations significatives observées le long de ce secteur se trouvent dans les environs immédiats des embouchures des ruisseaux

Arsenault, Cayouette et Gauvreau et correspondent respectivement à deux zones d'accrétion et une zone d'érosion.

- La flèche occidentale du barachois de Bonaventure présente pour sa part un caractère stable ou en légère accrétion pour les périodes de relevés considérées. Cependant, le transport sédimentaire côtier qui se déroule le long de la flèche occidentale du barachois est perturbé par la présence, sur l'avant-côte, des restes d'anciens quais de pêche. Il en résulte des zones localisées d'accrétion en amont (ouest) et des zones localisées d'érosion en aval (est) de chacun de ces obstacles.
- La flèche orientale présente, pour sa part, un bilan sédimentaire en nette érosion. Cette tendance montre cependant une grande variabilité spatiale le long de la structure sédimentaire où des zones localisées d'accrétion alternent avec des zones de forte érosion.
- L'avant-côte des secteurs de Saint-Siméon et de Bonaventure est dominée par les faciès sableux à proximité de la côte, la largeur de ce placage de sables variant de 60 m à 350 m selon les endroits. Plus au large, les sables sont remplacés par un faciès étroit et plus grossier de graviers et de galets qui s'étend sur environ 50 m, auquel succède rapidement le substratum rocheux à partir de l'isobathe de -4 m. Ces faciès sont généralement colonisés par des espèces végétales benthiques telles que les zostères marines (*Zostera marina*) pour les sables ou les fucus (*Fucus sp.*) et les laminaires (*Laminaria sp.*) pour les galets et les roches affleurantes. La carte la plus détaillée du secteur proposée par Collin (2009) révèle néanmoins une grande hétérogénéité des environnements benthiques côtiers, et l'avant-côte sableuse se présente, en réalité, comme une mosaïque d'herbiers de zostères marines et de zones de sables fins à moyens non végétées auxquels se mélangent des affleurements de graviers et de galets épars. Au-delà d'une distance de 250 m par rapport à la côte, les fonds sous-marins sont plutôt constitués d'une importante couverture de laminaires entrecoupée d'affleurements de roche, de galets ou de sables fins à moyens.
- Pour le secteur de Paspébiac, la présente étude confirme les résultats antérieurs qui montraient une stabilité du cordon ouest du barachois et une forte érosion de cordon est. La grande densité de mesures laser a en outre permis de mettre en évidence une grande variabilité du taux de recul le long de la barrière orientale, la moitié nord

subissant un recul important de -7 m/a tandis que la moitié sud ne présente qu'une érosion modérée de -3 m/a. Les données bathymétriques ont permis de corréler les différences de taux de recul le long de cette barrière avec la morphologie des barres d'avant-côte, et en particulier avec celle de la barre intérieure.

- Les relevés bathymétriques laser ont en outre permis de mettre en évidence une série de structures sédimentaires sous-marines (barres d'avant-côte, dunes hydrauliques, dépôts sédimentaires) qui ont permis de mieux décrire la dynamique côtière locale. L'étude morphologique de ces structures a ainsi mis en évidence l'existence de plusieurs transports sédimentaires côtiers selon les conditions hydrodynamiques (normales ou de tempête) et selon la direction des houles (SO ou SE).
- Les cartes morpho-sédimentaires montrent en outre que le barchois est composé exclusivement de sables, ceux-ci pouvant aller de fin au sommet des dunes hydrauliques à grossier dans les creux. Ces sables peuvent être mélangés par endroits à des galets. La zone des sables s'étend jusqu'à la plage à Norbert (inclue) avant de faire place à des fonds plus rocheux dans le secteur des falaises. L'avant-côte de ce secteur se présente surtout comme une mosaïque de fonds sous-marins sablo-graveleux, colonisés localement par des fucus dans la zone intertidale et de laminaires dans la zone infralittorale, de fonds sableux uniformes n'exhibant aucune structure sédimentaire détectable par LiDAR (ces fonds sont surtout présent au droit des épis d'arrêt de la plage à Norbert et de la plage de Hopetown) et d'affleurements rocheux, ces derniers pouvant même être observés très localement dans la zone intertidale comme sur la plage à Norbert.
- Dans le secteur de Saint-Godefroi, la géométrie des dépôts provenant de l'effondrements de pans de falaises, ainsi que la disposition des zones d'accrétion identifiées le long des côtes rocheuses, constituent autant d'indices de l'existence d'un transport littoral orienté vers le sud-ouest à partir de la pointe à Ritchie. Il est probable que ce transport se poursuive tout le long des falaises jusqu'au secteur de Paspébiac qui en constituerait ainsi l'aboutissement. En outre, tout comme dans le secteur des falaises de Paspébiac, la dérive littorale semble être alimentée en grande partie par l'érosion des dépôts situés au pied des falaises et provenant des effondrements qui se produisent dans les falaises et les talus.

- La plage constituant la partie sud-ouest du barachois de Hope Town présente un caractère relativement stable durant la période de relevés. Seule la zone de l'embouchure de la rivière Le Barachois subit des changements significatifs indiquant une légère érosion.
- La flèche nord-est du barachois est caractérisée, pour sa part, par une érosion soutenue, celle-ci touchant surtout la basse plage.
- La zone des talus doit être considérée comme en érosion, bien que la section de route empierrée reste stable. Cependant, lorsque aucune protection n'est présente, les talus qui constituent l'arrière-plage présentent des cicatrices d'érosion et des pertes évaluées à plusieurs centaines de mètres cubes.
- Enfin, les cartes morpho-sédimentaires de ce secteur révèlent que la quantité de sédiments disponibles pour le transport sédimentaire littoral local est très limitée, la couverture sableuse restant peu étendue (~48000 m²). Au-delà, les cartes montrent que le substratum rocheux constitue l'essentiel des fonds marins.

BIBLIOGRAPHIE

- Bergeron, P., 1995. *Étude de faisabilité de la restauration et de la mise en valeur du barachois de Paspébiac*. Biorex Inc. Sainte-Foy, Québec, Canada. 216 pages.
- Boucher, M., 2007. *Relations empiriques des données laser aéroportées (LiDAR) et des paramètres géologiques et géotechniques au sol, Golfe du Saint-Laurent, Baie des Chaleurs, Québec*. Mémoire en Sciences de la terre. INRS-ETE, Université du Québec, Québec, Canada. 189 pages.
- Bowen, A. J., 1967. *Rip currents*. Thèse. Université de Californie, San Diego, CA, USA. 115 pages.
- Bowen, A. J., D. L. Inman, V. P. Simmons, 1968. *Wave set-down and set-up*, Journal of Geophysical Research, 73(8), pp. 2569-2577.
- Bowen, A. J., 1969. *Rip Currents 1. Theoretical Investigations*, Journal of Geophysical Research., 74(23), pp. 5467-5478.
- Bowen, A. J., and D. L. Inman, 1969. *Rip currents 2. Laboratory and field observations*, Journal of Geophysical Research, 74(23), pp. 5479-5490.
- Collin, A., 2009. *Coalescence de l'écologie du littoral et de la technologie aéroportée du LiDAR ubiquiste*. Thèse en Sciences de la Terre. Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC, Canada. 280 pages.
- Cottin, A., 2008. *Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière peu profonde dans la Baie des Chaleurs, Québec, Canada*. Thèse en Sciences de la Terre. Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC, Canada. 259 pages.
- Dalrymple, R. A., 1975. *A mechanism of rip current generation on an open coast*, Journal of Geophysical Research, 80, pp. 3485-3487.
- Dean, R. G., 1991. *Handbook of coastal and ocean engineering. volume 2. offshore structures, marine foundations, sediment processes and modeling*. Gulf Publishing Co., Houston, TX, USA, vol. 715-734.
- Keramoal, Y., 2008. *Analyse du signal provenant du système aéroporté SHOALS* (LiDAR bathymétrique) pour la détection du fond marin*. Rapport de projet de fin d'études, ENSIETA, France. 63 pages.
- Komar, P. D., 1976. *Beach processes and sedimentation*. Prentice-Hall, New Jersey, USA. 431 pages.
- Long, B. F., 2006. *Étude hydrodynamique, sédimentologique et biologique des sites de Maria, Saint-Siméon, Bonaventure, Newport et Cap-d'Espoir dans la baie des Chaleurs, Québec, Canada*. Rapport pour le Ministère des Transports du Québec. INRS-ETE, Québec, QC, Canada. 121 pages, annexes.

- Long, B. F., L. Renaud, 1999. *Impact du retrait de l'épi rocheux de la plage à Norbert, Paspébiac, Québec*. Rapport pour la Chambre du Commerce du Grand Paspébiac, UQAR, Rimouski, QC, Canada. 5 pages.
- McKenzie, R., 1958. *Rip current system*, The Journal of Geology, 66, pp. 103– 113.
- Munk, W. H., and M. A. Traylor, 1947. *Refraction of Ocean Waves: A process linking underwater topography to beach erosion*, The Journal of Geology, 55, pp. 1-26.
- Poirier, C., 2002. *Étude hydraulique – Réfection d'une protection de pierre le long de la route 132 municipalité de Bonaventure*. Gouvernement du Québec, ministère des Transports du Québec, QC, Canada. 66 pages.
- Poirier, C., 2003a. *Étude hydraulique – Érosion de la rive de la Baie des Chaleurs le long de la route 132 municipalité de Saint-Godefroi*. Gouvernement du Québec, ministère des Transports du Québec, QC, Canada. 82 pages.
- Poirier, C., 2003b. *Étude hydraulique – Érosion de la rive de la Baie des Chaleurs le long de la route 132 municipalité de Shigawake*. Gouvernement du Québec, ministère des Transports du Québec, QC, Canada. 77 pages.
- Renaud, L., 2001. *Évolution et dégradation du barachois de Paspébiac*. Mémoire de Maîtrise en Sciences océanographiques. UQAR, Rimouski, QC, Canada. 123 pages.
- Ropars, Y., 1997. *Paspébiac, restauration du barachois*. Rapport technique, Travaux publics et Services gouvernementaux du Canada. 71 pages.
- Shepard, F. P., K. O. Emery, E. C. LaFond, 1941. *Rip currents: A process of geological importance*, The Journal of Geology, 49, pp. 337– 369.
- Sonu, C. J., 1972. *Field Observation of Nearshore Circulation and Meandering Currents*, Journal of Geophysical Research, 77(18), 3232–3247.
- Syvitski, J., 1992. *Marine geology of Baie des Chaleurs*. Géographie physique et quaternaire, 1992, 46, pp. 331-348.
- Xhardé, R., 2007. *Évaluation du potentiel des techniques aéroportées vidéographique et lidar appliquées à l'étude des risques naturels en milieu côtier*. Thèse en Sciences de la Terre, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC, Canada. 265 pages.

ANNEXE 1 – DESCRIPTION DES LIVRABLES

Livrables fournis dans l'annexe 4 (support DVD)

Répertoire 2003 (DVD #1)

Nom de fichier	Saint-Siméon trait de côte 2003.shp
Description	Position du trait de côte à Saint-Siméon en 2003, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 1 m.
Nom de fichier	Bonaventure trait de côte 2003.shp
Description	Position du trait de côte à Bonaventure en 2003, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 1 m.
Nom de fichier	Paspébiac trait de côte 2003.shp
Description	Position du trait de côte à Paspébiac en 2003, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 1 m.
Nom de fichier	Saint-Godefroi trait de côte 2003.shp
Description	Position du trait de côte à Saint-Godefroi en 2003, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 1 m.
Nom de fichier	Saint-Siméon topo 2003.shp
Description	Courbes de niveau topographiques du secteur de Saint-Siméon en 2003, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 1 m.
Nom de fichier	Bonaventure topo 2003.shp
Description	Courbes de niveau topographiques du secteur de Bonaventure en 2003, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 1 m.
Nom de fichier	Paspébiac topo 2003.shp
Description	Courbes de niveau topographiques du secteur de Paspébiac en 2003, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 1 m.
Nom de fichier	Saint-Godefroi topo 2003.shp
Description	Courbes de niveau topographiques du secteur de Saint-Godefroi en 2003, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 1 m.

Livrables fournis dans l'annexe 4 (support DVD) - suite

Répertoire 2004 (DVD #1)

Nom de fichier	Saint-Siméon trait de côte 2004.shp
Description	Position du trait de côte à Saint-Siméon en 2004, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 1 m.
Nom de fichier	Bonaventure trait de côte 2004.shp
Description	Position du trait de côte à Bonaventure en 2004, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 1 m.
Nom de fichier	Paspébiac trait de côte 2004.shp
Description	Position du trait de côte à Paspébiac en 2004, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 1 m.
Nom de fichier	Saint-Godefroi trait de côte 2004.shp
Description	Position du trait de côte à Saint-Godefroi en 2004, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 1 m.
Nom de fichier	Saint-Siméon topo 2004.shp
Description	Courbes de niveau topographiques du secteur de Saint-Siméon en 2004, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 1 m.
Nom de fichier	Bonaventure topo 2004.shp
Description	Courbes de niveau topographiques du secteur de Bonaventure en 2004, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 1 m.
Nom de fichier	Paspébiac topo 2004.shp
Description	Courbes de niveau topographiques du secteur de Paspébiac en 2004, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 1 m.
Nom de fichier	Saint-Godefroi topo 2004.shp
Description	Courbes de niveau topographiques du secteur de Saint-Godefroi en 2004, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 1 m.

Livrables fournis dans l'annexe 4 (support DVD) - suite

Répertoire 2006 (DVD #1)

Nom de fichier	Saint-Siméon et Bonaventure - trait de côte 2006 (Hydro 4x4).shp
Description	Position du trait de côte à Saint-Siméon et Bonaventure en 2006, coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 6 m.
Nom de fichier	Saint-Siméon et Bonaventure - trait de côte 2006 (Topo).shp
Description	Position du trait de côte à Saint-Siméon et Bonaventure en 2006, coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 2,5 m.
Nom de fichier	Saint-Siméon et Bonaventure - trait de côte 2006 (Hydro 2x2).shp
Description	Position du trait de côte à Saint-Siméon et Bonaventure en 2006, coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 4 m.
Nom de fichier	Saint-Siméon et Bonaventure - topo 2006 (Hydro 4x4 -1139a).shp
Description	Courbes de niveau topographiques du secteur de Saint-Siméon et Bonaventure en 2006, coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 6 m, zone 1139a.
Nom de fichier	Saint-Siméon et Bonaventure - topo 2006 (Hydro 4x4 -1147a).shp
Description	Courbes de niveau topographiques du secteur de Saint-Siméon et Bonaventure en 2006, coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 6 m, zone 1147a.
Nom de fichier	Saint-Siméon et Bonaventure - bathymétrie 2006 (Hydro 4x4).shp
Description	Courbes de niveau bathymétriques (isobathes) du secteur de Saint-Siméon et Bonaventure en 2006, coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 6 m.
Nom de fichier	Saint-Siméon et Bonaventure - topo et bathy 2006 (Hydro 2x2).shp
Description	Courbes de niveau topographiques et bathymétriques du secteur de Saint-Siméon et Bonaventure en 2006, coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 4 m, zone 1759b.

Livrables fournis dans l'annexe 4 (support DVD) - suite

Nom de fichier	1139a-hill235
Description	Modèle numérique de terrain avec contrastes accentués réalisé à partir des données acquises en mode hydrographique basse densité, secteur de Saint-Siméon et Bonaventure (côte), coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers.
Nom de fichier	1147a-hill235
Description	Modèle numérique de terrain avec contrastes accentués réalisé à partir des données acquises en mode hydrographique basse densité, secteur de Saint-Siméon et Bonaventure (mer), coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers.
Nom de fichier	1759b-hill200
Description	Modèle numérique de terrain avec contrastes accentués réalisé à partir des données acquises en mode hydrographique haute densité, secteur de Saint-Siméon et Bonaventure, coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS 84), élévations par rapport au niveau moyen des mers.
Nom de fichier	Paspébiac et Saint-Godefroi - trait de côte 2006 (Hydro 4x4).shp
Description	Position du trait de côte à Paspébiac et Saint-Godefroi en 2006, coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 6 m.
Nom de fichier	Paspébiac et Saint-Godefroi - trait de côte 2006 (Hydro 2x2).shp
Description	Position du trait de côte à Paspébiac et Saint-Godefroi en 2006, coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 4 m.
Nom de fichier	Paspébiac et Saint-Godefroi - topo 2006 (Hydro 4x4 – 1139b).shp
Description	Courbes de niveau topographiques du secteur de Paspébiac et Saint-Godefroi en 2006, coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 6 m, zone 1139b.
Nom de fichier	Paspébiac et Saint-Godefroi - topo 2006 (Hydro 4x4 – 1147b).shp
Description	Courbes de niveau topographiques du secteur de Paspébiac et Saint-Godefroi en 2006, coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 6 m, zone 1147b.

Livrables fournis dans l'annexe 4 (support DVD) - suite

Nom de fichier	Paspébiac et Saint-Godefroi - bathy 2006 (Hydro 4x4).shp
Description	Courbes de niveau bathymétriques (isobathes) du secteur de Paspébiac et Saint-Godefroi en 2006, coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 6 m.
Nom de fichier	Paspébiac et Saint-Godefroi – topo et bathy 2006 (Hydro 2x2).shp
Description	Courbes de niveau topographiques et bathymétriques du secteur de Paspébiac et Saint-Godefroi en 2006, coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers, précision du positionnement estimé à 4 m.
Nom de fichier	1139b-hill235
Description	Modèle numérique de terrain avec contrastes accentués réalisé à partir des données acquises en mode hydrographique basse densité, secteur de Paspébiac et Saint-Godefroi (côte), coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers.
Nom de fichier	1147b-hill235
Description	Modèle numérique de terrain avec contrastes accentués réalisé à partir des données acquises en mode hydrographique basse densité, secteur de Paspébiac et Saint-Godefroi (mer), coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers.
Nom de fichier	1132-hill235
Description	Modèle numérique de terrain avec contrastes accentués réalisé à partir des données acquises en mode hydrographique haute densité, secteur de Paspébiac et Saint-Godefroi, coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS 84), élévations par rapport au niveau moyen des mers.

Livrables fournis dans l'annexe 4 (support DVD) - suite

Répertoire MNT 2006 (DVD #2)

Nom de fichier	mntbonav2006
Description	Modèle numérique de terrain réalisé à partir des données acquises en mode hydrographique (haute et basse densités combinées), secteur de Bonaventure, coordonnées coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers.
Nom de fichier	mntssim2006
Description	Modèle numérique de terrain réalisé à partir des données acquises en mode hydrographique (haute et basse densités combinées), secteurs de Saint-Siméon à Bonaventure, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers.
Nom de fichier	mntpasp2006
Description	Modèle numérique de terrain réalisé à partir des données acquises en mode hydrographique (haute et basse densités combinées), secteur de Paspébiac et Saint-Godefroi, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers.
Nom de fichier	mntgod2006
Description	Modèle numérique de terrain réalisé à partir des données acquises en mode hydrographique (haute et basse densités combinées), secteur de Saint-Godefroi, coordonnées en MTM zone 5, élévations par rapport au niveau moyen des mers.
Nom de fichier	MNT Saint-Simeon et Bonaventure Hydro 2006 (Hydro 4x4)
Description	Modèle numérique de terrain mntssim2006 au format ASCII.
Nom de fichier	MNT Bonaventure 2006 (Hydro 2x2)
Description	Modèle numérique de terrain mntbonav2006 au format ASCII.
Nom de fichier	MNT Paspebiac et Saint-Godefroi 2006 (Hydro 4x4)
Description	Modèle numérique de terrain mntgod2006 au format ASCII.
Nom de fichier	mntbonav2006
Description	Modèle numérique de terrain réalisé à partir des données acquises en mode hydrographique basse densité, secteur de Paspébiac et Saint-Godefroi (terre), coordonnées géographiques (latitude, longitude, WGS84), élévations par rapport au niveau moyen des mers.
Nom de fichier	Résultats trait de côte - tout sites
Description	Mesures des variations horizontales de position du trait de côte pour les sites de Saint-Siméon, Bonaventure, Paspébiac et Saint-Godefroi, au format .xls.

ANNEXE 2 – MNT SECTEURS DE SAINT-SIMÉON ET BONAVENTURE

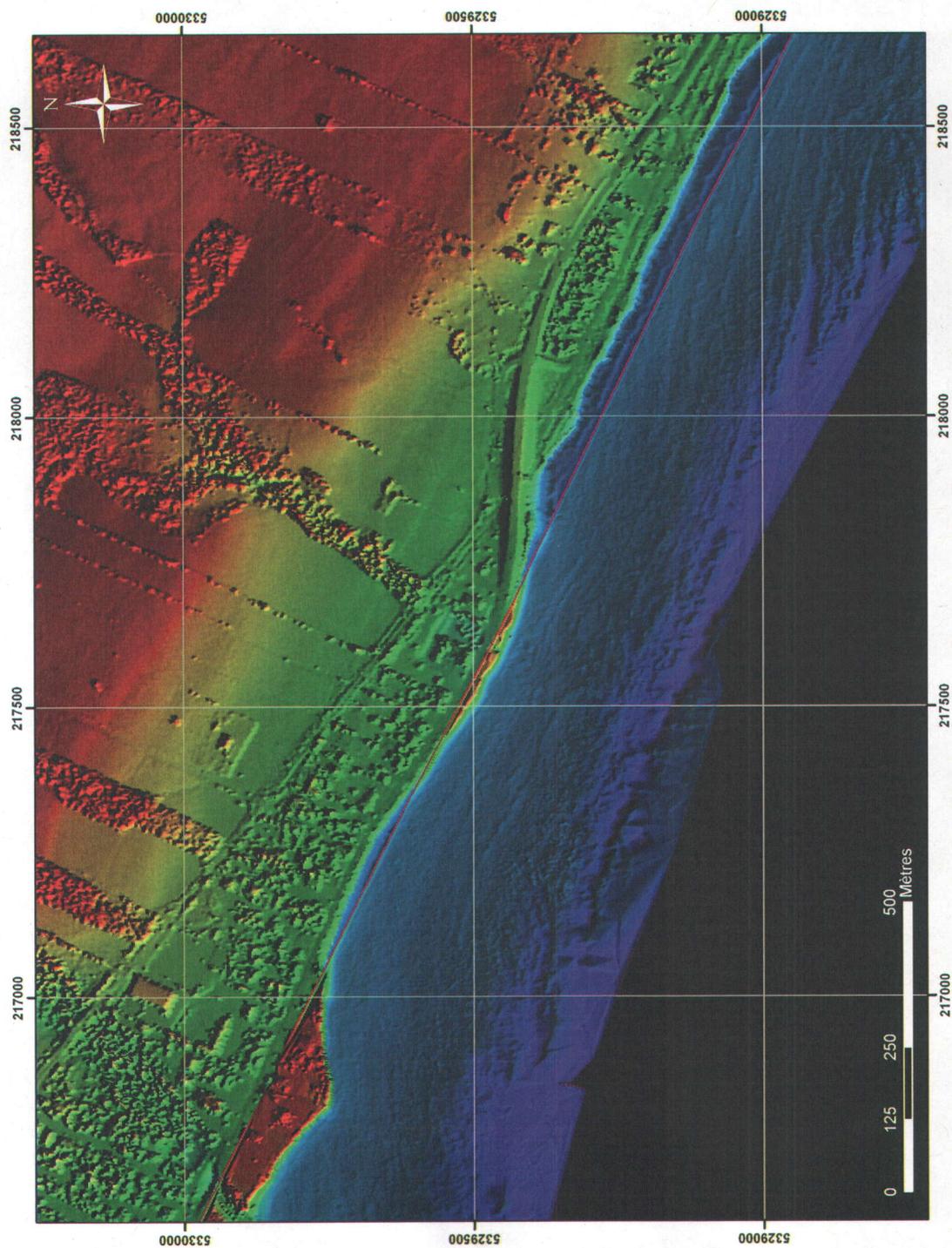


Figure A2.1 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).

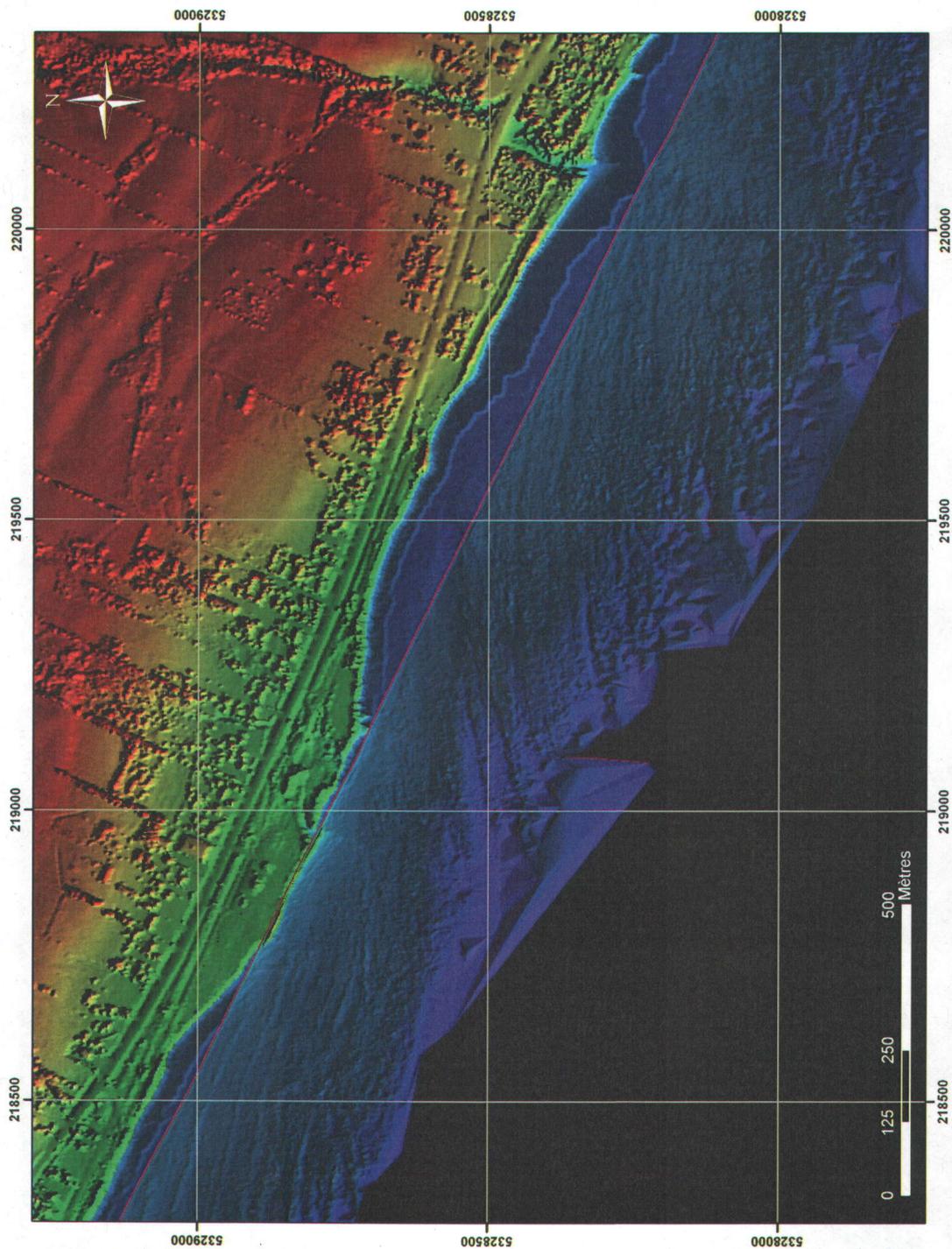


Figure A2.2 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).

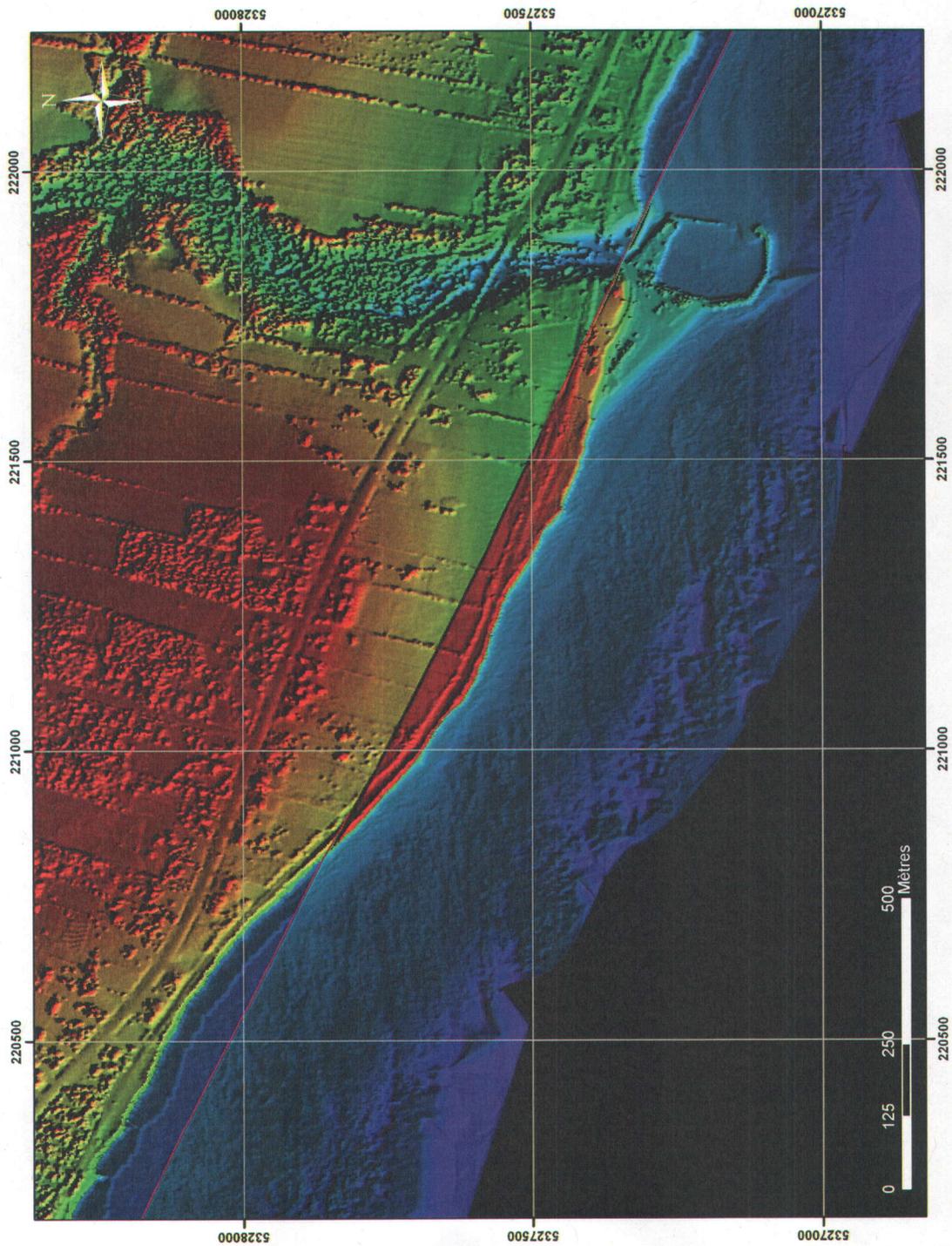


Figure A2.3 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

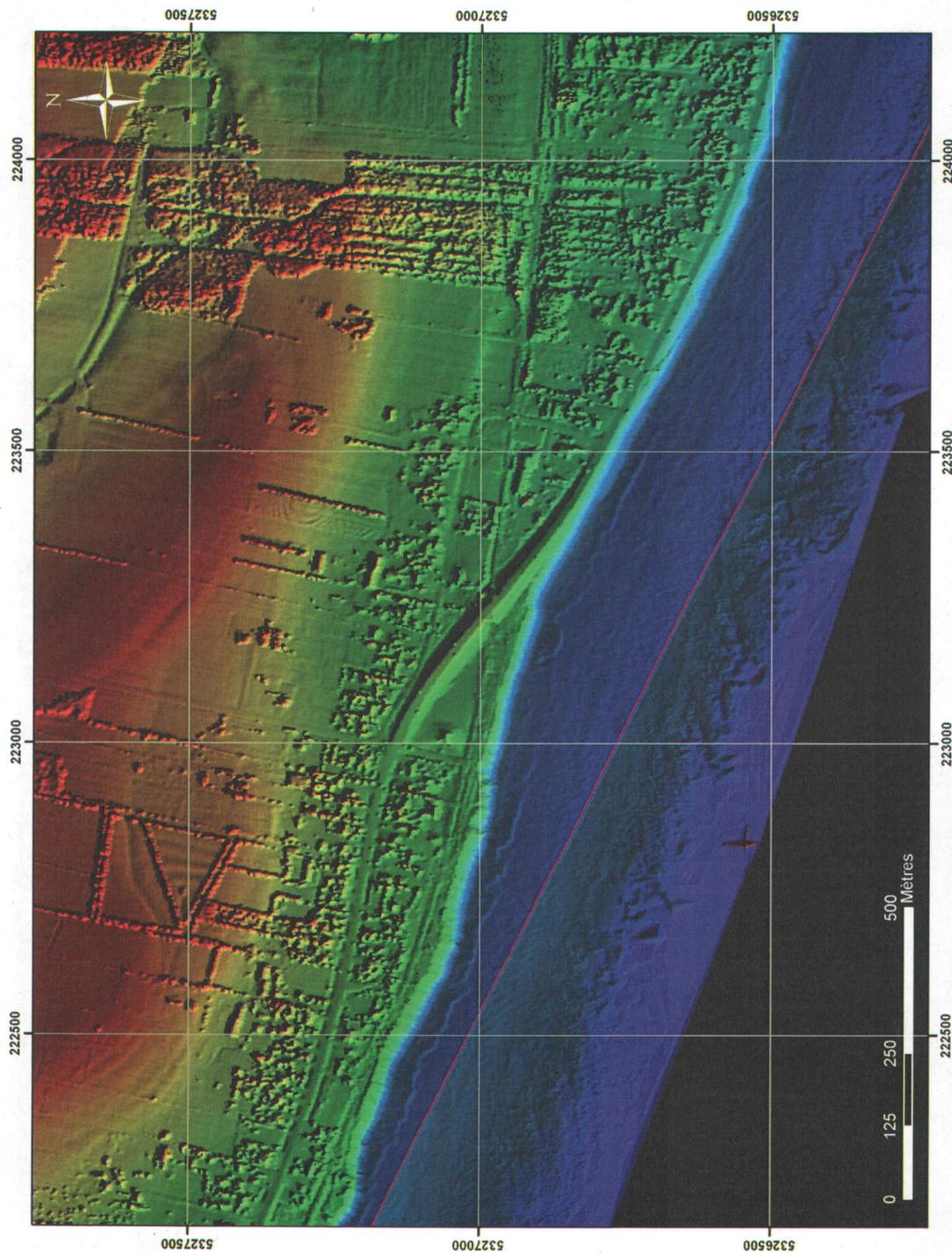


Figure A2.4 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

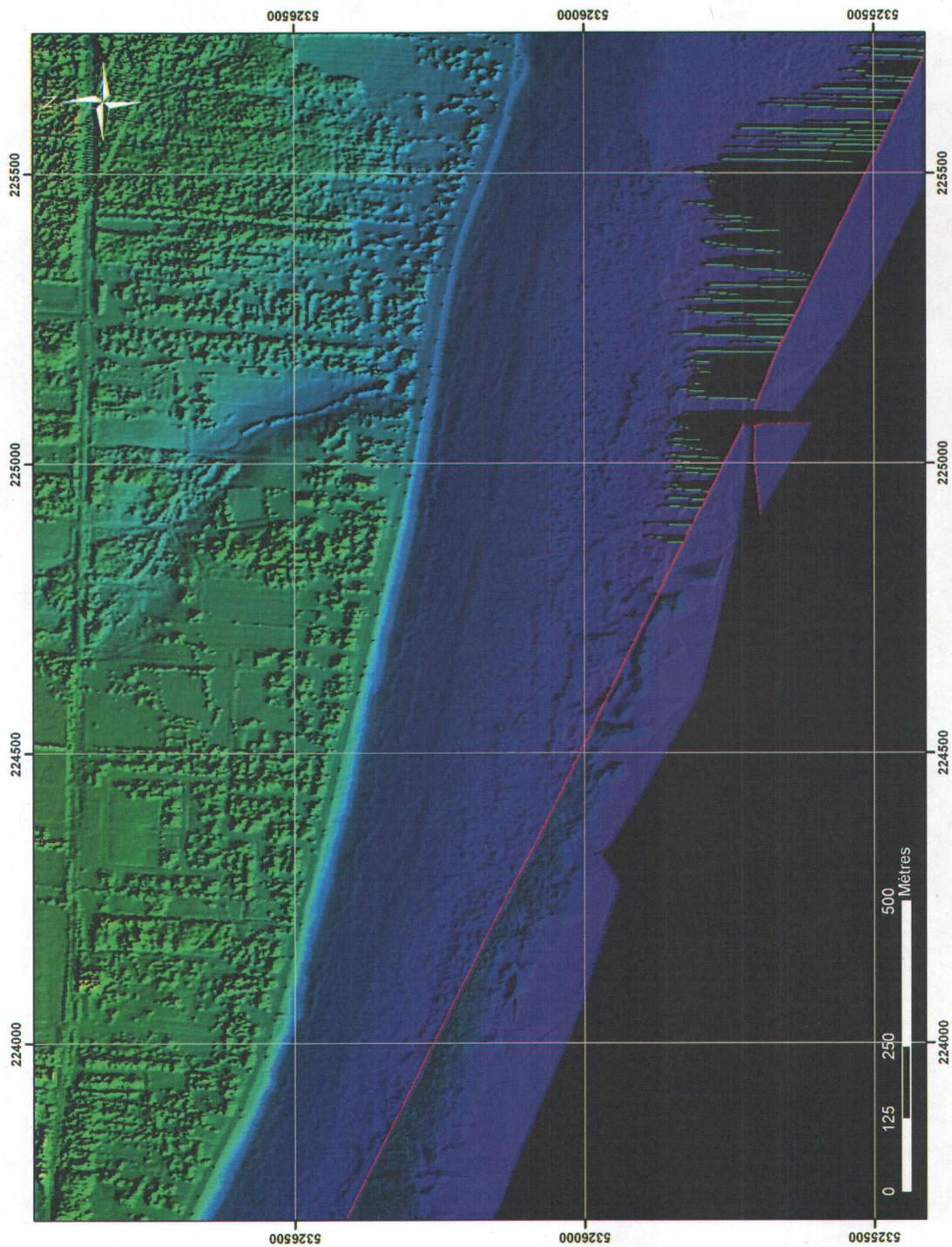


Figure A2.5 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

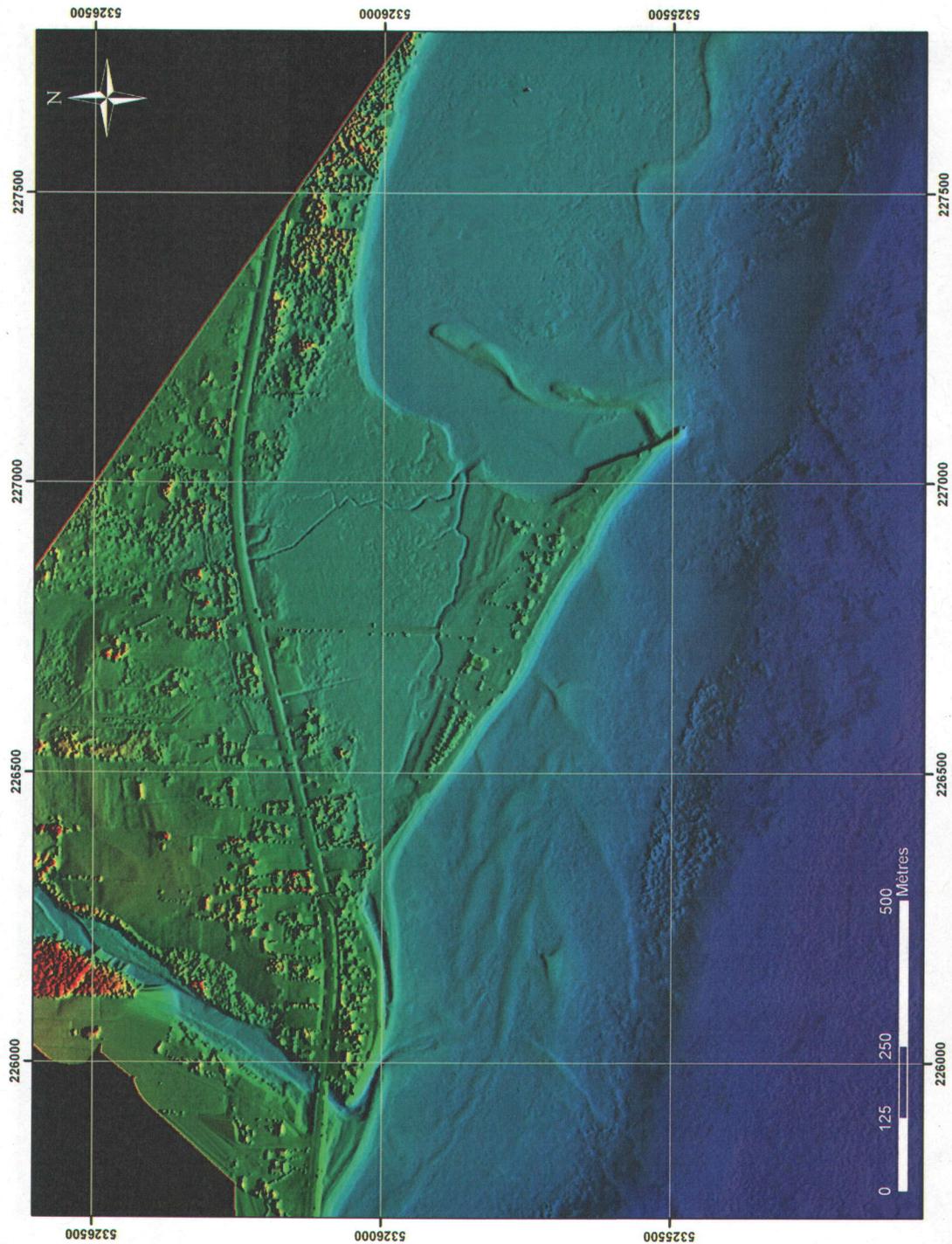


Figure A2.6 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).

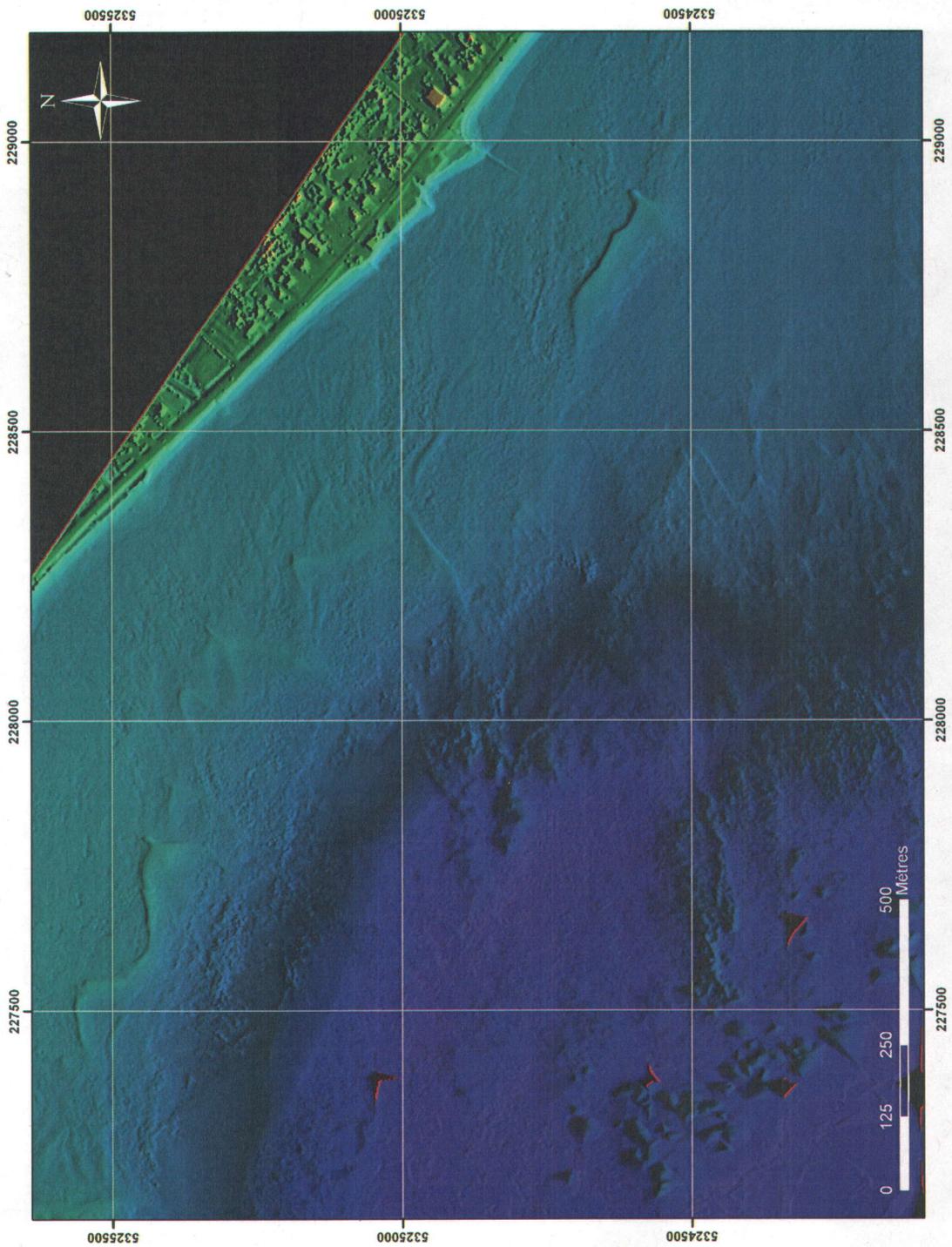


Figure A2.7 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

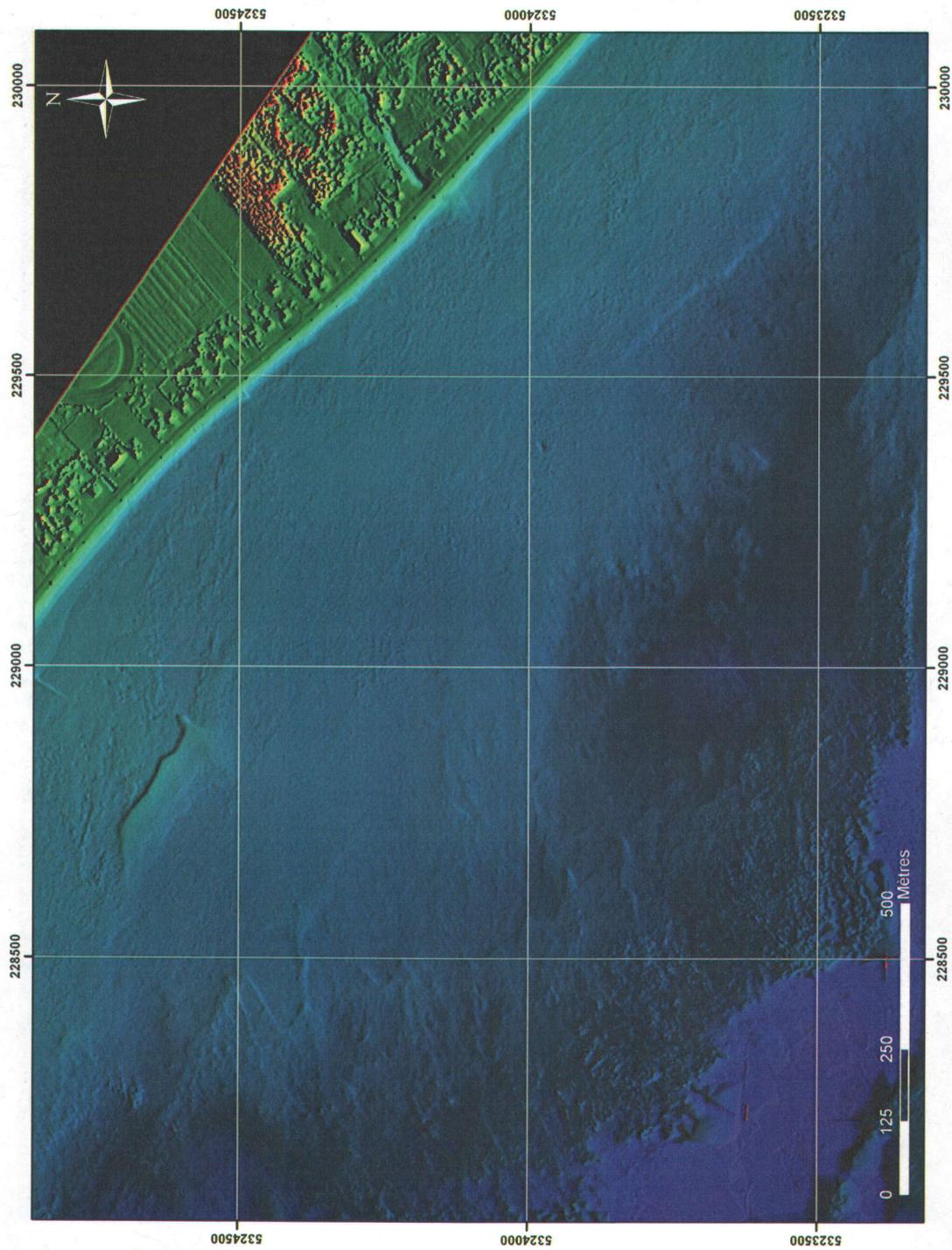


Figure A2.8 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).

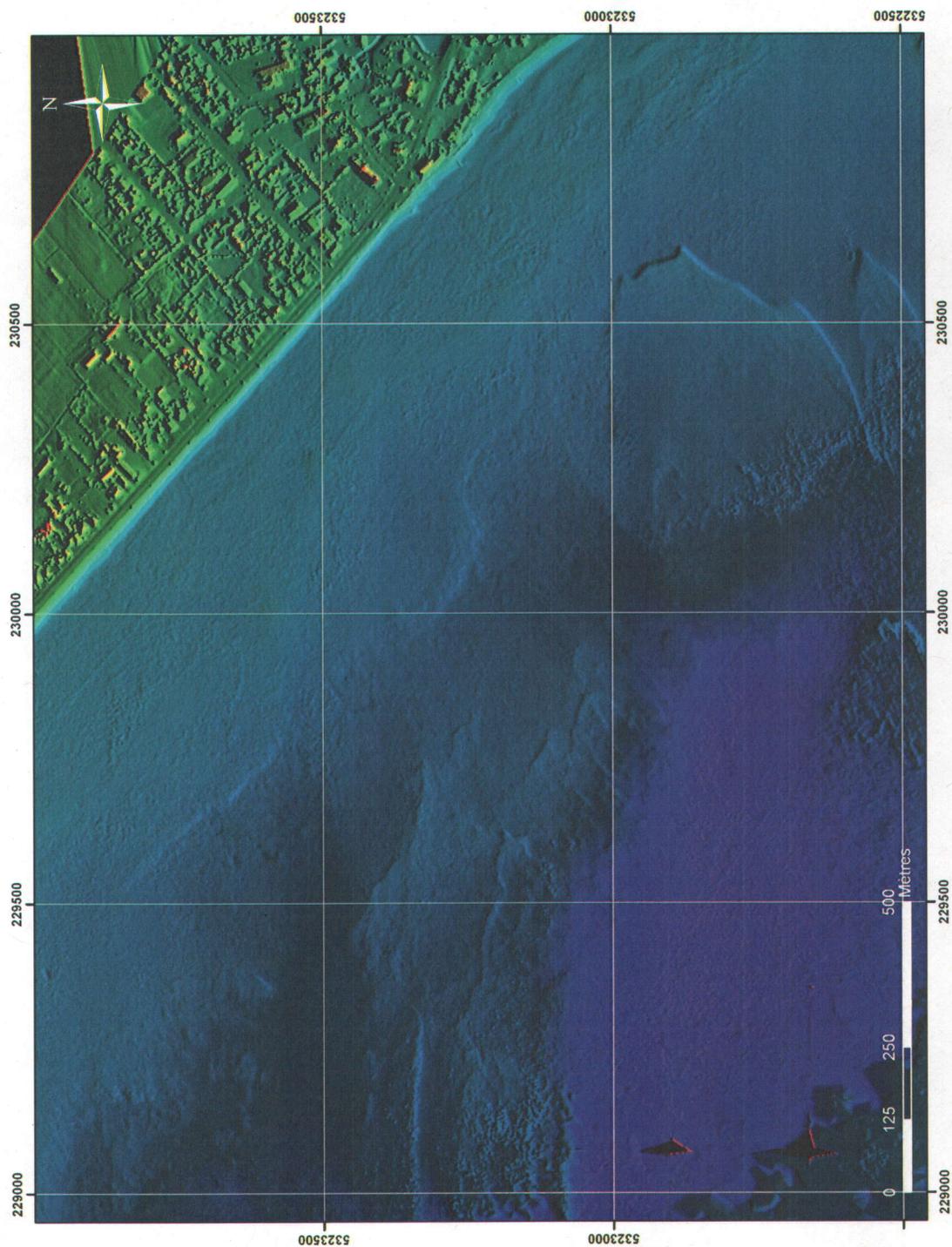


Figure A2.9 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

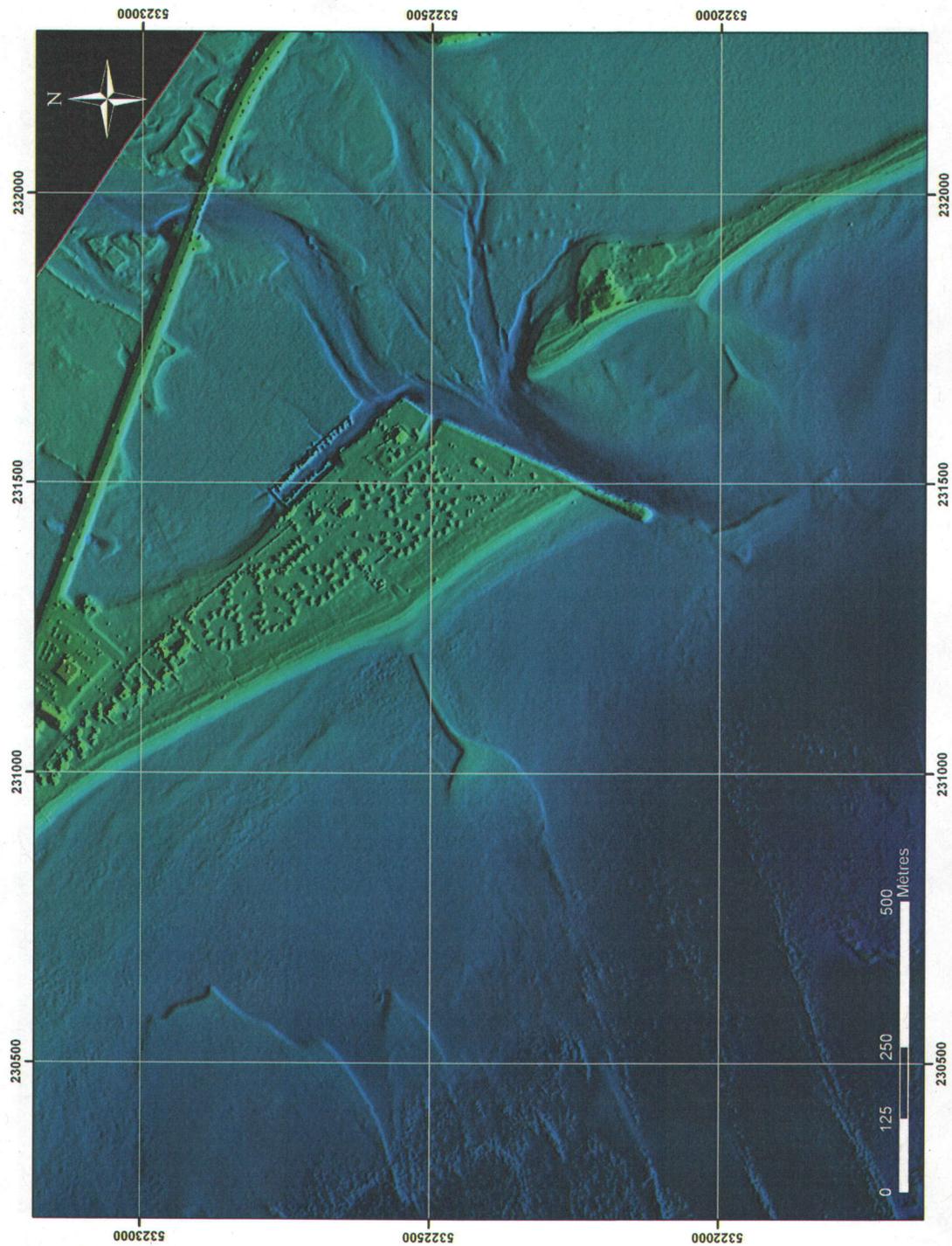


Figure A2.10 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

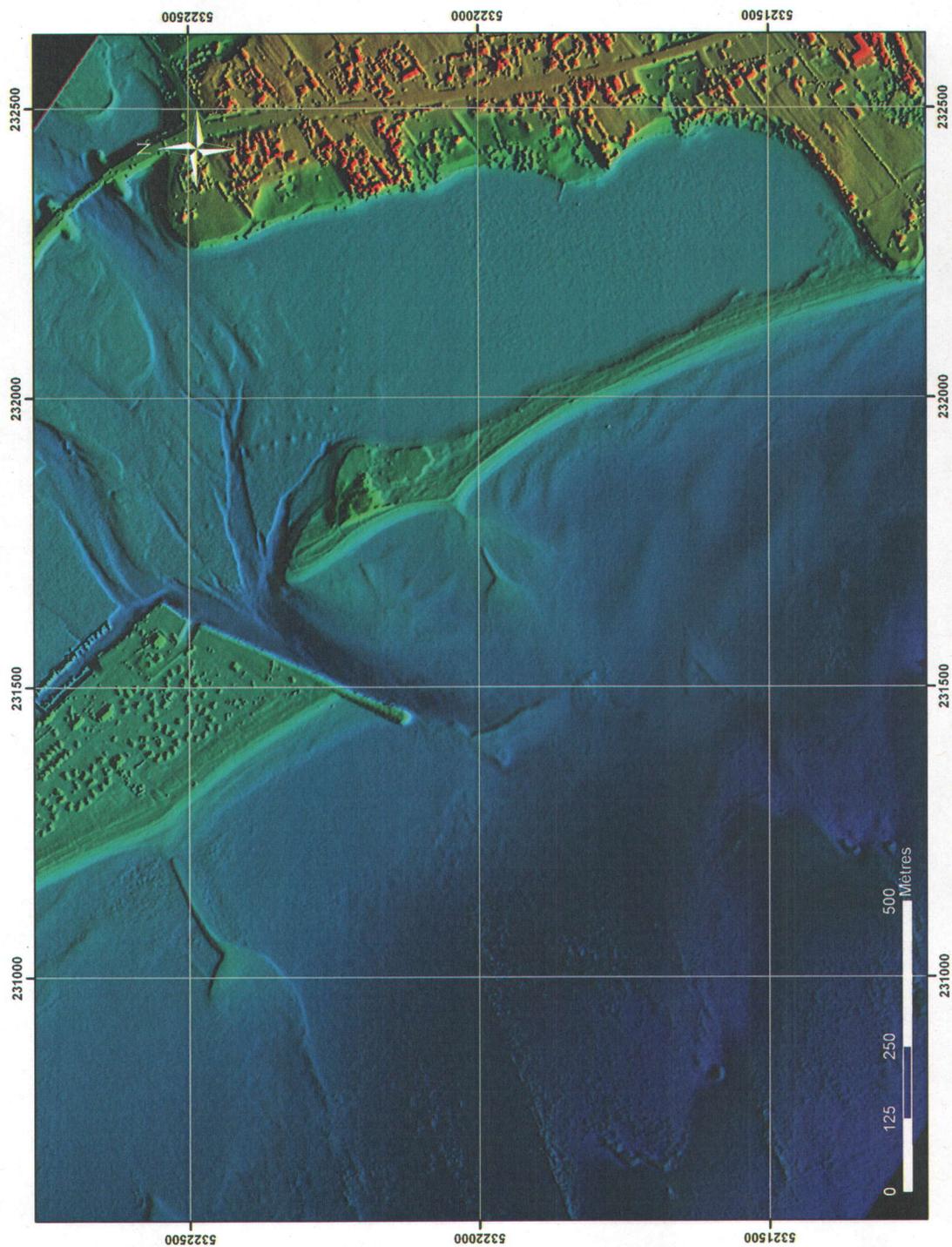


Figure A2.11 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

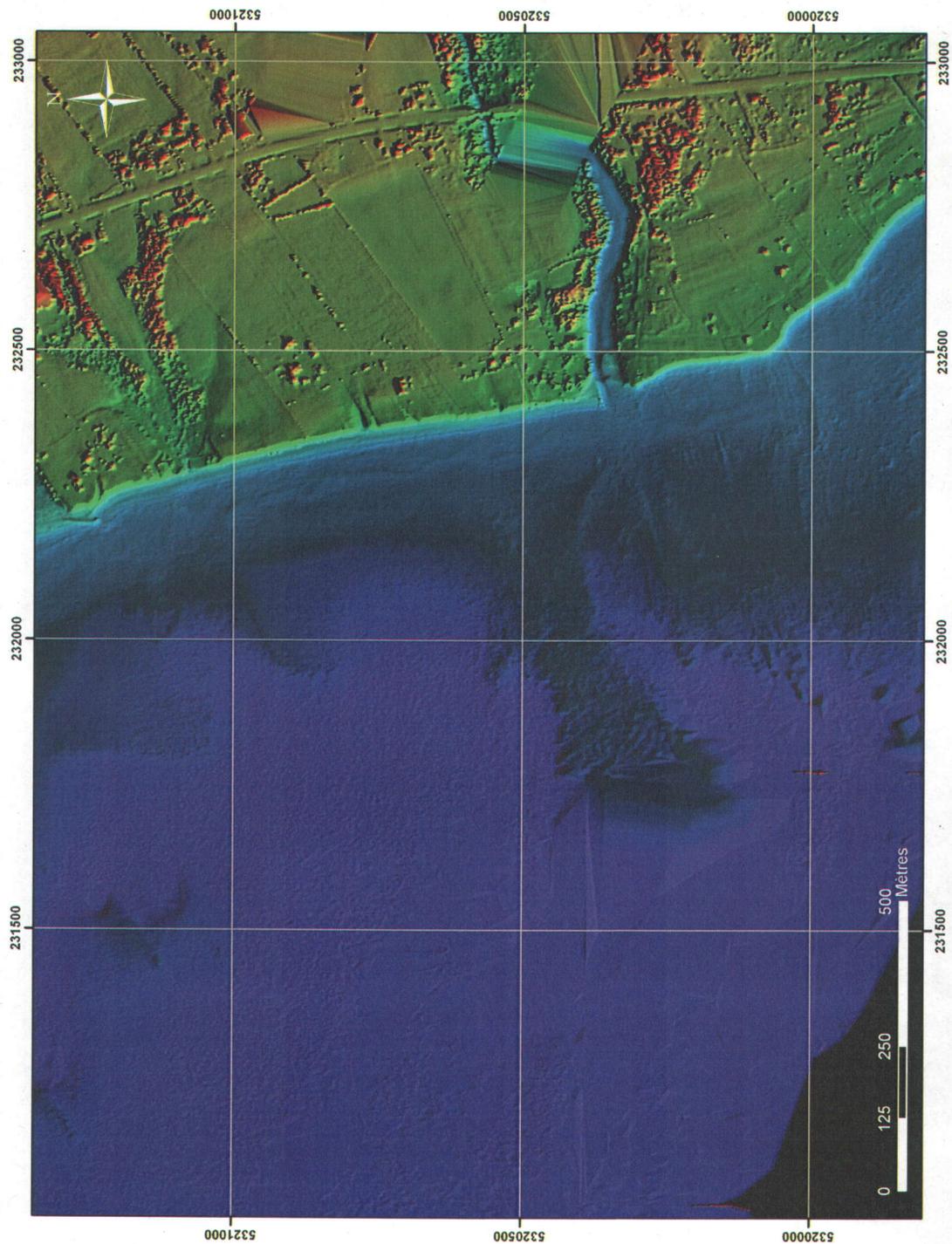


Figure A2.12 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

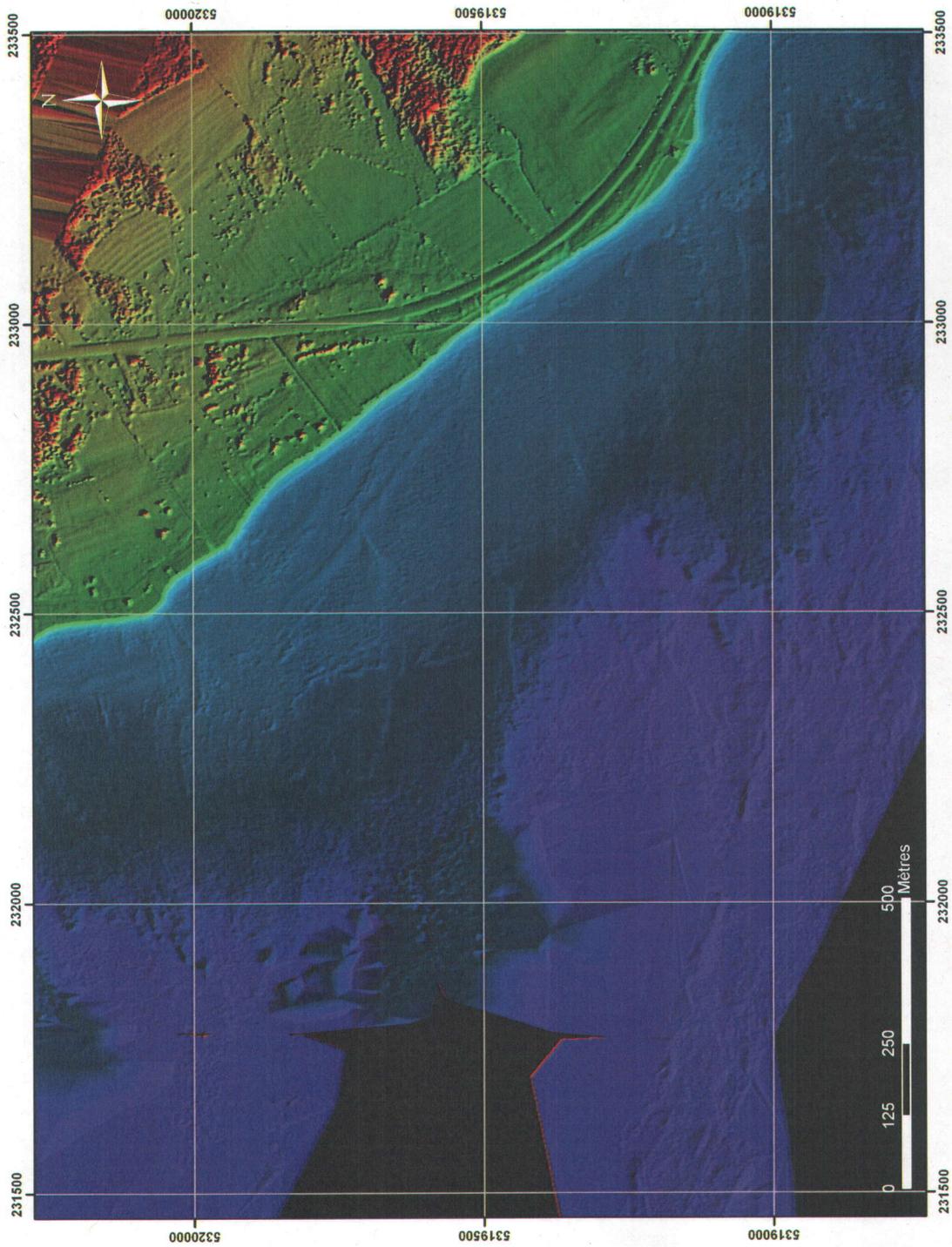


Figure A2.13 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

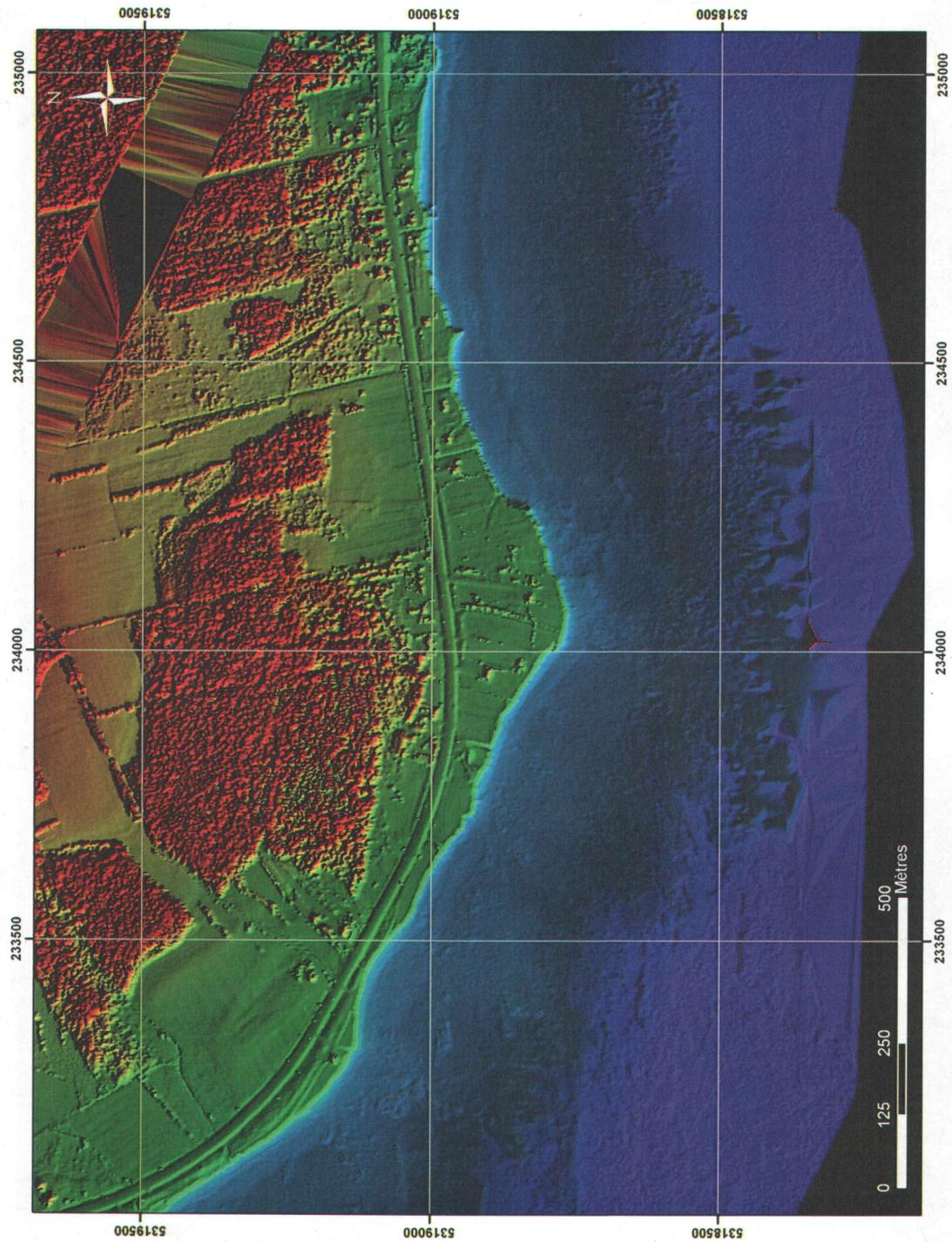


Figure A2.14 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

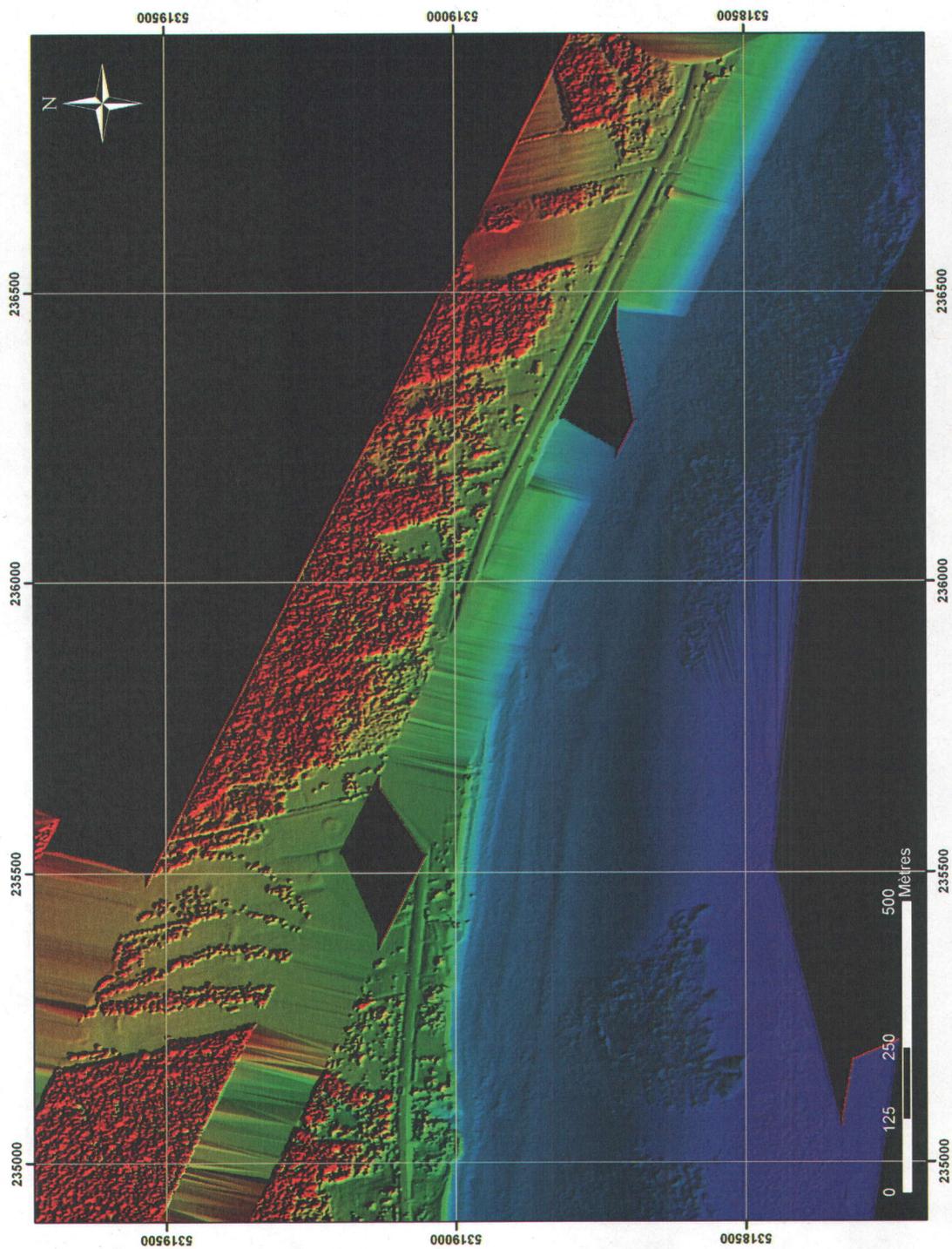


Figure A2.15 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

ANNEXE 3 – MNT SECTEURS DE PASPÉBIAC ET SAINT-GODEFROI

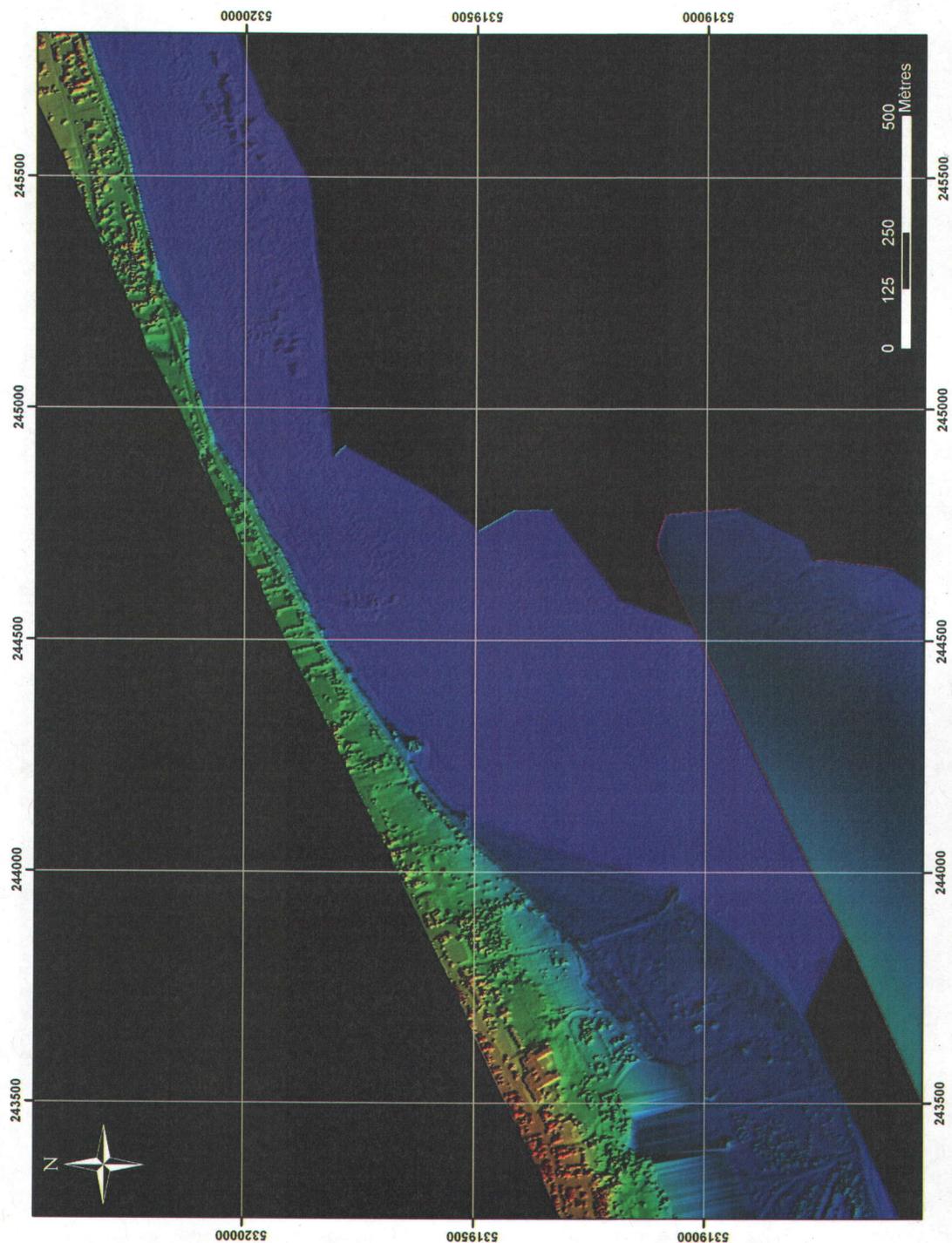


Figure A3.1 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).

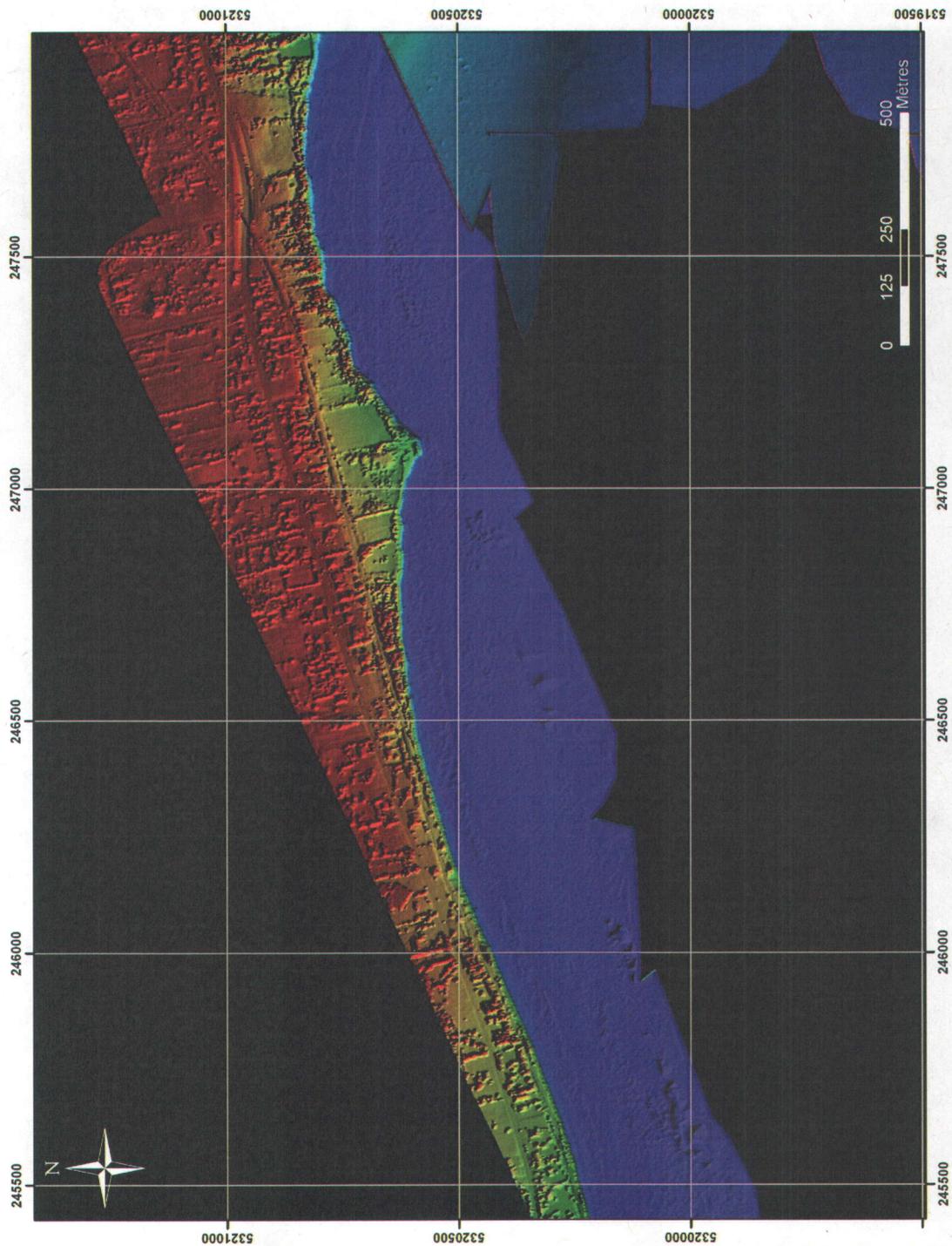


Figure A3.2 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

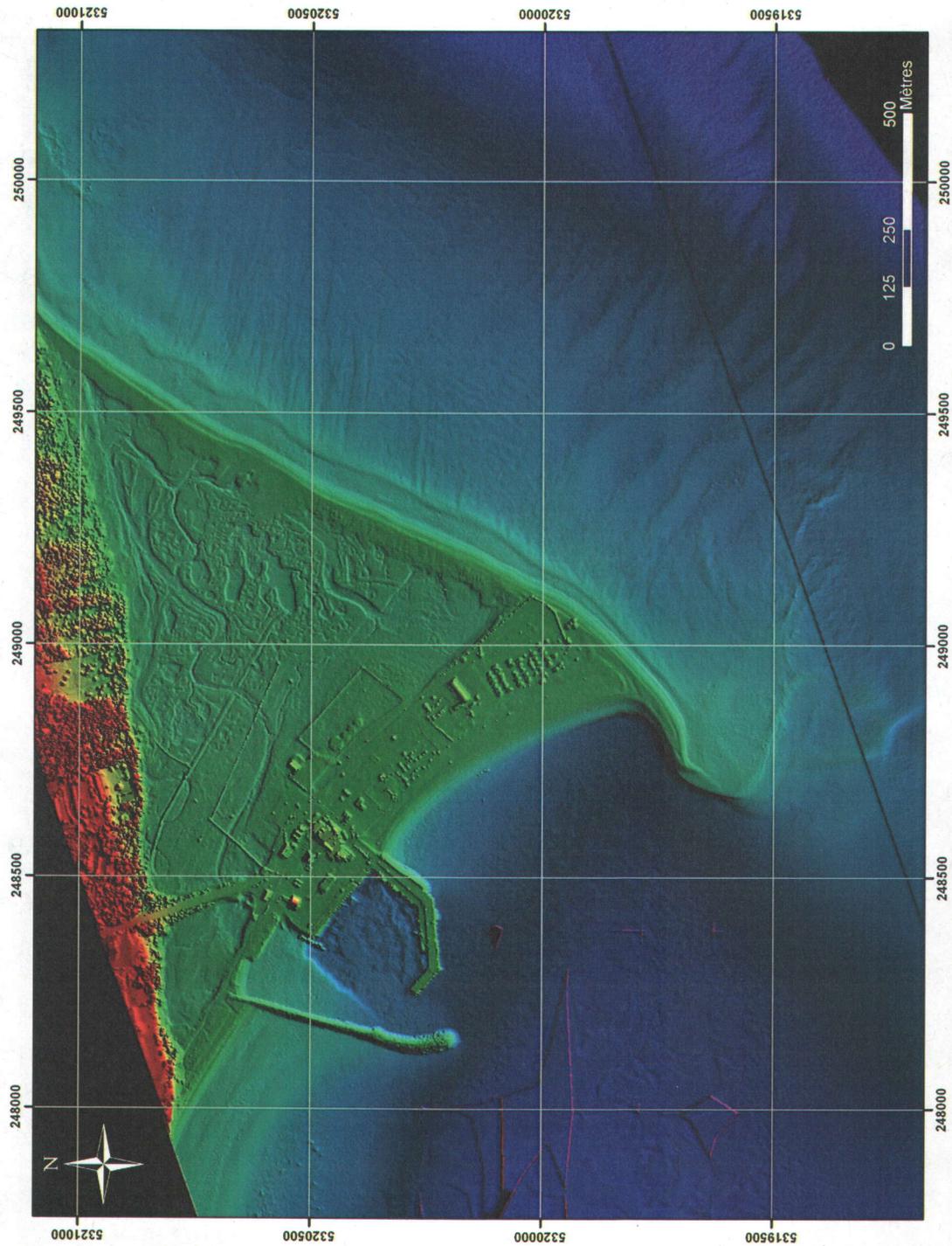


Figure A3.3 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).

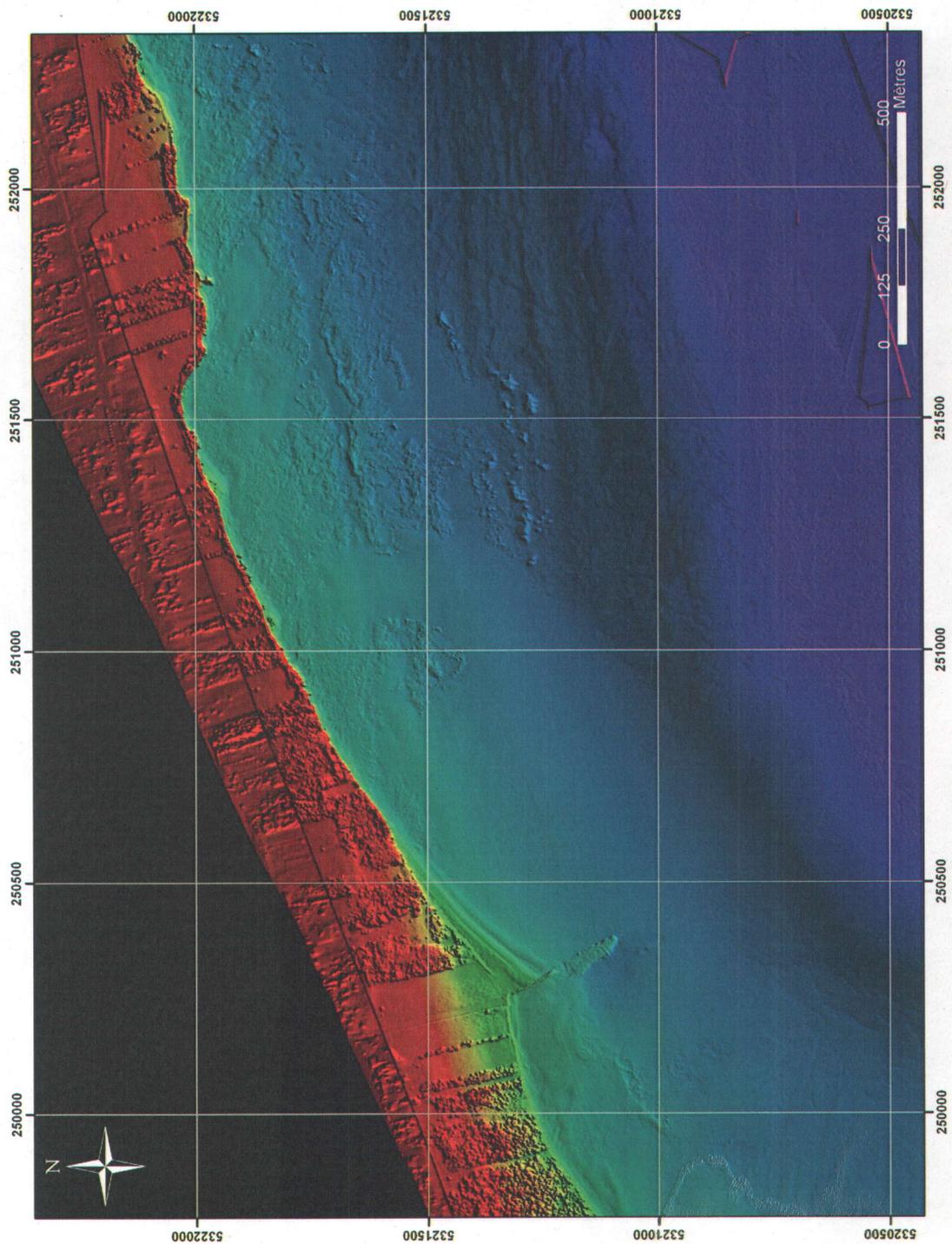


Figure A3.4 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

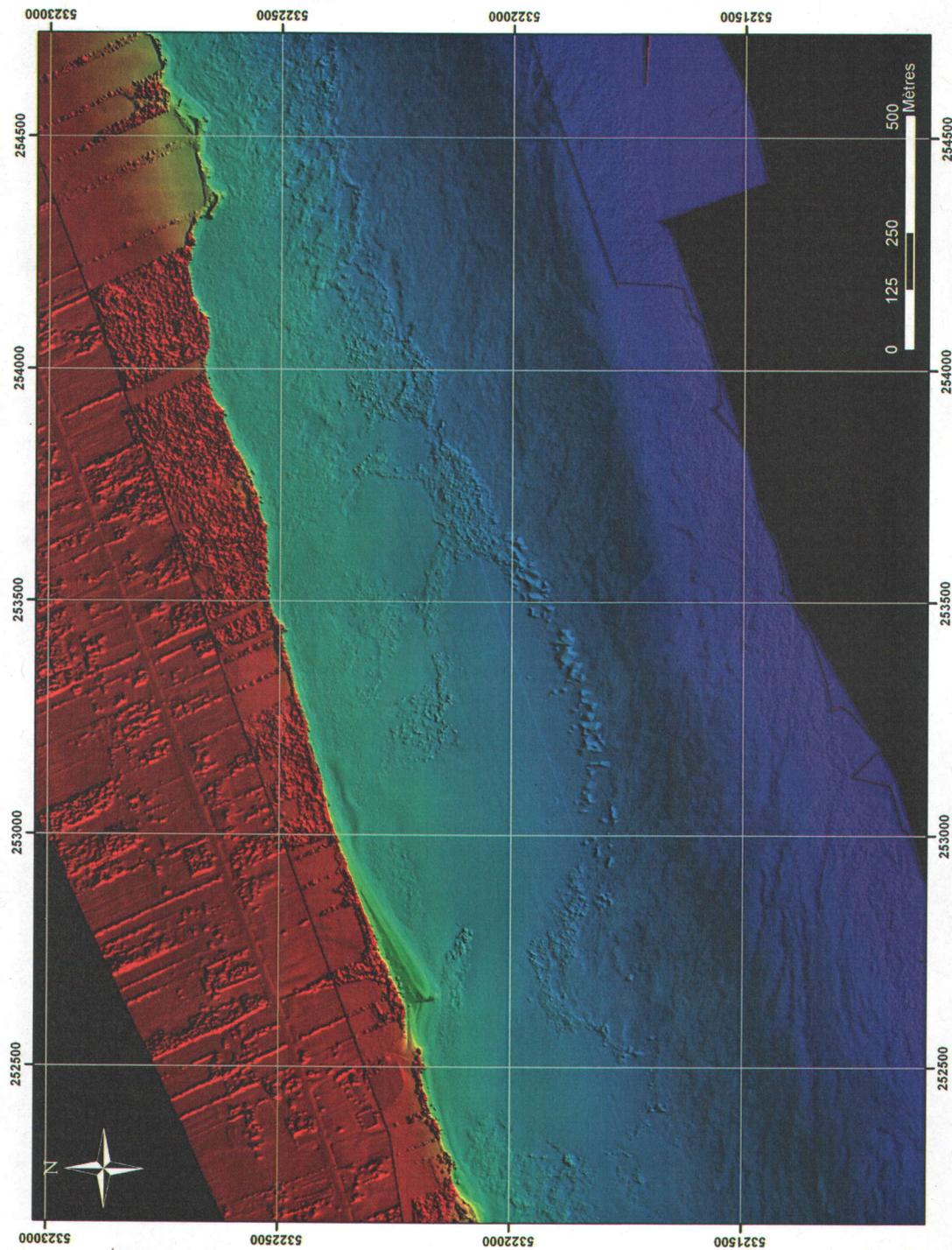


Figure A3.5 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

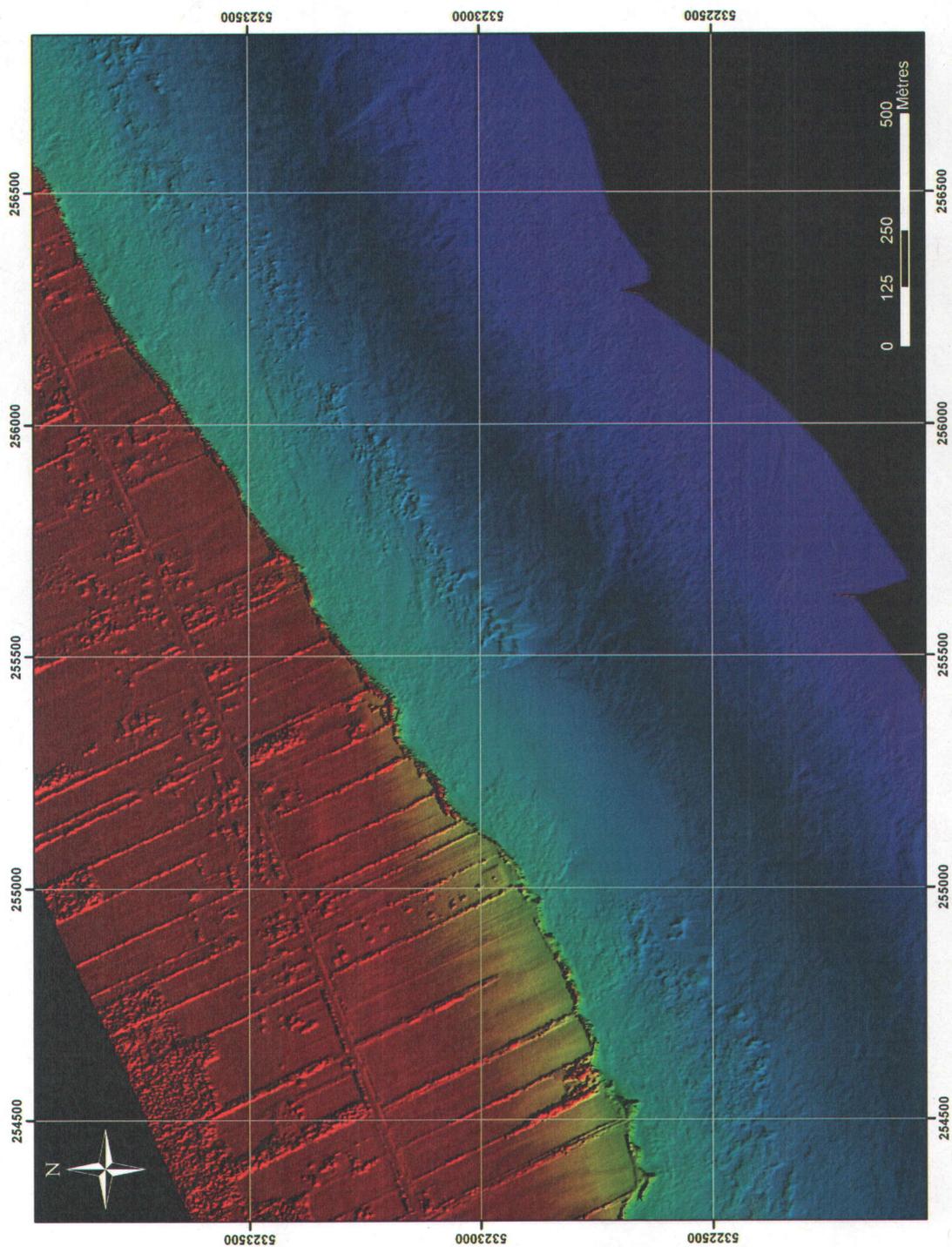


Figure A3.6 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).*

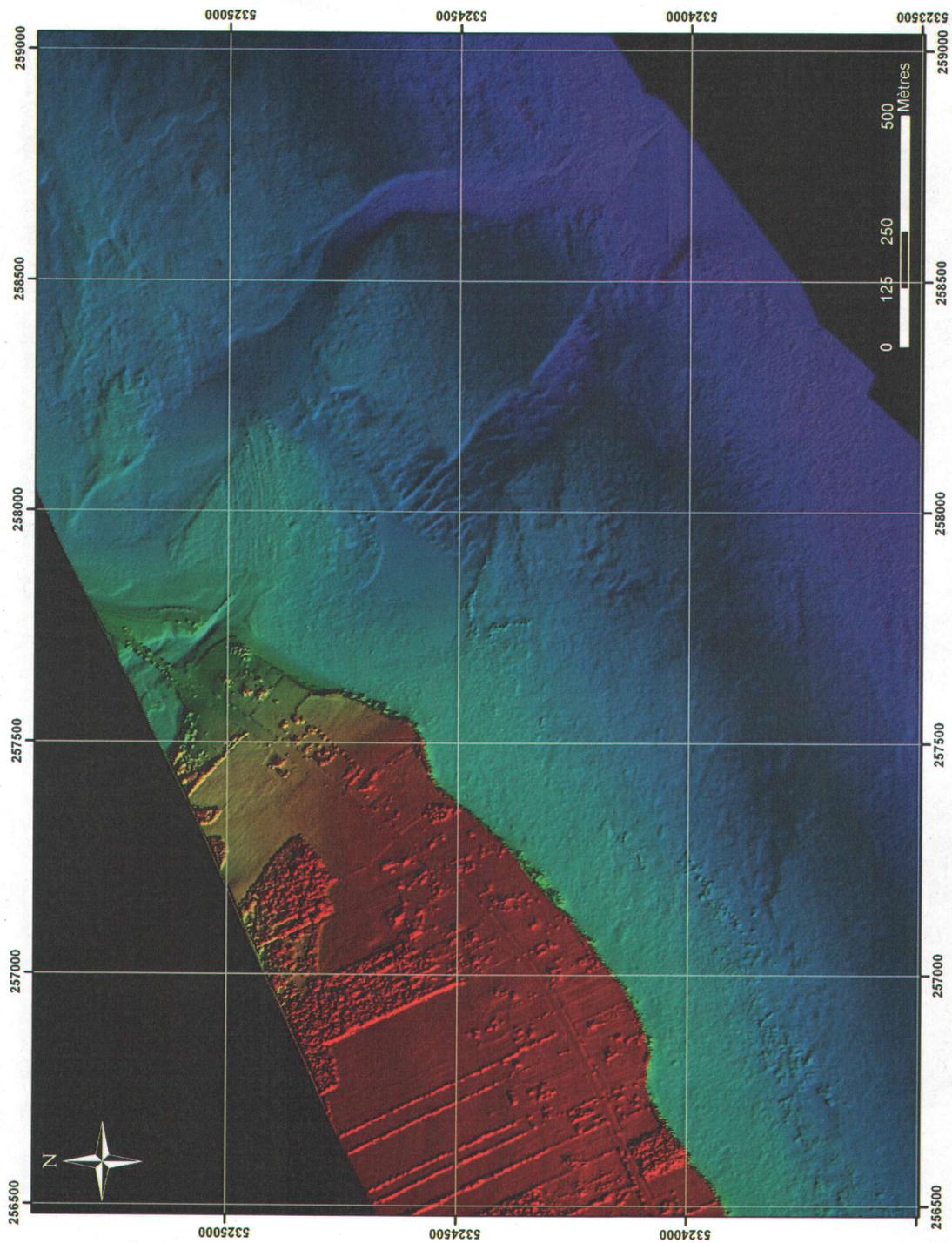


Figure A3.7 – Carte de relief en ombre portée de la bathymétrie et la topographie. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5).

ANNEXE 4 – CARTES MORPHO-SÉDIMENTAIRES

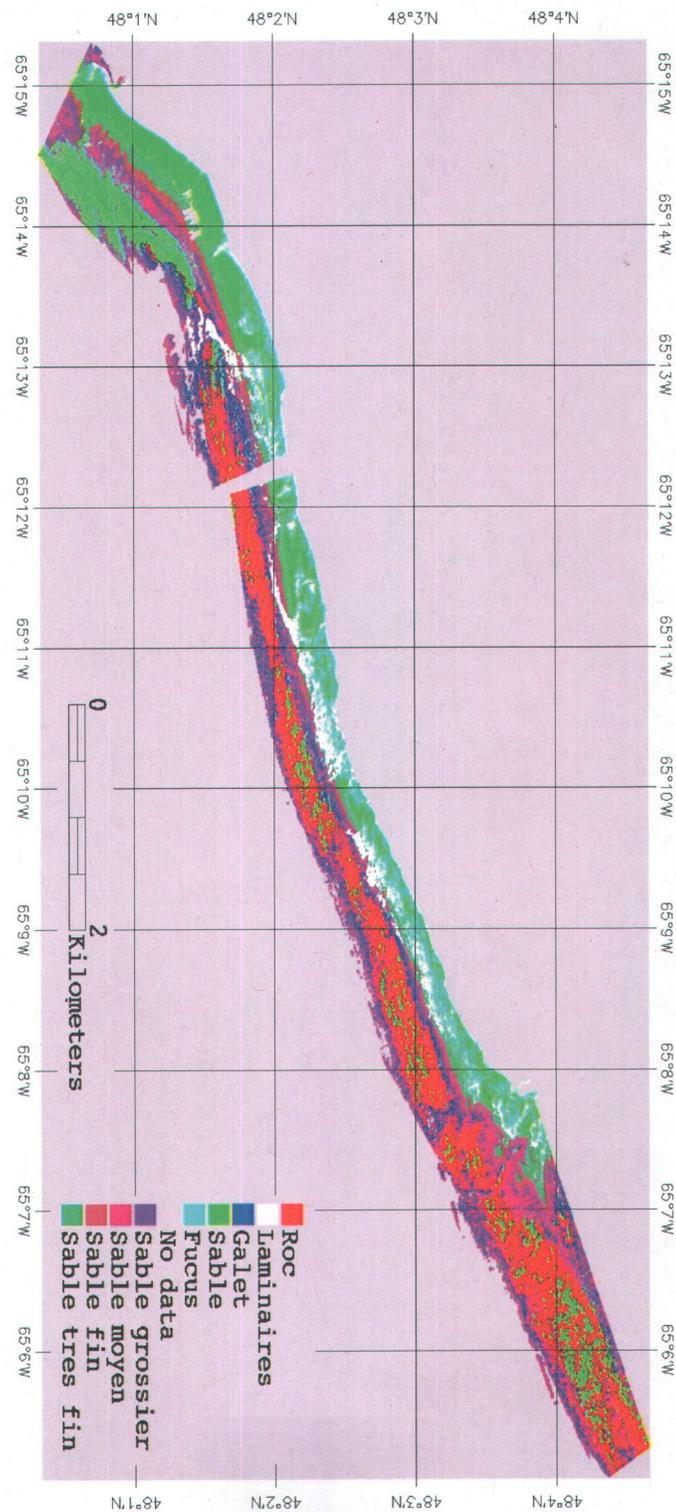


Figure A4.1 – Carte morpho-sédimentaire détaillée du secteur de Paspébiac et Saint-godefroi. La fiabilité globale de la carte est de 44,8 % (Source: Cottin, 2008).

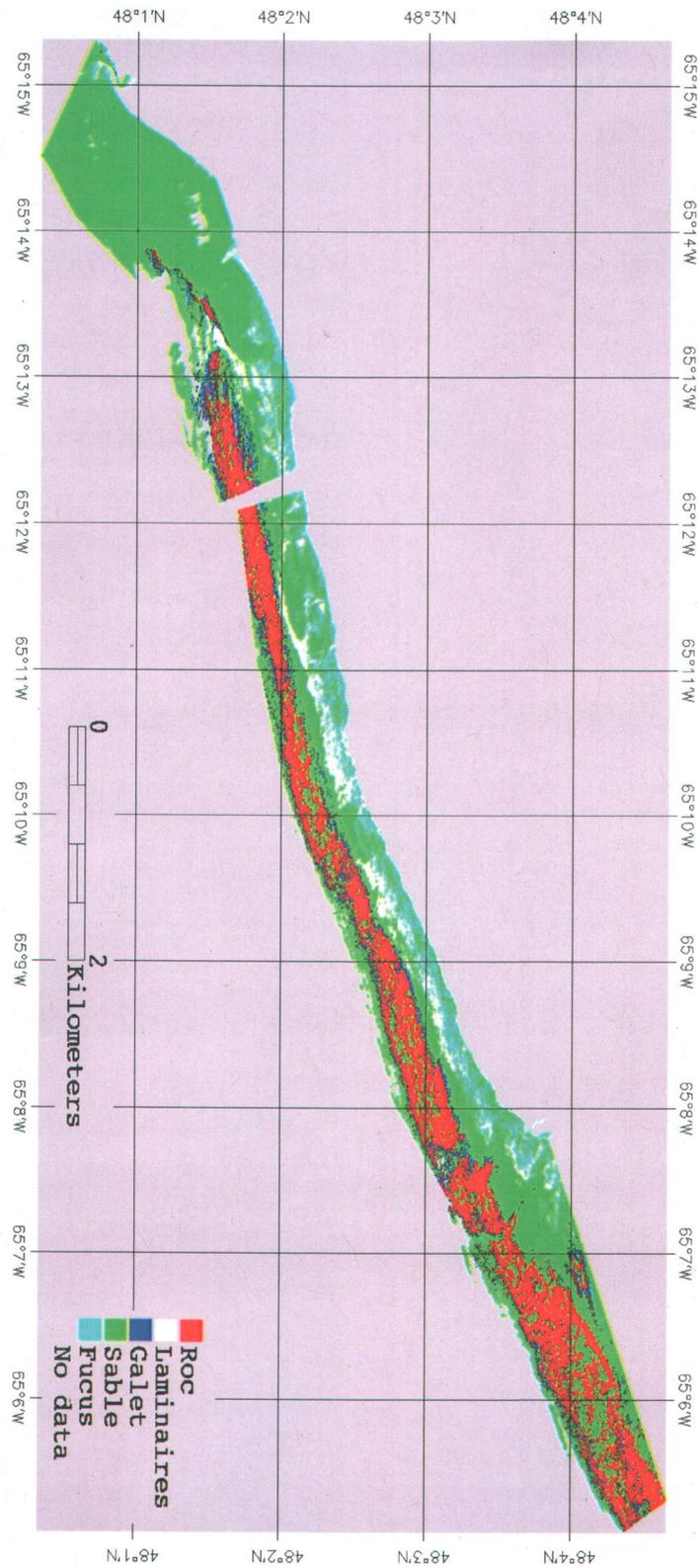


Figure A4.2 – Carte morpho-sédimentaire simplifiée du secteur de Paspébiac et Saint-godefroi. La fiabilité globale de la carte est de 53 % (Source: Cottin, 2008).

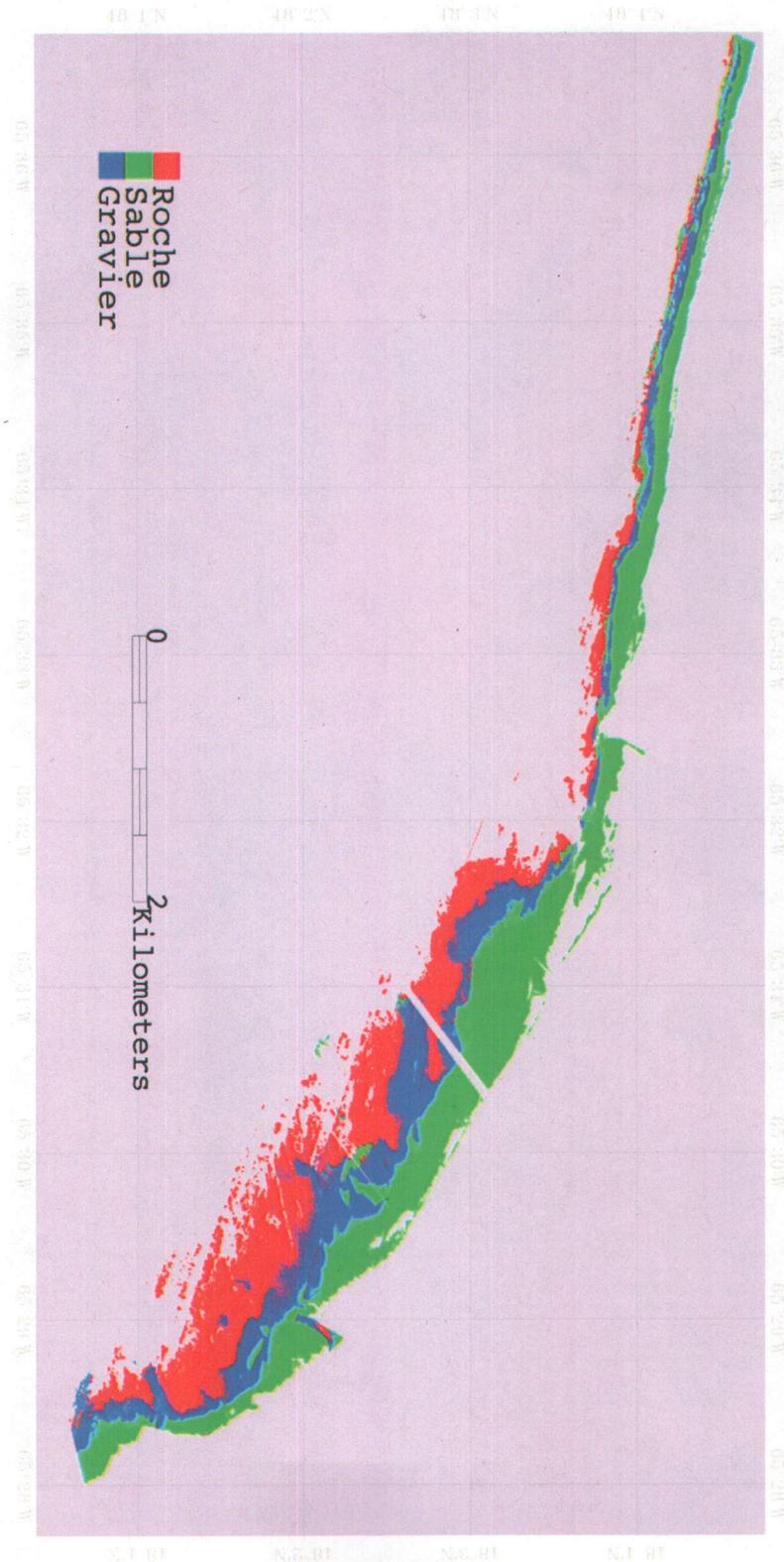


Figure A4.3 – Carte morpho-sédimentaire simplifiée du secteur de Saint-Siméon et Bonaventure. La fiabilité globale de la carte est de 54,74 % (Source: Cottin, 2008).

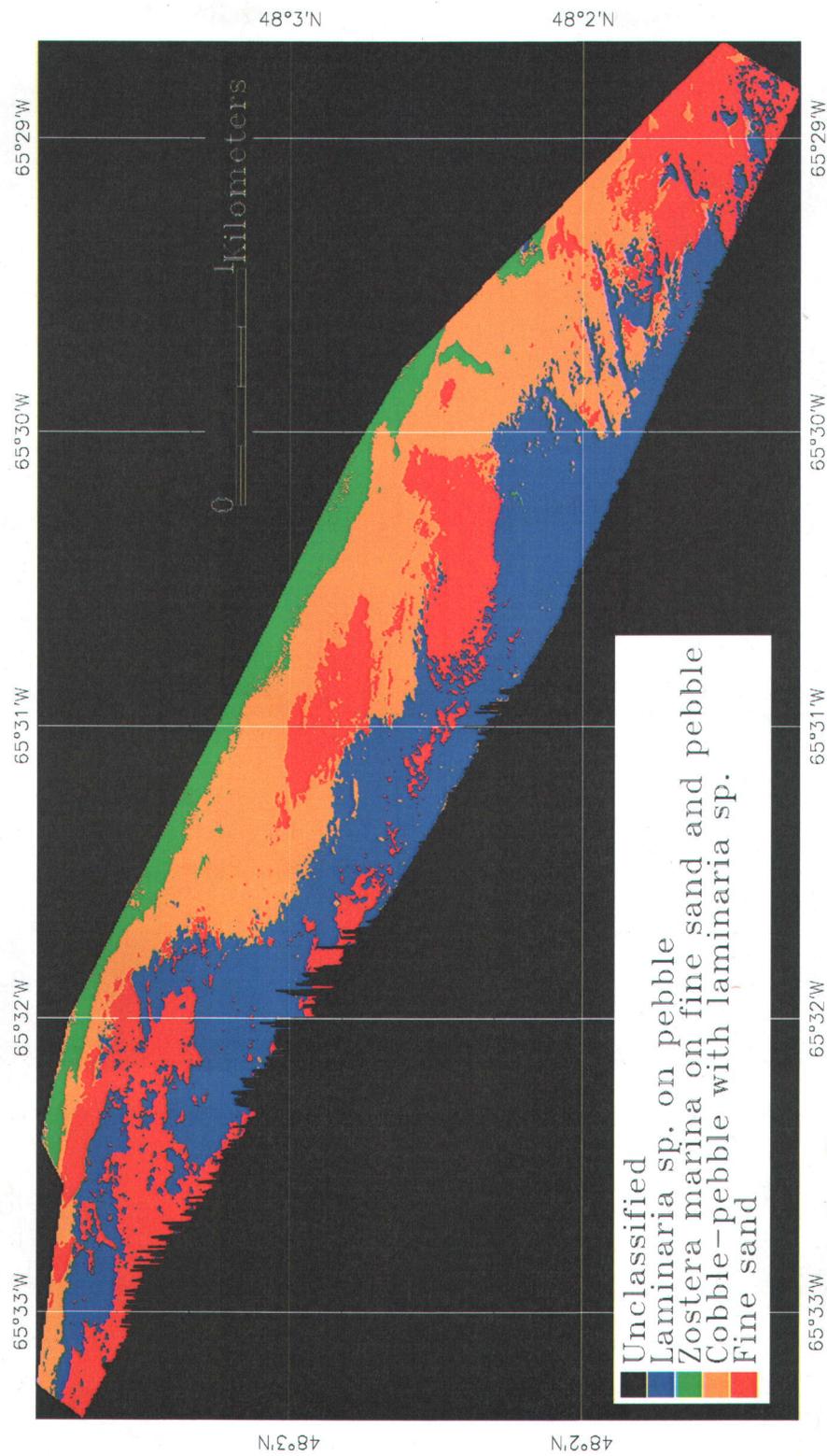


Figure A4.4 – Carte morpho-sédimentaire du secteur de Saint-Siméon et Bonaventure basée sur l'analyse de 12 variables statistiques. La fiabilité globale de la carte est de 95,2 % (Source: Collin, 2009).

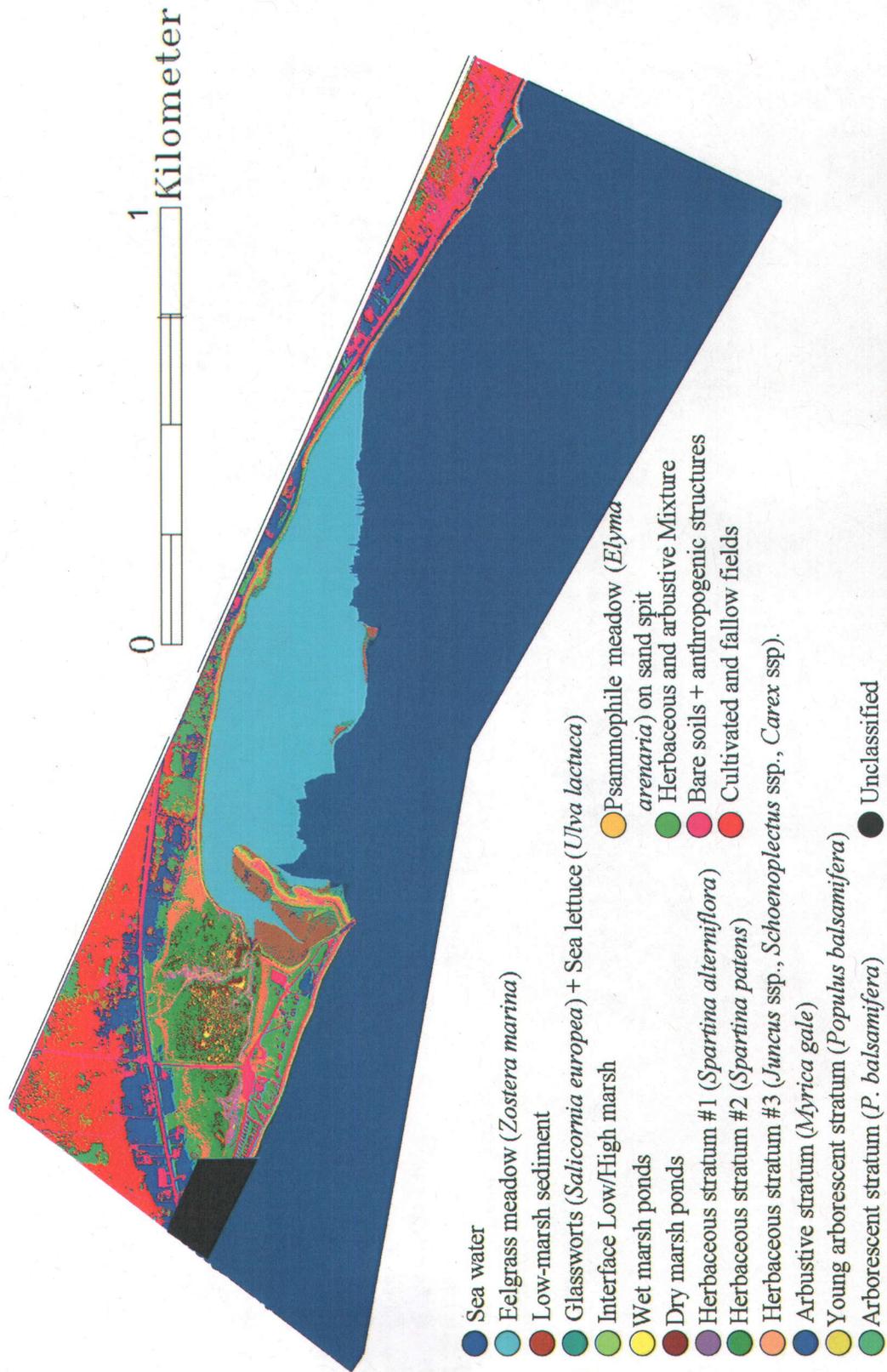


Figure A4.5 – Carte morpho-sédimentaire de la zone intertidale du marais de Saint-Siméon. La fiabilité globale de la carte est de 91,2 % (Source: Collin, 2009).

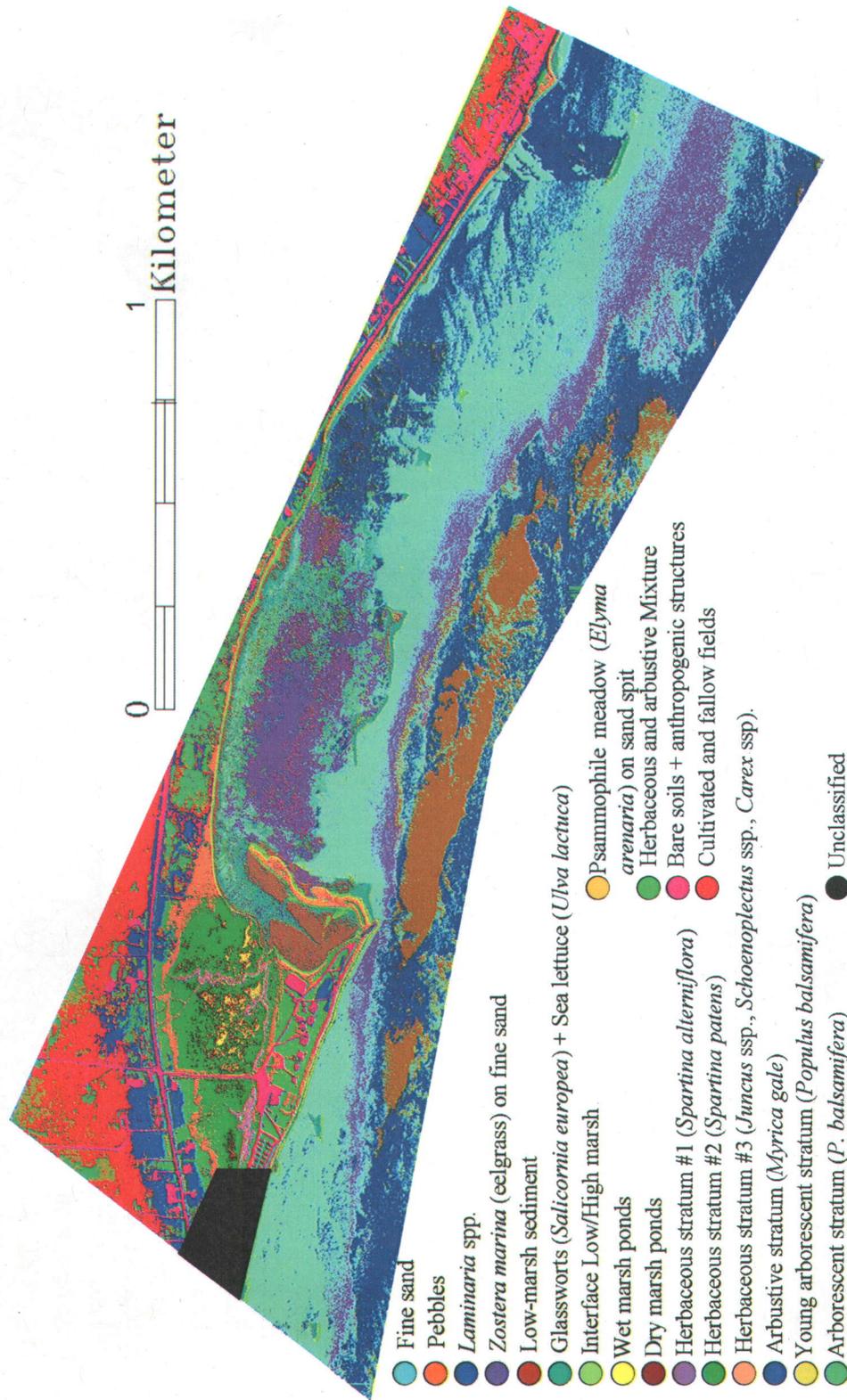


Figure A4.6 – Carte morpho-sédimentaire globale de la zone du marais de Saint-Siméon. La fiabilité globale de la carte est de 90,1 % (Source: Collin, 2009).

ANNEXE 5 – MNVE 2003-2004 DES TALUS SECTEUR DE SAINT-SIMEON

Les cartes des talus sont présentées d'ouest en est, du havre du Ruisseau-Leblanc à l'embouchure de la rivière Petite-Bonaventure.

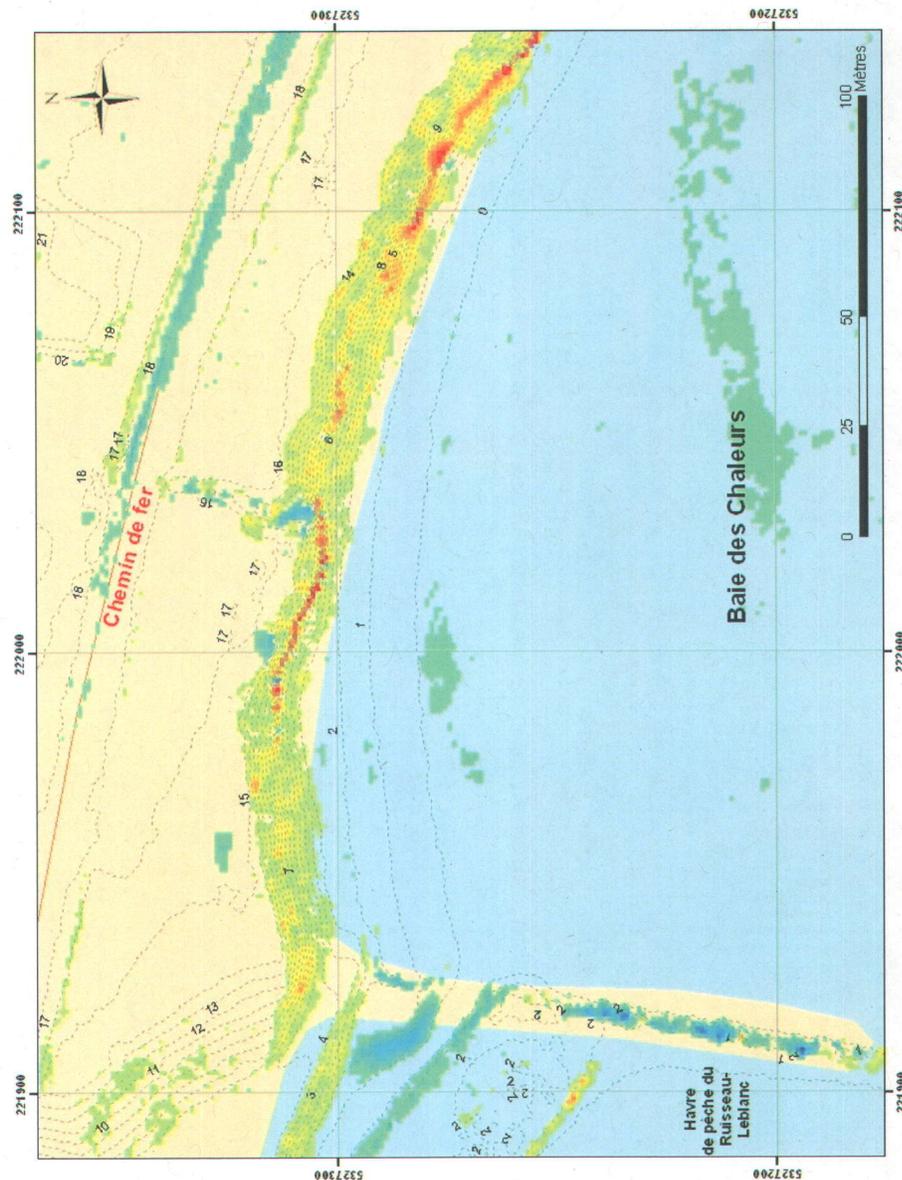


Figure A5.1 – Carte de l'érosion dans les talus de Saint-Siméon. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).*

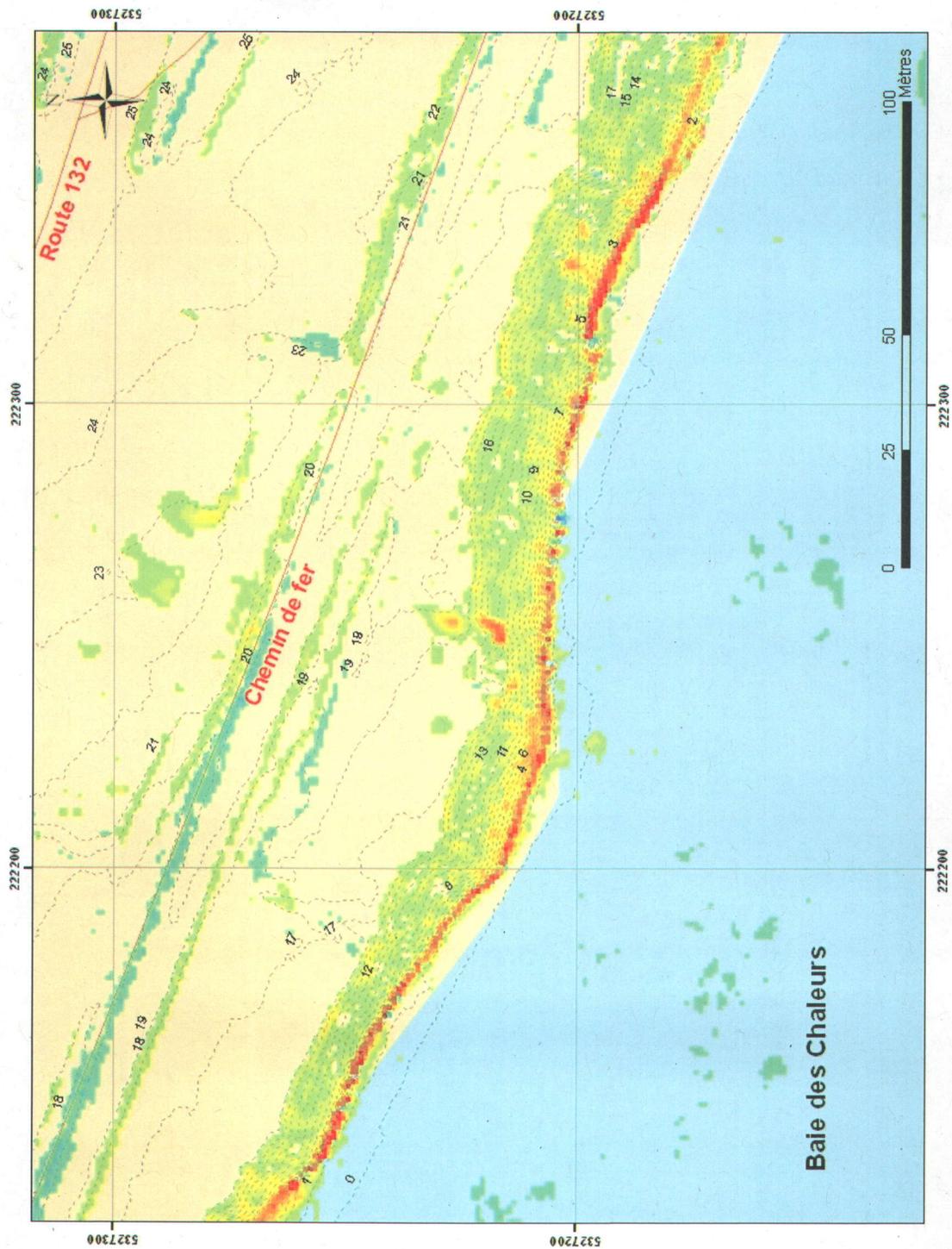


Figure A5.2 – Carte de l'érosion dans les talus de Saint-Siméon. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

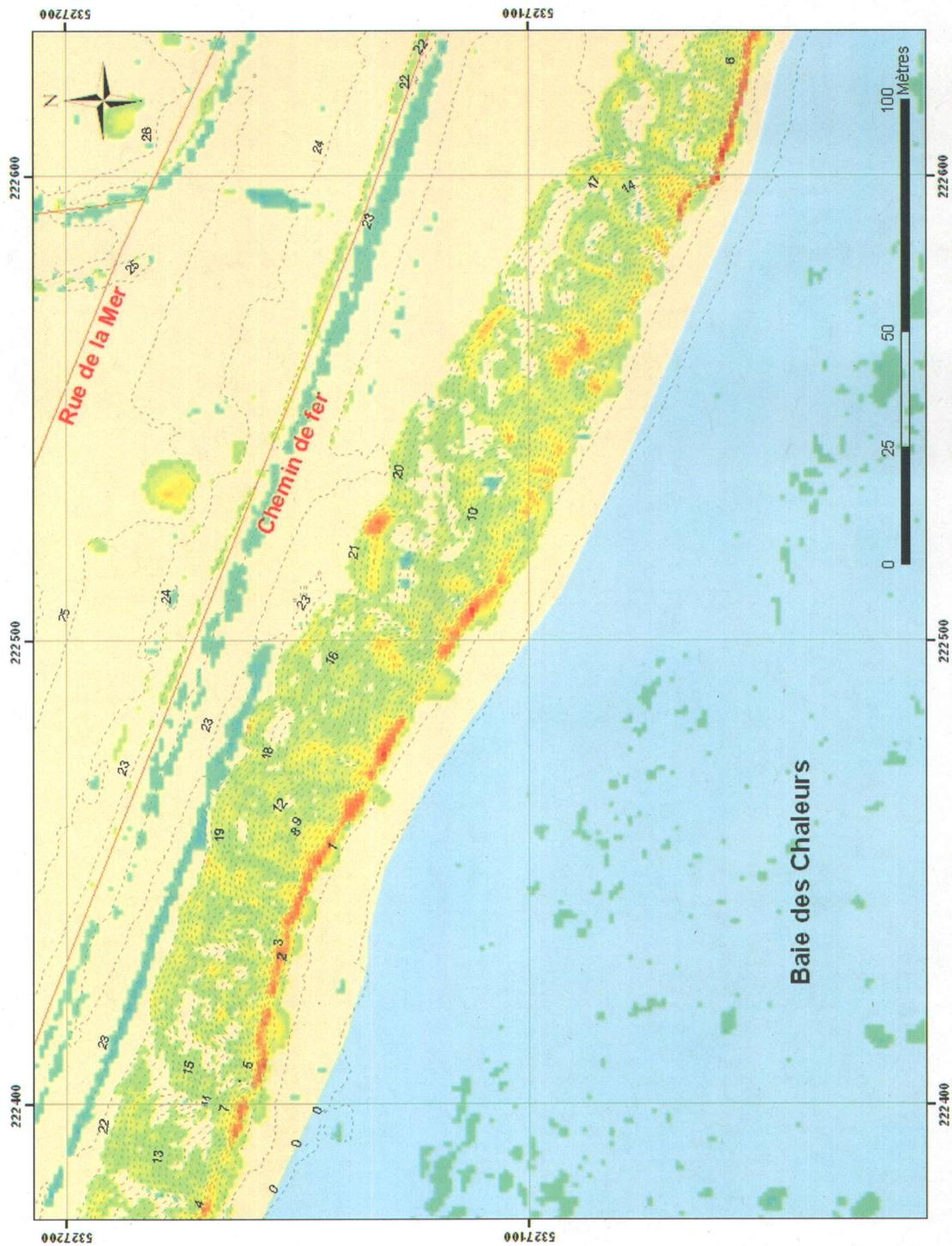


Figure A5.3 – Carte de l'érosion dans les talus de Saint-Siméon. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).*

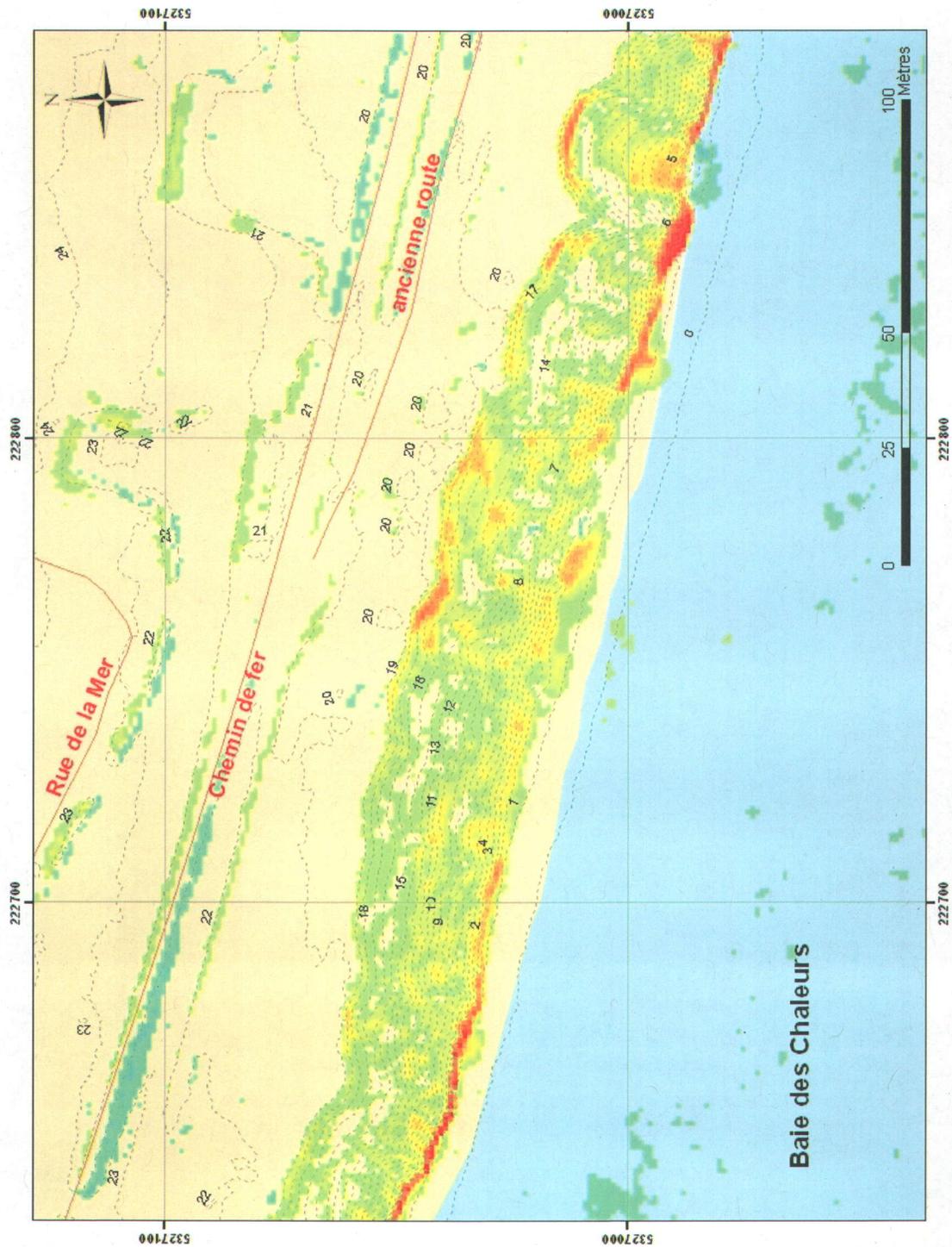


Figure A5.4 – Carte de l'érosion dans les talus de Saint-Siméon. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

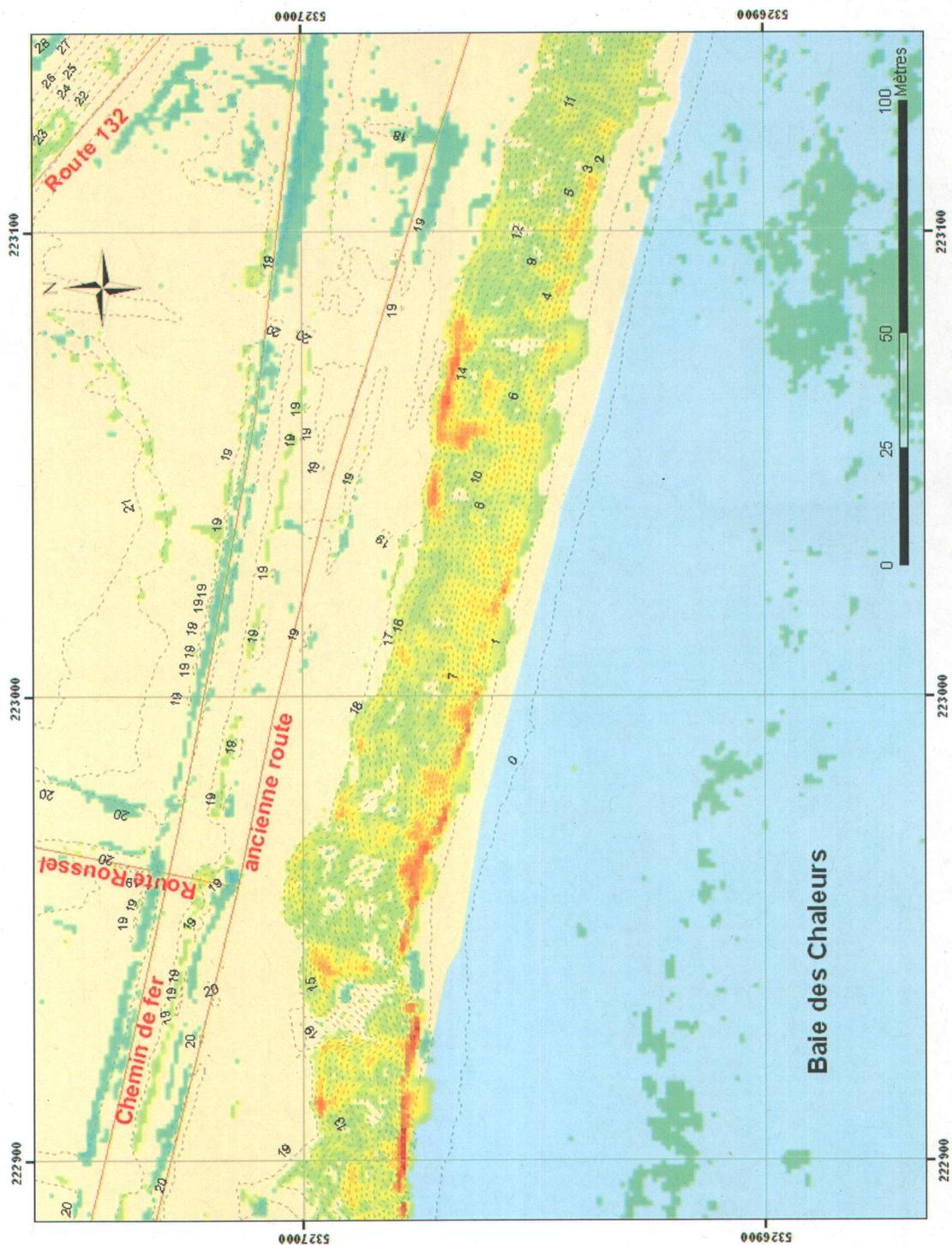


Figure A5.5 – Carte de l'érosion dans les talus de Saint-Siméon. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

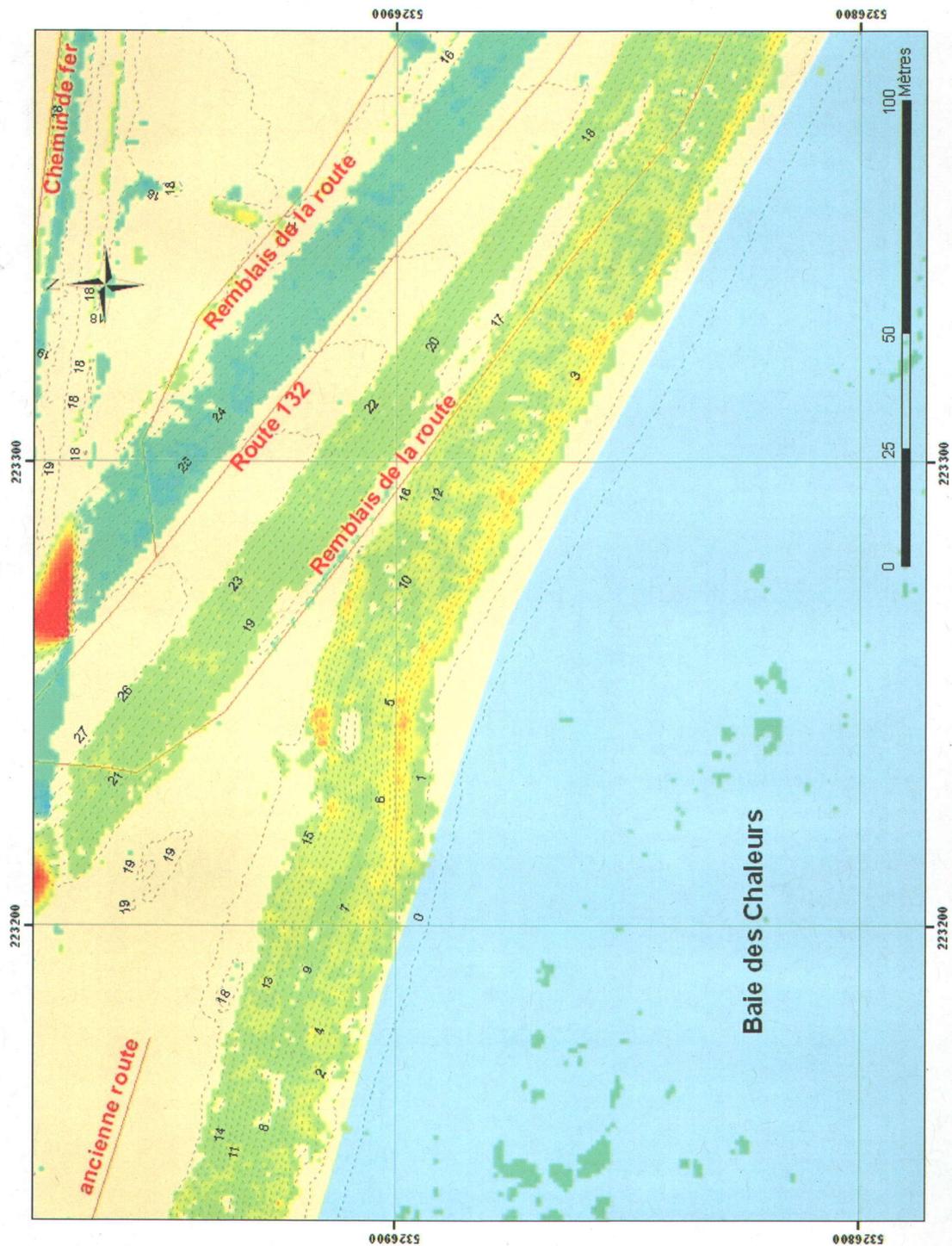


Figure A5.6 – Carte de l'érosion dans les talus de Saint-Siméon. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

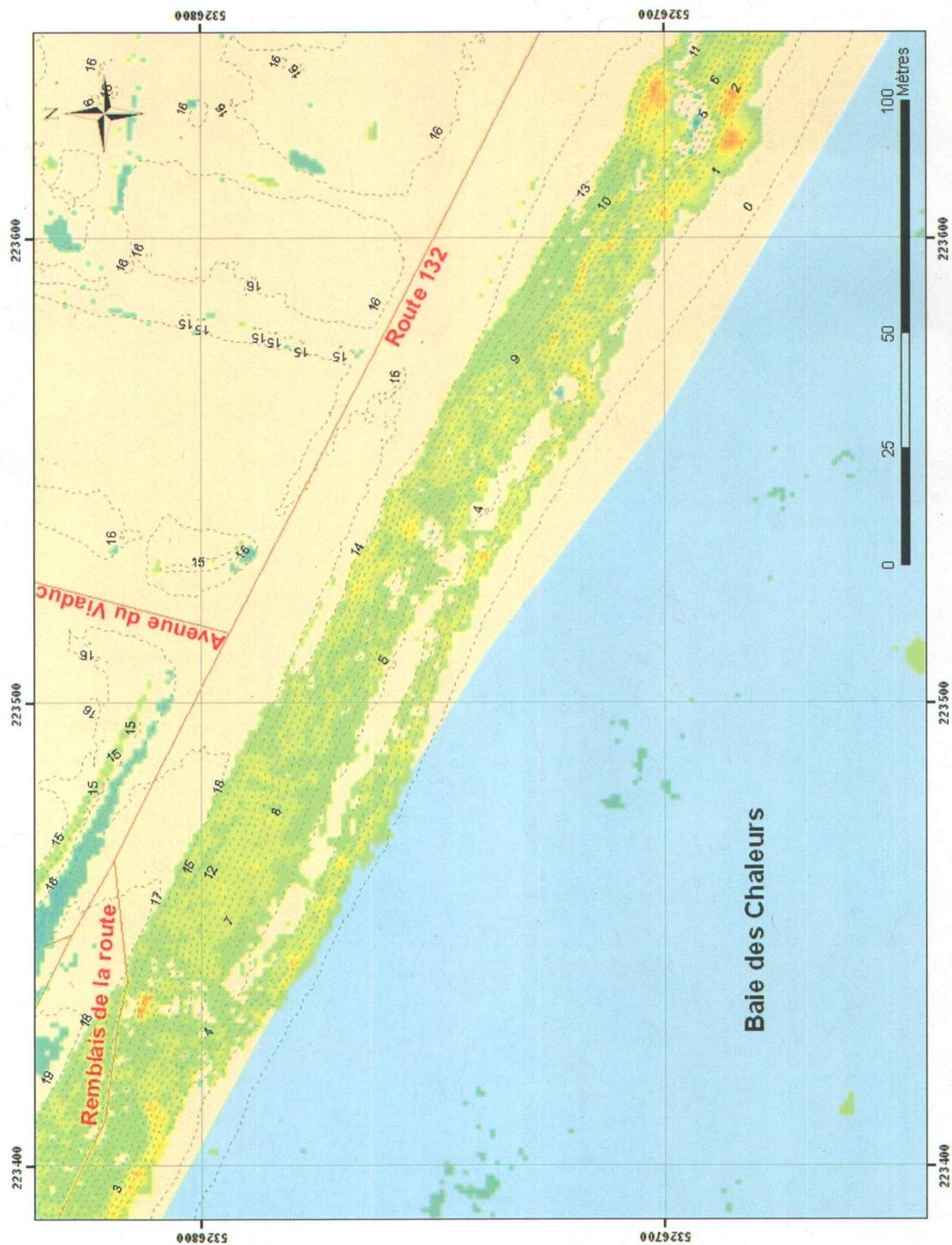


Figure A5.7 – Carte de l'érosion dans les talus de Saint-Siméon. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

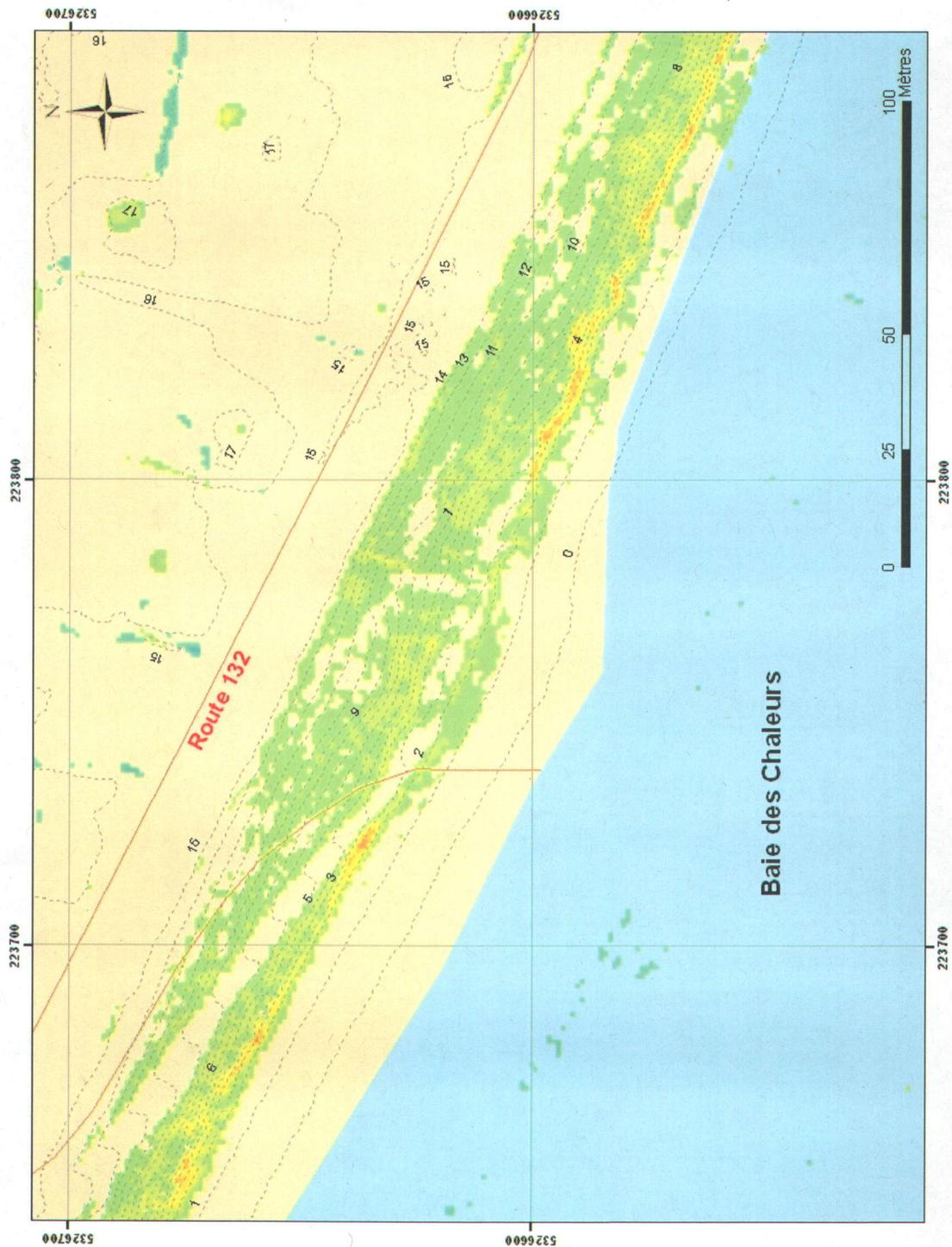


Figure A5.8 – Carte de l'érosion dans les talus de Saint-Siméon. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accréation. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

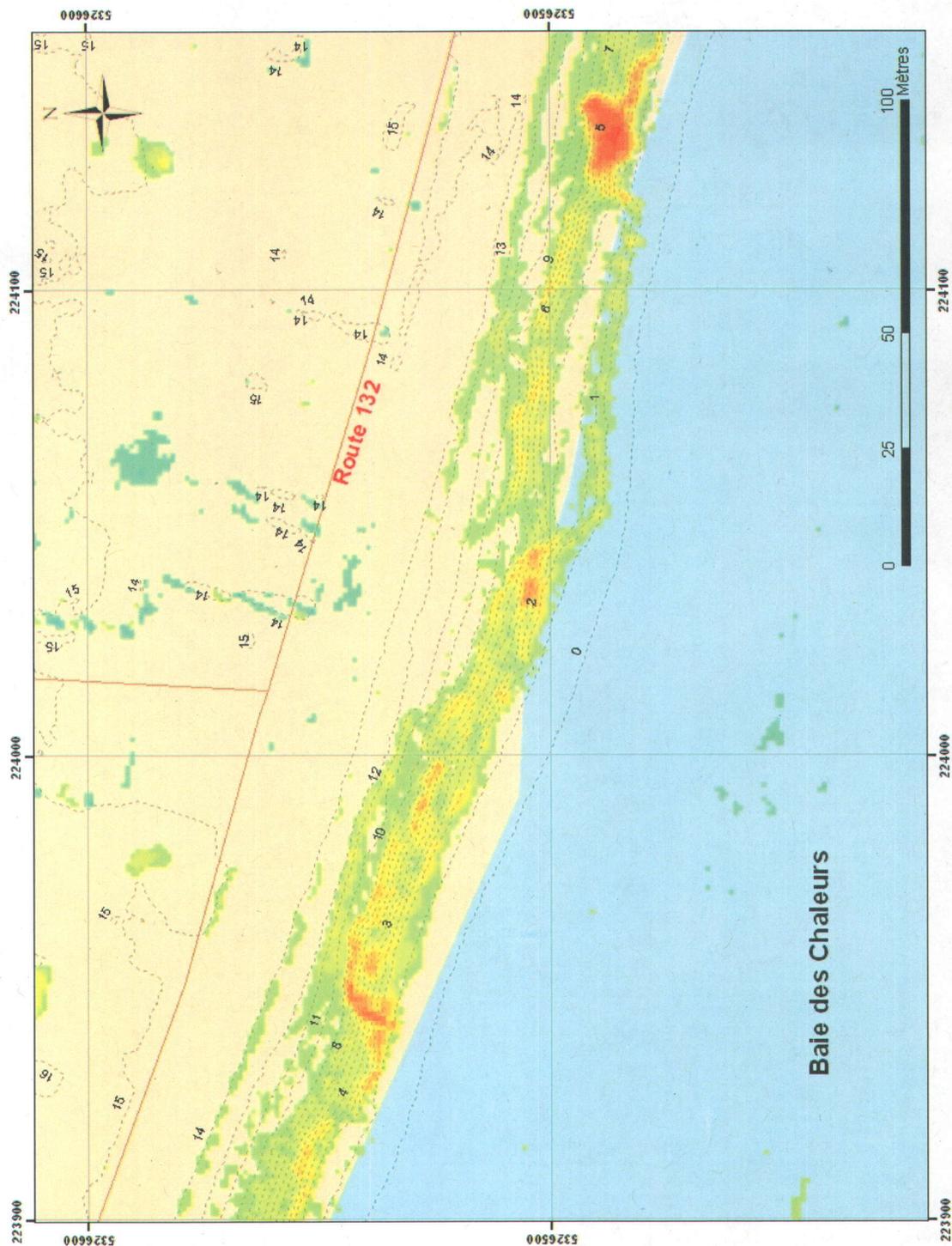


Figure A5.9 – Carte de l'érosion dans les talus de Saint-Siméon. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

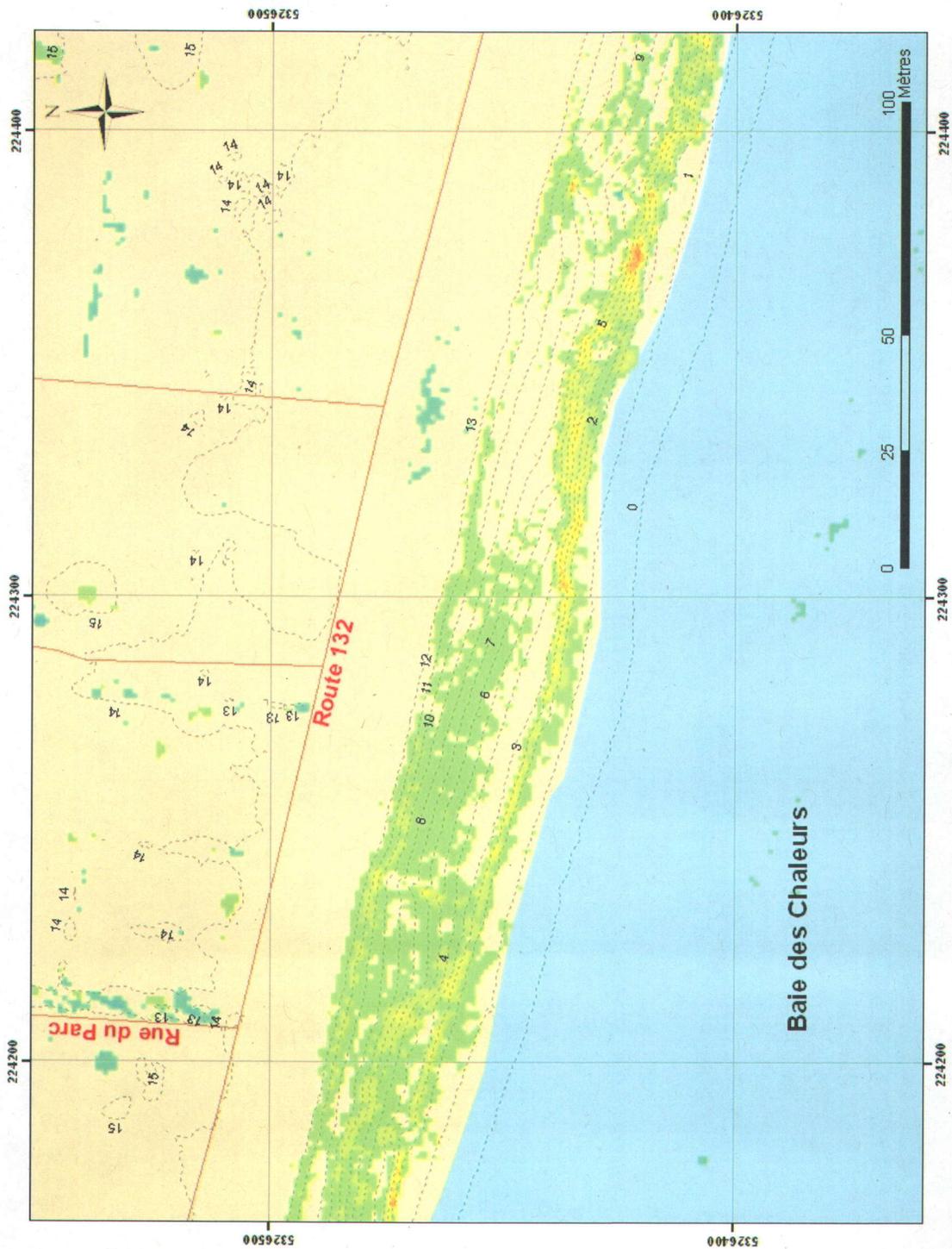


Figure A5.10 – Carte de l'érosion dans les talus de Saint-Siméon. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

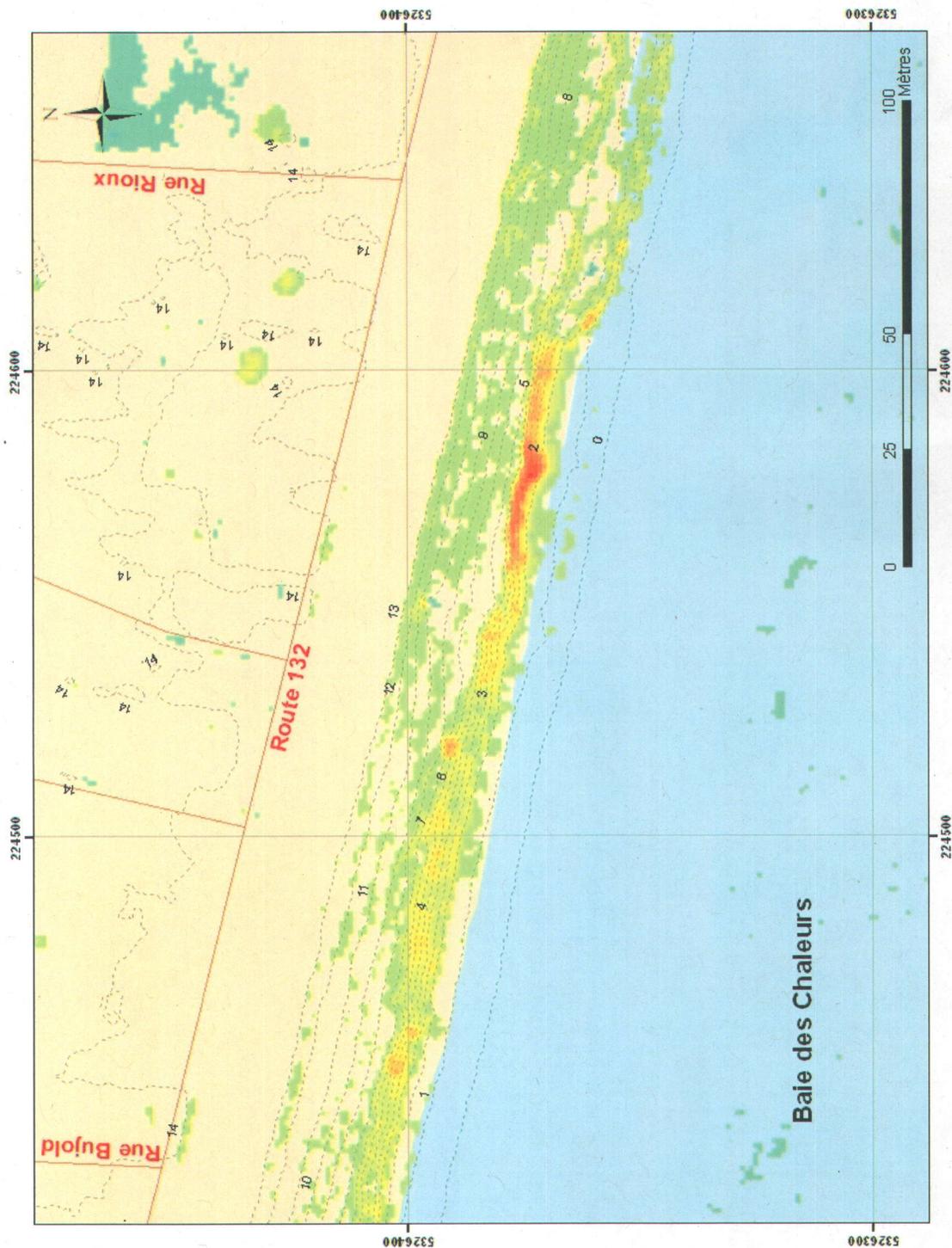


Figure A5.11 – Carte de l'érosion dans les talus de Saint-Siméon. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).



Figure A5.12 – Carte de l'érosion dans les talus de Saint-Siméon. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

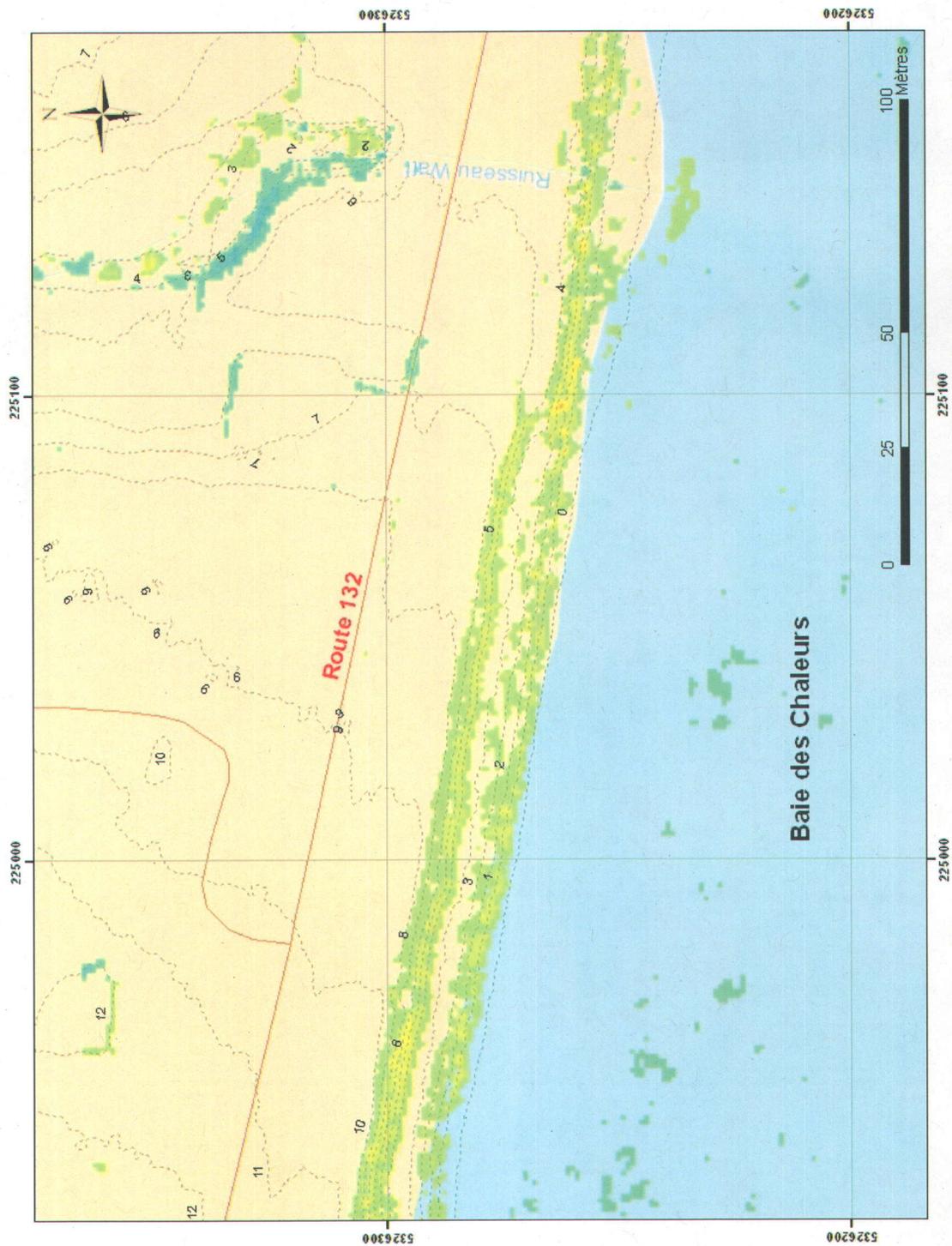


Figure A5.13 – Carte de l'érosion dans les talus de Saint-Siméon. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).



Figure A5.14 – Carte de l'érosion dans les talus de Saint-Siméon. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

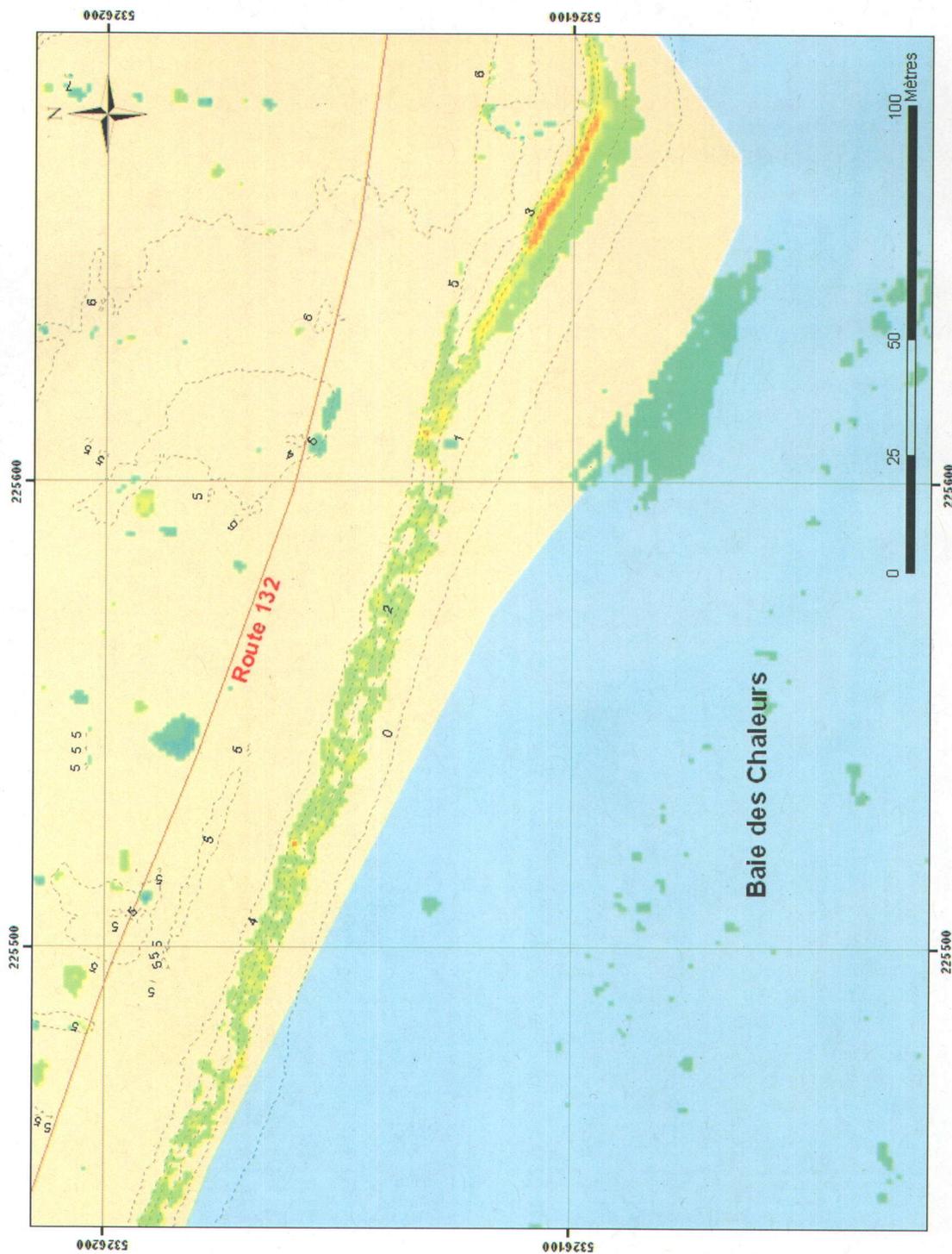


Figure A5.15 – Carte de l'érosion dans les talus de Saint-Siméon. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).*

SECTEUR DE BONAVENTURE

Les cartes des talus sont présentées d'ouest en est, du marais de Saint-Siméon à la route de l'Église de Bonaventure.

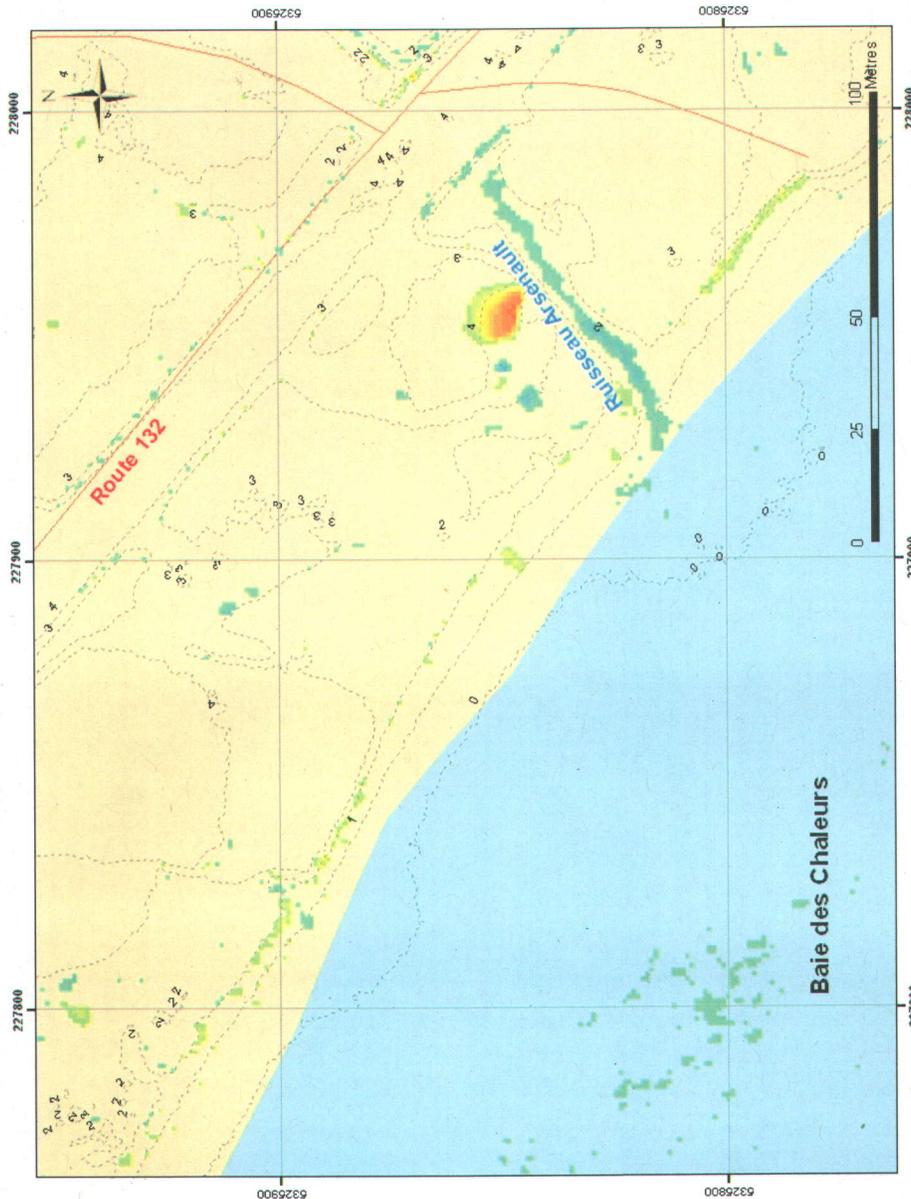


Figure A5.16 – Carte de l'érosion dans les talus de Bonaventure. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).*

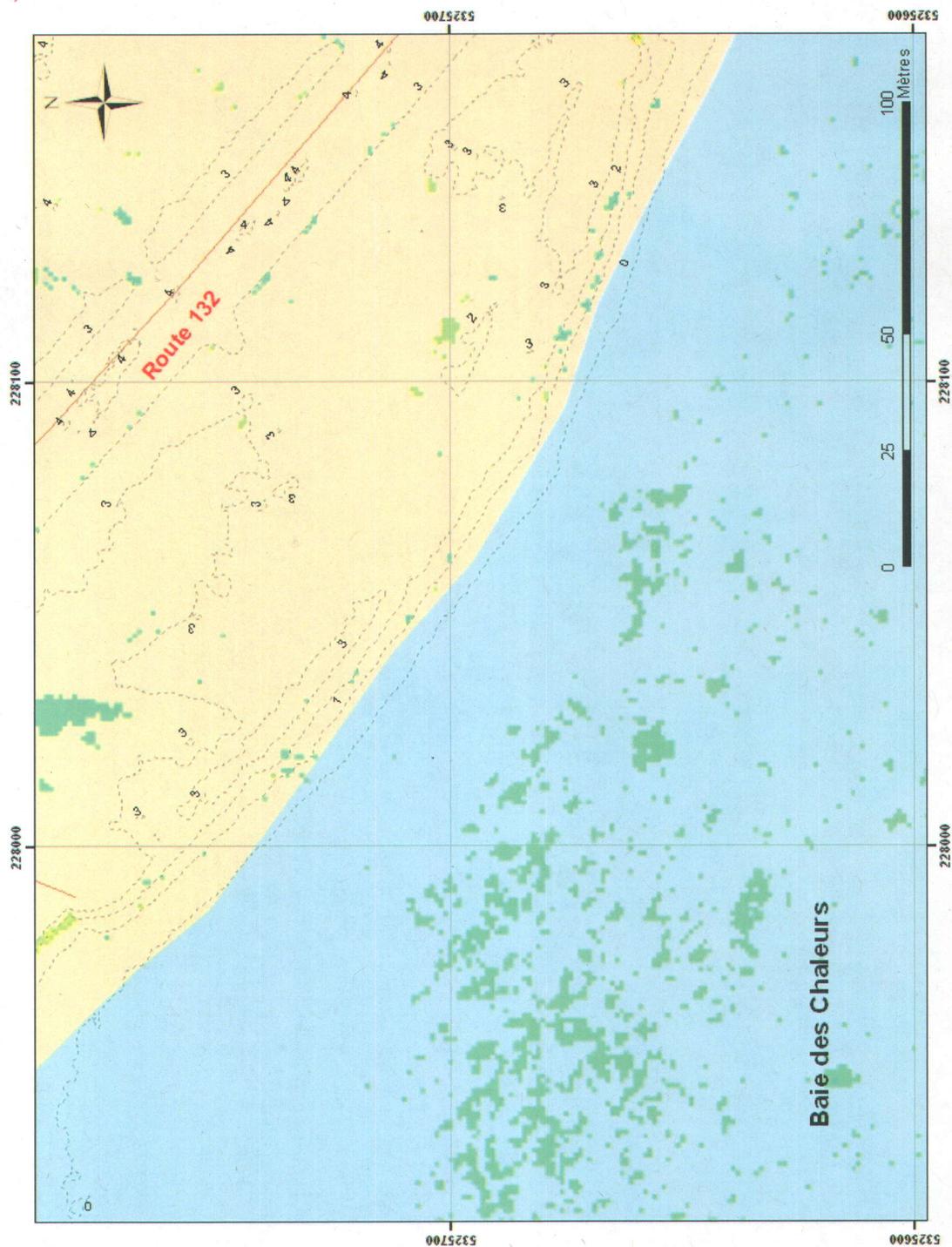


Figure A5.17 – Carte de l'érosion dans les talus de Bonaventure. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).*

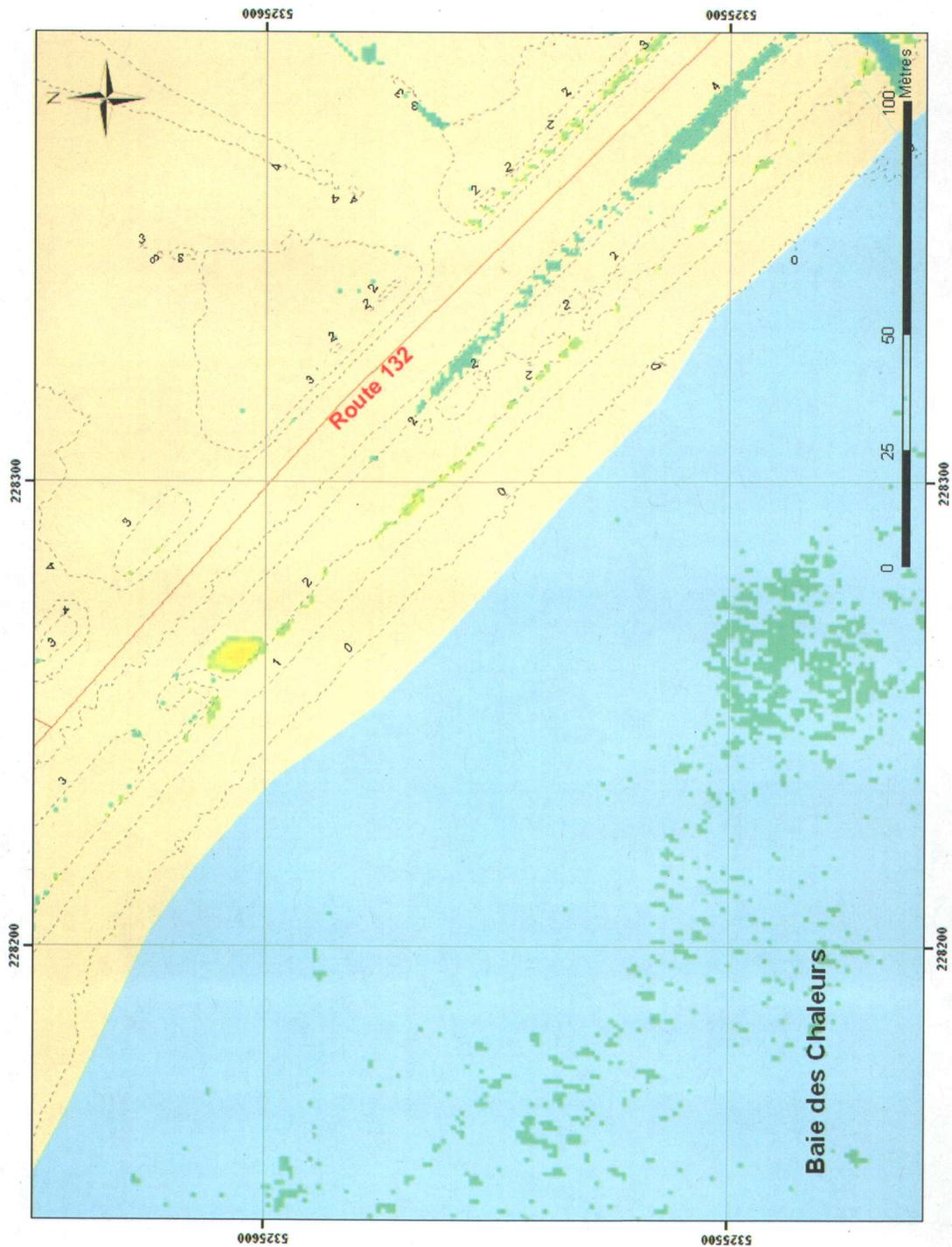


Figure A5.18 – Carte de l'érosion dans les talus de Bonaventure. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

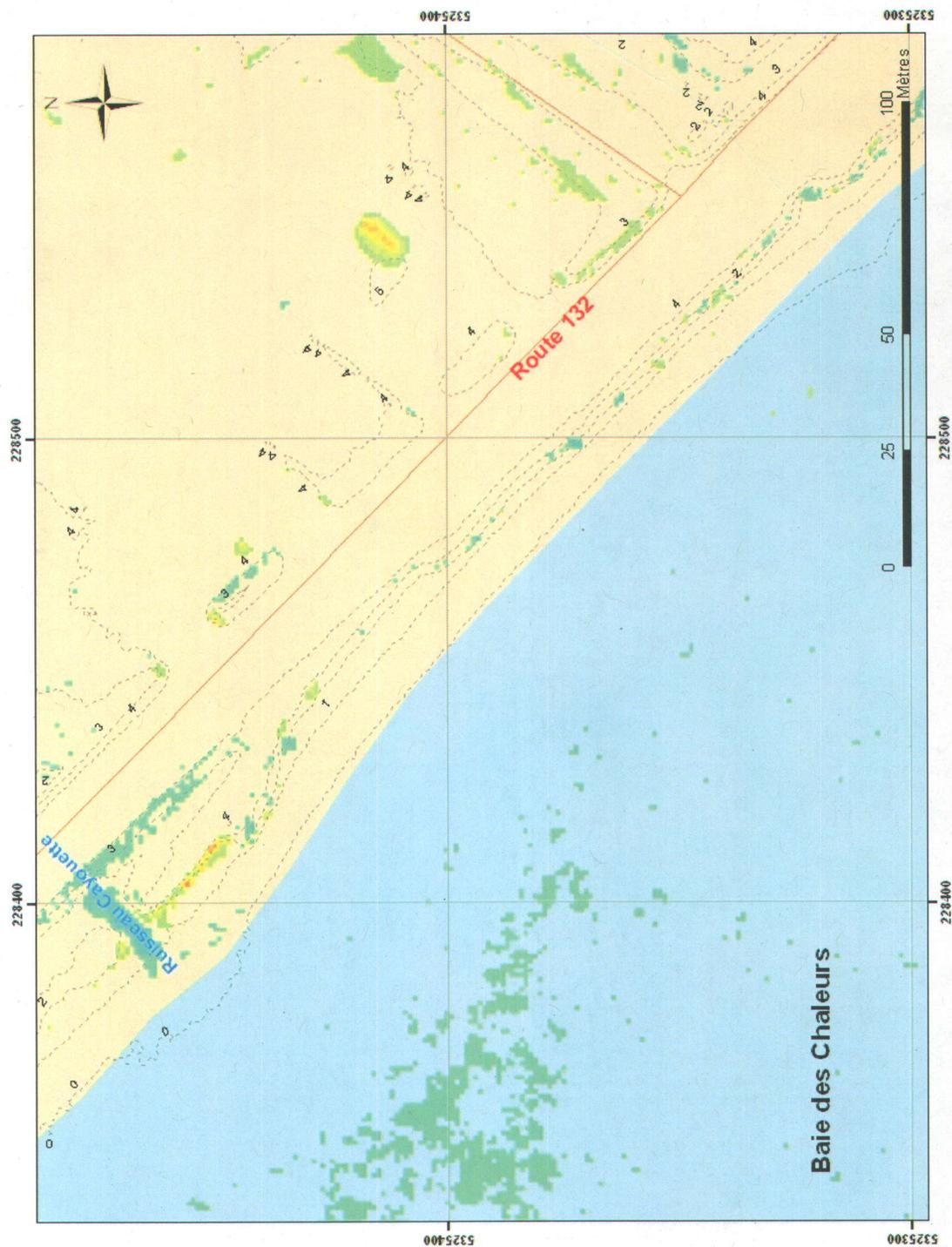


Figure A5.19 – Carte de l'érosion dans les talus de Bonaventure. *Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).*

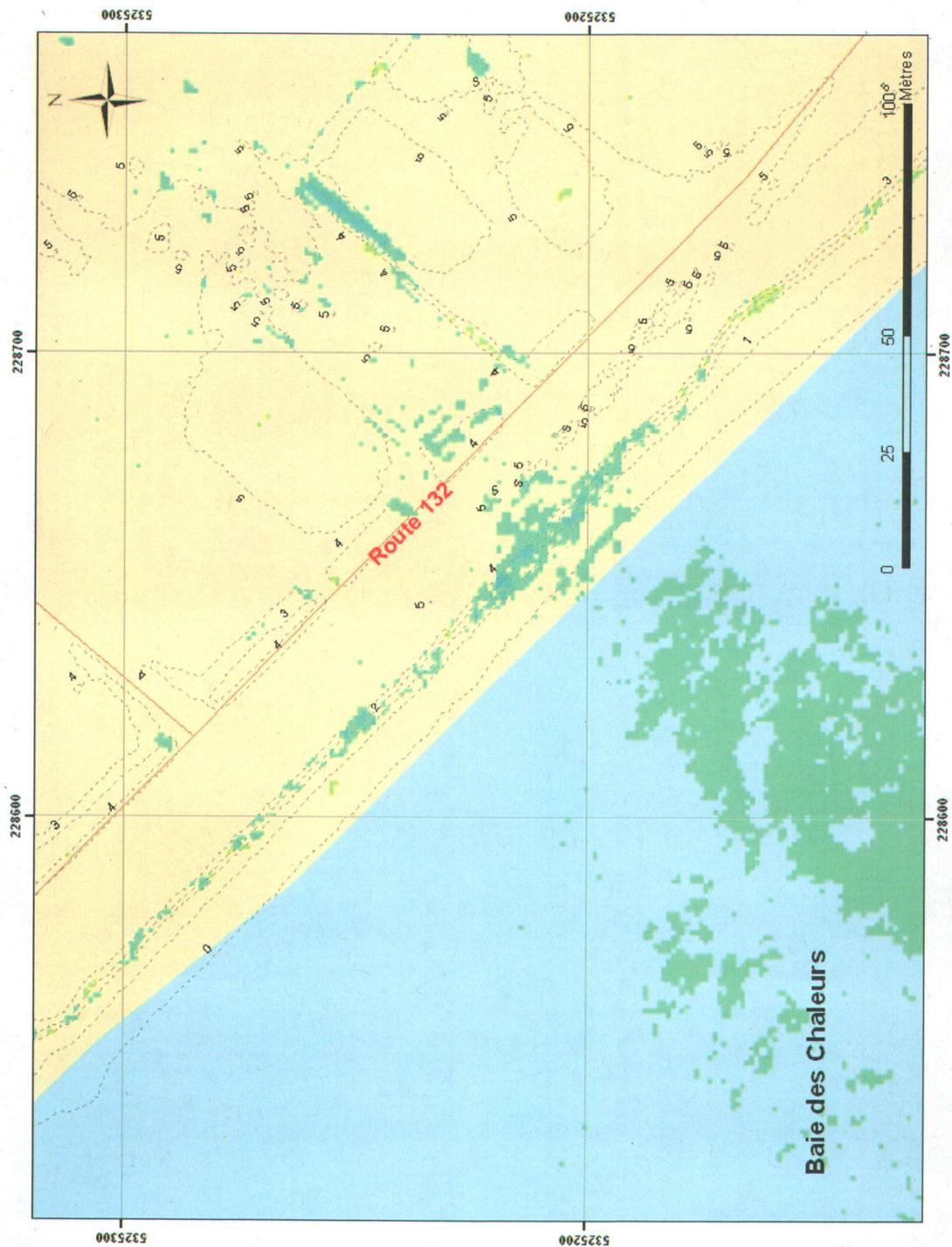


Figure A5.20 – Carte de l'érosion dans les talus de Bonaventure. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

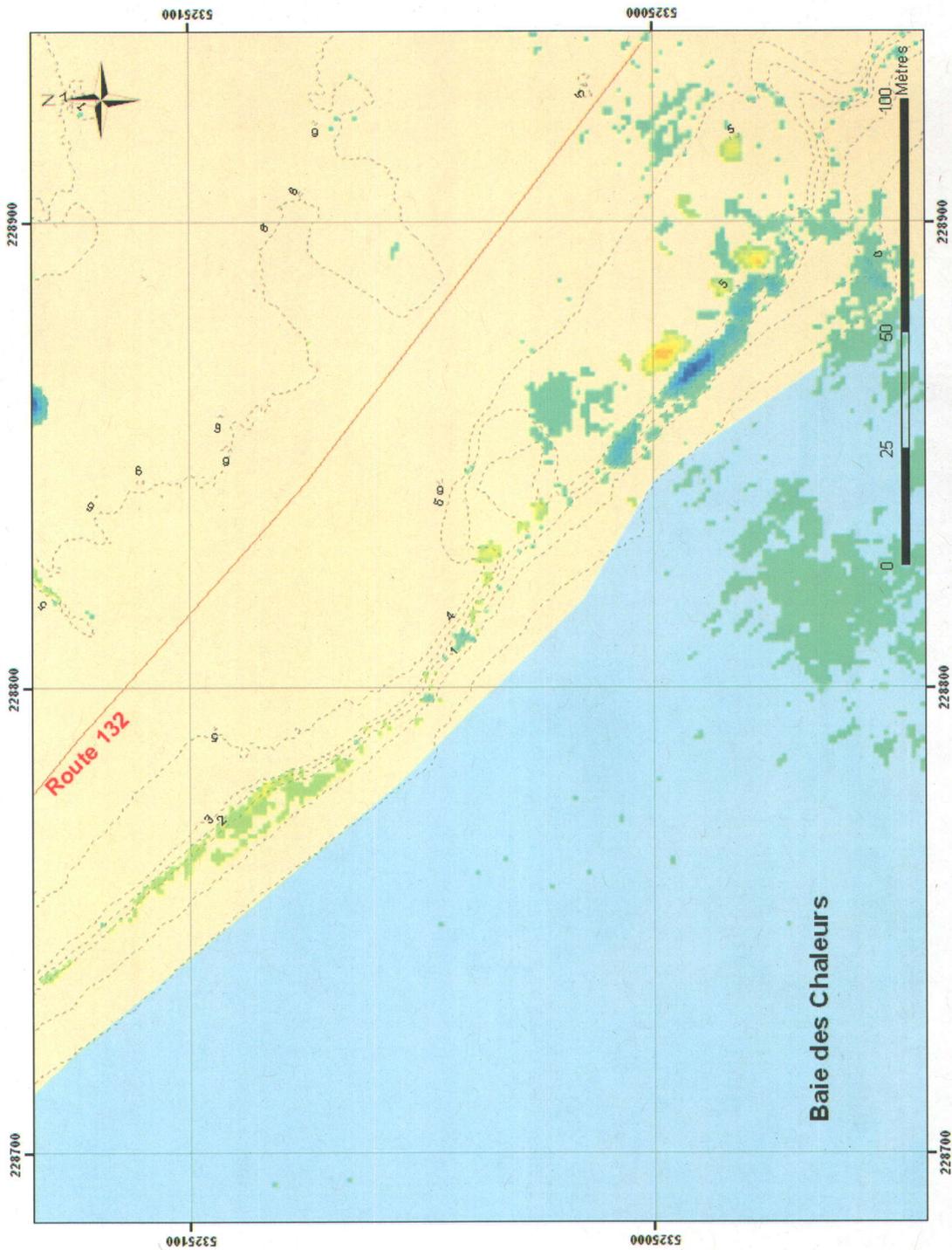


Figure A5.21 – Carte de l'érosion dans les talus de Bonaventure. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

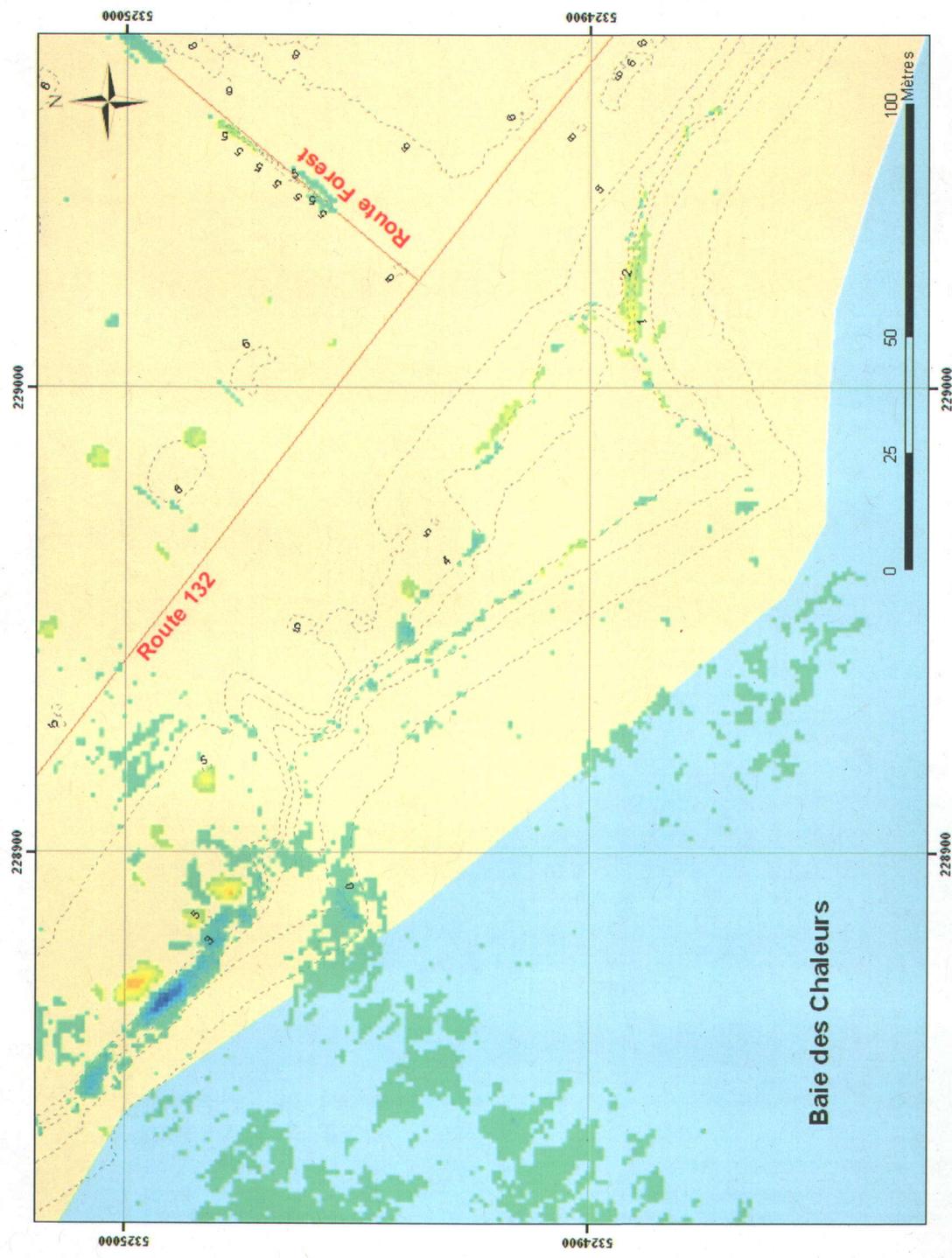


Figure A5.22 – Carte de l'érosion dans les talus de Bonaventure. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

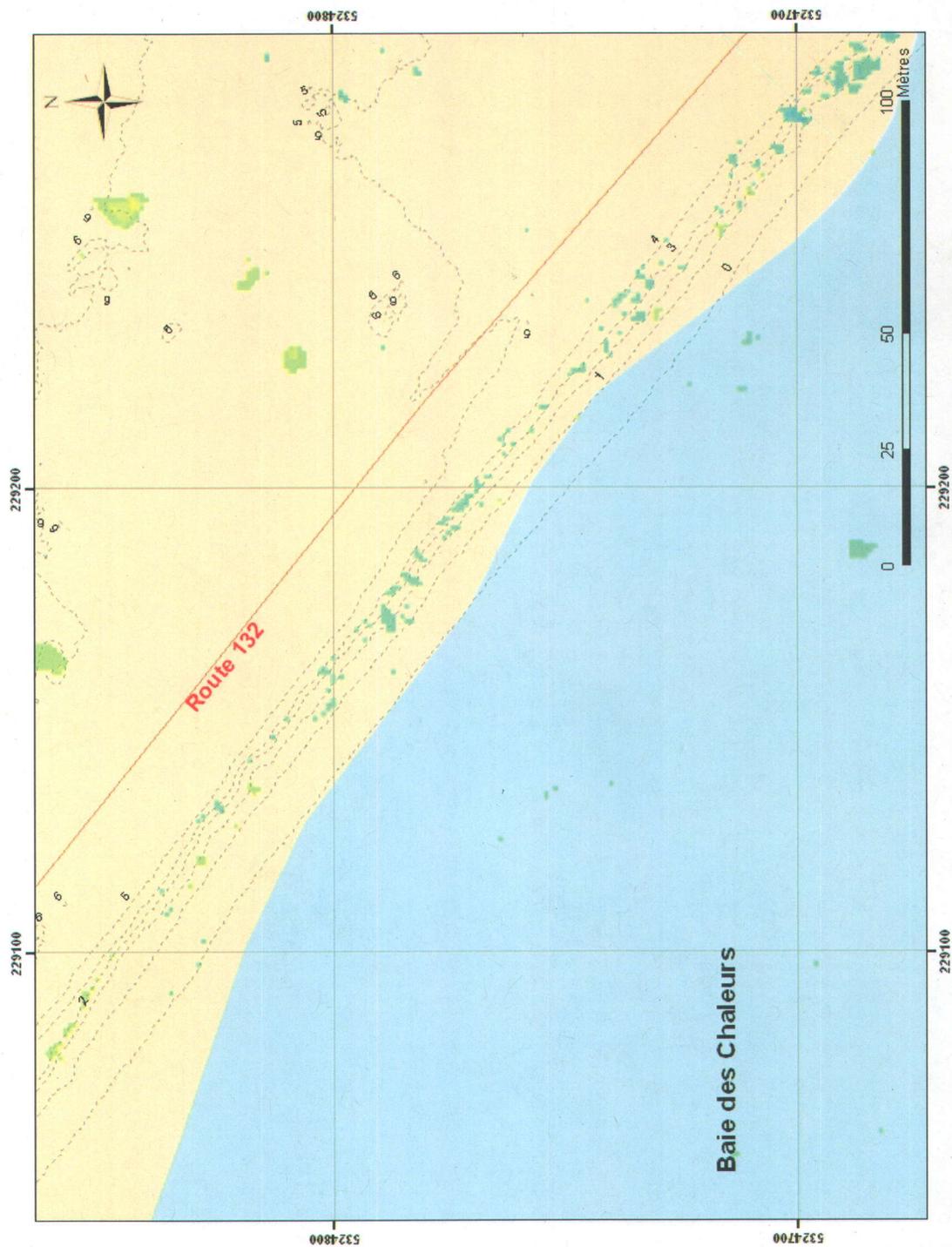


Figure A5.23 – Carte de l'érosion dans les talus de Bonaventure. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

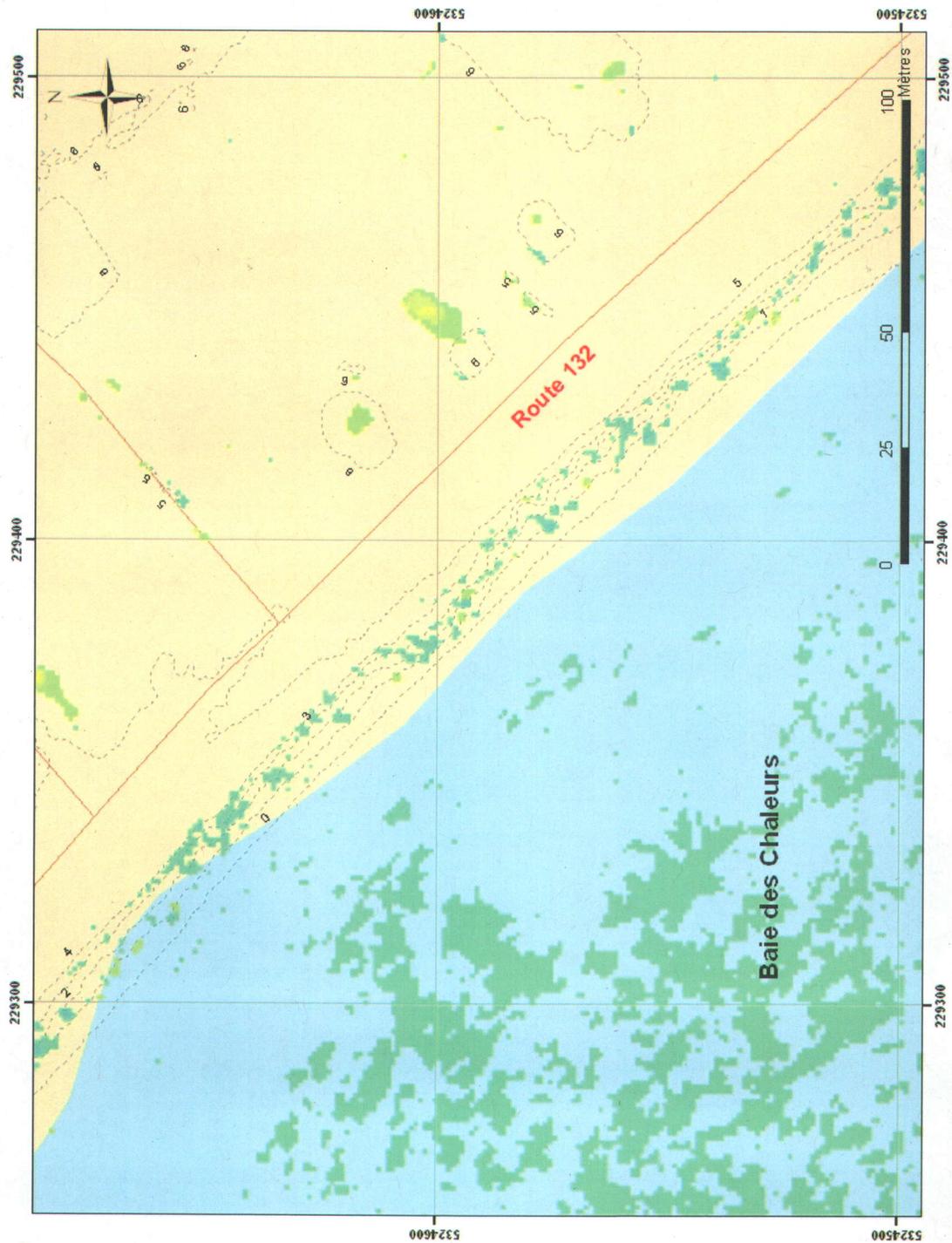


Figure A5.24 – Carte de l'érosion dans les talus de Bonaventure. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

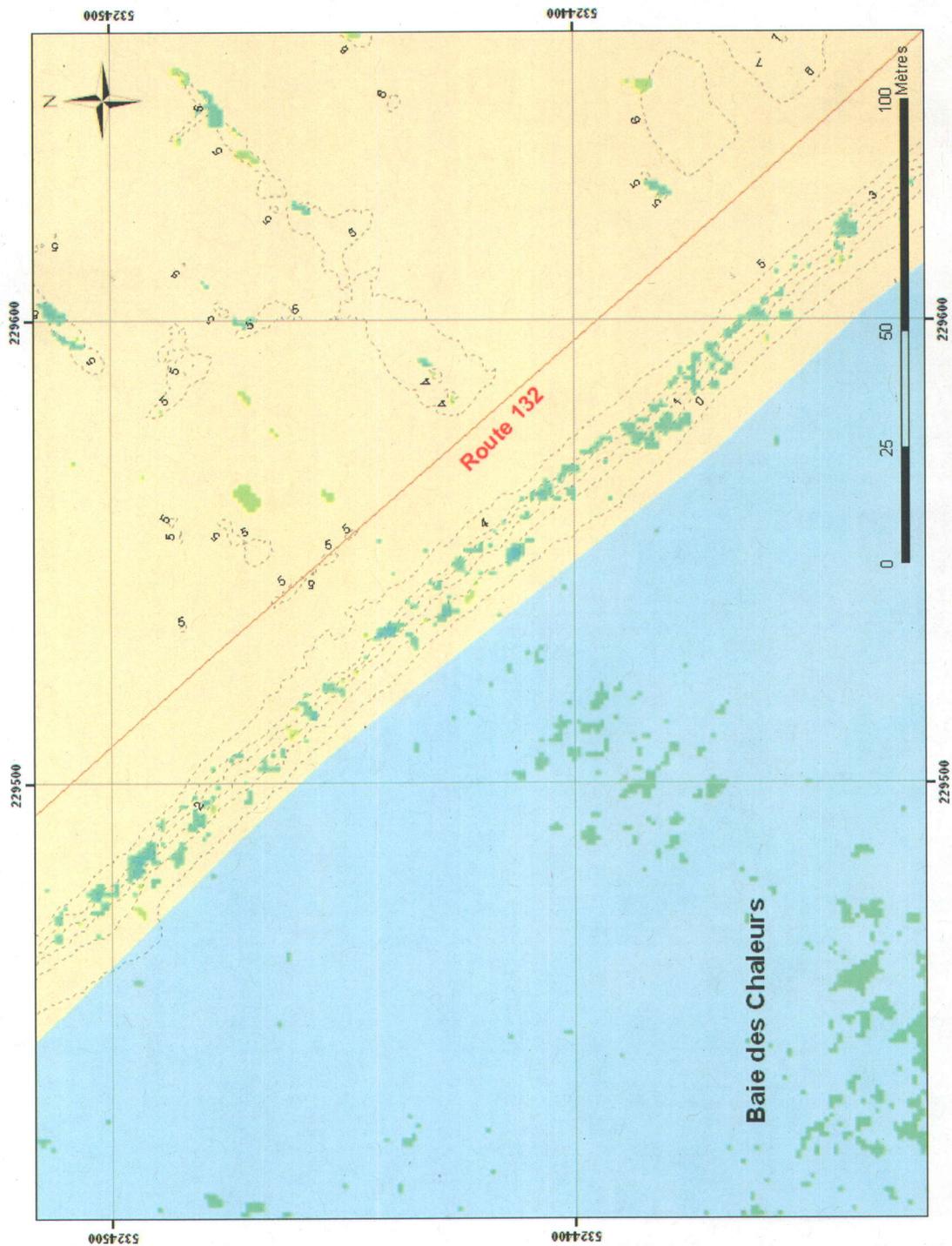


Figure A5.25 – Carte de l'érosion dans les talus de Bonaventure. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

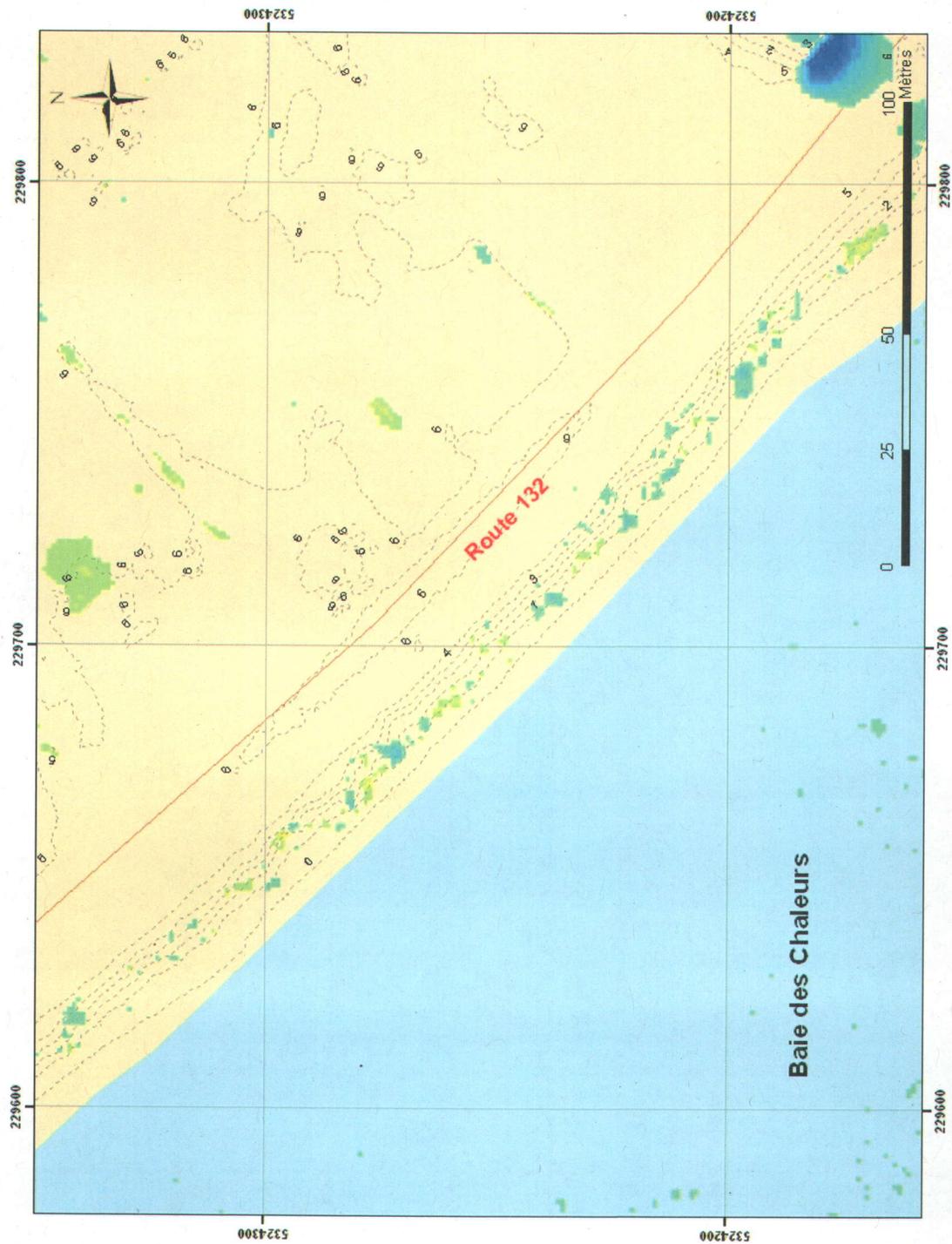


Figure A5.26 – Carte de l'érosion dans les talus de Bonaventure. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

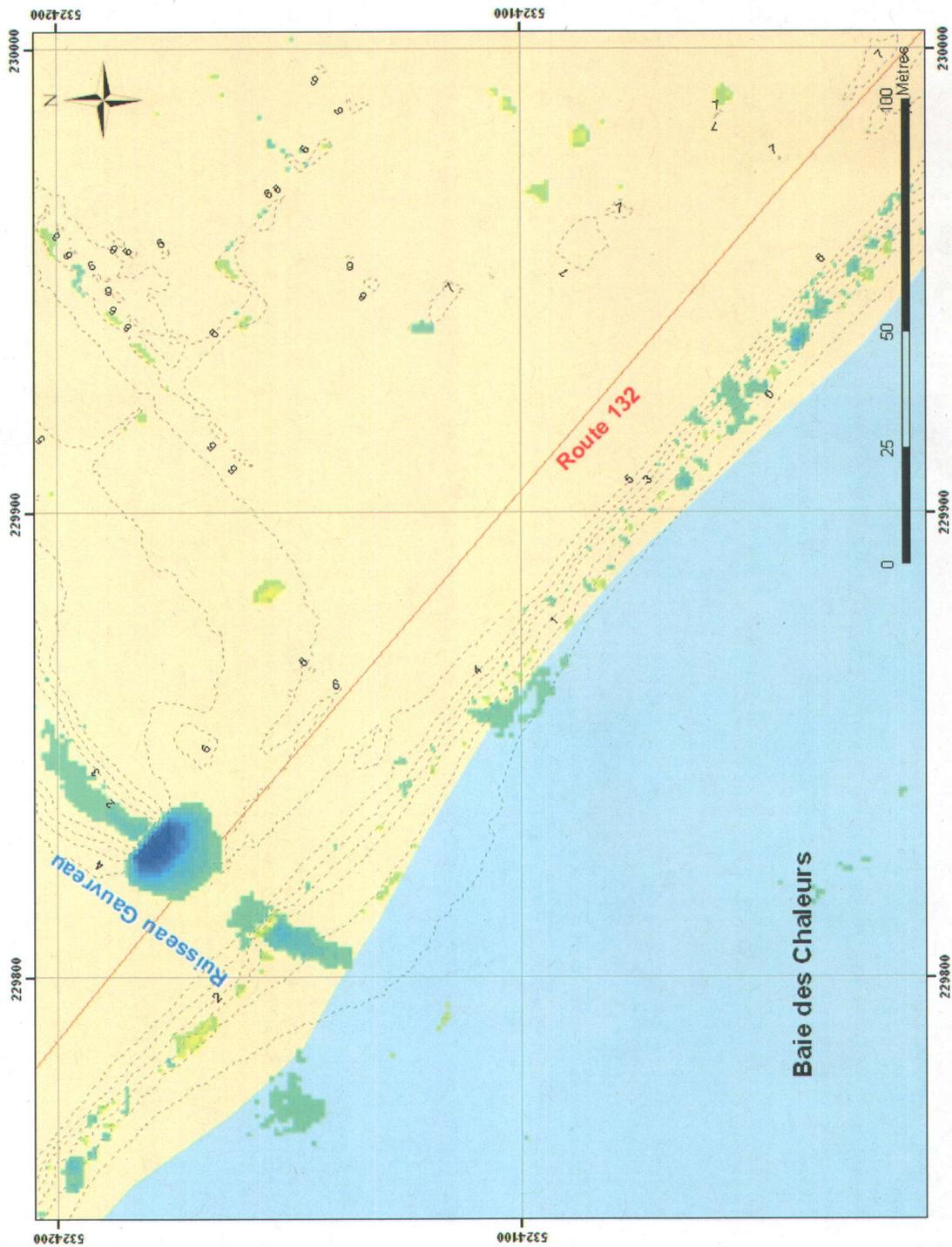


Figure A5.27 – Carte de l'érosion dans les talus de Bonaventure. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

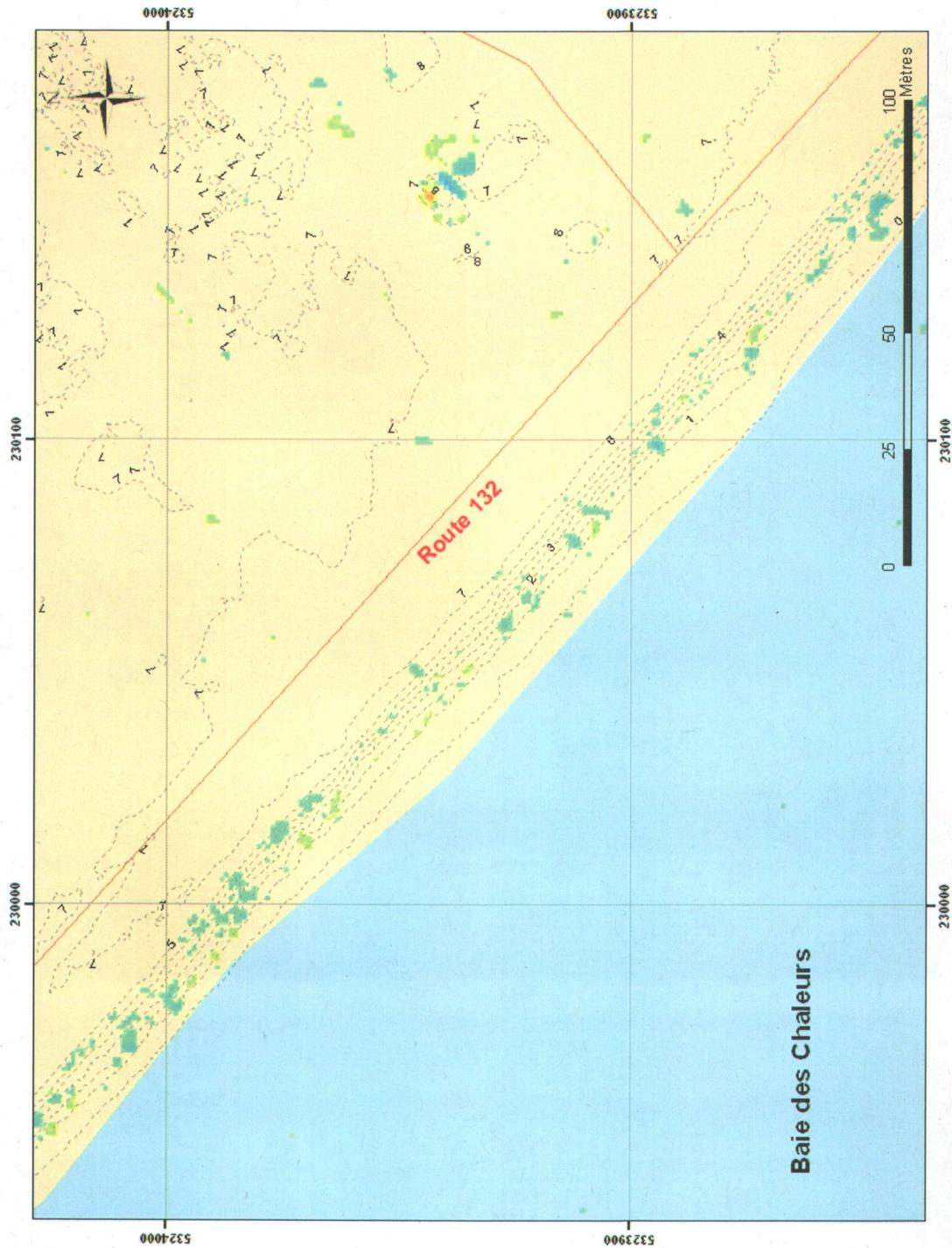


Figure A5.28 – Carte de l'érosion dans les talus de Bonaventure. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

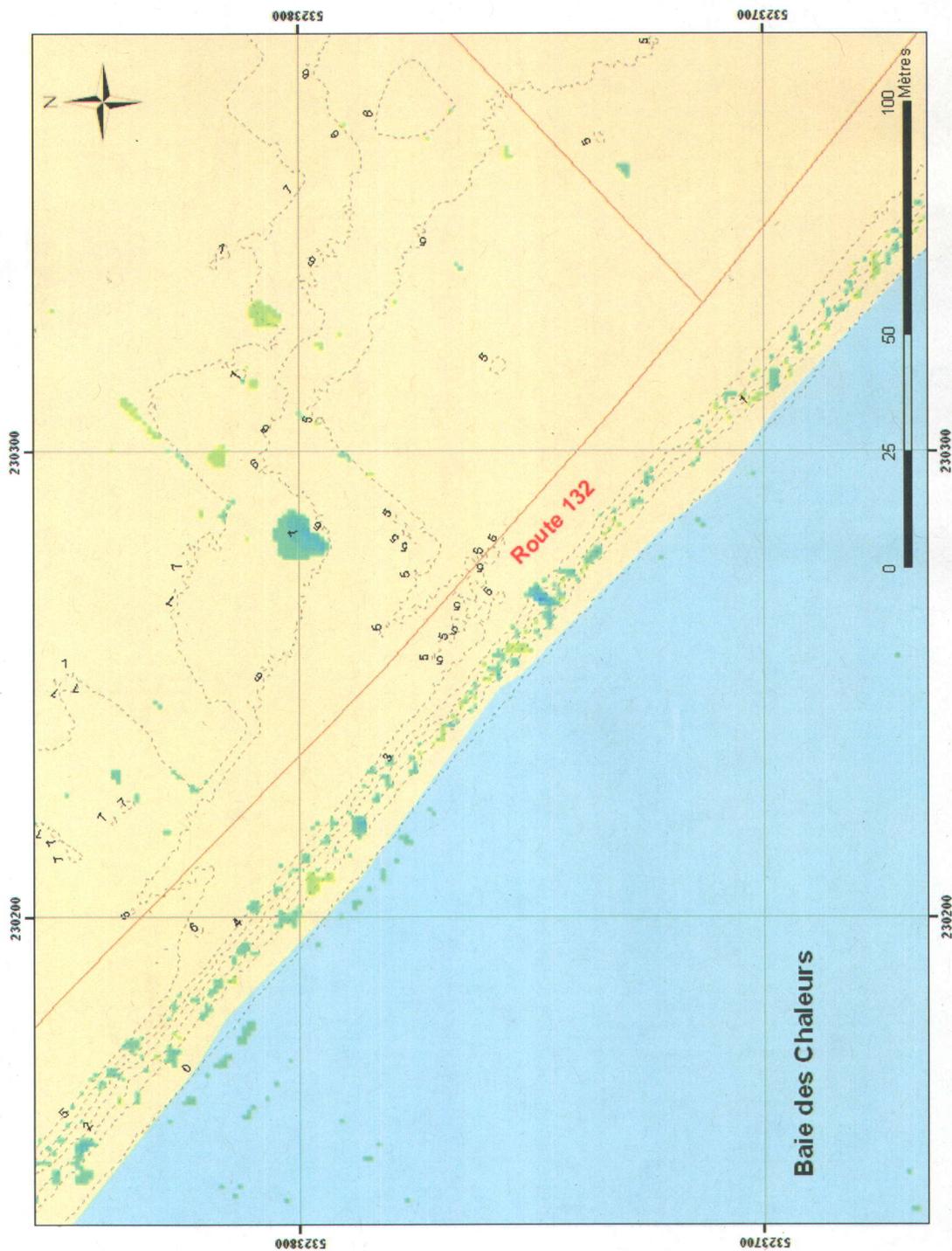


Figure A5.29 – Carte de l'érosion dans les talus de Bonaventure. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

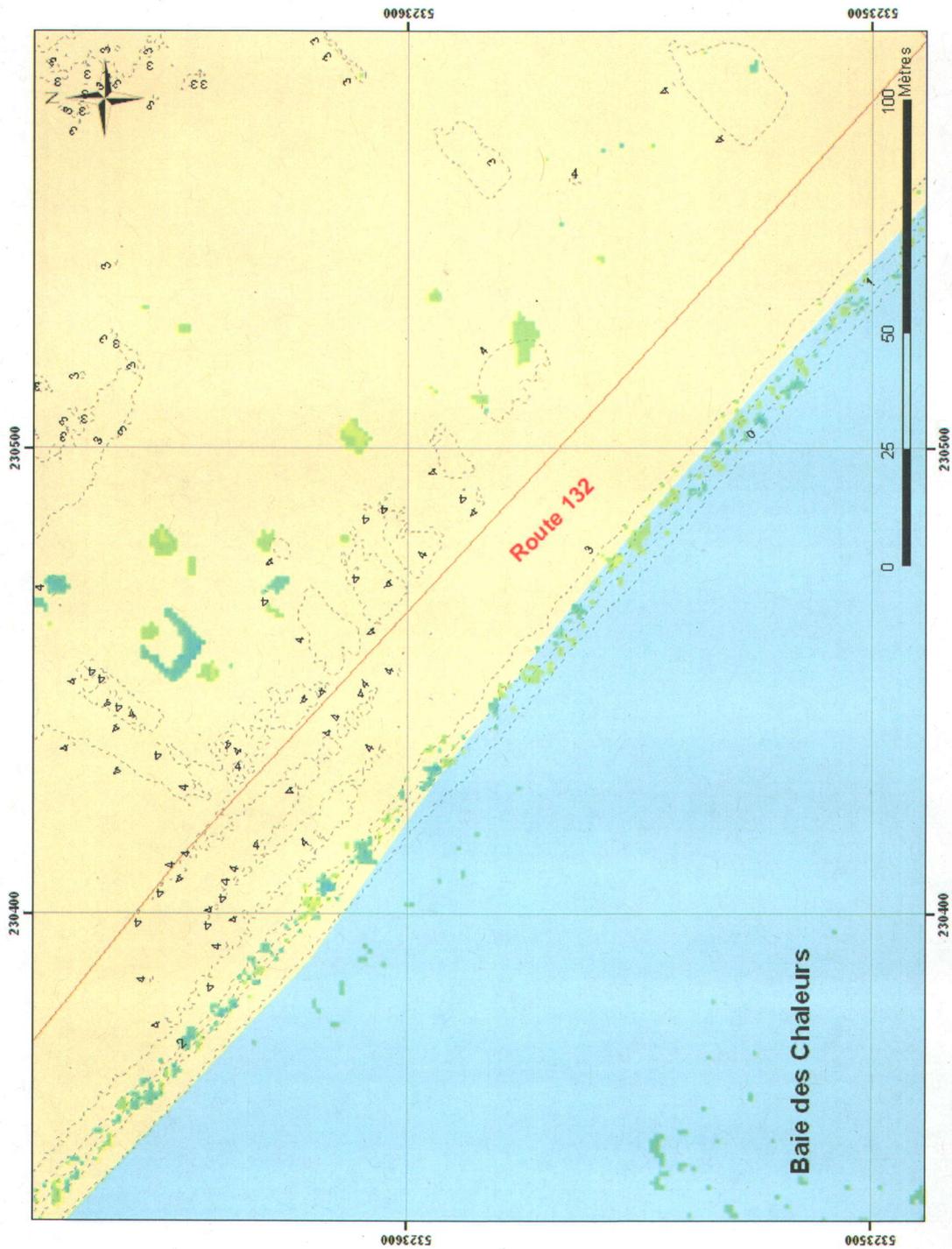


Figure A5.30 – Carte de l'érosion dans les talus de Bonaventure. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

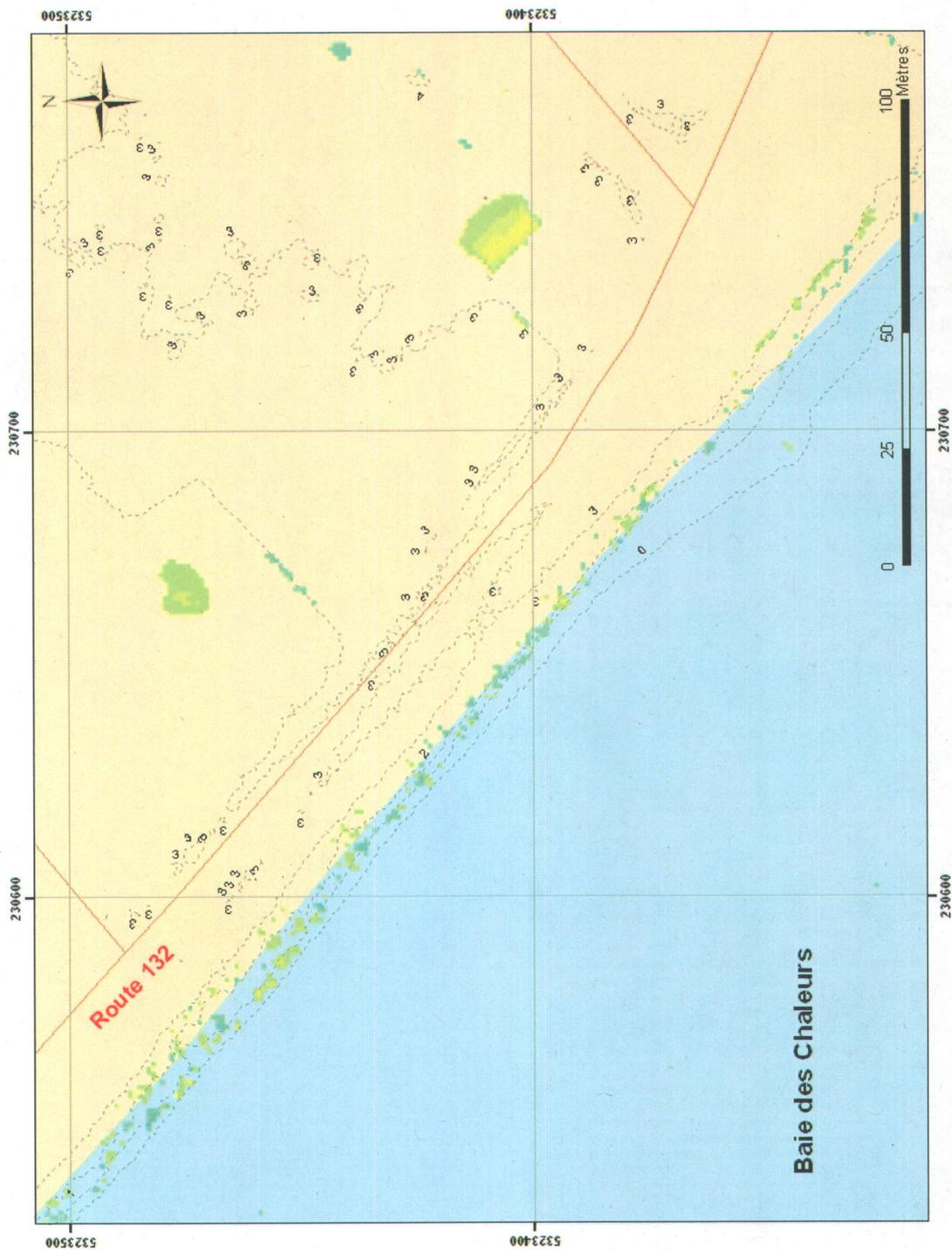


Figure A5.31 – Carte de l'érosion dans les talus de Bonaventure. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

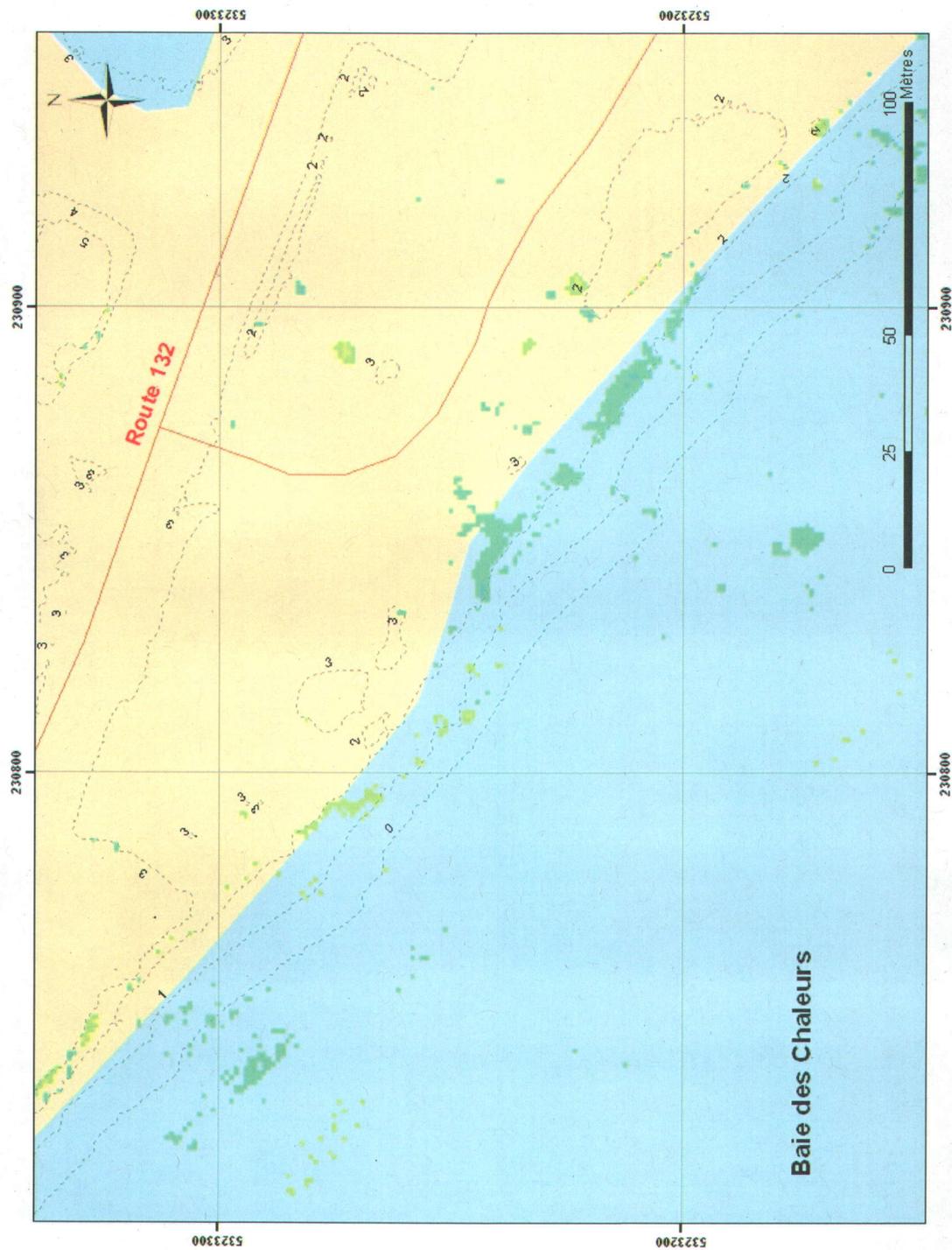


Figure A5.32 – Carte de l'érosion dans les talus de Bonaventure. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

SECTEUR DE SAINT-GODEFROI

Les cartes des talus sont présentées de la plage sud-ouest du barachois aux talus nord-est.

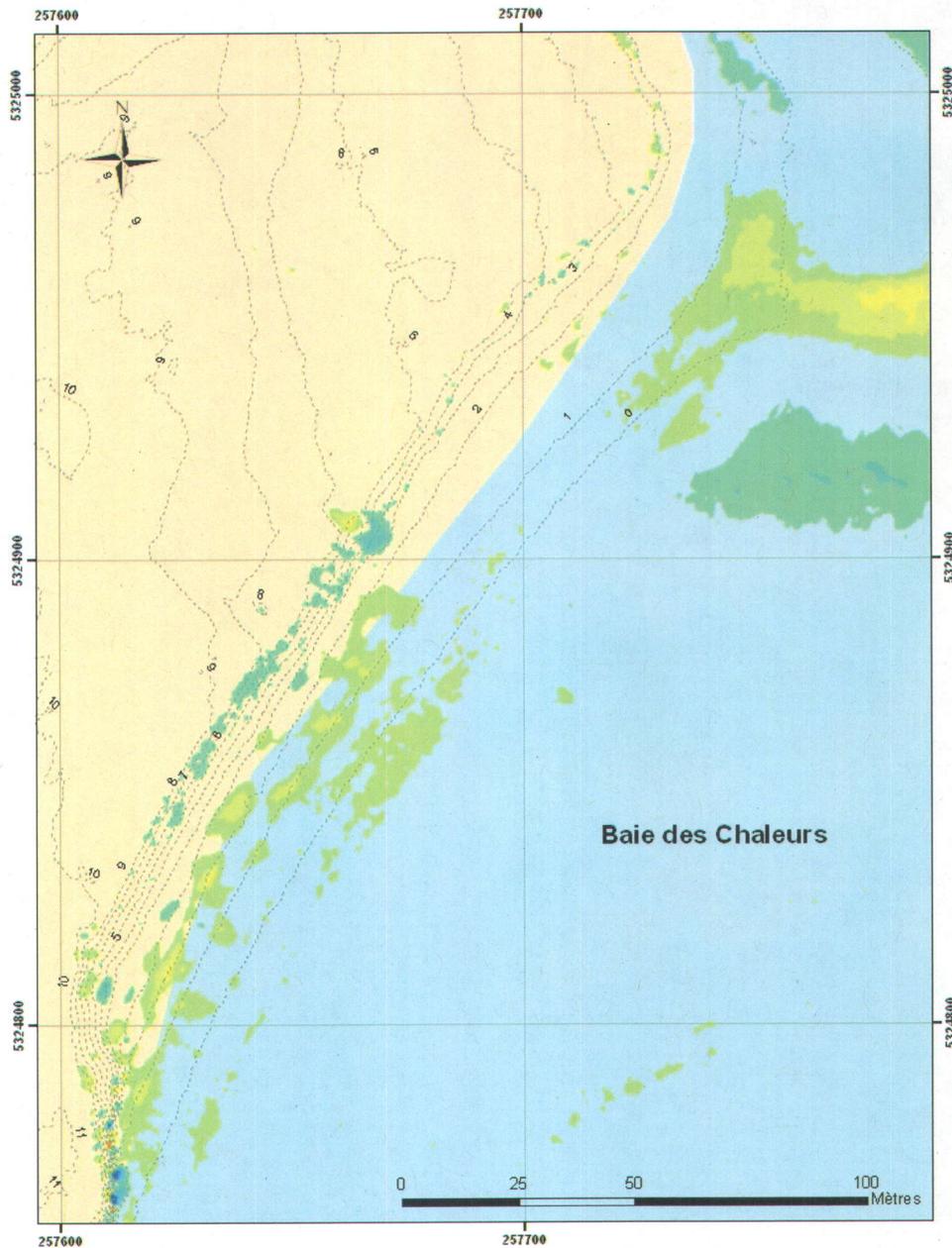


Figure A5.33 – Carte de l'érosion du secteur de Saint-Godefroi. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

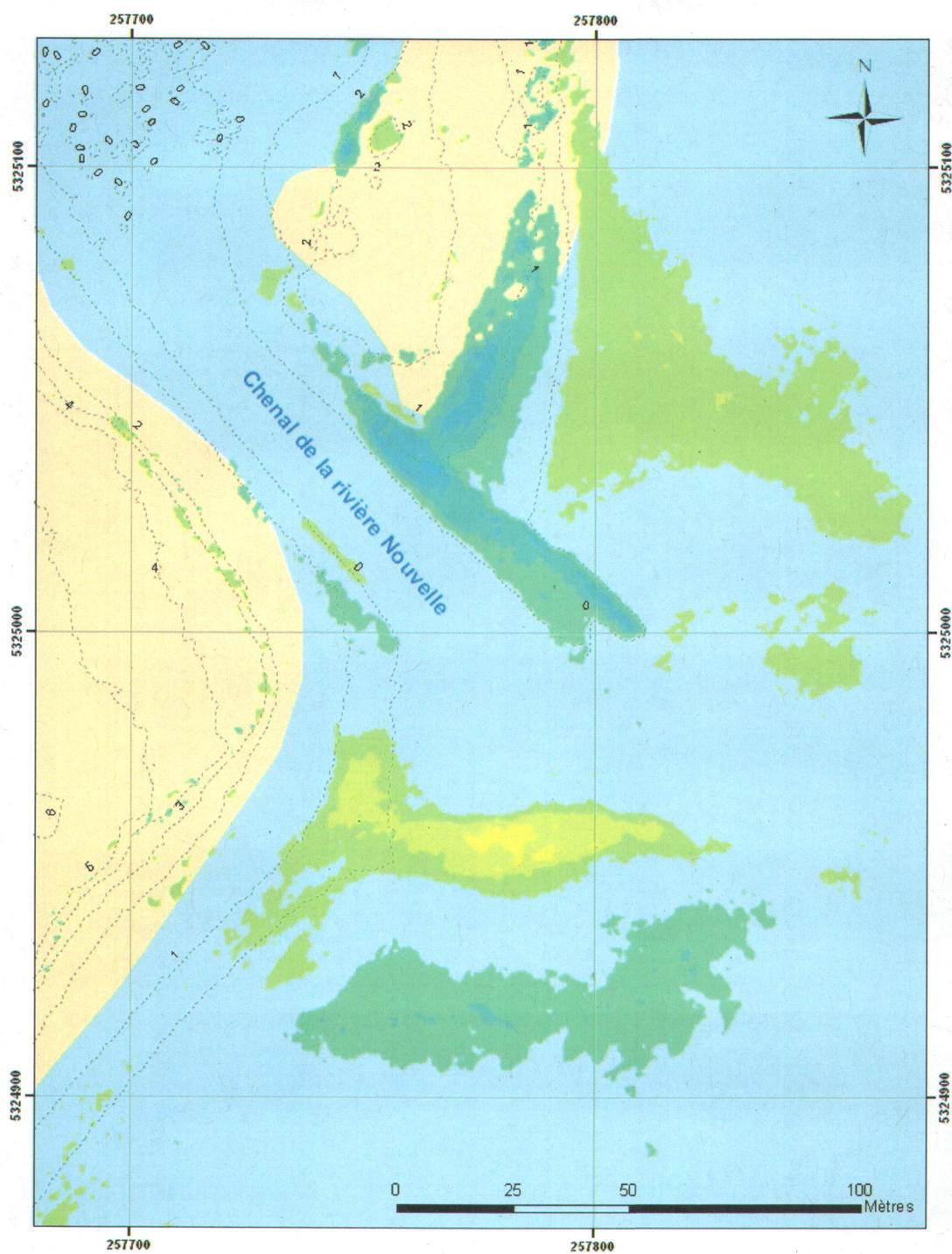


Figure A5.34 – Carte de l'érosion du secteur de Saint-Godefroi. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

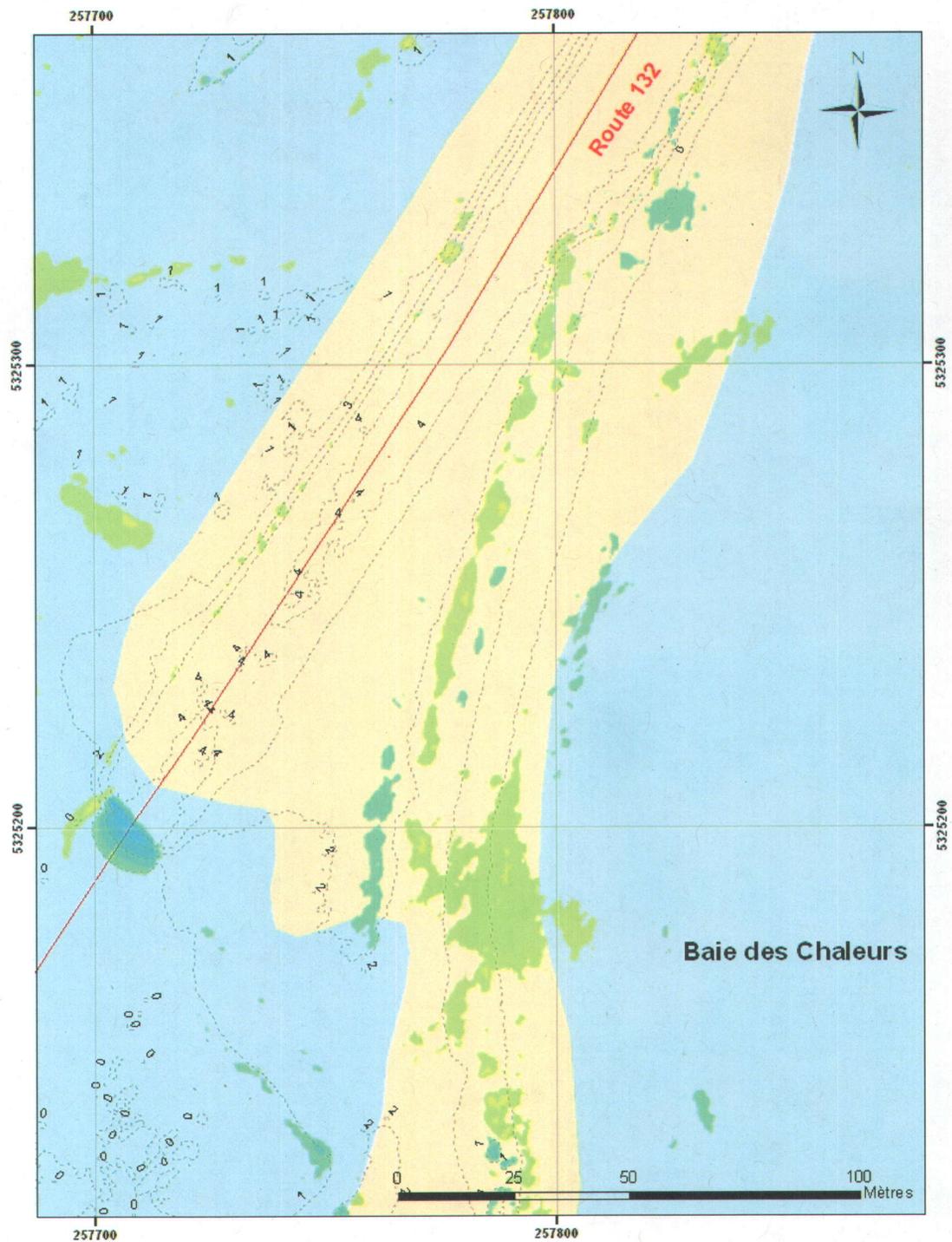


Figure A5.35 – Carte de l'érosion du secteur de Saint-Godefroi. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

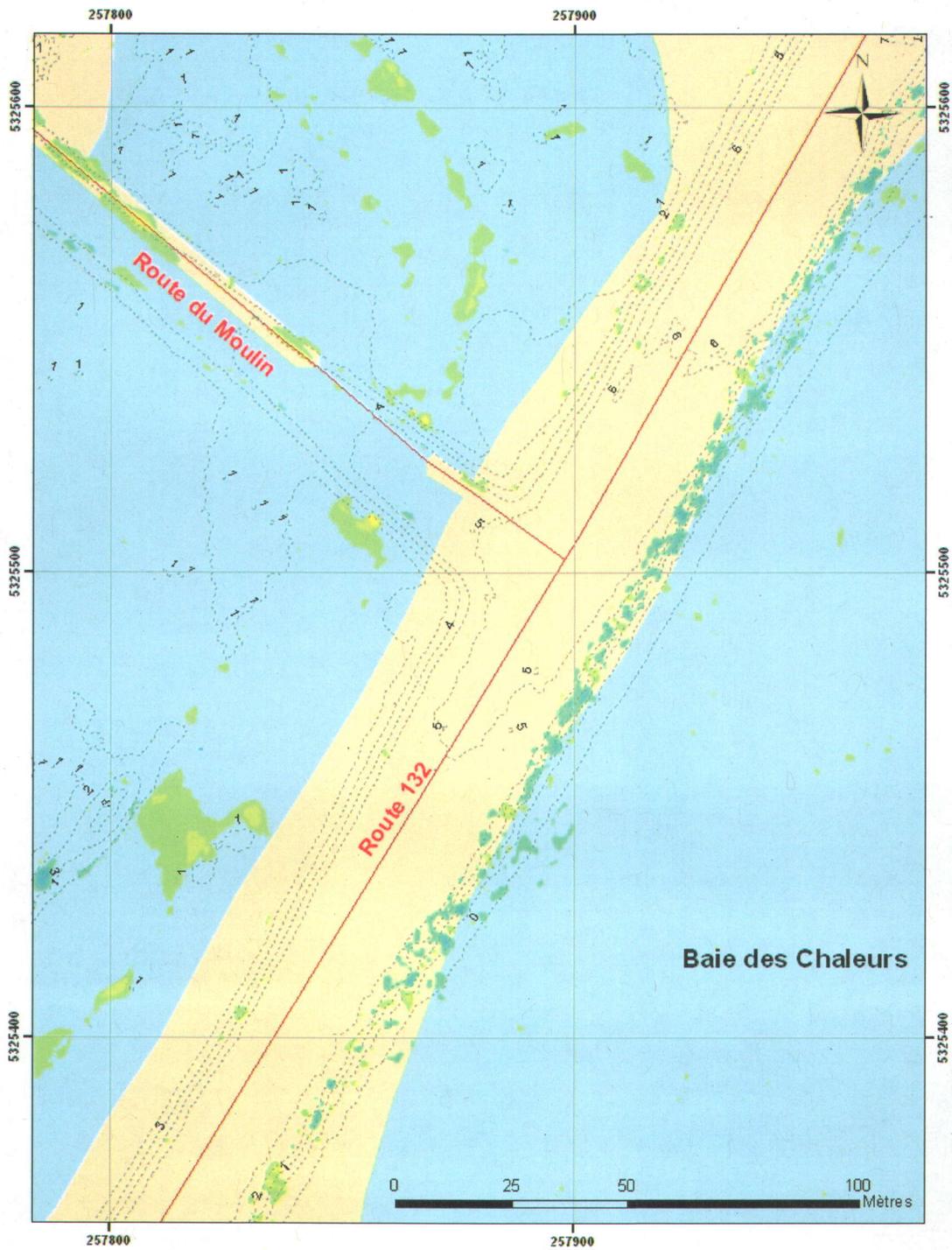


Figure A5.36 – Carte de l'érosion du secteur de Saint-Godefroi. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

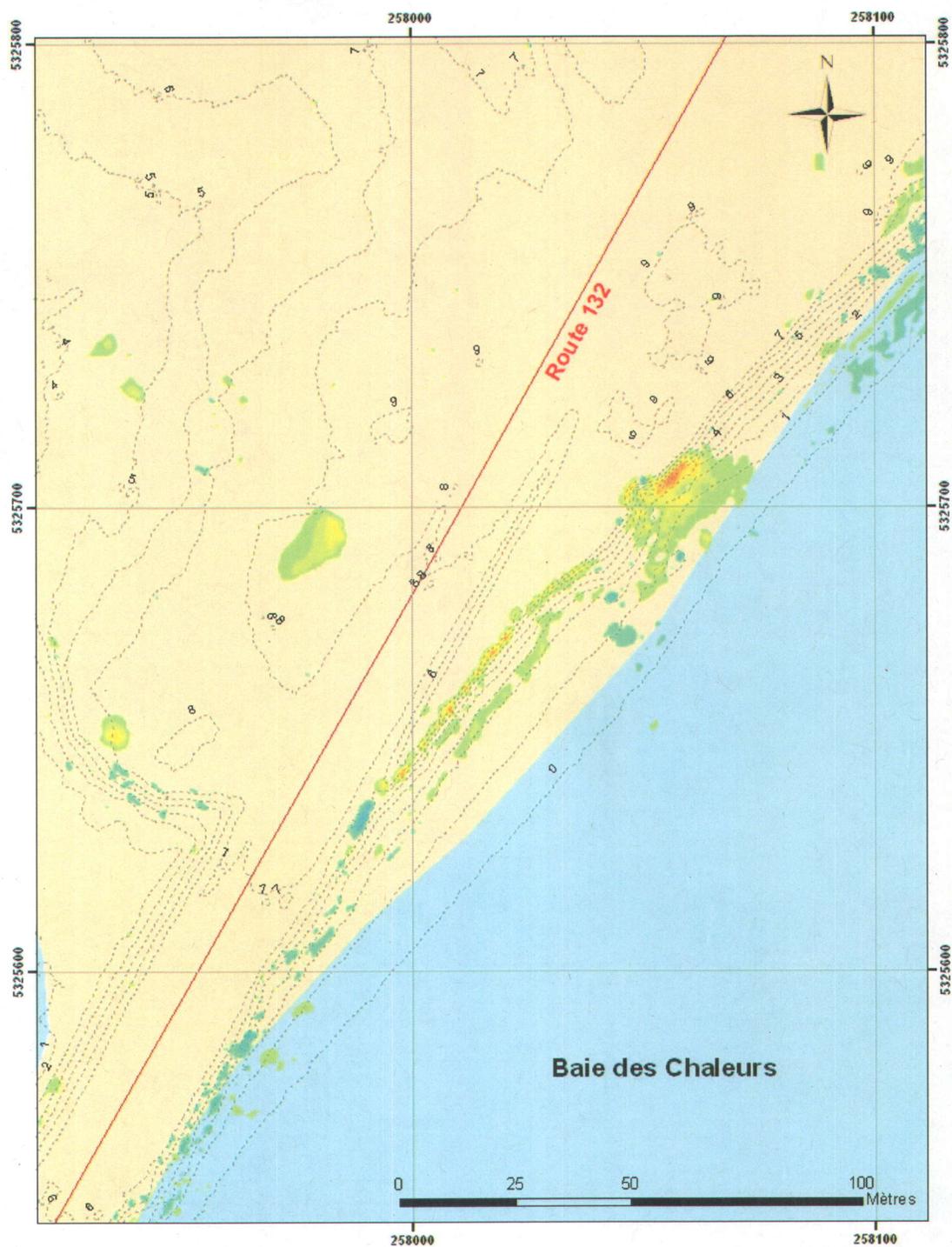


Figure A5.37 – Carte de l'érosion du secteur de Saint-Godefroi. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

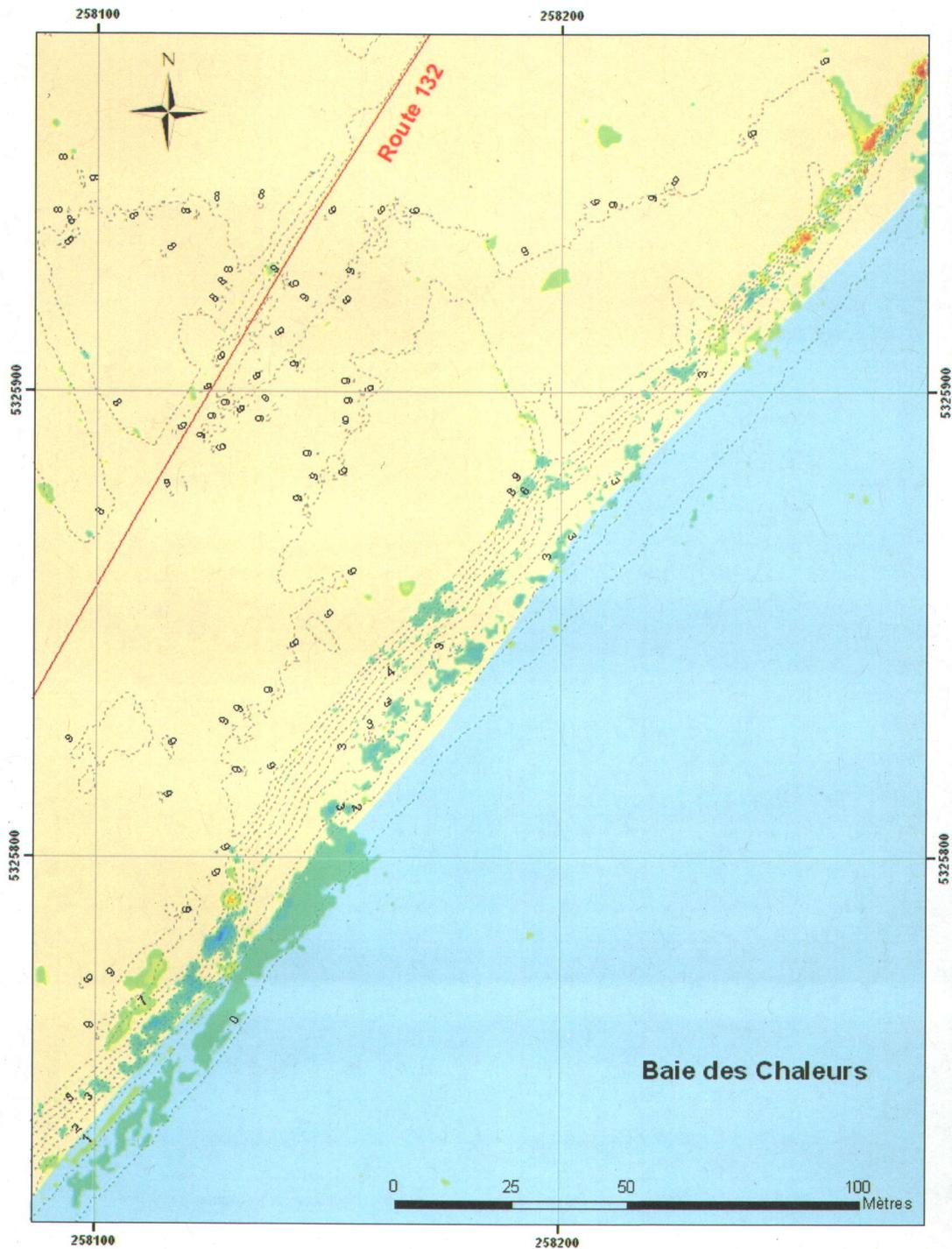


Figure A5.38 – Carte de l'érosion du secteur de Saint-Godefroi. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accretion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

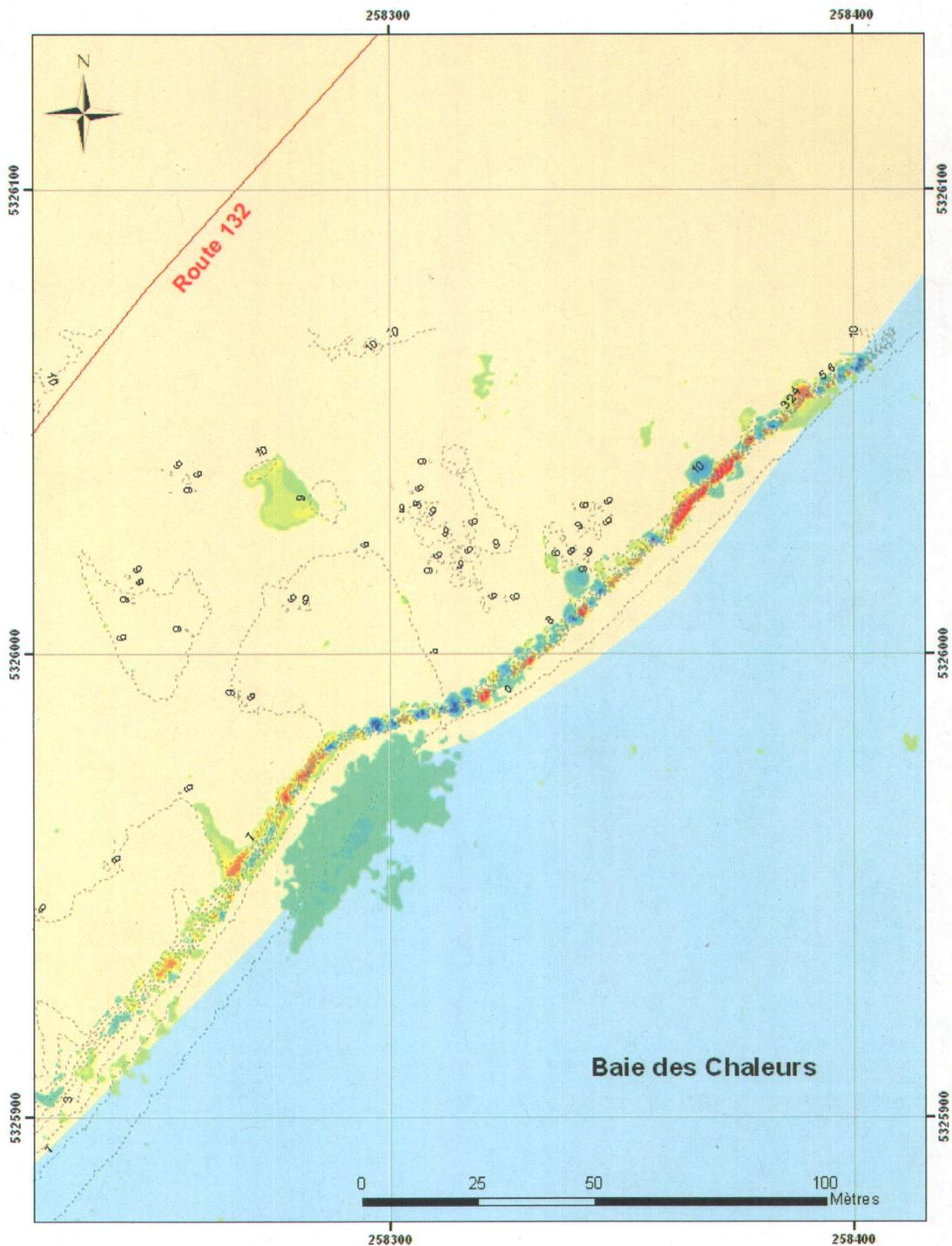


Figure A5.39 – Carte de l'érosion du secteur de Saint-Godefroi. Le système de référence de la carte est en projection modifiée transverse de Mercator zone 5 (MTM5). Les couleurs jaune-orange indiquent les zones en érosion et les couleurs bleu-vert indiquent les sections en accrétion. Les valeurs numériques et les lignes en pointillés représentent les courbes d'élévation de 2004 par rapport au zéro topographique (niveau moyen des mers).

